



Strål
säkerhets
myndigheten

Swedish Radiation Safety Authority

2018:07

Strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning

Beredning inför regeringens prövning
Slutförvaring av använt kärnbränsle



Granskningsrapport

Datum: 2018-01-23

Diarienumr: SSM2011-1135

Dokumentnr: SSM2011-1135-17

Beredning av tillståndsansökan: Svensk Kärnbränslehantering AB (slutförvar för använt kärnbränsle)

Ansvarig handläggare: Lena Sonnerfelt

Arbetsgrupp: Pål Andersson, Björn Brickstad, Peter Ekström, Giselle García Roldán, Mikael Kjellberg, Flavio Lanaro, Jan Linder (tidigare medarbetare), Georg Lindgren, Jinsong Liu, Maria Nordén, Carl-Henrik Pettersson, Bo Strömberg, Shulan Xu, Henrik Öberg

Fastställd: Ansi Gerhardsson

Strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning

Förord

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) har lämnat in två ansökningar enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet (kärntekniklagen) om att dels få uppföra och driva en inkapslingsanläggning i anslutning till det befintliga mellanlagret för det använda kärnbränslet, Clab, (tillsammans benämnt Clink) i Oskarshamns kommun och dels ett slutförvar för det använda kärnbränslet i Forsmark i Östhammars kommun.

Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) är beredande myndighet inför regeringens beslut rörande tillstånd enligt kärntekniklagen och ska efter granskningen lämna över ansökningarna, med eget yttrande, till regeringen.

SKB:s ansökningar är omfattande och berör komplexa frågeställningar. SSM har valt att dela upp granskningen av ansökningarna i fyra delar som resulterat i varsin granskningsrapport. Rapporterna hanterar Clink-ansökan, frågor kopplade till uppförande och drift av slutförvarsanläggningen, den långsiktiga strålsäkerheten efter förslutning av slutförvaret respektive systemövergripande frågor.

Tillsammans med granskningsrapporterna överlämnar SSM till regeringen en sammanställning av de synpunkter som inkommit från olika intressenter i de remissomgångar som hållits. En sammanfattande rapport har även tagits fram som på ett mer övergripande sätt presenterar granskningen och de resultat den resulterat i.

De rapporter från SSM:s beredningsarbete som överlämnas till regeringen är:

- SSM2011-1135-20. Sammanfattande rapport över SSM:s granskning av SKB:s ansökningar enligt kärntekniklagen om anläggningar för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle.



- SSM2015-279-21. Granskningsrapport Inkapsling och fortsatt mellanlagring av använt kärnbränsle (Clink).
- SSM2011-1135-19. Granskningsrapport Uppförande och drift av slutförvarsanläggningen.
- SSM2011-1135-17. Granskningsrapport Strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning.
- SSM2011-1135-18. Granskningsrapport Systemövergripande frågor.
- SSM2011-1135-21. SSM:s beaktande av remissynpunkter avseende SKB:s ansökningar enligt kärntekniklagen om anläggningar för slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle.

Den här rapporten presenterar resultat och bedömningar från granskningen av den långsiktiga strålsäkerheten efter förslutning av slutförvaret.

SSM har i egenskap av remissinstans i miljöbalksprövningen yttrat sig till mark- och miljödomstolen i juni 2016. SSM:s granskningsrapport avseende strålsäkerhet efter slutförvarets förslutning (SSM2011-1135-15) utgjorde underlag i samband med yttrandet. Föreliggande rapport som utgör underlag till myndighetens yttrande till regeringen är uppdaterad i det avseende att

- kommentarer som inkommit från SSM:s remissinstanser är beaktade,
- avsnitt 4.10.9 avseende SKB:s fältförsök med fokus på kopparkorrosion har uppdaterats
- avsnitt 5.1.3 avseende experiment med alfadopade material för studier av bränsleupplösning har uppdaterats,
- avsnitt 5.12.2 avseende inverkan av jordskalv har uppdaterats, och
- redaktionella ändringar har genomförts.

Sammanfattning

Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) har granskat Svensk Kärnbränslehantering AB:s (SKB) slutförvarsansökan enligt kraven i Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:21) om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall respektive (SSMFS 2008:37) om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. De viktigaste kraven vid bedömning av SKB:s ansökan i fråga om strålsäkerhet efter förslutning kan sammanfattas under rubrikerna

- helhetssyn kring skydd av människors hälsa och miljön,
- barriärsystemet och dess funktioner,
- optimering och bästa möjliga teknik,
- konstruktion och utförande samt intrång och tillträde,
- skydd av människors hälsa och miljöskydd,
- tidsperioder i säkerhetsanalysen, och
- säkerhetsanalys och säkerhetsredovisning.

Av myndighetens föreskriftskrav på ett slutförvar efter förslutning framgår bl.a. att den årliga risken för skadeverkningar för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken inte får överstiga 10^{-6} , vilket i praktiken motsvarar en stråldos i storleksordningen en hundradel av den naturliga bakgrundsstrålningen på platsen. SSM anser att det av SKB föreslagna barriärsystemet med barriärerna kapsel, buffert och berg har förutsättningar att uppfylla kraven på begränsade omgivningskonsekvenser och tålighet mot förhållanden, händelser och processer som kan påverka slutförvarets strålsäkerhet efter förslutning. SKB:s redovisning kring barriärsystemets långsiktiga tålighet i kombination med beräkningar av konsekvenser kopplade till spridning av radioaktiva ämnen från slutförvaret ger ett godtagbart underlag för SSM:s bedömning. SKB redovisar även analyser av en rimlig slutförvarsutveckling tillsammans med analyser



av fall där en eller flera barriärer helt eller delvis fallerar vilka även dessa utgör ett godtagbart underlag för SSM. Beträffande förmågan hos ett KBS-3-förvar vid Forsmarksplatsen att skydda människa och miljö från skadlig verkan av joniserande strålning, bedömer SSM att det finns förutsättningar att begränsa riskerna till nivåer förenliga med föreskriftskraven genom att använda de tilltänkta tekniska barriärerna, förlägga slutförvaret på lämpligt djup och i samband med placeringen av deponeringshål undvika olämpliga positioner i berggrunden.

SSM:s bedömning av förutsättningarna för kravuppfyllelse är gjorda utifrån att SKB fortsätter att utveckla konceptets detaljutformning och uppdatera sina säkerhetsanalyser i senare steg i prövningsprocessen. Fortsatta utvecklings-, forsknings- och demonstrationsinsatser under uppförande- och driftfaserna och fram till den slutliga förslutningen förväntas reducera osäkerheter av betydelse för slutförvarskonceptet. Genom den stegvisa prövningsprocessen kan granskningsresultat och eventuella nya vetenskapliga rön omhändertas och efter hand tillgodogöras. Mot denna bakgrund har SSM identifierat behov av utvecklingsarbete beträffande SKB:s redovisning inför myndighetens granskning i kommande steg med avseende på beständighet i slutförvarets tekniska barriärer, i synnerhet kopparhöljets långsamma krypdeformation samt vissa korrosionsprocesser som kan påverka kopparhöljet. Däremot bedömer myndigheten att frågorna inte är av sådan betydelse att SSM inte kan bedöma ansökan och de slutsatser som SKB redovisar om slutförvarets omgivningspåverkan och således förutsättningarna att uppfylla myndighetens krav på långsiktig strålsäkerhet.

Sammanfattningsvis bedömer SSM att myndighetens föreskriftskrav på långsiktig strålsäkerhet enligt SSMFS 2008:21 och SSMFS 2008:37 kan förväntas bli uppfyllda i samband med uppförande och drift av en slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle vid Forsmark. Denna bedömning har baserats på granskning av SKB:s ansökan och i synnerhet säkerhetsredovisningen SR-Site, platsundersökningsresultat från Forsmark, SKB:s forskning samt resultat från provtillverkning av slutförvarskomponenter. SSM bedömer vidare att SKB har förutsättningar att kunna vidareutveckla slutförvarskonceptet och detaljutformningen av slutförvarskomponenter i industriell skala samt hantera återstående granskningsfrågor kopplade till KBS-3-konceptet i nödvändig omfattning. SSM kommer att arbeta vidare med att utveckla specifika krav och förväntningar vid kommande steg i SKB:s program i syfte att säkerställa att de frågor som SSM bedömer som mest centrala för sina kommande ställningstaganden klaras ut vid lämplig tidpunkt i den stegvisa prövningsprocessen enligt kärntekniklagen.

Vidare bedömer SSM att användning av KBS-3-konceptets flerbarriärsystem vid Forsmarksplatsen kan anses vara bästa möjliga teknik enligt definitionen i de ovan nämnda föreskrifterna eftersom tekniska barriärer och förvarsutformning har bedömts vara lämpliga i förhållande till betingelser vid Forsmarksplatsen, samt eftersom det inte finns några alternativa metoder som har nått en liknande hög teknisk mognadsgrad och för vilka det finns ett lika utbrett stöd från experimentella och teoretiska vetenskapliga studier.

SKB:s metod för att visa slutförvarets strålsäkerhet efter förslutningen är enligt SSM:s bedömning också ändamålsenlig för tillämpning av optimeringsprincipen (dvs. begränsning av stråldoser till människor så långt detta är rimligt möjligt med hänsyn tagen till ekonomiska och samhällsliga faktorer) med avseende på alla väsentliga förhållanden, händelser och processer, val av material, dimensionering, anläggningens utformning och lokalisering inom den valda platsen samt med hänsyn till de förnyade framtida säkerhetsanalyserna som SKB behöver ta fram inom ramen för den stegvisa prövningsprocessen enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet.



Inför SSM:s granskning av kommande steg i prövningsprocessen efter ett tillståndsbeslut behöver SKB redovisa ett utökat underlag gällande:

- scenarier som adresserar kvarvarande osäkerheter och dess konsekvenser med avseende på kopparhöljets långsamma krypdeformation samt vissa korrosionsprocesser som kan påverka kopparhöljet så som grop- och spänningskorrosion
- vetenskapliga studier för att ytterligare underbygga den experimentella och teoretiska förståelsen för processerna ovan
- redovisning av hur dessa scenarier och vetenskapliga studier har beaktas för att optimera tillverkning och detaljutformning för de olika komponenterna i slutförvarets barriärsystem.

SKB behöver vidta ett antal åtgärder som underlag för SSM:s fortsatta granskning och stegvisa godkännanden, förutsatt ett regeringsbeslut om tillstånd. Exempel på ytterligare underlag som SKB förväntas ta fram för att i kommande steg få uppföra, inneha och driva en slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle vid Forsmark ur perspektivet att uppnå föreskriftskrav på slutförvarets långsiktiga säkerhet är:

- Ett detaljundersökningsprogram för uppförandefasen av slutförvaret med syfte att identifiera de aktiviteter och åtgärder som är nödvändiga för att verifiera och vidareutveckla den platsbeskrivande modellen för Forsmarkplatsen.
- En plan för de aktiviteter och åtgärder som är nödvändiga för vidareutveckling och justering av tillverkningsmetoder, detaljutformning, provningsmetoder inklusive deras kvalificering, acceptanskriterier m.m. som behövs för specifikation, tillverkning, installation och kontroll av de tekniska barriärerna kapsel och buffert. SKB ska också ta fram aktiviteter och åtgärder som är nödvändiga för utveckling av övriga förvarskomponenter som återfyllnad av deponeringstunnlar, pluggar för deponeringstunnlar, återfyllnad av övriga förvarsutrymmen samt slutlig förslutning av förvaret.
- En detaljerad plan för de bergtekniska åtgärder som behövs för att uppföra slutförvaret inklusive bergguttar av nedfartstunnlar, schakt och övriga förvarsutrymmen inklusive ett kontrollprogram som syftar till att verifiera att konstruktionsförutsättningarna i säkerhetsanalysen uppfylls under uppförandet av anläggningen fram till provdriften påbörjas.
- Ett program för fortsatt vetenskaplig fördjupning, utveckling och demonstration kring förhållanden, händelser, processer och barriärsystemets egenskaper som kan leda till spridning av radioaktiva ämnen från slutförvaret. Programmet behöver innefatta t.ex. grundläggande forskning, teoretisk förståelse, matematisk modellering, experiment kring degraderingsprocesser liksom verifierande tester och eventuella långtidsförsök.
- En plan för uppdatering och vidareutveckling av kommande säkerhetsanalyser med avseende på exempelvis metoder för analys av risk, tillämpning av optimeringsprincipen samt detaljering av slutförvarets utformning och förväntade utveckling före och efter förslutningen.

Vid framtagande av dessa program och planer behöver SKB visa hur SSM:s bedömningar och kommentarer som har tagits fram under prövningsprocessen har beaktats. Program och planer behöver tas fram och uppdateras samt godkännas av SSM inför kommande steg i SKB:s program för att etablera en slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle vid Forsmark.



Innehållsförteckning

Förord	1
Sammanfattning	2
Innehållsförteckning	5
Inledning	9

Del 1 Förutsättningar för kravuppfyllelse långsiktig strålsäkerhet

1. Sammanvägd bedömning	17
2. Tillämpningsområde	18
3. Helhetssyn	19
4. Barriärer och deras funktioner	20
5. Optimering och bästa möjliga teknik (BMT)	23
6. Konstruktion och utförande samt intrång och tillträde	30
7. Skydd av människors hälsa och miljön	46
8. Tidsperioder i säkerhetsanalysen	50
9. Säkerhetsanalysen säkerhetsredovisning	53

Del 2 Granskning av säkerhetsredovisningen

1. Övergripande bedömning av säkerhetsanalysen SR-Site	61
1.1 Säkerhetsanalysens syfte	61
1.2 Säkerhetsanalysens metodik	61
1.3 Slutförvarets förläggingsplats och initialtillstånd	65
1.4 Referensutvecklingen	66
1.5 Konsekvensanalys och scenarioutvärdering	67
1.6 Säkerhetsanalysens helhet	68
2. Säkerhetsanalysmetodik	69
2.1 Metodik	69
2.2 Systemanalys och FEP-hantering	74
2.3 Interna och externa förhållanden	81
2.4 Scenarier	83
2.5 Metod för riskberäkning	92
2.6 Hantering av osäkerheter	95
2.7 Tillämpbarhet av modeller, parametervärden och andra förutsättningar	98
2.8 Återkoppling till SKB:s kärnavfallsprogram	100
2.9 Tillämpning av kvalitetssäkringssystem	100
2.10 Sammanvägd bedömning av säkerhetsanalysmetodiken	101
3. Initialtillstånd	102
3.1 Forsmarksplatsens initiala egenskaper	105
3.2 Bergutrymmen och deras närområden	141



3.3	Bränsle	180
3.4	Kapseln	192
3.5	Buffert, återfyllnad och pluggar.....	220
3.6	Förlutning av slutförvaret.....	243
4.	Slutförvarets skyddsförmåga upp till 1 000 år	247
4.1	Utveckling av temperatur och strålfält i förvarets närhet	249
4.2	Utveckling av bränsle och kapselns hålrum.....	255
4.3	Kriticitet.....	259
4.4	Bergmekanisk utveckling.....	263
4.5	Hydrogeologisk utveckling.....	275
4.6	Grundvattenkemisk utveckling.....	281
4.7	Kemisk och mekanisk utveckling för buffert och återfyllnad.....	295
4.8	Återmättnad av buffert och återfyllnad.....	305
4.9	Kanalbildningserosion av buffert och återfyllnad.....	312
4.10	Korrosionsprocesser för koppar	317
4.11	Mekanisk deformation av kopparkapseln från svälltrycksfall	356
4.12	Kopparkapselns förmåga att motstå långsamma krypbelastningar	361
4.13	Inverkan av jordskalv.....	377
5.	Slutförvarets skyddsförmåga mellan 1 000 år och 100 000 år.....	383
5.1	Långsiktig utveckling av använt kärnbränsle och frigörelse av radionuklider vid kontakt med grundvatten	385
5.2	Klimatutveckling	398
5.3	Bergmekanisk utveckling.....	411
5.4	Hydrogeologisk utveckling.....	417
5.5	Grundvattenkemisk utveckling från 1 000 år till 100 000 år	434
5.6	Kemisk utveckling av buffert och återfyllnad.....	446
5.7	Frysning av buffert och återfyllnad.....	451
5.8	Kemisk erosion av buffert och återfyllnad.....	453
5.9	Mekanisk deformation av kopparkapseln utsatt för isostatisk last	461
5.10	Mekanisk deformation av kopparkapseln utsatt för skjuvlast.....	468
5.11	Korrosionsprocesser för koppar	483
5.12	Inverkan av jordskalv i förvarets närhet för de första 100 000 åren	504
5.13	Bedömning bufferterrosions omfattning i slutförvarsmiljön och tider till uppkomst av advektiva förhållanden i deponeringshål.....	517
6.	Slutförvarets skyddsförmåga efter 100 000 år	523
6.1	Övergripande redovisning för tiden efter 100 000 år.....	524
6.2	Denudation för tider efter 100 000 år	528
6.3	Inverkan av jordskalv efter 100 000 år	531
7.	Konsekvensanalys.....	532
7.1	Metodik.....	533



7.2	Modeller.....	539
7.3	Indata	552
7.4	Beräkningsresultat	582
7.5	SSM:s bedömning av konsekvensanalysen	601
8.	Restscenarier för mänskliga handlingar.....	606
8.1	Allmänt om framtida mänskliga handlingar	607
8.2	Övergivet oförslutet slutförvar.....	609
8.3	Mänskligt intrång på förvaret.....	611
8.4	Förebyggande åtgärder mot framtida mänskliga handlingar som negativt påverkar slutförvaret.....	617
9.	Bedömning av val och utvärdering av scenarier i SR-Site	619
9.1	Underlag från SKB	619
9.2	SSM:s bedömning.....	625
	Referenser.....	635
	Bilaga 1 Förkortningar.....	711
	Bilaga 2 Ordlista	713





Inledning

Den 16 mars 2011 lämnade Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) in en ansökan enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet (kärntekniklagen) till att uppföra, inneha och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark (Östhammars kommun). Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) har enligt 24 § förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet berett ansökan och hämtat in de yttranden som behövs för att med ett eget yttrande överlämna handlingarna i ärendet till regeringen inför dess tillståndsprövning av ansökan. SSM är även remissinstans till Mark- och Miljödomstolen som bereder ärendet enligt miljöbalken. Denna rapport är ett underlag för SSM:s bedömning av SKB:s ansökan i fråga om det planerade slutförvarets strålsäkerhet efter förslutningen.

SKB:s ansökan bygger på slutförvaring enligt KBS-3-konceptet. Detta innebär att det använda kärnbränslet i form av kulsor som är del av bränsleknippen innesluts i en kapsel vars lastbärande element består av segjärn. Kapselns korrosionsskyddande hölje består av koppar och har funktionen att innesluta det använda kärnbränslet så att radionuklider inte kan läcka ut. Kopparkapslarna ska deponeras ca 470 m ner i berggrunden på den valda platsen i Forsmark i Östhammars kommun. I så kallade deponeringstunnlar på förvaringsdjup borras vertikala hål i vilka kapslarna sänks ner. Kapslarna omges med bentonitlera som sväller när den vattenmättas av grundvattnet. Den svällda bentonitleran ska säkerställa att masstransport till och från kapslarna endast kan ske via diffusion och att ingen betydande mikrobiell aktivitet förekommer. Deponeringstunnlarna fylls med återfyllnadsmaterial också bestående av bentonitlera och slutförvaret försluts genom ett system av betongpluggar samt olika återfyllningsmaterial. Det förslutna slutförvaret ska skapa förutsättningar för att kunna hålla det använda kärnbränslet inneslutet under mycket lång tid, hundratusentals år, samtidigt som spridningen av radionuklider som ändå eventuellt skulle läcka ut fördröjs.

Övergripande kravbild

SKB har ansökt om tillstånd enligt kärntekniklagen att få uppföra, inneha och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle. Förutom kärntekniklagen är strålskyddslagen (1988:220) och delar av miljöbalken (1998:808) tillämpliga vid SSM:s bedömning av slutförvarets strålsäkerhet efter förslutningen. En översiktlig genomgång av det nationella ramverket och lagstiftningen kring kärntekniska anläggningar återfinns i den nationella planen för ansvarsfull och säker hantering av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall i Sverige (SSM rapport 2015:31).

Kärntekniklagen och strålskyddslagen innehåller övergripande bestämmelser om säkerhet vid kärntekniska anläggningar respektive strålskydd och regeringen har bemyndigat Strålsäkerhetsmyndigheten att utfärda föreskrifter inom vissa områden som lagarna berör. När det gäller den långsiktiga strålsäkerheten för ett slutförvar för använt kärnbränsle är de viktigaste föreskrifterna SSMFS 2008:21 om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall samt SSMFS 2008:37 om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. SSM har utfärdat allmänna råd för föreskrifternas tillämpning. Dessa föreskrifter detaljerar kraven på slutförvar genom kompletterande bestämmelser till föreskriften SSMFS 2008:1 om säkerhet i kärntekniska anläggningar som gäller samtliga typer av kärntekniska anläggningar.

Kärntekniklagen hänvisar till att vissa bestämmelser i miljöbalken ska tillämpas vid tillståndsprövningar enligt lagen. Mer specifikt hänvisas till miljöbalkens 2 kap. om allmänna hänsynsregler, 5 kap. 3 § om miljö kvalitetsnormer och 6 kap. om miljökonsekvensbeskrivningar. SSM:s bedömning av frågor som avser strålsäkerhet efter förslutning mot dessa miljöbalkskrav återfinns i granskningsrapporten för bedömning av



systemövergripande frågor (granskningsrapport *Systemövergripande frågor*, SSM2011-1135-18).

De viktigaste bestämmelserna vid bedömningen av SKB:s ansökan i fråga om strålsäkerhet efter förslutning kan sammanfattas under följande rubriker:

- Helhetssyn kring skydd av människors hälsa och miljön
- Barriärsystemets funktioner, konstruktion och utförande
- Bästa möjliga teknik
- Säkerhetsanalysens fullständighet och omgivningspåverkan
- Tidsperioder i säkerhetsanalysen
- Skydd av människors hälsa
- Skydd av miljön
- Säkerhetsanalys och säkerhetsanalysmetodik.

I del 1 i denna rapport redogör SSM systematiskt för bedömningen av förutsättningar för kravuppfyllelse i förhållande till alla relevanta krav på slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet i SSMFS 2008:21 och SSMFS 2008:37. I de allmänna råden belyser SSM närmare föreskrifternas möjliga tolkning och rekommenderar sätt för att hantera föreskriftkraven.

Kraven på helhetssyn kring skydd av människors hälsa och miljön innebär att människors hälsa och miljön ska skyddas under det slutliga omhändertagandet av det använda kärnbränslet samt på lång sikt. Detta gäller för såväl Sverige som utanför landets gränser. Därvid ska hänsyn tas till bästa möjliga teknik och strålskyddsoptimering. Utöver helhetssynen bestäms att risken för skadeverknings efter förslutning av slutförvaret inte ska överstiga en på miljonen för en representativ individ i den grupp som utsätts för största risken. Även biologisk mångfald och hållbart utnyttjande av biologiska resurser ska skyddas mot skadlig verkan av joniserande strålning.

Det ställs krav på en säkerhetsredovisning som sammantaget ska visa hur anläggningens säkerhet är anordnad. En viktig del av säkerhetsredovisningen är en säkerhetsanalys för långsiktig strålsäkerhet som ska omfatta förhållanden, händelser och processer vilka kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning. Metoderna för analysen ska redovisas med hänsyn till det passiva systemet av barriärer och dess utveckling med tiden. Relevanta scenarier för händelseförlopp och förhållanden som kan påverka den framtida utvecklingen av slutförvaret ska redovisas. Därutöver ska tillämpbarheten för modellerna som används i säkerhetsanalysen redovisas så långt som rimligen möjligt. En betydelsefull del av säkerhetsanalysmetodiken är hanteringen av osäkerheter och därför ska det redovisas hur detta har hanterats. Säkerhetsanalysen ska omfatta beskrivningar av utvecklingen av biosfären, geosfären och slutförvaret för de valda scenarierna för händelseförlopp och förhållanden som kan påverka den framtida utvecklingen av slutförvaret.

Det använda kärnbränslets farlighet på grund av dess radioaktivitet består över mycket långa tider samtidigt som radioaktiviteten succesivt klingar av. Detta behöver vid analysen av slutförvarets skyddsförmåga beaktas och särskilda krav gäller för den första tidsperioden fram till 1000 år efter förslutningen för vilken tillämpning av kvantitativa analyser av skadliga effekter av joniserande strålning på människors hälsa och miljön ska genomföras. För tiden efter 1000 år ska bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på olika tänkbara förlopp för utvecklingen av slutförvarets egenskaper, dess omgivning och biosfären. För tider längre än 100 000 år kan säkerhetsanalysens resultat succesivt betraktas mer som en illustration av slutförvarets skyddsförmåga givet de tillämpade antaganden som beräkningarna av konsekvensen för utsläpp av radioaktiva

ämnen baseras på. Resultaten från analyser för dessa långa tider efter förslutningen bör främst utnyttjas för att förbättra slutförvarets skyddsförmåga.

Stegvis bedömning av kravuppfyllelse

Processen för att medge tillstånd för en komplex kärnteknisk verksamhet följer en stegvis process (SSM STYR2011-131). Utgångspunkten i processen kan beskrivas vara den s.k. säkerhetsredovisningen, som ska redovisa anläggningen som uppförd, analyserad och verifierad. Säkerhetsredovisningen innefattar en säkerhetsanalys för slutförvaret för tiden efter förslutning. Förenklat omfattar processen följande steg:

- Ett första steg som innebär en principiell prövning för att på en övergripande nivå bedöma om det finns förutsättningar för en sökande att etablera en sökt verksamhet så att den kan förväntas komma att bedrivas på ett sådant sätt att gällande krav på säkerhet och strålskydd kan komma att uppfyllas vid efterföljande steg (innan SSM:s medgivande om uppförande, provdrift, respektive rutinmässig drift) i den stegvisa prövningen. Beslut om att medge tillstånd eller inte fattas av regeringen.
- Ett andra steg som innebär att ett medgivande från myndigheten att inleda själva uppförandet av en kärnteknisk anläggning baserad på en s.k. preliminär säkerhetsredovisning (PSAR). Redovisningen i PSAR utgör en teoretisk beskrivning/modell av hur gällande krav på säkerhet och strålskydd konkret är tänkta att uppfyllas för verksamheten i rutinmässig drift.
- Ett tredje steg som innebär ett medgivande från myndigheten att inleda provdrift av anläggningen baserat på en förnyad säkerhetsredovisning (SAR) som innehåller en första version av s.k. säkerhetstekniska driftsförutsättningar (STF). SAR utgör redovisning av faktisk kravuppfyllelse för uppförda konstruktioner och installationssystem samt en teoretisk beskrivning/modell av hur gällande krav på säkerhet och strålskydd konkret är tänkta att uppfyllas för själva driften av anläggningen.
- Ett fjärde steg som innebär ett medgivande från myndigheten att inleda rutinmässig drift av anläggningen baserad på en redovisning av ny version av SAR som kompletterats med erfarenheterna från provdriften samt uppdaterade säkerhetstekniska driftsförutsättningar (STF). Redovisningen i den kompletterade SAR utgör redovisning av faktisk kravuppfyllnad för såväl konstruktioner och installationssystem som för själva driften av anläggningen.

Därutöver är det värt att notera att en omarbetad version av SAR samt prövning och godkännande av SSM behövs inför avvecklingen av anläggningen. För slutförvarsanläggningen omfattar avvecklingsskedet rivning av ovanmarksdelen och av system och komponenter i undermarksdelen samt förslutning av återstående delar av undermarksdelen. Regeringen och SSM kan även ställa villkor vilka kan vara kopplade till något av de beskrivna prövningsstegen.

SSM:s bedömning av SKB:s ansökan i föreliggande granskning utgör det första steget i den stegvisa processen enligt ovan.

Av ovanstående framgår att någon bedömning av egentlig kravuppfyllnad inte låter sig göras förrän anläggningen uppförts (faktisk kravuppfyllelse för konstruktioner och installationssystem) och efter genomförd provdrift (faktisk kravuppfyllnad för själva driften av anläggningen). Av detta följer att SSM:s granskning syftar till att på en övergripande nivå bedöma om det finns förutsättningar för en sökande att etablera den sökta verksamheten så att den kan förväntas komma att bedrivas på ett sådant sätt att gällande krav på säkerhet och strålskydd kan komma att uppfyllas i senare skeden.



Att kravuppfyllnaden inte låter sig göras innan slutförvaret är i drift hänger även ihop med att slutförvarsutformningen kommer att behöva anpassas till de rådande förhållandena i berggrunden. Därutöver krävs information från detaljerade undersökningar av förutsättningarna på förvardjup för att beskriva det tillstånd som råder vid driftsförlutningen av deponeringstunnlarna. Detta tillstånd är utgångspunkten för analysen av slutförvarets strålsäkerhet efter förslutning. Platsanpassningen och den kommande projekteringen av slutförvaret innebär att SKB kommer att vidareutveckla och detaljera konstruktionslösningarna innan slutförvaret tas i rutinemässig drift. SSM har i bedömningen av förutsättningarna för SKB att påvisa kravuppfyllelse i samband med rutinemässig drift beaktat att det finns utrymme för vidareutveckling, optimering och detaljering av KBS-3-konceptets konstruktionslösningar.

SKB behöver beakta SSM:s synpunkter i denna rapport för att i relevant skede kunna påvisa uppfyllelse av tillämpliga strålsäkerhetskrav som ställs för att i kommande steg få godkännande av SSM att fortsätta processen för att etablera ett slutförvar.

Genomförande av SSM:s granskning

Granskningen har genomförts i enlighet med SSM:s ledningssystem och dess genomförandeprocess ”Tillståndspröva”. I synnerhet har granskningsprocessen följt de principer som beskrivs i myndighetens inriktningsdokument ”Beredning av tillstånd och prövning av tillståndsvillkor gällande kärntekniska anläggningar och andra komplexa anläggningar där strålning används” (SSM STYR2011-131). Enligt styrdokumentet är syftet med myndighetens beredning av ett tillståndsärende att bedöma om verksamheten kan förväntas bli lokaliserad, utformad och bedriven på ett sådant sätt att säkerhets- och strålskyddskraven, kraven på fysiskt skydd samt de allmänna hänsynsreglerna uppfylls.

Granskningen har genomförts i två faser. Den första inledande fasen syftade till att få en överblick över materialet och bedöma huruvida ansökan är tillräckligt komplett för att den ska kunna kungöras. Därutöver tillställdes SKB en rad kompletteringsbegäranden. I den inledande fasen har ingått att bereda den remiss som mark- och miljödomstolen skickade till SSM med frågan om synpunkter på fullständigheten av SKB:s ansökan enligt miljöbalken som domstolen bereder. Med utgångspunkt från resultaten från den inledande granskningen specificerades granskningsuppgifterna för den andra fasen, den så kallade huvudgranskningsfasen. I denna fas har SSM genomfört en detaljerad granskning av underlaget och en bedömning om SKB har förutsättningar att uppfylla tillämpliga författningskrav.

SSM har genomfört två breda nationella remissomgångar av SKB:s ansökan enligt kärntekniklagen. I den inledande granskningsfasen låg tyngdpunkten på synpunkter kring ansökans fullständighet. Remissomgången i huvudgranskningsfasen syftade till att inhämta synpunkter kring sakfrågorna som ansökan handlar om och för denna del av granskningen frågor om den långsiktiga strålsäkerheten. Remissvaren har beaktats i granskningen och i underlaget till yttrandet till regeringen redovisas en systematisk sammanställning av SSM:s hantering av inkomna remissynpunkter.

Säkerhetsredovisningen SR-Site med stödjande dokumentation och referenser är ett mycket omfattande material. SKB:s utredningar kännetecknas till stor del av en hög grad av specialisering och i många sammanhang tangerar utredningarna det som behandlas inom forskningen. För att granska och bedöma detta material har SSM dels genomfört egna granskningar, dels anlitat externa experter. Experterna har uppdragits att utreda avgränsade granskningsuppgifter som SSM har identifierat utifrån en egen genomgång av ansökansunderlaget samt baserat på tidigare expertutlåtanden. Experterna har givits i uppdrag att bedöma tekniska och vetenskapliga frågor, men däremot inte bedömt ansökansunderlaget i förhållande till författningskraven. Experterna har levererat rapporter

till SSM som återger deras granskning och bedömning av det undersökta ämnet. SSM har faktagranskat och kvalitetssäkrat rapporterna, men författarna står för bedömningarna däri. Det är således inte givet att SSM delar författarnas ståndpunkter. Sammanlagt har ett 90-tal expertrapporter publicerats i SSM:s så kallade "Technical Note"-serie. I upphandlingen av experterna enligt lagen (1992:1528) om offentlig upphandling har SSM vinnlagt sig om att undvika jävsituationer i förhållande till SKB:s verksamhet. Externa experternas Technical Notes har varit ett viktigt tekniskt och vetenskapligt underlag för SSM:s bedömningar av ansökan mot författningskraven.

I den inledande granskningsfasen identifierade SSM delar av ansökan som behövde kompletteras eller där SSM ansåg att underlaget var otydligt. I dessa fall begärde SSM förtydligande information eller kompletteringar av SKB. Sammanlagt har SSM begärt ett hundratal sådana förtydliganden och kompletteringar av SKB inom ramen för granskningen av SR-Site. I samband med sådana kompletteringsbegäranden har även protokollförda möten hållits med SKB för att tydliggöra vissa frågeställningar eller förklara innebörden för granskningen. SKB har inkommit med svar till alla dessa begäranden, i vissa fall kortfattade, i andra fall baserat på omfattande ytterligare utredningar.

SSM har bedömt SKB:s förutsättningar att kunna uppfylla författningskraven i relevanta skeden i den stegvisa processen. De allmänna råden till SSM:s föreskrifter har i stor utsträckning tillämpats som bedömningskriterier. SSM har försökt identifiera de kritiska frågorna i säkerhetsanalysen som har betydande påverkan på slutförvarets skyddsförmåga för att kunna inrikta granskningen på dessa. SSM har granskat det tekniska ansökansunderlaget och bedömt ifall analyserna i SR-Site är tillräckliga och trovärdiga. SSM har bedömt möjliga svagheter i systemet enligt KBS-3-konceptet utifrån ett tekniskt och vetenskapligt perspektiv.

Eftersom SR-Site utgör en komplex säkerhetsanalys har kopplingarna mellan olika betingelser beaktats och svagheters betydelse utvärderats med hänsyn till deras påverkan på systemet som helhet och i förlängningen till dess betydelse i förhållande till författningskraven. Detta innefattade en under granskningsprocessen ständigt pågående identifiering av frågeställningar som behövde avhandlas inte bara av enskilda granskare utan av granskningsgruppen som helhet. Frågeställningarna utvärderades dels med avseende på associerade konceptuella och parameter-relaterade osäkerheter, dels med avseende på den aktuella frågeställningens inverkan på en eller flera barriärers tillverkning/uppförande/karaktärisering och/eller deras långsiktiga funktion i slutförvaret. Identifierade frågeställningar av betydelse för slutliga bedömningar med avseende på föreskriftskrav diskuterades inom granskningsgruppen vid arbetsmöten. Den varierande bakgrunden hos granskningsgruppens deltagare möjliggjorde utveckling av ett integrerat synsätt som underlag för myndighetens slutliga bedömningar. Ett syfte med dessa arbetsmöten var att göra det möjligt för granskningsgruppens medlemmar att bilda sig en god uppfattning om strålsäkerhetsbetydelsen även av frågeställningar utanför det egna granskningsområdet. Den utförliga hanteringen av särskilda frågor i hela granskningsgruppen gjorde det möjligt att belysa dessa på ett mera mångfacetterat sätt. Diskussionerna sträckte sig längre än att utvärdera betydelsen för en specifik barriär/barriärfunktion, vilket i allmänhet innebar betydelsen för hela barriärsystemets robusthet och slutförvarets totala skyddsförmåga i såväl möjliga som hypotetiska situationer. I vissa fall underbyggdes bedömningarna av konsekvensberäkningar för dessa situationer (SSM Technical Note 2017:15). Detta utgjorde en av flera grunder för bedömning av såväl förutsättningar för kravuppfyllelse som bedömningar av vilka återstående åtgärder som behöver genomföras innan eventuella kommande steg i slutförvaret så som godkännande av PSAR och SAR.



SSM har för delar av analysen genomfört egna beräkningar och modelleringar. Dessa har genomförts av SSM:s personal och av externa experter. Modelleringarna har syftat till en ökad förståelse för SKB:s beräkningar och till att utvärdera trovärdigheten i SKB:s tolkningar av modelleringsresultaten. Övriga syften har varit att kontrollera att SKB:s beräkningar är korrekta och att bedöma SKB:s hantering av olika former av osäkerheter. I vissa fall har SSM tillämpat alternativa konceptuella modeller för att utreda betydelsen av konceptuella osäkerheter.

Eftersom SSM i denna granskning inte bedömer formell kravuppfyllnad utan förutsättningarna för kravuppfyllelse i relevant skede har SSM dels bedömt ansökan givet de antaganden om slutförvarets initialtillstånd som görs i SR-Site, dels bedömt förutsättningarna att uppnå initialtillståndet inklusive de antaganden som det är underbyggt med. Frågor i samband med sådana antaganden är ifall SKB har förutsättningar att realisera den referensutförning som analysen utgår ifrån och om konstruktionsförutsättningarna är väl underbyggda. SSM har beaktat att det finns utrymme för att SKB detaljerar komponenternas utformning och förbättrar det tekniska och vetenskapliga underlaget innan slutförvaret kommer att tas i drift. SSM kan konstatera att SKB behöver se till att de krav som säkerhetsanalysen ställer på slutförvarsanläggningen kan uppfyllas när anläggningen drivs.

Förutom själva bedömningen om redovisningarna i SR-Site kan påvisa förutsättningar för kravuppfyllelse har granskningen resulterat i ett stort antal rekommendationer till SKB för det fortsatta programmet för att etablera ett slutförvar. Rekommendationerna utgår exempelvis från SSM:s bedömningar av vad SKB behöver redovisa i kommande steg för att kunna uppfylla föreskriftskraven. På så sätt kan dessa anses vara SSM:s tolkning av vad föreskriftskraven innebär i det konkreta fallet. I vissa fall bedömer SSM att det krävs villkor för att säkerställa att viktiga strålsäkerhetsaspekter kommer att hanteras på ett tillbörligt sätt.

Ett antal aspekter av granskningen av slutförvarets strålsäkerhet efter förslutning kopplar även till de andra delgranskningarna av ansökan, dvs. granskningen av säkerhetsredovisningen för anläggningens uppförande och drift SR-Drift (SSM2011-1135-19) samt av systemövergripande frågor och frågor som kopplar till kraven i miljöbalken (SSM2011-1135-18). I dessa fall har gemensamma granskningar utförts för att kunna beakta alla relevanta aspekter. Ett exempel är slutförvarets initialtillstånd som är avhängigt driften av anläggningen, eller uppfyllelsen av de allmänna hänsynsreglerna som är avhängigt slutförvarets skyddsförmåga efter förslutningen.

Kvalitetssäkringen av SSM:s granskningsarbete utgår från myndighetens ledningssystem. I syfte att säkerställa en effektiv ledning och styrning samt ett systematiskt förbättrings- och utvecklingsarbete har SSM certifierat sitt ledningssystem enligt standarderna för kvalitet (ISO 9001), miljö (ISO 14001) och arbetsmiljö (OHSAS 18001). SSM:s ledningssystem är även utvecklat med hänsyn till de krav som finns i IAEA:s standard ”The Management System for Facilities and Activities, GS-R-3”. Alla myndigheter ska dessutom ha ett ledningssystem för informationssäkerhet. Kvalitetssäkringen i SSM:s granskningsarbete och dess redovisning har utgått dels från egen kontroll på utredarnivå, dels från intern kontroll inom SSM:s granskningsorganisation inklusive samråd inför fastställande av granskningsdokumentationen och slutligen från kvalitetskontrollinsatser från externa experter anslutna till SSM. Dokumentation av dessa kvalitetskontrollinsatser finns även i arbetsdokumentationen för projektuppföljningen av SSM:s granskningsinsatser. SKB har också bidragit med en faktakoll av innehållet av skrivningarna kring SKB:s redovisning i granskningsrapporten. SSM har också beslutat att offentligöra delar av granskningsdokumentationen i preliminärversion för att insamla eventuella synpunkter från allmänheten inför fastställandet. Versionshantering,



kvalitetssäkringssynpunkter och dess bemötande samt backup av SSM:s granskningsdokumentation har genomförts i SSM:s dokumenthanteringssystem.

Expertgranskning av OECD NEA

På begäran av regeringen genomförde OECD NEA en så kallad internationell peer review av SKB:s redovisning av säkerheten efter förslutning, SR-Site. Enligt överenskommelsen med NEA syftade granskningen till att ge regeringen ett ställningstagande från ett internationellt perspektiv om tillräckligheten och trovärdigheten av SKB:s redovisning av säkerheten efter förslutning. NEA skapade en granskningsgrupp med 10 experter från olika medlemsländer som genomförde granskningsuppdraget. Utgångspunkt var SR-Site huvudrapporten, den platsbeskrivande modelleringen samt ytterligare stödande dokument. Under granskningen svarade SKB vid flera tillfällen på frågor från gruppen och det anordnades ett möte där experterna kunde ställa frågor till SKB. Experterna hade även möjlighet att delta vid ett fältbesök. OECD NEA har publicerat granskningens resultat i sin rapportserie (OECD NEA, 2012).

Expertgruppens övergripande slutsats är att SR-Site är tillräcklig och trovärdig som underlag till tillståndsbeslutet. Gruppen anser att SKB kärnavfallsprogram är moget och i princip anses det vara tillräckligt kompetent att uppfylla de industriella och säkerhetsrelaterade krav som är tillämpliga i kommande steg i etableringen av ett slutförvar. Gruppen framhåller att SKB överlag ger en övertygande illustration av genomförbarheten och den långsiktiga strålsäkerheten av det planerade slutförvaret enligt KBS-3-konceptet. SKB:s argument bedöms trovärdiga och grundade i den rådande vetenskapliga förståelsen. Gruppen anser att analysen kan betraktas som fullständig och att inga viktiga delar saknas. Experterna ser dock förbättringsmöjligheter och gruppen ger därför en rad rekommendationer till SKB.

SSM har utnyttjat den internationella granskningens resultat som ett underlag till myndighetens granskning av tekniska och vetenskapliga frågor. NEA:s expertgrupp har inte haft i uppdrag att granska SR-Site i förhållande till kravuppfyllelse gentemot tillämpliga författningskrav.

Rapportstruktur

Denna rapport om granskning av den långsiktiga strålsäkerheten för ett slutförvar för använt kärnbränsle enligt KBS-3-konceptet i Forsmark består av två delar. I del 1 redogör SSM för bedömningarna av SKB:s förutsättningar att kunna uppfylla föreskriftskraven i relevanta skeden av den stegvisa processen. Redovisningen är strukturerad med hänsyn till tillämpliga krav i SSMFS 2008:21 och SSMFS 2008:37. Bedömningarna baseras på SSM:s omfattande granskning av SKB:s ansökan med hänsyn till säkerhetsanalysen för långsiktig strålsäkerhet efter förslutningen, SR-Site.

SSM:s detaljerade granskning av SR-Site och dess underlag är dokumenterad i del 2 i denna rapport. För varje område som har granskats återges kortfattat SKB:s redovisning följt av SSM:s bedömning med avseende på granskningsområdet.

I del 2 redovisas först en sammanvägd översiktlig bedömning av hela säkerhetsanalysen SR-Site. Därefter följer den detaljerade granskningen av metodiken som SKB har använt för SR-Site. Utöver metodiken är slutförvarets planerade initialtillstånd en viktig förutsättning för att kunna utvärdera dess långsiktiga strålsäkerhet. I samband med den detaljerade granskningen av initialtillståndet redovisas i kapitel 3 SSM:s bedömning av genomförbarheten för uppförande med avseende på långsiktig strålsäkerhet efter förslutning.



SSM har strukturerat redovisningen kring utvecklingen av slutförvarets skyddsförmåga med tiden utifrån tre tidsrymder som var för sig har redovisats i ett kapitel. I kapitel 4 behandlas den första tidsrymden som sträcker sig fram till 1000 år efter förslutning av slutförvaret som den redovisas i SR-Site med relevanta underlagsrapporter. Denna tidsperiod ligger i linje med föreskriftskrav på redovisning av kvantitativa analyser som ställs i 11 § SSMFS 2008:37. Därutöver kan tidsperioden anses täcka in stora delar av slutförvarets utveckling i samband med att grundvattenet återmättar tunnlarna inklusive buffert och återfyllnadsmaterial. I kapitel 5 redogörs för granskningen av SR-Site för den andra tidsperioden som sträcker sig från 1000 år till 100 000 år. Denna period har härletts från kriteriet för begränsning av individrisk i SSMFS 2008:37. SSM tolkar i enlighet med de allmänna råden till föreskriften att en strikt jämförelse med riskkriteriet främst är meningsfull fram till ca 100 000 år. Denna tidsrymd täcker in stora drag in en glaciationscykel, motsvarande den föregående s. k. Weichselistiden och kan även kopplas till utvecklingen av avfallens radiotoxicitet som minskar med tiden. I kapitel 6 behandlas granskningen av SR-Site för den tredje tidsperioden som täcker in tiden efter 100 000 år. För denna tid anser SSM att riskanalysens resultat succesivt bör betraktas som en illustration av slutförvarets skyddsförmåga givet de antagna förutsättningarna och deras osäkerheter. En strikt jämförelse av den beräknade risken med riskkriteriet anses inte meningsfull utan analysen bör utnyttjas för att identifiera möjligheter att förbättra slutförvarets skyddsförmåga.

SSM bedömer därefter i kapitel 7 konsekvensanalysen som presenteras i SR-Site med relevanta underlagsrapporter. Därefter följer i kapitel 8 bedömningen av SKB:s redovisning kring oavsiktlig framtida mänsklig påverkan på slutförvarets skyddsförmåga inklusive frågor om informationsbevarande. I kapitel 9 redogör SSM för bedömningen av SKB:s förutsättningar att uppfylla riskkriteriet samt andra författningskrav. Rapporten avslutas med en referenslista och ordlista. För enkelhetens skull har rapporter publicerade av SKB och SSM hänvisats till med rapportnummer i stället för författarnamn, exempelvis SKB TR-08-05 för att referera till rapporten som behandlar den platsbeskrivande modellen för Forsmark.



Del 1 Förutsättningar för kravuppfyllelse långsiktig strålsäkerhet

SSM bedömer i detta avsnitt SKB:s förutsättningar för att uppfylla SSM:s föreskriftskrav enligt föreskrifterna SSMFS2008:37 och SSMFS 2008:21. Bedömningarna har till stor del baserats på SSM:s detaljerade granskning av SKB:s säkerhetsanalys SR-Site som beskrivs i del 2 av denna granskningsrapport.

För att SKB inom ramen för ett tillstånd enligt kärntekniklagen ska kunna påbörja konstruktionsarbeten vid Forsmarksplatsen och i ett senare skede ta ett sådant slutförvar i provdrift krävs att SSM kan fastslå att SKB uppfyller föreskriftskraven. SSM:s bedömning baseras inom den pågående tillståndsprövningen i första hand på information SKB lämnat i sin ansökan. SSM beaktar även möjligheter att genom ytterligare utredningar och utvecklingsinsatser fördjupa SKB:s nuvarande säkerhetsredovisning. SSM bedömer vidare möjligheterna att hantera och minimera betydelsen av kvarvarande osäkerheter. SKB behöver under samtliga faser av slutförvarsprogrammet ta vara på möjligheter att förbättra slutförvarets långsiktiga skyddsförmåga genom att optimera förvarets uppförande och utformning. SSM anser att vissa osäkerheter med avseende på förvarets utformning kan kopplas till att alla moment i SKB:s program inte kan genomföras i detta steg. Här kan exempelvis nämnas konstruktion av tillfartsvägar ner till förvarsdjup, en kommande detaljprojektering av förvaret inklusive dess komponenter, samt slutlig utveckling av tillverkningsmetoder. För de flesta av föreskriftskraven bedömer SSM i nuläget om SKB med beaktande av befintlig information har förutsättningar att påvisa kravuppfyllelse. De bedömningar som SSM tagit fram i detta prövningssteg kommer att vidareutvecklas, konkretiseras och verifieras framöver i samband med kommande granskningar av ansökningar för godkännande i de olika stegen. Vissa föreskriftskrav är i huvudsak inriktade på kommande faser i arbetet med att etablera ett slutförvar för använt kärnbränsle och är därför av begränsad relevans att bedöma vid detta granskningstillfälle.

SSM:s bedömning av SKB:s förutsättningar för att uppfylla föreskriftskraven har sorterats in under följande rubriker:

- Sammanfattande bedömning
- Tillämpningsområde
- Helhetssyn
- Barriärsystemet och dess funktioner
- Optimering och bästa möjliga teknik
- Konstruktion och utförande samt intrång och tillträde
- Skydd av människors hälsa och miljöskydd
- Tidsperioder i säkerhetsanalysen
- Säkerhetsanalys och säkerhetsredovisning

1. Sammanvägd bedömning

SSM bedömer sammanvägt att SKB har förutsättningar att uppfylla samtliga av SSM:s tillämpliga föreskriftskrav gällande långsiktig strålsäkerhet och slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle. Denna bedömning har baserats på granskning av information som SKB har lämnat i sin ansökan. Ett slutförvar för använt kärnbränsle som byggs vid Forsmark på cirka 500 m djup i berggrunden baserat på KBS-3-metoden bedöms kunna utformas så att tillräcklig säkerhet och strålskydd efter slutlig förslutning kan uppnås. SKB:s säkerhetsanalys SR-Site med underliggande utredningar och kompletteringar till ansökan bedöms vara utförlig och ge ett för detta steg i prövningsprocessen tillräcklig belysning av frågeställningar av relevans för ett slutförvars långsiktiga skyddsförmåga. SKB:s program betraktas även rent generellt som tillräckligt långt gånget för att SSM ska kunna bedöma förutsättningar för kravuppfyllelse. Detta med tanke på genomförandet av ett forsknings- och utvecklingsarbete under flera årtionden, uppförandet av ett

underjordslaboratorium vid Äspö, provtillverkning av fullskaliga slutförvarskomponenter samt analys av långsiktig strålsäkerhet inom ramen för preliminära säkerhetsanalyser även innan SR-Site. SSM konstaterar även att användning av flera barriärer och barriärfunktioner, både hos de tekniska och hos den naturliga bergbarriären, innebär en diversifiering av principer till stöd för analys och bedömning av långsiktig strålsäkerhet. SSM anser att begränsning av omgivningskonsekvenser även vid tänkta bortfall av säkerhetsfunktioner och enskilda barriärer ger tilltro till att förvarssystemet som helhet är robust. SKB har genomfört analyser av fall med hypotetiska och långtgående bortfall av barriärer och säkerhetsfunktioner för individuella barriärer vilket ger en grundläggande förståelse för hur de olika barriärerna både ensamt och i samverkan med varandra bidrar till slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. SSM anser även att SKB:s val av en plats med få vattenförande sprickor på förvarsdjup bidrar till systemets robusthet.

Inom SSM:s granskning har behov av ytterligare insatser identifierats inom en rad olika områden för att ytterligare underbygga säkerhetsanalysen och förfina och optimera det föreslagna slutförvarssystemet. SSM anser att det är nödvändigt att ytterligare insatser genomförs innan SSM kan ta slutlig ställning till om SKB uppfyller samtliga SSM:s föreskriftskrav och inte bara ha förutsättningar att uppfylla föreskriftskraven, vilket krävs innan det kan bli aktuellt att påbörja konstruktionsarbeten vid Forsmark och senare för att ta ett slutförvar i provdrift. Krav på ytterligare utredningar, vidareutveckling och optimering av slutförvaret motiveras med behov av beaktande av faktiska förhållanden på förvarsdjup, behov av en utökad och förfinad scenarioanalys samt behov av ytterligare utvecklingsarbete och forskning av relevans för de tekniska barriärernas skyddsförmåga. SSM kan dock konstatera att det, inom ramen för en stegvis prövning av ett så långsiktigt och komplext projekt som etablerandet av ett slutförvar för använt kärnbränsle, är oundvikligt att kvarstående frågeställningar och behov av ytterligare analyser identifieras efter varje prövningssteg. Behov av ytterligare forskning kan ses mot bakgrund av att SKB redan har genomfört ett mycket omfattande forskningsprogram under lång tid, samt att SSM har sedan länge förutsatt ett långsiktigt behov av fortsatt forskning finns förutom under en konstruktionsfas även under slutförvarets hela driftperiod, bland annat för att underbygga uppdaterade säkerhetsanalyser, ta vara på driftserfarenheter, genomföra fortsatt optimeringsarbete, samt att ta vara på tillkommande forskningsresultat i vetenskapssamhället i stort.

2. Tillämpningsområde

2.1 Krav

1 § SSMFS 2008:21 *Dessa föreskrifter gäller anläggningar för slutförvaring av kärnämne och kärnavfall (slutförvar). Föreskrifterna gäller inte för anläggningar för markdeponering av lågaktivt kärnavfall enligt 16 § förordningen (SSMFS 1984:14) om kärnteknisk verksamhet.*

Föreskrifterna innehåller kompletterande bestämmelser till Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar.

1 § SSMFS 2008:37 *Dessa föreskrifter är tillämpliga på slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. Föreskrifterna är inte tillämpliga på anläggningar för markdeponering av lågaktivt kärnavfall enligt 19 § förordningen (1984:14) om kärnteknisk verksamhet.*

2.2 SSM:s bedömning

Föreskrifterna SSMFS 2008:21 och SSMFS 2008:37 är tillämpliga för SKB:s ansökan om att få uppföra, driva och inneha en slutförvarsanläggning enligt KBS-3 metoden vid Forsmarksplatsen.

3. Helhetssyn

3.1 Krav

3 § SSMFS 2008:37 *Människors hälsa och miljön ska skyddas från skadlig verkan av joniserande strålning, dels under den tid då de olika stegen i det slutliga omhändertagandet av använt kärnbränsle och kärnavfall genomförs, dels i framtiden. Det slutliga omhändertagandet får inte orsaka svårare effekter på människors hälsa och miljön utanför Sveriges gränser än vad som accepteras inom Sverige.*

3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att föreskriftskravet har förutsättningar att uppfyllas från perspektivet långsiktig strålsäkerhet i framtiden. För bedömningar kring risk för omgivningspåverkan under förvarets uppförande och driftfas respektive drift av inkapslingsanläggningen hänvisas till granskningsrapporter *Uppförande och drift av slutförvarsanläggning* (SSM2011-1135-19) respektive *Inkapslingsanläggning och Clab* (SSM2011-279-21).

SSM anser att slutförvaring enligt KBS-3-metoden vid Forsmarksplatsen har utformats för att ge kommande generationer skydd från skadlig verkan av joniserande strålning, dels genom val av en lämplig berggrund med få vattenförande sprickor, dels genom utformning av tekniska barriärer som bidrar med inneslutning av det använda bränslet under så lång tid som möjligt och i synnerhet under den tid då slutförvaret medför den största potentiella risken för omgivningskonsekvenser. Strategin att koncentrera och innesluta det använda kärnbränslet i berggrunden innebär dock att det är mycket svårt eller omöjligt att helt utesluta viss risk kopplad till spridning av radioaktiva ämnen från slutförvaret främst via grundvattenströmning. SSM anser dock att SKB:s analyser med hjälp av pessimistiska fall har gjort det möjligt att gränssätta effekter för förvarets långsiktiga utveckling som involverar spridning av radioaktiva ämnen. I SKB:s redovisning analyseras effekter av utsläpp till geografiskt små utströmningsområden i slutförvarets närområde. SKB:s biosfärsmodellering bedöms i allmänhet ge en bra beskrivning av biosfären. SKB har utförligt beskrivit kända trender i omgivningen kring slutförvaret i biosfärsanalyserna i enlighet med SSM:s föreskrifter och allmänna råd i SSMFS 2008:37. De landskapsspecifika doskonverteringsfaktorer (LDF-värden) som SKB har beräknat genom biosfärsmodellering och dosberäkning är rimliga att använda för att uppskatta omgivningskonsekvenser kopplade till ett visst utsläpp av radioaktiva ämnen. Detta beror på att de beaktar spridningsvägar, markanvändning och kostvanor som medför en förhållandevis stor exponering för de närboende.

SSM bedömer att det kan anses som uteslutet att det slutliga omhändertagandet av använt kärnbränsle i ett slutförvar vid Forsmark skulle kunna orsaka svårare effekter utanför Sveriges gränser än de i slutförvarets närområde vilka har analyserats i SKB:s säkerhetsanalys SR-Site. Spridningsvägar till andra länder och Östersjön är förknippad med mycket liten dos/risk med tanke på den stora utspädningseffekten redan på betydligt kortare avstånd än de till landsgränserna. Denna slutsats har också baserats på, förutom argument kring utspädning och spridning av radionuklider i grund- och ytvatten, att storskalig luftburen spridning av radionuklider förefaller mycket osannolik eftersom ingen



process som skulle kunna orsaka sådan luftburen spridning har kunnat identifieras. Vulkanism förväntas exempelvis inte förekomma i den svenska berggrunden.

4. Barriärer och deras funktioner

4.1 System av passiva barriärer

4.1.1 Krav

2 § SSMFS 2008:21 *Säkerheten efter förslutning av ett slutförvar ska upprätthållas genom ett system av passiva barriärer.*

4.1.2 SSM:s bedömning

SSM:s bedömning av säkerheten efter slutlig förslutning har baserats på att SKB föreslår ett multibarriärsystem enligt KBS-3-metoden med tre huvudsakliga barriärer; i) barriären av berg som uppnås genom att slutförvaret placeras på ca 500 m djup i en granitisk berggrund, ii) kopparkapseln med en segjärnsinsats och iii) bentonitbufferten. Berget är en naturlig barriär medan kapsel och buffert betraktas som av människan tillverkade tekniska barriärer. Baserat på de granskningsresultat som presenteras i del 2 av denna granskningsrapport drar SSM slutsatsen att användning av kombinationen av dessa tre olika typer av passiva barriärer med olika egenskaper och funktioner ger förutsättningar för att upprätthålla slutförvarets skyddsförmåga och säkerheten efter förslutning. Ett förvar av den typ som SKB föreslår har därför förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet. Strålsäkerheten förväntas upprätthållas genom att utsläpp av radioaktiva ämnen för den första tiden efter förslutning förhindras helt och om detta inte längre skulle vara möjligt kommer konsekvenser av möjliga utsläpp av radioaktiva ämnen att begränsas så långt som möjligt. Barriärerna inom KBS-3 betraktas som passiva eftersom de är utformade för att fungera utan kontroller och aktiva underhållsåtgärder.

4.2 Innesluta, förhindra eller fördröja spridning av radioaktiva ämnen

4.2.1 Krav

3 § SSMFS 2008:21 *Varje barriär ska ha till funktion att på ett eller flera sätt medverka till att innesluta, förhindra eller fördröja spridning av radioaktiva ämnen, antingen direkt, eller indirekt genom att skydda andra barriärer i barriärsystemet.*

4.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s system av barriärer med berg, kapsel och buffert tillsammans ger goda förutsättningar för att i tillräcklig utsträckning begränsa slutförvarets omgivningskonsekvenser. Denna slutsats har baserats på analys av de två huvudsakliga barriärfunktionerna alternativt säkerhetsfunktioner enligt terminologin i SKB:s säkerhetsanalys. SKB demonstrerar säkerheten med hjälp av två huvudsakliga barriärfunktioner i) inneslutning av det använda kärnbränslet med täta kopparkapslar, och efter förlust av inneslutning ii) fördröjning av radioaktiva ämnen som transporteras via grundvattenrörelser från förvarsdjup upp till markytan. Var och en av barriärfunktionerna kan vara verksamma samtidigt i slutförvaret som en helhet, men för varje unik kapselposition är det antingen den ena eller den andra barriärfunktionen som är verksam.

SSM konstaterar att bränslets avklingning medför att behov av att förlita sig på inneslutning är större på kort sikt än på lång sikt. Enbart barriärfunktionen inneslutning kan helt förhindra omgivningskonsekvenser. Analysen av inneslutningsfunktionen blir dock mer och mer omfattande och komplex som funktion av tiden. Tillkommande osäkerheter på mycket lång sikt avser i synnerhet den gradvisa utvecklingen av

slutförvarsmiljön, och även en eventuell påverkan från mycket långsamma eller osannolika degraderingsprocesser. Av detta skäl fås en ökad betydelse av barriärfunktionen fördröjning som ett nödvändigt komplement för att påvisa en begränsning av möjliga omgivningskonsekvenser särskilt för extremt långa tider. Fördröjning kan betraktas som en latent barriärfunktion i de situationer där den verksamma barriärfunktionen är inneslutning. SSM konstaterar att inneslutningsfunktionen avgörs av de tekniska barriärernas funktion och långsiktiga beständighet medan retardationsfunktionen avgörs av de radioaktiva ämnens kemiska egenskaper i slutförvarsmiljön och berget samt transport i tekniska barriärer och berg med det omgivande grundvattnet.

KBS-3-konceptet är utformat så att det enbart är kapseln som har förutsättningar att helt innesluta det använda kärnbränslet i långa tidsskalor, medan bufferten och berget bidrar till stabila kemiska betingelser och långsam transport av korroderande ämnen i kapselns närhet vilket främjar kapselns långsiktiga funktion. Bufferten och berget har båda en betydelse för att säkerställa långsam spridning av radioaktiva ämnen som medför dispersion och tid för avklingning av radioaktiva ämnen från kapslar som kan ha fallerat i slutförvarsmiljön. Enligt SKB:s analys har en kapsel med ett mindre genomgående hål från tillverkningen en förmåga att under en viss tid förhindra spridning av radioaktiva ämnen. Detta gäller sannolikt i viss omfattning även en kapsel som skadats på annat sätt. SSM anser att SKB:s analys visat att samtliga tre barriärer antingen direkt eller indirekt bidrar till de båda barriärfunktionerna inneslutning och fördröjning.

SSM konstaterar att de två barriärfunktionerna verkar enligt olika principer men eftersom båda påverkas av gemensamma omgivningsfaktorer som grundvattenflöde och grundvattenkemi är de bara delvis oberoende av varandra. De båda barriärfunktionerna kompletterar dock varandra i hög utsträckning. För ett stort antal sorberande radioaktiva ämnen medför kombinationen gynnsamma sorptionsegenskaper och radioaktivt sönderfall försumbar omgivningspåverkan oavsett om den verksamma barriärfunktionen är inneslutning eller fördröjning. Betydande riskbidrag i riskanalysen orsakas av endast ett fåtal radioaktiva ämnen med lång halveringstid och/eller ingen eller mycket begränsad sorptionsförmåga. Enbart barriärfunktionen inneslutning kan helt eliminera dessa bidrag till risk. Nuklider som bidrar till risk tillhör grupperna långlivande fissionsprodukter, långlivade aktiveringsprodukter eller vissa dotternuklider i sönderfallkedjor. Det bör noteras att osannolika händelser samtidigt kan inverka negativt på båda barriärfunktionerna, så som exempelvis stora jordskalv.

Förutom de grundläggande barriärfunktionerna inneslutning och fördröjning har SKB definierat säkerhetsfunktioner för individuella barriärer för att analysera förutsättningar för uppfyllelse av de grundläggande barriärfunktionerna (SR-Site huvudrapport, figur 8-2). SSM anser att dessa förtydligar de enskilda barriärernas funktioner och betydelse i slutförvarssystemet. De bidrar dock inte till slutförvarets skyddsförmåga utöver deras påverkan på grundläggande barriärfunktioner.

SSM bedömer att berggrunden vid Forsmark har fördelaktiga egenskaper för att kunna innesluta det använda kärnbränslet. Det beror främst på förekomst av en låg frekvens av vattenförande sprickor på förvarsdjup samt att den nuvarande grundvattenkemin på planerat förvarsdjup bedöms främja de tekniska barriärernas beständighet. Bergets egenskaper har en stor betydelse med tanke på dess dubbla funktioner att dels fungera som en barriär för radionuklider som av något skäl och vid någon tidpunkt passerat de tekniska barriärerna, dels bidra med gynnsamma betingelser för att långsiktigt upprätthålla de tekniska barriärernas funktion. Stabila geologiska förhållanden bidrar också till att berget kan behålla sina barriärfunktioner under en lång tid efter förslutningen. Förläggning av slutförvaret på stora djup i berggrunden vid Forsmark är också fördelaktigt med tanke på



behovet av att förhindra att människor avsiktligt eller oavsiktligt kommer i kontakt med det använda kärnbränslet som resultat av deras handlingar eller aktiviteter.

SSM bedömer sammanfattningsvis att var och en av de tre barriärerna berg, kapsel och buffert på ett betydelsefullt sätt bidrar till långsiktig strålsäkerhet för ett slutförvar enligt KBS-3-konceptet, och att de huvudsakliga barriärfunktioner som SKB har analyserat ger förutsättningar för att begränsa slutförvarets omgivningskonsekvenser. Därmed anser SSM att det finns förutsättningar för att uppfylla föreskriftskravet.

4.3 Rapportering om brist i barriärfunktion

4.3.1 Krav

4 § SSMFS 2008:21 *En brist i någon av slutförvarets barriärfunktioner, som konstateras under tiden slutförvaret är under uppförande eller driftövervakas, och som kan komma att försämra säkerheten efter förslutningen utöver vad som förutsetts i säkerhetsredovisningen¹, ska utan onödigt dröjsmål rapporteras till Strålsäkerhetsmyndigheten. Detsamma gäller om det uppstår misstanke om en sådan brist eller om att en sådan brist kan komma att uppstå i framtiden.*

4.3.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att det finns förutsättningar att uppfylla detta föreskriftskrav men att detta krav har sin relevans främst för bedömning av SKB:s arbete under slutförvarets uppförande- och driftfas. SSM kan dock redan nu konstatera att SKB för att kunna uppfylla detta föreskriftskrav behöver vidta vissa åtgärder för att kunna utvärdera och verifiera barriärfunktioner både kopplade till tekniska barriärer och den naturliga barriären. SKB behöver kunna ge fortlöpande underlag för utvärdering av slutförvarets barriärer och barriärfunktioner under kommande steg i slutförvarsprogrammet.

Kravet syftar också till behovet av att följa vetenskapliga rön samt drifterfarenheter från SKB:s anläggningar respektive andra liknande anläggningar i världen. Det främsta syftet med kravet är att kunna identifiera omständigheter som hittills varit okända eller som skulle kunna ha en större påverkan än förväntat på slutförvaret. SSM bedömer att den stegvisa processen med återkommande granskningar av säkerhetsredovisningar vid uppförande, provdrift och drift av slutförvarsanläggningen kommer att ge möjlighet till uppföljning samt tillämpning av detta krav.

Kravet innebär att konstruktionsförutsättningar kopplade till långsiktig strålsäkerhet som gäller anläggningsdelarna som byggs under uppförandet av slutförvaret och valet av det lämpligaste förvarsdjupet enligt principen för optimering samt bästa möjliga teknik behöver utvärderas och följas upp under uppförandet. Detta innebär att SSM behöver ta del av planer och program som visar hur information insamlas, utvärderas och bedöms med hänsyn till brister eller misstankar om brister i slutförvarsbarriärerna. Detta kommer att utgöra ett underlag för myndighetens tillsyn under uppförandet.

¹ Jfr. 4 kap. 2 § Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar.



5. Optimering och bästa möjliga teknik (BMT)

5.1 Optimering, BMT samt kollektivdos

5.1.1 Krav

4 § SSMFS 2008:37 *Vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall ska optimering ske och hänsyn tas till bästa möjliga teknik. Kollektivdos på grund av förväntat utläckage av radioaktiva ämnen under 1000 år efter förslutningen av ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall ska beräknas som summan över 10000 år av den årliga kollektivdosen. Beräkningen ska redovisas i enlighet med 10-12 §§.*

5.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s föreslagna användning av KBS-3-konceptets flerbarriärsystem med kopparkapsel med segjärnsinsats, buffert av bentonitlera samt goda bergförhållanden på cirka 500 m vid Forsmarksplatsen i tillräcklig utsträckning beaktar kravet på bästa möjliga teknik och optimering. Materialval, dimensionering av tekniska barriärer och förvarslayout bedöms vara lämpliga med beaktande av konstaterade betingelser vid Forsmarksplatsen och kravet på bästa möjliga teknik. SSM konstaterar därför att det finns förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet.

SSM bedömer att Forsmarksplatsen har förutsättningar att förhindra, begränsa och fördröja utsläpp av radioaktiva ämnen så långt som rimligen möjligt. Bergets skyddsförmåga på avsett förvarsdjup beror främst på en begränsad förekomst av vattenförande sprickor och grundvattenkemiska betingelser som främjar de tekniska barriärernas långsiktiga beständighet. Lämpliga grundvattenkemiska betingelser avser i detta fall ett grundvatten med förhållandevis hög jonstyrka, låga sulfidhalter och förhållandevis låga halter av reaktivt löst organiskt material. Den låga frekvensen av vattenförande sprickor på förvarsdjup innebär enligt SKB:s platsbeskrivande och hydrogeologiska modeller att en majoritet av alla deponeringshål inte kommer att korsas av vattenförande sprickor och endast ett mindre antal deponeringshål blir exponerade för grundvattenflöden i samband med infiltration av meteoriska vatten samt smältvatten i samband med kommande glaciationer. Det sistnämnda har betydelse främst för att begränsa risken för erosion av bufferten. SSM anser att SKB:s platsundersökningar har gett en för detta steg i prövningen tillförlitlig bild av förhållanden i de bergvolymerna som är avsedda för slutförvaring. Det finns dock ett behov av ytterligare undersökningar för att verifiera och vidareutveckla platsbeskrivande modeller i samband med en kommande konstruktionsfas. Det kvarstår bland annat frågeställningar kring bergspänningar samt spricknätverkets detaljerade geometri och egenskaper.

SSM bedömer att egenskaperna hos Forsmarksplatsen med förhållandevis tätt berg bidrar till kopparkapslarnas och buffertarnas funktion genom förhållandevis liten materieöverföring. Detta innebär avsaknad av grundvattenflöde för flertalet positioner i berget utan vattenförande sprickor samt begränsat grundvattenflöde för övriga positioner i berget. Dessa egenskaper hos berget bidrar till de tekniska barriärernas beständighet genom att det finns naturliga förutsättningar för begränsning av degraderingsprocesser. Dessa förutsättningar innefattar långsam transport av exempelvis korroderande ämnen, korrosionsprodukter, utspädda grundvatten respektive potentiellt bildade bentonitkolloider. I fall kopparkapselns inneslutande förmåga av någon känd eller okänd anledning upphör att fungera som barriär i slutförvaret bidrar berget vid Forsmark på ett betydande sätt även till barriärfunktionen fördröjning. Detta genom långsammare spridning av radioaktiva ämnen från slutförvarets närområde till markytan och biosfären från positioner i berggrunden med tätt berg i jämförelse med ett mer normalsprickigt berg. Sannolikt går det av praktiska skäl emellertid inte att helt undvika förekomst av ett mindre



antal deponeringshålspositioner med mera betydande grundvattenflöden, vilket kan resultera i mera omfattande kapselkorrosion och bufferterosion samt i en förlängning snabbare spridning av radioaktiva ämnen. Det krävs en anpassning av slutförvarets utformning och utförlig analys av egenskaper för dessa deponeringshålspositioner för att säkerställa en så hög skyddsförmåga som möjligt.

Olämpliga positioner i berggrunden innefattar inte enbart höga grundvattenflöden utan även förekomst av större strukturer i berget som kan hysa betydande skjuvrörelser i samband med stora jordskalv, vilket kan skada de tekniska barriärerna. SSM bedömer att SKB:s föreslagna åtgärder för att minimera risk för konsekvenser från ett jordskalv är att betrakta som bästa möjliga teknik. Dessa åtgärder innefattar en selektiv deponeringshålsplacering för att undvika utsatta positioner i berggrunden och utformning av tekniska barriärer med tålighet för skjuvrörelser upp till ett visst maximalt belopp. SSM konstaterar dock att SKB:s angreppssätt behöver vidareutvecklas och justeras för att utförligare motivera och uppskatta skalvfrekvenser, ta hänsyn till den mänskliga faktorn vid uppförande av slutförvaret och utvärdera barriärernas tålighet med beaktande av variationer hos materialegenskaperna för kapsel och buffert.

Förutom platsvalet är SKB:s föreslagna gradvisa platsanpassning av slutförvaret ett viktigt inslag för att uppfylla kravet på bästa möjliga teknik för att så långt som möjligt förhindra, begränsa och fördröja utsläpp av radioaktiva ämnen. Här ingår val av förvarsdjup, orientering och placering av deponeringstunnlar samt val av positioner i berget för deponeringshåll. Beträffande förvarsdjupet anser SSM att SKB:s föreslagna djupintervall är godtagbart, men att en utförligare optimeringsanalys behöver genomföras när mera information finns framme efter konstruktion av tillfartsvägar ner till förvarsdjup. Bästa möjliga teknik skulle kunna innefatta ett större djup, eftersom skyddsförmåga i vissa avseenden påverkas positivt av ett längre avstånd till markytan. Det är dock i slutändan fråga om en avvägning mellan olika faktorer.

Beträffande deponeringstunnlarna är bästa möjliga teknik, enligt SSM:s bedömning, avhängigt av en orientering av tunnarna nära parallellt med den största horisontella huvudspänningsriktningen i berggrunden samt tillämpning av respektavstånd från deformationszoner i berggrunden. Dessa åtgärder behöver vidtas för att i största möjliga utsträckning minimera mekaniska skador i tunnelväggarna och sulan samt för att begränsa påverkan från eventuella större skjuvrörelser längs närliggande deformationszoner. SSM anser även att SKB:s planerade principer för urval av deponeringshålspositioner preliminärt baserat på det så kallade EFPC-kriteriet för att undvika stora sprickor samt ett inflödeskriterium är att betrakta som bästa möjliga teknik och av betydelse för att optimera förvarets skyddsförmåga. SSM anser att ytterligare utvärdering och vidareutveckling av dessa principer behöver göras eftersom degraderingsprocesser för de tekniska barriärerna påverkas markant av lokala förhållanden i berggrunden. Det bör noteras att urvalsprinciperna inte nödvändigtvis säkerställer en viss spännvidd av förhållanden i slutförvaret, eftersom deponeringshålspositioner i berg som saknar vattenförande sprickor under uppförandefasen i viss utsträckning kan komma att få det efter förslutning på grund av bergmekaniska effekter. Sprickornas transmissivitet kan också både öka och minska till följd av bergmekaniska effekter. På korta avstånd från förvarsutrymmenas bergväggar kan en påverkan förekomma så som spjälkning av deponeringshålets väggar och bildandet av en störd zon i tunnelväggarna. Påverkan förväntas avta snabbt på längre avstånd.

SSM bedömer generellt att täta bergförhållanden vid Forsmark har betydande fördelar i perspektivet långsiktig strålsäkerhet efter slutlig förslutning och att dessa förhållanden generellt förstärker både bergbarriären och slutförvarets övriga barriärfunktioner. Ett antal frågeställningar kring utveckling av förvarsförhållanden för tätt berg behöver dock särskilt



uppmärksamhet på grund av transienta förhållanden som sker efter förslutning tills grundvattenförhållanden vid Forsmarksplatsen har återetablerats till sitt ursprungliga tillstånd. Dessa frågeställningar behöver inte innebära en negativ påverkan på den långsiktiga strålsäkerheten men de skulle kunna ha det. Frågorna kräver därför ytterligare insatser i kommande steg i SKB:s program. Till dessa hör en mera detaljerad analys av tidsskalor för återmättnad av buffert och återfyllnad. I samband med långa återmättnadstider och tider för utveckling av svälltryck förväntas exempelvis en långsam deformation av kopparhöljet äga rum. SSM anser att långsam deformation av kopparhöljet medför att en detaljerad förståelse för krypmekanismer i kopparhöljet får en ökad betydelse.

Det kan finnas förutsättningar för en mikrobiell sulfatreduktion vid avsaknad av svälltryck och vid en mycket långsam uppbyggnad av svälltryck i samband med långsam återmättnad. Detta kan ha en inverkan på degraderingsprocesser så som vissa typer av lokal kopparkorrosion som kan kopplas till närvaron av en gasfas. Enligt SSM:s uppfattning behöver denna typ av processer därför utvärderas med högre detaljeringsgrad i kommande steg av SKB:s program. En utökad scenarioanalys och ytterligare utredningar kring processer kopplade till täta bergförhållanden och en långsam återmättnad av i första hand bufferten förväntas på sikt ge ett underlag för en slutlig bedömning av påverkan av den transienta inledande fasen.

Förutom uppfyllelse av krav på tillämpning av bästa möjliga teknik innefattar föreskriftskravet att en optimering av slutförvarets skyddsförmåga ska göras med utgångspunkt i de riskbidrag som har kvantifierats i riskanalysen. Resultaten från en sådan optimering kan exempelvis visa att en viss förvarsutformning är optimal med beaktande av riskbidrag från olika typer av händelser och processer. Optimeringen kan även visa vilka åtgärder och justeringar av slutförvarskonceptet som är mest effektiva för att så långt som ekonomiskt rimligt reducera dos och risk. SSM konstaterar att SKB:s genomförda analyser av detta slag är knapphändiga och endast avser ett fåtal aspekter av långsiktig strålsäkerhet. Beräkningar kopplade till dimensionering av korrosionsbarriären respektive ett antal osäkerhetsanalyser för det så kallade advektion-korrosionsfallet har dock genomförts. I dessa studier modellerades inverkan av kapseltjocklek och betydelsen av olika typer av urvalskriterier för val av deponeringspositioner med avseende på antal beräknade kapselbrott efter en miljon år. Osäkerhetsanalyser för advektion-korrosionsfallet avser för närvarande konceptuella osäkerheter kopplade till bufferterosion och hydrogeologi snarare än konkreta åtgärder kopplade till uppförandefasen.

SSM anser emellertid att en generell optimering av slutförvarssystemet avser även exempelvis driftsrelaterade frågor som inte nödvändigtvis behöver baseras på beräkningar av dos/risk. En sådan generell optimering har genomförts i olika sammanhang under SKB:s hittillsvarande arbete och bedöms även ha en betydelse i kommande steg av SKB:s program. I många fall styrs utformningen av slutförvaret av faktorer som inte direkt kan relateras till dos/risk och som inte utan vidare kan kvantifieras och modelleras inom ramen för en riskanalys. SSM anser därför att SKB:s begränsade användning kvantitativa optimeringsanalyser baserad på dos/risk är rimliga med tanke på ramen för detta prövningssteg. I senare steg av slutförvarsprogrammet inför en eventuell idrifttagning när ytterligare information finns tillgänglig från förhållanden på förvarsdjup, och från provtillverkning av slutförvarskomponenter anser dock SSM att andra relevanta frågeställningar behöver identifieras och analyseras. Ett exempel på en sådan tänkbar optimeringsanalys som har berörts ovan avser val av förvarsdjup.

SSM har i detta prövningssteg fäst störst avseende vid processer, händelser och egenskaper som kan leda till utsläpp av radioaktiva ämnen under de första 100 000 åren. Tider efter 100 000 år har inte granskats med samma detaljeringsgrad och bedöms ha en

mindre betydelse för bedömningen av SKB:s ansökan. Även om riskkriteriet inte har samma dignitet för tider efter 100 000 år som för tiden före, så kvarstår kravet att analysera dos/risk med syftet att identifiera möjliga åtgärder för att förbättra slutförvarets skyddsförmåga och säkerställa uppfyllelse av kravet på bästa möjliga teknik. SSM anser att ytterligare analyser i kommande steg av SKB:s program som omfattar dos/risk för tider före 100 000 år till stöd för bedömning av kravuppfyllelse i förhållande till riskkriteriet, även behöver innefatta tider efter 100 000 år fram till en miljon år. Dessa beräkningar behöver ge ett stöd för utvärdering av bästa möjliga teknik/optimering, vilket bör ske etappvis efter perioder då information av betydelse för utvärderingen av långsiktig strålsäkerhet gradvis tillkommer.

SSM anser att SKB:s analys av kollektivdos är godtagbar och konsekvent med SSM:s egna analyser. Det enda scenariot som inkluderar utsläpp av radioaktiva ämnen under de första 1000 åren är ett ur statistisk mening litet utsläpp från kapslar får stora skador pga. berggrörelser orsakade av jordskalv i närheten av slutförvaret. Utsläpp av radioaktiva ämnen domineras av kol-14. SSM konstaterar att kollektivdos har en mindre betydelse för bedömning av SKB:s analys, eftersom beräknade risker för utsläpp av radioaktiva ämnen under de första 1000 åren av ett flertal orsaker är mycket små för att därefter gradvis öka under säkerhetsanalysens tidsperioder. Skulle andra tänkbara scenarier som i någon sträckning involverar risk för tidiga utsläpp av radioaktiva ämnen behöver dock frågan om kollektivdos tas upp på nytt och utvärderas med högre detaljeringsgrad.

En diskussion av bästa möjliga teknik i perspektivet av barriärsystemets detaljerade utformning med avseende på föreskriftkrav SSMFS 2008:21 § 6 redogörs för nedan och krav på bästa möjliga teknik enligt miljöbalken finns beskrivet i granskningsrapport *Systemövergripande frågor*.

5.2 Utformning med hänsyn till BMT

5.2.1 Krav

SSMFS 2008:21 6 § Barriärsystemet ska konstrueras och utföras med hänsyn till bästa möjliga teknik².

5.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser att KBS-3-metodens tekniska barriärer bestående av en kopparkapsel med en segjärnsinsats samt den omgivande bufferten av bentonitlera har förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet. SSM avser dock att ställa krav på ett betydande fortsatt utvecklingsarbete innan utformning, tillverkning och provning av dessa förvarskomponenter kan anses vara helt färdigutvecklad och tillräckliga för slutförvarets driftsfas.

SSM bedömer att även andra komponenter i konceptet som SKB har utvecklat och som kan betraktas som delar av barriärsystemet har förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet. Till dessa hör det omgivande berget som visserligen inte är påverkbart efter platsvalet men konkreta åtgärder kan ändå vidtas för att förbättra skyddsförmågan. Detta gäller exempelvis vid planering av slutförvarets layout, vid placering och orientering av deponeringstunnlar i förhållande till deformationszoner, vid val av förvarsdjup, begränsning av bergskadezonen EDZ ("Excavation Damaged Zone") samt vid placering av deponeringshål i förhållande till stora och/eller vattenförande sprickor i berggrunden. Även andra tillverkade komponenter i slutförvaret kan betraktas som delar av barriärsystemet då de har en påverkan på slutförvarets strålsäkerhet före respektive efter den slutliga förslutningen, så som återfyllning av deponeringstunnlar med block och

² Jfr. 2 kap. 3 § miljöbalken



pellets av bentonitlera, pluggar tillverkade av cement i änden av deponeringstunnlarna, återfyllning av transport- och huvudtunnlar samt förslutningen av tillträdesvägar till förvaret.

Denna fas av myndighetens prövning och granskning av barriärsystemet avser SKB:s nuvarande referensutformning och inte ett ställningstagande till en slutlig utformning av slutförvaret och dess komponenter för användning i drift. SSM anser det vara nödvändigt att SKB fullt ut utnyttjar möjligheten att under en uppförandefas vidareutveckla och förbättra barriärsystemet baserat på tillkommande information inklusive nya resultat från vetenskapssamhället i stort, samt resultat både från denna granskning och från SSM:s kommande granskningar. Detta förväntas innebära en vidareutveckling och ytterligare konkretisering av den nuvarande referensutformning som SKB har specificerat i ansökan. I etablerandet av slutförvarets initiala tillstånd ingår exempelvis att med en gradvis ökande detaljeringsgrad specificera materialval, dimensionering av slutförvarskomponenter, tillåtna toleranser vid tillverkning, val av tillverkningsmetoder, tunneldrivning och slutförvarets layout, detaljutformning av komponenter, kravställning och karaktärisering av materialegenskaper och materialsammansättning, oförstörande och förstörande provning samt driftsfrågor.

SSM anser att vissa val som gjorts är grundläggande för KBS-3-metoden och därför betraktas som en grundförutsättning för kommande steg i SKB:s program. SSM bedömer att dessa i synnerhet är: (i) val av koppar som korrosionsbarriär, (ii) användning av en lastbärande insats för att uppnå kapselns mekaniska integritet, (iii) val av bentonitlera för buffert och återfyllnad samt (iv) val av ungefärligt förvarsdjup cirka 400-700 m. Om behov av betydande ändringar av dessa grundförutsättningar av något skäl skulle uppkomma kan det komma att krävas en ny tillståndsprovning samt omfattande forsknings- och utvecklingsinsatser innan SKB:s program skulle kunna övergå i en implementeringsfas.

SSM bedömer att SKB:s materialval för tekniska barriärer som inkluderar koppar, segjärn och bentonitlera enligt referensutformningen är lämpliga med beaktande av platsförutsättningar vid Forsmark och är att betrakta som bästa möjliga teknik. Enligt SSM finns det förutsättningar att åstadkomma en godtagbar korrosionsbarriär med ett 50 mm tjockt kopparhölje. Detta baserat på befintlig kunskap om processer som kopparkorrosion med kvarvarande syre, sulfidkorrosion, anoxisk korrosion av koppar i syrgasfritt vatten, strålninginducerad korrosion, mikrobiell sulfatreduktion, diffusion i bentonitlera, fördelning av grundvattenflöde samt grundvattenkemiska betingelser i berggrunden vid Forsmark. SSM anser att användning av en korrosionsbarriär av koppar i samverkan med andra barriärer och med beaktande av i huvudsak välkända betingelser i slutförvarsmiljön vid Forsmark är lämplig och i tillräcklig utsträckning bidrar till slutförvarets skyddsförmåga. Det finns fortfarande frågor kopplade till korrosionsprocesser som behöver belysas ytterligare i kommande steg av slutförvarsprogrammet, men dessa frågor bedöms inte vara avgörande i detta steg. Det finns andra alternativa material som utgör tänkbara materialval för korrosionsbarriären, men det skulle med all sannolikhet vara både svårt och mycket tids- och resurskrävande att visa att något alternativt material är uppenbart bättre än koppar för ett slutförvar vid Forsmark. SSM anser därför att ett kopparhölje med en tjocklek av 50 mm är att betrakta som bästa möjliga teknik. Den betydande kapseltjockleken på 50 mm bidrar till tålighet i förhållande till ett brett spektrum av korrosionsprocesser.

Beträffande kapselinsatsen av segjärn som SKB har utvecklat bedömer SSM att skadetålighet och marginaler mot plastisk kollaps i samband med isostatiska lastfall är god. SSM bedömer även att det finns förutsättningar att uppnå tillräckligt goda materialegenskaper med avseende på skjuvlastfallet. Här har dock vissa kvarvarande



frågor med avseende på den variation av materialegenskaper som påvisats i samband med den av SKB genomförda provtillverkningen en större betydelse, vilket behöver uppmärksammas i kommande steg. Det är viktigt att kvarvarande osäkerheter blir omhändertagna så som spridningen i brottseghetsdata för segjärnsinsatsen, eventuell förekomst av inre defekter som är svåra att kvalificera i en kvalificeringsprocess för oförstörande provning samt verifikation av tillverkningskrav med utgångspunkt från enbart mikrostruktur och provtagning i insatsens övre delar. SSM bedömer dock att SKB genom ytterligare utvecklingsarbete och provtillverkning kan ta fram erforderligt underlag inför kommande säkerhetsanalyser. Den av SKB föreslagna insatsen tillverkad genom gjutning bedöms ha förutsättningar att uppfylla kravet på bästa möjliga teknik eftersom marginaler mot plastisk kollaps i samband med isostatiska lastfall är förhållandevis god. Det är vidare möjligt att begränsa konsekvenser från eventuella jordskalv genom att optimera hela barriärsystemet som förutom kapseln även involverar buffertens densitet samt urvalskriterier för deponeringshålspositioner. SSM bedömer att bästa möjliga teknik inkluderar användning av oförstörande provning (OFP) för både BWR- och PWR-insatser. Eventuella kvarstående osäkerheter med avseende på insatsernas materialegenskaper bör möjligen hanteras med probabilistiska metoder. SKB har ännu inte tagit fram karaktäristik för defekter i insatsen utifrån ett OFP-perspektiv, men SSM bedömer att SKB kan ta fram den eftersökta informationen efter ytterligare utvecklingsarbete.

SKB motiverar användning av en buffert tillverkad av bentonitlera dels med utgångspunkt från barriärfunktionen inneslutning och möjligheten att bl.a. eliminera mikrobiell aktivitet och advektiv transport i anslutning till kapselytor, dels med utgångspunkt från dess bidrag till barriärfunktionen fördröjning av radionuklider i fall att kapselns inneslutande förmåga har upphört att fungera. Bentonitleran i återfyllnaden har enligt SKB:s specifikationer mindre långtgående funktionskrav men innefattar att begränsa grundvattenflöde och förhindra en för stor inträngning av buffertmaterial. SSM anser att användning av bentonitlera både som buffert och återfyllnad är att betrakta som bästa möjliga teknik under förutsättning att materialvalet innefattar krav på tillräckligt hög smektithalt så att svälltryck kan upprätthållas i tillräcklig omfattning även efter vissa materialomvandlingar. Bentonitlera har varit föremål för omfattande undersökningar inte bara i det svenska kärnavfallsprogrammet utan i flera andra länder med slutförvarsprogram under lång tid. Det skulle sannolikt vara mycket svårt och resurskrävande att ta fram ett alternativt material med lika goda eller bättre egenskaper för slutförvarssammanhanget. För att så långt som möjligt reducera vissa möjliga korrosionsangrepp på kopparkapseln kan bästa möjliga teknik, förutom krav på smektithalt, komma att innefatta även andra krav på materialvalet så som att halter och förekomstformer av organiskt material behöver specificeras och begränsas. Erosionsbeständighet behöver också beaktas vid materialvalet. Med tanke på att jonbytesreaktioner kommer att äga rum för bentonitmaterial i anslutning till vattenförande sprickor är det dock tveksamt om stora skillnader för olika bentonittyper kan påvisas i detta avseende.

SSM anser att det är rimligt att kraven på återfyllnadsmaterialet är lägre än för buffertmaterialet med tanke på att återfyllnadens funktionskrav generellt är mindre långtgående och har en mindre säkerhetsbetydelse. Mikrobiell sulfatreduktion i återfyllnaden behöver dock kunna begränsas för att så långt som möjligt undvika kapselkorrosion i omättade deponeringshåll. Val av buffertens densitet är en viktig fråga för optimering av buffertens säkerhetsfunktioner. En tillräckligt hög densitet är viktig för att eliminera/reducera mikrobiell aktivitet samtidigt som en allt för hög densitet innebär större risk för kapselbrott i samband med skjuvlastfallet. Det krävs ytterligare studier kring hur en lämplig och homogen densitet för både buffert och återfyllnad åstadkoms i verkliga deponeringstunnlar med användning av pressade block och pellets samt efter beaktande av förvarsutrymmenas faktiska geometrier med oregelbundna bergväggar.

Beträffande slutförvarets utformning utgör inplaceringen i djupled en viktig faktor. När väl ett platsval har genomförts utgör val av förvarsdjup tillsammans med planering av förvarslayouten kvarstående möjligheter att påverka slutförvarets skyddsförmåga. SSM anser att bästa möjliga teknik för ett slutförvar vid Forsmarksplatsen i detta avseende utgör ett förvarsdjup på minst det djupintervall på 450 - 500 m som SKB har specificerat i ansökan. För mera ytligt belägna förvar har SKB visat på förekomst av en högre sprickfrekvens på grundare djup. En sådan inplacering skulle försämra skyddsförmågan i perspektivet degradering av de tekniska barriärerna via mera omfattande erosion av bufferten och korrosion av kapseln, och också medföra mera begränsad fördröjning av radioaktiva ämnen om kapselns täthetsfunktion fallerar. Ett djupare förvar än vad SKB föreslår skulle kunna medföra en förbättrad skyddsförmåga tack vare en lägre risk för utspädning av grundvatten på förvarsdjup, minskad risk för att slutförvaret påverkas av permafrost, lägre grundvattenflöden samt längre transportvägar från läckande kopparkapslar till biosfären. Det finns dock även betydande nackdelar såsom försämrade förutsättningar för konstruktionsarbeten till följd av högre bergsspänningar på större djup. Enligt SSM:s bedömning har SKB visserligen hanterat bergspänningssituationen pessimistiskt i sin nuvarande analys, men detta kan troligen inte fastställas förrän tillfartsvägarna har färdigställts. SSM anser att SKB i kommande steg av sitt program behöver på ett grundligare sätt baserat på en optimeringsanalys motivera val av förvarsdjup med hjälp av bland annat uppdaterad information om bergspänningssituationen. SSM anser att det är rimligt att i en sådan analys beakta att ett större förvarsdjup är förknippat med ökade kostnader på grund av att konstruktionsarbeten försåras och att deponeringstunnlarna inte kan utnyttjas lika effektivt med tanke på högre omgivningstemperaturer.

Förutom de mest grundläggande frågorna kring materialval för de tekniska barriärerna och kring förvarsdjupet anser SSM att kopparkapselns tillverkning och detaljutformning utgör en av de frågeställningar som har betydelse för bedömning av förutsättningar att uppfylla kravet på bästa möjliga teknik. Kapselns nuvarande tillverkning och detaljutformning kan inte anses vara definitivt fastställd och kan i viss omfattning komma att justeras i kommande steg av SKB:s program. SSM anser att tillverkningsmetoderna extrusion och smidning kan preliminärt anses vara godtagbara och har förutsättningar för att uppfylla krav på bästa möjliga teknik för tillverkning av kopparkapseln. Det finns dock ett flertal frågeställningar som ytterligare behöver belysas så som hur homogen fosforhalt kan verifieras, vilka åtgärder som behövs för att eliminera/minimera förekomst av oxidföreningar, samt fastställande av kravbilderna för defekter i kapselns komponenter. För avslutning av kopparkapseln har SKB utvecklat en variant av friktionsomrörningssvetsning som bedöms vara lämplig för ändamålet. SSM anser dock att en viktig fråga för friktionsomrörningssvetsning är att sammanhängande oxidstråk har detekterats i svetsfogen vid provtillverkning. Sådana oxidstråk kan i samband med väteupptag efter kapseldeponering medföra en påverkan på kapselns skyddsförmåga i samband med både deformation och korrosion. SKB har dock utvecklat sin svetsmetod genom användning av skyddsgasen argon som kan begränsa förekomst av oxider i svetsfogen. Metodens effektivitet och tillförlitlighet behöver dock vidareutvecklas och förbättras i kommande steg av SKB:s program. SKB behöver också fortsätta studier av degraderingsmekanismer som kan kopplas till oxidförekomster. Digniteten av sådana studier påverkas delvis av i vilken omfattning svetsfogens innehåll av oxider kan minimeras. SSM anser att även svetsmetoden har förutsättningar att uppfylla kravet på bästa möjliga teknik.

SKB:s kapselutformning har baserats på att kopparkapseln kan deformeras via kryp då yttre tryck anbringas på kapseln. Det bör dock framhållas att det finns vissa osäkerheter kring koppars krypduktilitet och tålighet mot krypdeformation. SSM betraktar inte frågan som avgörande i detta prövningssteg men SSM avser ställa krav på att inverkan av dessa



osäkerheter kartläggs och minimeras genom ett långsiktigt provnings- och utvecklingsprogram som bland annat innefattar studier av krypmekanismer, provtillverkning av kapselkomponenter, modellering av höljets deformation, och fortsatt optimering av kapselns utformning.

6. Konstruktion och utförande samt intrång och tillträde

6.1 Tålighet

6.1.1 Krav

SSMFS 2008:21 5 § *Barriärsystemet ska ha tålighet mot sådana förhållanden, händelser och processer som kan påverka barriärernas funktioner efter förslutningen.*

6.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning och analys kring barriärsystemets långsiktiga integritet ger ett tillräckligt underlag för att konstatera att ett barriärsystem bestående av kopparkapsel, bentonitbuffert och berg vid Forsmarksplatsen har förutsättningar att uppfylla SSM:s föreskriftskrav kopplat till barriärsystemets tålighet. De tekniska barriärerna behöver inte vara bestående i absolut mening för att föreskriftkravet skall kunna anses vara uppfyllt. Utformning och materialval behöver dock vara lämpligt med avseende på faktiska förhållanden på förvarsdjup liksom med avseende på händelser och processer. Det behöver visas att var och en av barriärerna på ett väsentligt sätt bidrar till förvarets långsiktiga skyddsförmåga. I detta avsnitt görs en genomgång av tålighet i följande perspektiv:

- barriärernas samlade betydelse
- Forsmarksplatsens betydelse
- inverkan av en eller flera fallerade barriärer
- de viktigaste frågorna för de enskilda tekniska barriärernas tålighet

För en bedömning av barriärsystemets tålighet krävs kunskaper om varje enskild barriärs tålighet samt hur barriärerna samverkar för att upprätthålla slutförvarets skyddsförmåga. Det finns dock osäkerheter med avseende på enskilda barriärers utveckling som är svåra att helt eliminera särskilt för extremt långa tider. Utvärdering av systemets tålighet genom analys av barriärdegradering och konsekvensanalys pekar dock på att systemets tålighet i sin helhet är godtagbart även om enskilda barriärers skyddsförmåga i viss utsträckning skulle visa sig vara sämre än vad som förutsätts i SKB:s analys. Sammantaget bedömer SSM att barriärsystemet bestående av tekniska barriärer och den naturliga bergbarriären är tillräckligt robust. Fall med stora omgivningskonsekvenser avser situationer i vilka mer än en barriär fallerar eller visar sig ha en väsentligt sämre skyddsförmåga än förväntat. Analys av konsekvenser av att enskilda barriärer eller kombinationer av barriärer helt förlorar sina barriärfunktioner har genomförts av SKB och detta gör det möjligt att få en grundläggande förståelse för hur de olika barriärerna både ensamt och i samverkan med varandra bidrar till slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet.

SSM:s slutsats om tålighet ovan har också baserats på resultat från platsundersökningsfasen bl.a. att frekvensen av vattenförande sprickor i avsedda bergvolymen vid Forsmark är låg, samt att en överlag gynnsam grundvattenkemisk miljö för de tekniska barriärernas beständighet och för fördröjning av flertalet radioaktiva ämnen har kunnat verifieras. Förutom grundvattenflöden och kemiska förhållanden behöver mekaniska laster i berggrunden också beaktas vid bedömning av tålighet eftersom dessa förhållanden berör kapselns mekaniska integritet. Dessa är dock delvis relaterade till yttre händelser så som kommande istider snarare än till platsvalet.



Förutsättningarna för de tekniska barriärernas beständighet påverkas av lokala bergegenskaper runt omkring deponeringshålen. Olika typer av positioner i berget för deponeringshålen kan t.ex. medföra olika karaktärstik inom riskanalysen:

- helt utan vattenförande sprickor eller stora sprickstrukturer
- med mindre spricka/sprickor som medför ett begränsat grundvattenflöde i direkt anslutning till deponeringshålet
- med större sprickor/strukturer som kan hysa mera betydande grundvattenflöden och/eller hysa berggrörelser i samband med kommande jordskalv

SKB förutsäger att för den förhållandevis täta Forsmarkslinsen kommer en majoritet av deponeringshålen inte ha anslutande vattenförande sprickor medan de flesta övriga deponeringshål kommer att träffas av mindre sprickor med begränsat grundvattenflöde. Deponeringshål med större sprickor är mindre lämpliga och SKB har föreslagit metoder för att så långt som möjligt utesluta denna kategori. Även om sådana deponeringshål i praktiken inte helt kan undvikas så anser SSM att en selektiv placering av deponeringshål är en effektiv metod för att tillgodose barriärsystemets tålighet.

Om deponeringshålen har placerats i en tät berggrund minskar risken för att mer än en teknisk barriär kan falla samtidigt i ett och samma deponeringshål. Fall där en teknisk barriär faller oberoende av den andra inkluderar en tänkt förlust av bufferten eller alternativt kapselbrott med bildning av genomgående sprickor eller hål i kopparhöljet i ett deponeringshål med intakt buffert. Om ett antal enskilda kapselbrott äger rum fördelat över ett långt tidsspänn är sannolikheten mindre för att spridning av radioaktiva ämnen ger upphov till betydande omgivningskonsekvenser än om kapselbrott kan kopplas till diskreta händelser i slutförvarets utveckling. SSM anser att det finns förutsättningar att uppfylla tålighetskravet även för dessa helt hypotetiska fall.

Om deponeringen sker i lämpliga positioner så bidrar även berget i stor utsträckning till barriärsystemets tålighet genom att begränsat grundvattenflöde och långsam transport av läckande radioaktiva ämnen i fall kapselns inneslutande förmåga skulle upphöra. Bergbarriären anses vara betydligt förstärkt i deponeringshålspositioner som inte skärs av vattenförande sprickor. Avsaknaden av direkta förbindelser med omgivande grundvatten innebär att eventuella läckande radionuklider endast kan spridas i långsammare takt via diffusion till sprickor som skär deponeringstunnlar eller möjligen via den så kallade störda zonen i tunnelns bergvägg. I en berggrund med få vattenförande sprickor finns därmed överlag mera gynnsamma förutsättningar för begränsad spridning av eventuella läckande radionuklider i jämförelse med en normalsprickig berggrund.

Enligt SKB:s redovisning kan det inte uteslutas att de båda tekniska barriärerna degraderas i ett och samma deponeringshål och därmed begränsas skyddsförmågan till att enbart omfatta den naturliga barriären. Det mest betydelsefulla fallet för denna situation som har identifierats avser sulfidkorrosion som pågår under lång tid i bergpartier med hög sulfidhalt och höga flöden samt i positioner i berget som också under längre tid har påverkats av utspädd grundvatten och buffererosion. Uppkomsten av sådan dubbel förlust av tekniska barriärer dominerar SKB:s riskanalys. SSM anser dock att det finns förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet även i detta fall så länge som de positioner i berget som kan medföra förlust av de båda tekniska barriärerna på grund av erosion/korrosion så långt som möjligt identifieras och undviks vid utplaceringen av deponeringshål. Denna situation förväntas enbart omfatta ett begränsat antal deponeringshålspositioner. Kvarvarande risk behöver kvantifieras och integreras i riskanalysen.



Det ur perspektivet barriärsystemets tålighet mest betydelsefulla fallet avser situationer där alla tre barriärerna degraderas och/eller påverkas samtidigt av en och samma händelse/process. Det enda kända exemplet på sådana fall i SKB:s redovisning är kapsel haverier som uppstår som ett resultat av stora skjuvrörelser i berget på grund av stora jordskalv i närliggande deformationszoner. Detta fall kan ge upphov till kapselbrott, bildande av snabba transportvägar i berget samt även en reducering av buffertens skyddsförmåga. Ett kapselbrott på grund av jordskalv förväntas därför medföra större konsekvenser än andra fall som har diskuterats ovan. I jordskalvsfallet kan även ett flertal kapslar i direkt anslutning till varandra skadas vid ett och samma tillfälle vilket är mycket osannolikt om kapslar istället fallerar på grund av inre processer eller som påverkas av varierande grundvattenflöden i slutförvarsmiljön. SSM konstaterar dock att det som i många andra sammanhang är på gränsen till omöjligt att helt undvika risk för omgivningskonsekvenser med avseende på extrema händelser med mycket låg sannolikhet. Det är sannolikt inte heller möjligt att utforma och dimensionera barriärsystemet för att helt eliminera risken för skador på ett fåtal tekniska barriärer. SSM anser att tålighetskravet kan uppfyllas genom att vidta åtgärder för att säkerställa gynnsamma materialegenskaper för insatsen, kopparhöljet och bufferten, samt att så långt som möjligt undvika positioner i berggrunden med förhöjd risk för att påverkas av ett jordskalv. Kvarvarande risk efter tillämpning av urvalskriterier för utplacering av deponeringshål, materialprovning, oförstörande provning och hållfasthetsanalyser behöver också beaktas i riskanalysen.

Riskutspädning som ett resultat av en probabilistisk hantering av konsekvenser från jordskalv förväntas inte vara av avgörande betydelse då den kortsiktiga risken kopplat till förekomst av pulsutsläpp är begränsad i förhållande till risk från långsiktiga kontinuerliga utsläpp. SSM anser dock att SKB med ett mera integrerat angreppssätt för modellering av radionuklidtransport kan verifiera detta förhållande på ett tydligare sätt.

SSM:s bedömning med avseende på de enskilda tekniska barriärernas tålighet avser följande frågeställningar:

- kapselns skadetålighet och tålighet mot plastisk kollaps för svälltrycklastfall och isostatisk belastning vid stora islaster
- kapselns skadetålighet och tålighet mot plastisk kollaps i samband med skjuvlaster
- buffertens tålighet mot erosion i samband med installationsfasen samt kemiska omvandlingar
- kapselns tålighet i samband med korrosion vid intakta buffertförhållanden
- buffertens tålighet mot kemisk erosion vid mycket utspädda grundvattenförhållanden
- kapselns tålighet i samband med korrosion vid eroderade buffertförhållanden
- kapselns tålighet mot långsamma krypdeformationer och väteförspädning

Det bör påpekas att föreskriftskravet avser hela barriärsystemet och inte enskilda barriärer. SSM:s bedömning av förutsättningar för kravuppfyllelse avser således systemet som helhet. Bedömningen av de enskilda barriärernas tålighet har dock en betydelse för andra föreskriftskrav förutom tålighetskravet så som kravet kopplat till bästa möjliga teknik (6§ SSMFS 2008:21; 4§ SSMFS 2008:37) och kravet kopplat till skydd av människors hälsa (5§ SSMFS 2008:37).

Kapselns skadetålighet och tålighet mot plastisk kollaps för svälltrycklastfall och isostatisk belastning vid stora islaster

SSM bedömer att SKB:s nuvarande förslag till kapselutformning för BWR- och PWR-kapslar med insats av segjärn och ett kopparhölje har tålighet mot plastisk kollaps av insatsen samt tålighet mot deformationer av kopparhöljet vid de identifierade



konstruktionsstyrande fallen kopplade till buffertens svälltryck och initiala utveckling. Svälltryckslaster uppstår som ett resultat av att bufferten som omger kapseln återmättas med vatten från omgivande berg och sväller i deponeringshålets slutna volym.

SSM anser även att kapseln har tålighet mot de isostatiska laster som är förknippade med höga vattentryck under kommande istider vid den förväntade maximala istäckningen. Istäcket och vattenpelaren i berggrunden under en istid kan under vissa förhållanden öka den isostatiska belastning som kopparkapslarna blir exponerade för. Även vid dessa isostatiska belastningar finns enligt känslighetsanalyser fortfarande förhållandevis goda marginaler mot plastisk kollaps. Realistiska tryckprov har genomförts i nära fullskala. Resultat från dessa har god överensstämmelse med numeriska analyser vilket bidrar till SSM:s tilltro till kapselns tålighet. Om istjockleken närmar sig mycket extrema mindre sannolika värden samtidigt som det finns stora tillverkningsfel i förhållande till segjärnsinsatsens diameter, erhålls dock mindre säkerhetsmarginaler mot isostatisk kollaps av kapseln.

SSM bedömer att skadetåligheten för segjärnsinsatser av både BWR- och PWR-typ får anses vara god med utgångspunkt från analyser av de tvärsnitt i vilka SKB har ansatt defekter. Att tvärsnitten tål så stora defekter beror på att segjärnsinsatsen främst erhåller tryckspänningar vid isostatisk last. Det gör att de acceptabla sprickstorlekarna blir i det närmaste oberoende av segjärnets brottseghet utom inom vissa områden för vilka SKB redovisar något lägre acceptabla sprickstorlekar. Detta pekar sammantaget på att skadetåligheten får anses vara relativt god. SSM anser dock att SKB via en kvalificeringsprocess behöver visa att man har tillgång till oförstörande provning (OFP) vid tillverkningen som förmår att detektera, karaktärisera och storleksbestämma de defektstorlekar som är framtagna i samband med skadetålighetsanalyserna. SSM anser att det isostatiska lastfallet har stor betydelse eftersom fallet på mycket lång sikt berör kapselns tålighet i samtliga deponeringshålspositioner dvs. även de positioner som inte skärs av vattenförande sprickor.

Kapselns skadetålighet och tålighet mot plastisk kollaps i samband med skjuvlaster

SSM bedömer på basis av nuvarande redovisning och detaljutformning för både BWR och PWR kapslar, med segjärnsinsats och kopparhölje med lock och botten, att det finns förutsättningar att påvisa tillräcklig tålighet mot plastisk kollaps vid de skjuvlaster som har specificerats i SKB:s konstruktionsstyrande lastfall. Skjuvlaster kan uppstå vid vissa deponeringshålspositioner i samband med stora jordskalv i deformationszoner i nära anslutning till slutförvaret. De primära rörelserna i dessa zoner kan fortplanta sig till mindre rörelser i sprickor som skär vissa deponeringshål. SSM:s bedömning av skjuvlastfallet har baserats på att det är ett mindre sannolikt lastfall för en individuell kapsel i slutförvaret. Detta beror på en låg årlig sannolikhet för att betydelsefulla skalv kommer att inträffa i just de deformationszoner som ligger närmast slutförvaret. Dessutom även om sådana jordskalv skulle ske är det endast kapslar i begränsad uppsättning deponeringshålspositioner som skulle bli utsatta för denna typ av last. Detta kan jämföras med det isostatiska lastfallet som i princip avser samtliga kapselpositioner. Betydelsen av skjuvlastfallet och vilka marginaler som kommer att erfordras beror delvis på med vilken precision SKB kommer att kunna identifiera och utesluta olämpliga deponeringshålspositioner som kan hysa stora skjuvrörelser.

SSM noterar att skjuvlast som ett resultat av berg rörelser vid jordskalv är både förskjutningsstyrt och deformationsstyrt. Det innebär att om man erhåller lokal plasticering av vissa områden hos kapseln så minskar kapselns styvhet varvid konstruktionen avlastas i dessa områden. Kopparhöljet har inte någon bärande funktion vilket betyder att kopparhöljets tjocklek inte är av avgörande betydelse för kapselns



strukturella integritet vid skjuvlastfallet. SKB har genomfört analyser dels med avseende på en intakt kopparkapsel, dels med avseende på en kapsel för vilken korrosion som omfattar cirka hälften av kopparkapselns tjocklek har ägt rum. SSM konstaterar dock att en bedömning av kapselns deformation som äger rum efter det att kapseln har varit utsatt för betydande korrosion behöver beakta förekomst av väte som diffunderar in i materialet och dess eventuella påverkan på materialegenskaperna.

SSM:s bedömning med avseende på förekomst av en acceptabel tålighet mot plastisk kollaps vid en skjuvlast görs med hänsyn till måttliga töjningar och lokal utbredning av dessa töjningar i kapseln i förhållande till materialkraven på kapselinsatsens brotttöjning. Resultat från en experimentell studie i skala 1:10 som SKB har utfört ger även ett visst empiriskt stöd till denna bedömning. SSM anser dock att det är betydelsefullt att SKB framöver förbättrar redovisningen om hur man med hög tillförlitlighet ska säkerställa tillräcklig brotttöjning i insatsen via den materialprovning och andra undersökningar som planeras i samband med tillverkningen. I det fall stora variationer i insatsens brotttöjningsegenskaper inte kan uteslutas genom att optimera tillverkningsprocessen, behöver dessa variationer explicit omhändertas genom hållfasthetsberäkningar respektive beräkningar av möjligt antal skadade kapslar och därmed i slutändan även i riskanalysen.

SSM anser att bedömning av kapslarnas skadetålighet vid en skjuvlast enligt SKB:s konstruktionsförutsättningar innebär att SKB kan visa, via en kvalificeringsprocess att man med oförstörande provning vid tillverkningen av insatsen förmår detektera, karaktärisera och storleksbestämma de acceptabla defektstorlekar som är framtagna i samband med skadetålighetsanalyserna. De defektstorlekar som behöver detekteras i insatsen, speciellt inre defekter som inte är öppna mot insatsens mantelyta, kan vara hårt styrande och svåra att kvalificera i en kvalificeringsprocess för oförstörande provning efter tillverkningen. SSM anser därför att SKB behöver genomföra ytterligare studier av konsekvensen av yttre laster på kapselns hållfasthet och kopparkapselns täthet om insatsen skulle innehålla större sprickor än vad som SKB hittills har postulerat i skadetålighetsanalyserna. Resultat från hållfasthetsberäkningar respektive beräkningar av möjligt antal skadade kapslar på grund av skjuvlastfallet behöver ligga till grund för en kompletterad riskanalys.

Buffertens tålighet mot initial erosion efter installationsfasen samt kemiska omvandlingar

SSM bedömer att SKB har visat att det finns förutsättningar för att uppnå erforderlig tålighet för bufferten i perspektivet erosion under och direkt efter installationen. SSM anser att den initiala erosionen kan begränsas på ett tillförlitligt sätt med tanke på att utsatta positioner i berget med höga grundvattenflöden går att undvika med en selektiv deponeringshålsplacering. Det är dock viktigt att initial erosion utvärderas och beaktas för det antal av accepterade deponeringshålspositioner med grundvattenflöden över gränsvärdet. SSM ser positivt på att en relation mellan ackumulerad eroderad massa av lermaterial och ackumulerat vatteninflöde har tagits fram. Betydelsefullt är även att det finns ett tröskelvärde för vatteninflödeshastigheten till ett deponeringshål under vilket erosionen inte verkar ske. Dessa resultat har baserats på ett stort antal försök i olika skalor. SSM anser att SKB:s forskning har lett fram till en godtagbar om än delvis empirisk grundläggande processförståelse. SSM bedömer dock att vissa frågeställningar med avseende på buffertens erosionsbeständighet under fältförhållanden behöver vidareutvecklas. Detta gäller bland annat kategorisering av spricknätverkets egenskaper och hydrogeologins inverkan på buffertens integritet.

SSM bedömer att SKB:s redovisning visat att buffertens tålighet i perspektivet kemiska omvandlingar är godtagbar. Grundläggande för denna slutsats är en god teoretisk förståelse av de ingående mineralens tänkbara omvandlingsreaktioner, samt att

modelleringsresultat i rimlig utsträckning visats överensstämma med observationer från laboratorieförsök samt naturliga analogier. Kemiska omvandlingar är i viss utsträckning förväntade i alla deponeringshålspositioner som ett resultat av initial strålning, förhöjd temperatur och materieurbyte med omgivande grundvatten. Det är dock endast om omvandlingsreaktioner fortgår i en större omfattning som buffertens tålighet påverkas. Dessa reaktioner skulle antingen behöva ge upphov till ett kraftigt minskat svälltryck så som efter en omfattande illitisering, alternativt orsaka stora förändringar med avseende på buffertens mekaniska egenskaper, så som efter en omfattande cementering. SSM bedömer att dessa fall är osannolika. Även om illitisering av bufferten skulle styras av materieöverföring snarare än kinetiska faktorer så skulle ett betydande materieurbyte med omgivande grundvatten behöva äger rum för att reaktionen skulle bli betydelsefull. Detta skulle i så fall endast avse ett begränsat antal deponeringshålspositioner.

Cementeringsprocesser kan under vissa omständigheter påverka buffertens elastiska och plastiska egenskaper och därför indirekt styvheten. SKB:s numeriska simuleringar och återopade fältförsök visar att cementeringens omfattning i ett KBS-3-förvar i Forsmark förväntas vara begränsad. SSM bedömer att dessa processer inte väsentligt kommer att påverka bentonitens egenskaper med avseende på skjuvlastfallet. SKB:s modellering av buffertens svälltryck med hänsyn till bl.a. osmos och Donnanjämvikt, homogenisering, materie- och värmetransport, samt mekaniska egenskaper i samband med skjuvlastfallet anser SSM vara godtagbar. SSM bedömer även att negativ inverkan på buffertens egenskaper från kapslarnas initiala strålfält kommer att vara mycket begränsad. SKB bör dock i kommande steg av sitt program eftersträva en mera detaljerad teoretisk förståelse kring betydelsen av dosrater och bestrålningstider, snarare än att slutsatser motiveras på empirisk grund baserad på total ackumulerad dos. SSM anser att termiska omvandlingar under en lång återmättnadsfas kan begränsas genom termisk dimensionering av slutförvaret och beaktande av buffertens lägre termiska konduktivitet under omättade förhållanden. Det är dock av stor betydelse för SSM:s bedömning av omvandlingsreaktionernas omfattning att temperaturen i närområdet för kapseln förblir lägre än 100°C.

Kapselns tålighet i samband med korrosion vid intakta buffertförhållanden

SSM anser att kapselns tålighet i samband med korrosion vid intakta buffertförhållanden baseras på att transportprocesser är mycket långsamma och begränsas till diffusion samt att pH och redoxförhållanden inuti bufferten förväntas variera inom snäva intervall som ett resultat av buffrande komponenter och mineral i berg, buffert och omgivande grundvatten. Dessa faktorer utgör randvillkor och är begränsande faktorer för korrosionsprocesser. Buffertens svälltryck och låg vattenaktivitet inhiberar mikrobiella processer som skulle kunna bidra till kapselkorrosion. Dessa förhållanden säkerställer dock inte nödvändigtvis tålighet med avseende på spänningskorrosion (se nedan). Det behöver också beaktas att buffertens täthet är reducerad under perioder då det finns en sammanhängande transportväg för gasformiga korroderande ämnen så som syre och svavelväte.

SSM anser att allmän korrosion under oxiderande betingelser med beaktande av den betydande kapseltjockleken på 50 mm sannolikt endast har en mycket liten påverkan på kopparkapslarnas skyddsförmåga beroende på att tillgången till syre begränsas genom en försegling av deponeringstunnlarna efter avslutad deponering, samt att syre förbrukas av andra processer i slutförvarsmiljön utöver kapselkorrosion. Inverkan av denna typ av korrosion uppkommer endast under den förhållandevis korta tiden med oxiderande betingelser. För att dessa slutsatser ska vara giltiga är det dock viktigt att det med hög tillförlitlighet går att visa att ett kontinuerligt inläckage av syre via tunnelpluggen och berg i nära anslutning till pluggen kan uteslutas under slutförvarets driftsfas. Utsträckning av tidsperioden med oxiderande betingelser påverkas förutom av syreförbrukande korrosion



även av transportprocesser samt av biologiska och kemiska processer i slutförvaret som konsumerar syre. Dessa processer är delvis påverkbara genom specifikation av acceptanskriterier för buffert och återfyllnadsmaterial samt genom utformning av tunnelpluggar och bergtätningar.

SSM bedömer att kapselns tålighet i förhållande till allmän korrosion av koppar i kemiskt reducerande och sulfidhaltig miljö är förutsägbar genom massbalans- och massöverföringsberäkningar. Förhållanden i bufferten som är gynnsamma i perspektivet korrosion uppnås successivt varefter bufferten återmätas. SSM konstaterar att frågeställningar av betydelse för den initiala perioden i säkerhetsanalysen avser i synnerhet omfattning av mikrobiell sulfatreduktion samt uppskattning av tiden tills att sammanhängande transportvägar i gasfasen har eliminerats. Omättade förhållanden i bufferten skulle enligt SKB:s analys kunna bli bestående under några 1000-tals år för vissa deponeringshålspositioner, vilket har en påverkan på gasformig materieöverföring. För längre tider får grundvattenflödes hastigheter i sprickor som skär deponeringshålen en gradvis ökande betydelse. Det finns också vissa osäkerheter kring långsiktig utveckling av grundvattenkemiska förhållanden, bland annat med avseende på fördelningen av sulfid- och vätehalter. SSM bedömer dock att SKB har beaktat dessa osäkerheter och att de beräknade korrosionsdjupen som ett resultat av allmän korrosion är begränsade i förhållande till kapseltjockleken på 50 mm även med hänsyn till mycket långa tider. I kommande steg av slutförvarsprogrammet finns behov av ytterligare undersökningar av återmättnadsförloppet i främst deponeringshål utan förbindelse med vattenförande sprickor samt undersökningar av mikrobiell sulfatreduktion i olika återfyllnadsmaterial som kan bli aktuella att använda i slutförvaret. Betydelsen av sådana omgivningsbetingelser för korrosionsprocesser i koppar förtydligas om de integreras i scenarioanalysen istället för att endast hanteras genom processbeskrivningar och fristående modelleringsstudier.

SSM konstaterar att kapselns tålighet med avseende på lokala korrosionsprocesser som spänningskorrosion och gropkorrosion påverkas av huruvida bildning av passiverande sulfidfilmer under omättade förhållanden kan förekomma. Enligt SKB:s redovisning förväntas tillgången på sulfid vara mycket begränsad invid kapselytorna som ett resultat av allmän korrosion och diffusion i vattenfasen vilket anses eliminera risken för dessa lokala korrosionsprocesser. SSM anser dock att två fall som möjligen kan involvera en förhållandevis snabb bildning och transport av sulfider avser å ena sidan diffusion av sulfid i gasfas som har bildats i återfyllnaden och å andra sidan mikrobiell sulfatreduktion på kapselytor innan buffertens svälltryck har hunnit byggas upp. Dessa processer påverkar färre och färre kapselpositioner under slutförvarets gradvisa återmättnad. SSM:s bedömning är emellertid att risken för lokala korrosionsangrepp i sulfidmiljö inte helt kan uteslutas. Ytterligare analyser som med en högre detaljeringsgrad analyserar förutsättningar för sulfidkorrosion i omättad miljö och risk för att passiverande filmer uppstår bör genomföras. För att underbygga bedömning av risken för spänningskorrosion behövs även utförligare analyser av förekomst av dragspänningar i kopparhöljet.

Beträffande korrosion av koppar i syrgasfritt vatten konstaterar SSM att såväl experimentella data som teoretiska analyser pekar på att denna korrosionsform i princip är möjlig i frånvaro av löst vätgas. I säkerhetsanalyssammanhang avser dock de avgörande frågorna korrosionsformens betydelse för dimensionering av korrosionsbarriären och för hur analysen av slutförvarets långsiktiga risk påverkas, snarare än enbart frågan kring huruvida processen existerar eller inte. Korrosion i slutförvarsmiljö förväntas bli begränsad av att processen endast fortgår under grundvattenförhållanden där koncentrationer av korrosionsprodukterna väte och koppar(I)-joner förblir mycket låga. Korrosion kan dock under slutförvarsförhållanden fortskrida nära kemisk jämvikt och styrs då sannolikt av bortförsl av lättflyktigt bildat väte. SSM bedömer att



korrosionsformen har en mycket liten betydelse för kapselns tålighet i deponeringshål med intakt och återmättad buffert. Det är i huvudsak buffertens tätande förmåga och låga materieöverföringshastigheter på 500 m djup i berggrunden som utgör grunden för denna bedömning. Under den tid deponeringshålen förblir omättade skulle betydelsen kunna vara större eftersom mängd bildad vätgas behöver ackumuleras i den tillgängliga inneslutande gasvolymen innan korrosionen avstannar samt att transport av väte i gasfasen möjligen kan åtföljas av en mikrobiell konsumtion av vätgas i återfyllnaden.

Beträffande betydelsen av saltanrikning i anslutning till kopparkapslarna under perioden med omättade förhållanden (även kallad bastu- eller sauna-effekten) konstaterar SSM att halterna av karbonat och sulfat invid kapselytor förväntas bli löslighetsbegränsade. Ackumulation av klorid som ett resultat av inflöde av omgivande grundvatten med hög salthalt skulle kunna ha en större betydelse för kemiska betingelser invid kapselytorna eftersom de fasta kloridfaserna har mycket högre löslighet. SSM bedömer dock att omfattningen vid behov kan begränsas och verifieras med information om lokala berggenskaper, och beaktas vid detaljerad utformning av buffert/återfyllnad. På lång sikt förväntas diffusion utjämna koncentrationsskillnader som uppstår på grund av denna effekt. En känslighetsanalys kring parametrar som styr transport av ånga i bufferten skulle ge ytterligare underlag för att bedöma processens omfattning i olika tidsintervall. SSM anser vidare att SKB i kommande steg av slutförvarsprogrammet behöver integrera arbetet med att karaktärisera kemiska betingelser i bufferten i högre utsträckning med analysen av buffertens och återfyllnadens termiska och hydrauliska utveckling.

SSM bedömer baserat på den förhållandevis korta tiden med ett betydande gammastrålfält vid kapselns ytteryta att den ackumulerade mängden av radiolytiska oxidanter som kan bildas medför en för liten reduktion av kopparhöljets tjocklek för att ha någon väsentlig påverkan på kapselns skyddsförmåga. Grunden för detta ställningstagande är den intakta kapselns strålskärning och halveringstiden på cirka 30 år för den i sammanhanget dominerande nukliden cesium-137. SSM anser dock att SKB fortsättningsvis behöver redovisa strålfältets inverkan på den elektrokemiska korrosionspotentialen samt hur en passivering av oxidlagret under inverkan av strålfältet ensamt eller i samverkan med andra processer kan påverka uppkomst av ojämna korrosionsangrepp.

Buffertens tålighet mot kemisk erosion vid mycket utspädda grundvattenförhållanden

SSM anser att det finns förutsättningar för att uppfylla erforderlig tålighet i perspektivet kemisk erosion av bufferten som kan ske vid mycket utspädda grundvattenförhållanden för de bergförhållanden som har konstaterats vid Forsmarksplatsen. Det är dock en komplex fråga eftersom erosionsprocessernas omfattning och betydelse beror på ett flertal samverkande faktorer kopplade till skilda områden så som kolloidkemi, hydrogeologi, grundvattenkemi samt klimatutveckling. Buffertens tålighet är delvis beroende av bergets täthet samtidigt som bufferten har stor betydelse för positioner där bergets täthet är mindre gynnsam.

SSM anser att den vetenskapliga förståelsen av kemisk erosion av bufferten vid mycket utspädda grundvattenförhållanden har utvecklats mycket under de senaste åren, dels genom SKB:s egen forskning, dels genom internationella projekt. Forskningen har bland annat lett fram till ett gränsvärde för förekomst av buffererosion med avseende på grundvattnets jonstyrka, samt en modell för erosionshastighet som beror på lokala bergförhållanden. SSM bedömer att det av SKB tillämpade gränsvärdet, nämligen att summan av laddningsekvivalenter för upplösta katjoner ska vara högre än 4 mM för att undvika buffererosion, är pessimistiskt vald för tillämpning i säkerhetsanalysen. Gränsvärdet bedöms vara rimligt väl underbyggt baserat på en utförlig teoretisk motivering och ett flertal experimentella studier.

SSM bedömer att SKB:s modell för buffertens erosionshastighet vid utspädda förhållanden till stor del bygger på pessimistiska antaganden eftersom man har utgått från den mera erosionsbenägna rena natriumbentoniten som referensmaterial. Även om vissa forskningsfrågor behöver undersökas ytterligare så som inverkan av en sedimentering av kolloidpartiklar så bedömer SSM att erhållna modelleringsresultat representerar gränssättande erosionshastigheter.

Förutom konceptuella och vetenskapliga frågor kring buffererosionsprocessen i sig ingår i säkerhetsbedömningen ett flertal angränsande frågeställningar så som: (i) den massförlust som medför en risk för advektiva förhållanden i bufferten, (ii) erosionsgeometrier som bildas i en buffert efter erosion, (iii) fördelning av grundvattenflödes hastigheter och sprickaperturer för slutförvarets samtliga deponeringshålspositioner, (iv) den grundvattenkemiska utvecklingen och utspädning av salthalt till en nivå som medger buffererosion, (v) den förutsatta klimatutvecklingen som bland annat är styrande för vid vilken tidpunkt kemisk buffererosion först kan uppstå.

SSM anser att den av SKB förutsatta buffertförlusten som krävs för att uppnå advektiva förhållanden i ett deponeringshål är ändamålsenligt motiverad. Kvarvarande osäkerheter har hanterats på ett rimligt sätt bl.a. genom att analysera alternativa omfattningar av den buffertförlust som krävs för att uppnå advektiva förhållanden. SKB:s erosions- respektive korrosionsgeometrier är visserligen stiliserade och förenklade, men samtidigt kan det konstateras att analysen sannolikt har baserats på de mest pessimistiska fallen.

Beträffande hydrogeologi anser SSM att SKB i rimlig omfattning har beaktat föreliggande osäkerheter genom att modellera tre alternativa samband mellan sprickstorlek och transmissivitet och genom att genomföra ett antal realiseringar för varje samband. Oberoende beräkningar har dock visat att SKB:s erosionsberäkningar är känsliga för valet av modell för sprickapertur med en mera omfattande buffererosion vid tillämpning av den alternativa Hjerne-modellen. Även om SKB har tagit fram en godtagbar motivering till varför Hjerne-modellen är osannolik så noterar SSM dock att basfallets aperturer är mindre än dem som kan härledas från resistivitetmätningar i berggrunden. SSM anser därför att SKB i kommande steg av sitt program behöver genomföra ytterligare undersökningar kring sambandet mellan sprickapertur och transmissivitet, och dessutom inkludera en alternativ konceptuell modell för grundvattenflödet som utgår från ett glest nätverk av kanaler genom berget eftersom ett sådant fall sannolikt har en påverkan på omfattningen av buffererosion.

SSM konstaterar att SKB:s beräkningar av grundvattnets salthaltsutveckling som används för att underbygga buffererosionsberäkningar har baserats på betydande inslag av konservatism. Detta beror på att SKB förutsätter infiltration av rent vatten, enbart beaktar utbyte av lösta joner med matrisvatten samt försummar tillskott av katjoner från vittringsreaktioner i berggrunden. SKB:s förenklade antaganden innebär också att samtliga deponeringshålspositioner uppnår den grad av utspädning som erfordras för buffererosion. Denna utgångspunkt innebär möjligen att både SKB:s erosionsmodell och den påvisade känsligheten för hydrogeologiska förhållanden har en mindre betydelse än vad SKB:s nuvarande beräkningar förespeglar. SKB har i andra sammanhang använt andra typer av modeller för att förutsäga grundvattnets salthaltsutveckling och dessa resultat antyder att erosionen bara omfattar en delmängd av alla deponeringshål. SSM bedömer därför att SKB i kommande steg av sitt program bör ta fram en mera sammanhållen och komplett modelleringsansats med avseende på utveckling av grundvattnets salthalt till stöd för erosionsberäkningar samt bör beakta kompletterande analyser av matrisvattensammansättning, abiotiska vittringsprocesser i berggrunden samt biologiska processer i ytlagret som kan påverka grundvattnets mineralisering.



SSM bedömer att i synnerhet med beaktande av tillskott av lösta joner från vittringsreaktioner att en omfattande utspädning av grundvatten på förvarsdjup är osannolik under den första perioden med tempererade förhållanden och att risk för kemisk buffererosion främst kan kopplas till situationer långt in i framtiden när glaciala smältvatten infiltrerat berggrunden. SKB:s analys visar också att osäkerheter i klimatutveckling kan gränssättas av fallet med en erosion av bufferten som pågår under hela glaciationscykeln. För att i framtiden kunna prioritera olika åtgärder för att förstärka barriärsystemets tålighet anser dock SSM att SKB i kommande steg av sitt program behöver ta fram en mindre grov analys av hur flöden och massförlust på grund av buffererosion är fördelad över en glaciationscykel.

SSM anser sammanfattningsvis att Forsmarkplatsens specifika egenskaper med få vattenförande sprickor samt förekomst av grundvatten med hög jonstyrka på förvarsdjup bidrar till att tillgodose buffertens tålighet även efter beaktande av risken för kemiska erosionsprocesser. Denna bedömning baseras förutom på platsvalet också på SKB:s planer på att använda en selektiv deponeringshålsplacering där positioner i berget med omfattande grundvattenströmning inte utnyttjas. Dessa båda förutsättningar bidrar till en begränsning av antalet deponeringshål som påverkas av buffererosion under relevanta tidsskalor.

Kapselns tålighet i samband med korrosion vid eroderade buffertförhållanden

SSM konstaterar att kapselkorrosion förväntas ske snabbare i eroderade deponeringshål i jämförelse med deponeringshål med intakt buffert. Detta beror på att buffertens materieöverföringsbegränsningar elimineras och att advektiva förhållanden kan uppstå i direkt anslutning till kapselytorna. Snabbare transport av korroderande ämnen respektive korrosionsprodukter upplösta i grundvatten ger förutsättningar för mera betydande korrosionsangrepp. De konceptuella osäkerheterna kopplade till kopparkorrosion ökar också i en miljö där vissa begränsningar med avseende på mikrobiell sulfatreduktion så som höga svälltryck inte längre upprätthålls. Kapselns tålighet behöver därför i viss utsträckning anses vara reducerad i deponeringshål med eroderad buffert.

SSM anser att SKB har genomfört en utförlig analys kring vilka betingelser i slutförvarsmiljön som kan påverka omfattning av sulfidkorrosion i eroderade deponeringshål. Även om analyserna omfattar osäkerheter så bedömer SSM att dessa har utvärderats inom ramen för känslighetsanalyser. Osäkerheterna kan kopplas till val av konceptuell hydrogeologisk modell innefattande olika korrelationer mellan sprickstorlek och transmissivitet, respektive mellan sprickapertur och transmissivitet, fördelning av sulfidhalter, korrosions- och erosionsgeometrier, tidsintervall för förekomst av utspädda grundvattenförhållanden samt inverkan av val av kapseltjocklek samt tillämpning av urvalskriterier för deponeringshål. SKB:s beräkningsresultat pekar på att det är osannolikt att kapselbrott sker under tiden upp till 100 000 år även för fallet då buffertens säkerhetsfunktioner har eliminerats. SKB:s beräkningar tyder på att användning av urvalskriterier för deponeringshål är en betydelsefull åtgärd för att minimera risker kopplat till både kapselkorrosion och buffererosion. SSM anser också att SKB genom bortval av deponeringshålspositioner som uppvisar ofördelaktiga förhållanden i perspektivet erosion/korrosion kan begränsa inverkan av dessa processer på slutförvarets skyddsförmåga.

Beträffande korrosion av koppar i rent vatten i eroderade deponeringshål konstaterar SSM att det är tänkbart att korrosionen, förutom den borttransport av väte som SKB har baserat sin analys på, även drivs framåt av mikrobiella processer i närheten av kapselytan som förbrukar bildat väte. För att detta fall ska realiseras krävs dock att en lång händelsekedja

fullbordas i vilken varje steg har en viss sannolikhet och en viss utsträckning i tiden: (i) grundvattnets salthalt behöver först sjunka radikalt till dess att jonstyrkan från katjoner motsvarar 4 mM, (ii) erosionen av buffertmaterial påbörjas och fortskrider till dess att mikrobiell aktivitet möjliggörs och advektiva förhållanden uppstår, (iii) mikrobiella populationer etableras i eroderade deponeringshål med en kapacitet att konsumera även små mängder bildad vätgas, och (iv) korrosionen fortskrider till dess att kopparhöljet fallerar. SSM anser att anoxisk korrosion i fallet eroderade deponeringshål möjligen kan ha en viss betydelse men att detta fall sannolikt som mest omfattar endast ett fåtal deponeringshål med höga grundvattenflöden i vilka buffererosion och kapselkorrosion har fortskridit under en längre tid. Dessa begränsande förutsättningar gäller även för andra korrosionsprocesser som skulle kunna ha betydelse efter buffererosion och uppkomst av advektiva förhållanden så som gropkorrosion. SSM drar exempelvis slutsatsen att för gropkorrosionsfaktorer som har föreslagits i litteraturen skulle gropkorrosion utöver allmän korrosion i eroderade deponeringshål ha en måttlig påverkan på riskanalysen vid beaktande av en realistisk fördelning av sulfidhalter i grundvattnet. SSM anser att SKB i kommande steg av slutförvarsprogrammet inom ramen för en scenarioranalys ytterligare kan beakta dessa kombinationer av processer för att belysa inverkan av eroderade förhållanden.

SSM anser vidare att gropkorrosion möjligen kan inträffa i deponeringshål som förutom erosion även har påverkats av syre i samband med infiltration av glaciala smältvatten. SKB:s argumentation för att utesluta gropkorrosion i en oxiderande miljö har baserats på att passiverande ytfilmer inte uppstår i slutförvarsmiljön eftersom kombinationen låga pH, låga vätekarbonathalter och höga kloridhalter inte medför passivering. I glaciala smältvatten är dock kloridhalterna lägre än i dagsläget och pH är högre vilket skulle kunna gynna uppkomst av passiverande ytfilmer och därmed orsaka gropkorrosionsrisk. SSM noterar dock att fallet med nedträngning av glaciala smältvatten bara avser ett fåtal deponeringshålspositioner, avser ganska extrema och osannolika antaganden kring isfrontens läge och rörelser, förutsätter gränssättande höga syrehalter i smältvattnet samt konservativt försummar vissa rimligt förekommande syreförbrukningsprocesser.

Kapselns tålighet mot långsamma krypdeformationer och väteförspredning

SSM konstaterar att SKB:s kapselutformning har baserats på att kopparhöljet kan deformeras i samband med att buffertmaterialet sväller och i samband med uppbyggnad av det hydrostatiska trycket. Då dessa yttre tryck anbringas på kapseln deformeras kopparhöljet till dess att kopparhöljet kommer i kontakt med segjärnsinsatsen. Användningen av en spalt mellan insats och hölje i kombination med de långa tiderna för uppbyggnad av svälltryck i en viss andel av deponeringshålen innebär att kopparmaterialet behöver kunna deformeras under långa tider och behöver visas ha tillräcklig krypduktilitet. SKB:s hantering av krypdeformation i säkerhetsanalysen SR-Site har baserats på ett krav att koppars krypduktilitet ska överstiga 15 % och att brottförlängningen av koppar vid enaxlig dragprovning ska överstiga 40 %. Krav på krypduktilitet uppnås enligt SKB genom att säkerställa en fosforhalt i intervallet 30-100 ppm samt en svavelhalt som maximalt uppgår till 12 ppm.

SSM anser att SKB har bedrivit en systematisk experimentell verksamhet för att ta fram kunskap kring kopparens deformationsegenskaper men myndigheten konstaterar samtidigt att det är svårt att extrapolera krypegenskaper för OFP-Cu under långa tider baserat på krypprov som har pågått några få år. Av detta skäl har teoretisk förståelse för krypdeformation och fundamentala krypmodeller en stor betydelse. SKB:s strategi består dels av att via matematisk modellering med finita elementmetoden kunna förutsäga hur stor krypdeformation som behövs för olika konstruktionsstyrande lastfall baserat på geometriska förutsättningar för kapselutformningen, dels av att för en fundamental



krypmodell utan passningsparametrar kunna förutsäga krypdeformationen vid ett antal krypexperiment. SSM bedömer att SKB:s strategi är rimlig men konstaterar samtidigt att SKB:s nuvarande krypmodell innehåller flera empiriska parametrar och därför för närvarande inte kan betraktas som genomgående fundamental. Dessutom finns andra experimentella resultat förutom SKB:s som har en betydelse för förståelsen av fosfors inverkan. SKB anser att fosfor förhindrar uppkomsten av låg krypduktilitet genom att fosfor ansamlas i korngränserna och reducerar korngränsglidning, vilket enligt SSM:s uppfattning inte kan anses vara verifierat i dagsläget och att andra förklaringar till fosfors inverkan därför behöver övervägas.

SSM anser att SKB:s hantering av kryp i kommande steg i slutförvarsprogrammet behöver baseras på ytterligare analys av krypmekanismer i kopparsamt en mer utförlig karaktärisering av förhållanden i berggrunden för att kvantifiera återmättnadsförloppet i synnerhet för deponeringshål utan vattenförande sprickor. Sådana insatser förväntas bidra till ett tillförlitligt underlag för att dels avgöra i vilken omfattning kopparkapseln kan deformeras utan att riskera kapselns säkerhetsfunktioner, dels vilket tidsförlopp som behöver beaktas med tanke på varierande hydrogeologiska förhållanden i berggrunden. SKB:s nuvarande studier kring återmättnadsförlopp i olika typer av deponeringshål visar att vissa deponeringshål har återmättnats efter från några 10-tals år, medan tiden till full återmättnad för de långsammaste hålen varierar starkt beroende på berggrundens egenskaper. Tidsintervallen beror främst på egenskaperna fördelning av vattenledande sprickor, bergmatrisens och den störda zonens hydrauliska konduktivitet. Tidsskalan har stor betydelse för pålastningen av isostatiskt tryck.

Enligt SSM:s bedömning ger SKB:s beräkningskapacitet i nuläget en ungefärlig uppfattning om krypdeformationernas storlek och vilka delar av kapseln som är mest påverkade. För att slutligt kunna bedöma om deformationsegenskaperna är tillräckliga erfordras analys av en mera fullständig uppsättning av lastsituationer som kan uppstå i slutförvarsmiljön, inverkan av osäkerheter som då eventuellt kvarstår kring kopparens krypegenskaper, samt inverkan av geometriska osäkerheter kring kapselkomponenternas dimensioner. SKB behöver dessutom genomföra ytterligare utredningar kring i vilken utsträckning väte som bildas vid korrosion och gammabestrålning tränger in i kopparmaterialet och påverkar kopparmaterialets kryp- och sprödhetssegenskaper. SSM konstaterar att det finns experimentella resultat som pekar på en betydande påverkan på kopparsamt i ytliga lager vid artificiell elektrokemisk väteladdning i laboratoriemiljö. Dessa experiment utfördes dock inte under realistiska slutförvarsbetingelser utan konstruerades med målet att påvisa väteladdning och effekter det eventuellt medför. Det kan dock i dagsläget inte anses som välkänt i vilken omfattning både inlagring och avgasning av väte kan förväntas äga rum i slutförvarsmiljön med beaktande av realistiska förhållanden med bland annat tidsförloppet för gammastrålning och varierande omfattning av kopparkorrosion i olika typer av deponeringshålspositioner. SSM konstaterar att frågeställningar kring kopparkapselns krypdeformation behöver fortsatt hantering och beskrivning på ett sammanhållet sätt inom ramen för konstruktionsstyrande fall och scenarier inom säkerhetsanalysen.



6.2 Flera barriärer

6.2.1 Krav

SSMFS 2008:21 7 § *Barriärsystemet ska innehålla flera barriärer så att så långt det är möjligt nödvändig säkerhet upprätthålls trots enstaka brist i en barriär.*

6.2.2 SSM:s bedömning

Föreskriftskravet kopplar till principen om flerfaldiga barriärer och multipla säkerhetsfunktioner (IAEA Safety Standards, No. SSR-5) för slutförvaring av använt kärnbränsle och annat radioaktivt avfall. Detta är en metod för att så långt som möjligt säkerställa skyddsförmågan även om viss information, vissa kunskaper eller visst utförande med avseende på en barriär eller barriärfunktion är ofullständig eller visar sig ha brister. Det bör påpekas att föreskriftskravet inte nödvändigtvis är kopplat till en sannolikhet eller motivering av en viss brist, utan att det även beaktar konsekvenser av postulerade brister som inte behöver vara baserade på berättigade misstankar om att bristerna skulle kunna förekomma.

Beträffande kunskaper om enskilda barriärer och dess långsiktiga utveckling så kommer ny information att framkomma som är relevant att beakta så länge relaterat forsknings- och utvecklingsarbete äger rum. SSM anser att SKB behöver genomföra ett långsiktigt forskningsprogram även under hela förvarets uppförande och driftsfas för att verifiera kunskap om barriärer och barriärfunktioner, dra nytta av driftserfarenheter, genomföra förnyade säkerhetsanalyser samt att genomföra gradvisa förbättringar. Det går för närvarande inte att förutsäga en tidpunkt då all kunskapsinhämtning kan avslutas. Detta innebär att ny kunskap kan tillkomma som föranleder uppdatering och möjligen omprövning av tidigare etablerade uppfattningar om barriärernas skyddsförmåga.

SSM anser att principen om flerfaldiga barriärer innebär att säkerhetsanalysen behöver baseras på flera principer och olika typer av argument för att motivera slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. SKB har i sin ansökan främst beaktat långsiktig strålsäkerhet som uppnås vid användning av de tre barriärerna berget, kapseln och bentonitbufferten. Barriärerna kompletterar varandra, men en fullständig redundans kan inte förväntas på så sätt att barriärerna, var och en för sig, i princip skulle kunna erbjuda tillräcklig långsiktig strålsäkerhet. Detta beror på att inga aktiva åtgärder är möjliga att vidta efter slutlig förslutning av slutförvaret för att exempelvis underhålla, inspektera eller reparera en barriär, samt att barriärerna i viss utsträckning påverkar varandra som ett resultat av begränsad materie- och energiöverföring i systemet. Långsiktig strålsäkerhet uppnås med barriärsystemet som helhet, i vilket varje enskild barriär i tillräcklig utsträckning behöver bidra till slutförvarets långsiktiga säkerhet. Så länge verkliga eller hypotetiska brister med avseende på en av slutförvarets barriärer ger begränsad effekt uppnås robusthet för systemet i sin helhet.

Analys av slutförvarssystemets robusthet förutsätter en analys av hypotetiska brister som kan förekomma dels med avseende på slutförvarets barriärer och utförande, dels med avseende på barriärfunktioner och deras hantering i säkerhetsanalysen. Den första typen av brist kan exempelvis avse hypotetiska kvalitetsbrister vid tillverkning av komponenter, eller att uppförande och drift av slutförvaret hypotetiskt genomförs så att vissa krav som motiveras med tanke på långsiktig strålsäkerhet åsidosätts eller inte blir beaktade i tillräckligt hög utsträckning. Den andra typen av hypotetisk brist avser säkerhetsanalysens hantering av långsiktiga processer exempelvis med avseende på degraderingsmekanismer, slutförvarsmiljön och radionuklidtransport. Denna typ av brist kan kopplas till en otillräcklig förståelse för långsiktiga utvecklingsförlopp även om all information om slutförvarets initiala egenskaper skulle visa sig vara helt korrekt.



SSM:s föreskriftskrav kopplar till behovet av att kunna förutsäga konsekvenser av brister kopplat till barriärerna som sådana eller barriärfunktionerna så som de är representerade i säkerhetsanalysen. Detta möjliggör en prioritering av åtgärder för att så långt som möjligt analysera/kvantifiera och om möjligt eliminera risk för konstaterade och i vissa fall hypotetiska brister och därmed gradvis förbättra slutförvarets skyddsförmåga under tiden slutförvaret är under uppförande och i drift.

SSM anser att enstaka brist kan tolkas som att en barriär i slutförvaret inte i avsedd utsträckning eller inte överhuvudtaget bidrar till slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. Den enstaka bristen kan förekomma i en av de tre barriärerna berg, buffert eller kapsel. Ett exempel är att kopparhöljet för en enstaka kapsel är defekt redan vid inplacering i slutförvaret med en eller flera genomgående hål. Detta fall ger enligt SKB:s redovisning låg dos/risk främst kopplat till utsläpp av några få lätttrörliga radionuklider som kol-14 och jod-129. Begränsning av omgivningskonsekvenser åstadkoms tack vare att både bufferten och berget fortfarande bidrar via barriärfunktionen fördröjning.

Ett annat fall är att en ursprungligen intakt kapsel som har inplacerats med en icke fungerande buffert, eller har placerats i ett deponeringshål som borde uteslutas antingen på grund av förekomst av höga grundvattenflöden eller på grund av risk för skjuv rörelser i samband med jordskalv. Dessa brister ger i sig inga omedelbara konsekvenser i form av spridning av radioaktiva ämnen men leder till en åtminstone i statistisk mening större risk för kapselbrott och en förkortad kapsellivslängd.

Fallet med en ofullständig buffert eller inplacering i ett olämpligt deponeringshål med förhöjd erosionsrisk kan i en förlängning medföra högre sannolikhet för kapselbrott och utsläpp av radioaktiva ämnen som då inte fördröjs genom långsam transport genom bufferten. Om man beaktar att det med all sannolikhet föreligger en betydande tidsfördröjning till kapselbrott medför detta fall en minskad betydelse av radionuklider med kort och medellång halveringstid så som kol-14. Om man istället beaktar fallet med inplacering av en kapsel i en olämplig deponeringshålsposition som korsas av stora strukturer och förutsätter att en sådan placering verkligen leder till ett kapselbrott och bildande av snabba transportvägar i geosfären återstår endast en reducerad buffert som barriär för fördröjning av radionuklider. Fallets betydelse kopplas till att en enstaka brist vid utplaceringen av ett deponeringshål påverkar två barriärer och två barriärfunktioner samtidigt som förhållandevis tidiga kapselbrott inte helt kan uteslutas. Sannolikhet för förekomst av detta fall under en tidig fas av slutförvarets utveckling bedöms dock vara mycket liten.

Det kan inte helt uteslutas att en enstaka brist i exempelvis förståelsen av en viss process eller egenskap kopplat till en av KBS-3-systemets tre barriärer berg, kapsel och buffert kan leda till att denna barriärs skyddsförmåga helt uteblir i hela slutförvaret. Enstaka brister med avseende på sådan förståelse leder dock mera sannolikt till att en av barriärerna får en endast delvis försämrad skyddsförmåga under vissa specifika betingelser som inte förekommer generellt i slutförvaret eller endast förekommer under vissa specifika tidsperioder i förvarets långsiktiga utveckling. Om många eller samtliga exemplar av en viss barriär inte bidrar till slutförvarets långsiktiga skyddsförmåga blir givetvis effekterna avsevärt mera betydelsefulla än om bristen bara innefattar ett enskilt eller ett fåtal exemplar av en barriär.

Även om en av systemets barriärer hypotetiskt förutsätts att helt ha fallerat finns förutsättningar för begränsad omgivningspåverkan eftersom det finns andra barriärer som fortfarande upprätthåller en eller flera barriärfunktioner. Det mest betydelsefulla fallet av denna kategori är att samtliga kapslar av en okänd anledning saknar skyddsförmåga redan vid tidpunkten för slutförvarets slutliga förslutning. SSM konstaterar baserat på SSM:s



granskning och egen analys av SKB:s radionuklidtransportberäkningar att omgivningskonsekvenserna blir måttliga även för detta fall så länge som buffertens och bergets förmåga att fördröja utsläpp kvarstår. De blir dock betydligt högre än den årliga dos som motsvarar SSM:s riskkriterium. En lång rad radionuklider med olika kemiska egenskaper och halveringstider har betydelse i detta fall, men dos/risk domineras av radionuklider med liten sorptionsförmåga så som exempelvis kol-14, jod-129, selenium-79 och radium-226.

Det andra fallet som SKB har analyserat i detta sammanhang är att samtliga buffertar saknar skyddsförmåga direkt efter slutlig förslutning. Enligt SKB:s analyser leder detta fall till ett fåtal kapselbrott i tidskalan på en miljon år. Det skiljer sig inte avsevärt från fallet när bufferten initialt är intakt eftersom de deponeringshål med en buffert som hur som helst löper en viss risk att eroderas bort på grund av höga flöden också är deponeringshål i vilka det finns förutsättningar för en mera omfattande kapselkorrosion. Kapselns livslängd är enligt SKB:s utredningar sannolikt betydande även utan buffertens skyddande förmåga och konsekvenser förväntas därför ske sent i den tidsskala på 100 000 år som SSM i första hand har baserat sin granskning på.

Fallet att berget generellt saknar skyddsförmåga i perspektivet fördröjning av radionuklider har analyserats av SKB, men för att detta fall ska få några konsekvenser krävs att även kapselns inneslutande förmåga har upphört. Det krävs därför att man postulerar en brist hos berget och en hos kapseln, vilket är mer än en enstaka brist och fallet omfattas därför inte av föreskriftskravet. Mot bakgrund av ovanstående analys som visar på begränsade omgivningskonsekvenser i samband med de enstaka brister som SKB har utvärderat så konstaterar SSM att det finns förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet.

SKB har även redovisat ett antal fall där två av de tre barriärerna har förlorat en eller flera barriärfunktioner. SSM bedömer som framgår ovan att dessa fall inte omfattas av föreskriftskravet eftersom kravet avser en enstaka brist. SSM konstaterar dock att om samtliga kapslar av en okänd anledning saknar skyddsförmåga samtidigt som bergets förmåga att fördröja utsläpp av radioaktiva ämnen helt har gått förlorad erhålls enligt SKB:s redovisning årliga doser på några mSv, dvs. doser betydligt högre än bakgrundsstrålningen. Ungefär samma resultat erhålls om samtliga kapslar och buffertar av en okänd anledning saknar skyddsförmåga men om bergets förmåga att fördröja utsläpp av radioaktiva ämnen kvarstår. Mycket höga maxdoser erhålls för ännu mera extrema fall där både kapsel, buffert och berg har förlorat en eller flera barriärfunktioner. Doser någon tiopotens mer än bakgrundsstrålningen erhålls också om samtliga kapslar av en okänd anledning saknar skyddsförmåga och om bränslematrisens begränsade upplösningshastighet i en representativ slutförvarsmiljö av något skäl inte kan tillgodoräknas.

SSM anser sammanfattningsvis att den långsiktiga strålsäkerheten för SKB:s planerade slutförvar i Forsmark med den naturliga bergbarriären bestående av förhållandevis intakt berg samt de tekniska barriärerna kapsel och buffert inte i allt för hög utsträckning är avhängig en enstaka barriär eller barriärfunktion. Det finns därmed förutsättningar att uppfylla kravet på användning av ett flerbarriärsystem. Betydelsen av enstaka brister och avsaknad av vissa barriärer/barriärfunktioner har analyserats av SKB, men SSM anser att vissa av dessa analyser i högre utsträckning kan knytas till en värdering av kunskapsunderlag och värdering av risk för mänskliga misstag vid konstruktion/tillverkning/uppförande. SSM kan dock konstatera att SKB:s fall som involverar stora omgivningskonsekvenser är kopplade till ganska extrema och osannolika scenarier med omfattande och snabb degradering av slutförvarets skyddsförmåga med fler än en barriär/barriärfunktion som helt upphör att fungera.



6.3 Övervakning och återtag

6.3.1 Krav

8 § SSMFS 2008:21 *Inverkan på säkerheten av sådana åtgärder som vidtas för att underlätta övervakning eller återtagning av deponerat kärnämne eller kärnavfall från slutförvaret eller för att försvåra tillträde till slutförvaret ska analyseras och redovisas till strålsäkerhetsmyndigheten.*

6.3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att det finns förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet men att det för närvarande inte slutligt går att ta ställning till om åtgärder behöver vidtas för att underlätta övervakning eller återtagning av deponerat kärnämne eller kärnavfall från slutförvaret eller för att försvåra tillträde till slutförvaret. Skulle SKB föreslå sådana längre fram i programmet behöver dessa analyseras utförligt mot bakgrund av föreskriftskravet.

Återtagbarhet av kapslar har visats vara tekniskt genomförbart genom försök vid Äspölaboratoriet. SSM konstaterar att återtagbarhet bör vara möjligt att genomföra åtminstone under den period som slutförvaret är i drift. Åtgärder för att försvåra tillträde förutom val av ett tillräckligt omfattande förvarsdjup, innefattar metoder att försluta och försegla tillträdesvägarna till slutförvaret, vilket först blir aktuellt i samband med slutlig förslutning av slutförvaret. Granskning av SKB:s konkreta förslag till åtgärder kan göras vid den tidpunkt då sådana åtgärder föreslås och blir aktuella.

6.4 Utformning med hänsyn till skyddsförmåga

6.4.1 Krav

8 § SSMFS 2008:37 *Ett slutförvar ska främst utformas med hänsyn till dess skyddsförmåga. Om åtgärder vidtas för att underlätta tillträde eller försvåra intrång ska effekterna på slutförvarets skyddsförmåga redovisas.*

6.4.2 SSM:s bedömning

SKB har i detta skede av etablerandet av ett slutförvar för använt kärnbränsle inte uttryckligen redovisat några åtgärder som avses vidtas för att underlätta tillträde eller försvåra intrång. SKB har dock vid val av plats beaktat omständigheter som anses vara gynnsamma för att begränsa sannolikheten för framtida mänskliga intrång. SKB för även resonemang om hur valet av förvarsdjup påverkar sannolikheten för intrång. SSM bedömer att SKB har förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet.

6.5 Konsekvenser av intrång

6.5.1 Krav

9 § SSMFS 2008:37 *Konsekvenserna av intrång i ett slutförvar ska redovisas för de olika tidsperioder som anges i 11 - 12 §§. Slutförvarets skyddsförmåga efter intrång ska beskrivas.*

6.5.2 SSM:s bedömning

SSM konstaterar att SKB i ansökan har redovisat konsekvenser av intrång i ett slutförvar för de olika tidsperioder som anges i 11 – 12 §§ SSMFS 2008:37 och att SKB har beskrivit slutförvarets skyddsförmåga efter intrång.

SSM bedömer att SKB har valt lämpliga fall för att redovisa konsekvenser av intrång i ett slutförvar. SSM bedömer vidare att valda fall med direkt respektive indirekt påverkan på slutförvaret utgår från rimliga antaganden. SKB belyser konsekvenser av direkt påverkan

på slutförvaret genom ett fall där slutförvaret genomborras. Beräkningar utförs för människorna som utför borrhningen och för en familj som bor i anslutning till borrhålet. Beträffande indirekt påverkan belyser SKB konsekvenserna av tunneldrivning ovanför slutförvaret och gruvdrift i ett område i närheten av Forsmark. Analyserna har utförts för olika tider som täcker in tidsperioderna givna i 11 – 12 §§ SSMFS 2008:37. SSM har i granskningen befunnit SKB:s resultat från dosuppskattningarna för de olika fallen trovärdiga med utgångspunkt från valda förutsättningar och beräkningsantaganden. SSM bedömer även att SKB:s beskrivningar av slutförvarets skyddsförmåga efter intrånget är godtagbar för de olika fallen. SSM bedömer därför sammantaget att SKB har förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet.

7. Skydd av människors hälsa och miljön

7.1 Riskkriteriet

7.1.1 Krav

5 § SSMFS 2008:37 *Ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall ska utformas så att den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken. Sannolikheten för skadeverkningar på grund av en stråldos ska beräknas med de sannolikhetskoefficienter som redovisas i Internationella strålskyddskommissionens publikation nr 60, 1990.*

7.1.2 SSM:s bedömning

SSM konstaterar att det planerade slutförvaret vid Forsmark enligt säkerhetsanalysen SR-Site med tekniska barriärer utformade enligt KBS-3 systemet endast förväntas ge upphov till mycket liten risk för skadeverkningar från utsläpp av radioaktiva ämnen och att denna risk först uppstår långt in i framtiden. SKB:s beräknade risk som uppkommer till följd av de två kapselbrottmekanismerna skjuvlast från stora jordskalv respektive kombinationen bufferterosion och sulfidkorrosion av kopparkapslar blir slutförvarets totala långsiktiga risk cirka 2 tiopotenser under SSM:s riskkriterium (eller en hundradel) efter 100 000 år och cirka 1 tiopotens under SSM:s riskkriterium (eller en tiondel) efter 1 miljon år. Fullständig förlust av bufferten i alla deponeringshål av en okänd anledning ger enligt SKB:s redovisning inte väsentligt högre risk/dos i jämförelse med normalfallet så länge kapselns skyddsförmåga kvarstår och endast långsamt degraderas på grund av korrosion. Momentan fullständig förlust av kapselns inneslutande förmåga i samtliga deponeringshål ger dos i nivå med bakgrundsstrålningen så länge bufferten är intakt. Förlust av de tekniska barriärerna i samtliga deponeringshål, ger dock dos väsentligt över bakgrundsstrålningen under de första 10 000 åren. Mycket höga doser under tidshorisonter upp till 100 000 år fås om förlust av kapselns inneslutande förmåga kombineras med fall i vilka bränlematrisens begränsade upplösningshastighet i en representativ slutförvarsmiljö inte beaktas.

SSM konstaterar att beräkning av slutförvarets långsiktiga dos/risk innebär en sammanvägning av bidrag till slutförvarets skyddsförmåga från de båda huvudsakliga barriärfunktionerna inneslutning och fördröjning. Bedömning av den första funktionen baseras på en analys av kapselns långsiktiga integritet med beaktande av slutförvarsmiljön och buffertens och bergets förmåga att skydda kapseln, samt kombinationer av processer och händelser som kan bryta kapselns inneslutande förmåga. Denna analys ger upphov till en kumulativ fördelning av sannolikheten för kapselbrott som funktion av tiden, där kapselbrott innebär att utsläpp av radioaktiva ämnen från slutförvaret blir möjliga. Den andra delen av analysen innefattar analys av fördröjning och transport av radionuklider från fallerade kapslar i deponeringshålspositioner i berggrunden till markytan, samt av exponeringsvägarna i biosfären. Föreskriftskravet innebär inte att en viss funktionalitet av



de tekniska barriärerna behöver säkerställas med avseende på barriärfunktionen inneslutning, utan enbart att den kombinerade skyddsförmågan av de båda barriärfunktionerna tillsammans behöver ge förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet.

En möjlig omständighet som skulle försvåra förutsättningar för kravuppfyllelse i förhållande till riskkriteriet är om det skulle visa sig att bergförhållanden på förvarsdjup vid Forsmark är väsentligt mindre gynnsamma än de förväntade. Detta skulle nämligen samtidigt inverka negativt på de båda barriärfunktionerna inneslutning och fördröjning. SSM bedömer dock att denna risk är liten eftersom platsundersökningsresultaten gav en gynnsam och förhållandevis konsekvent bild av bergförhållanden på förvarsdjup samt att ytterligare verifikation av bergförhållanden kan genomföras under slutförvarets konstruktions- och driftsfas. Mera omfattande platsspecifik information förväntas kunna tas fram i samband med uppförande och drift av ett slutförvar. I viss utsträckning är sämre bergförhållanden också en fråga om projektrisker snarare än risk för människors hälsa eftersom vissa kompensatoriska åtgärder är möjliga exempelvis ytterligare begräsningar med avseende på placering av deponeringshål.

SSM konstaterar att SKB:s riskanalys i SR-Site i detta skede av SKB:s program oundvikligen är förknippad med vissa osäkerheter exempelvis med tanke på begränsningar på grund av att platsspecifik information om förhållanden på stora djup i huvudsak kommer från borrhålsundersökningar, att visst fortsatt forskningsarbete ännu pågår samt att förvarskoncept och slutförvarskomponenter fortfarande är föremål för utvecklingsarbete. Enligt SSM:s bedömning skulle ett antal båda kända och okända faktorer och osäkerheter kunna medföra att slutförvarets skyddsförmåga i slutändan inom vissa begränsade intervall bli såväl bättre som sämre än vad som förespeglas i den befintliga riskanalysen. Det är naturligt att riskanalysen i samband med etablerandet av en viss verksamhet inte enbart har syftet att visa på kravuppfyllelse, utan även är ett verktyg för att identifiera och hantera risker. SKB:s säkerhetsanalys är till stora delar baserad på internationellt vedertagen metodik och analys av frågeställningar som även tidigare har utvärderats i detalj inom ett antal andra slutförvarsprogram. Det finns dock ett antal aspekter av SKB:s säkerhetsanalys kopplade till långsiktig risk som är mera specifika för SKB:s program och som har varit föremål för särskilt omfattande granskningsinsatser. SSM kommenterar översiktligt dessa aspekter nedan. SSM anser att tillhörande frågeställningar behöver beaktas under kommande steg i SKB:s program. Det skulle även kunna uppkomma andra skäl att genomföra utredningar för ytterligare analys av riskfaktorer. Myndigheten bedömer dock att det finns förutsättningar att identifiera åtgärder som förbättrar slutförvarets skyddsförmåga samt att påvisa kravuppfyllelse i förhållande till riskkriteriet.

SSM har i sin bedömning av förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet i första hand beaktat tiden före 100 000 år. SSM konstaterar dock att riskanalysen även har betydelse för tiden efter 100 000 år så till vida att den utgör en grund för bedömning av bästa möjliga teknik och för att utvärdera effektiviteten av olika åtgärder för att förbättra skyddsförmågan som en del av en förbättrings- och optimeringsprocess. Det finns dock ingen direkt motsättning mellan dessa båda syften. Det är osannolikt att åtgärder som erfordras för att tillgodose och förbättra skyddsförmågan under de första 100 000 åren, inte också skulle förbättra skyddsförmågan för tider bortom 100 000 år.

SSM anser att det finns vissa aspekter av SKB:s jordskalvsmodellering och hantering av risken för kapselskador på grund av skjuvlaster som SKB behöver vidareutveckla med syfte att ytterligare underbygga riskanalysen. Detta innefattar att den antagna jordskalvsfrekvensen inte förefaller ta tillräcklig höjd för en förhöjd skalvfrekvens för postglaciala skalv i förhållande till skalvfrekvensen som avser tempererade förhållanden. Ytterligare en relaterad fråga är att SKB i sina beräkningar förutsätter att tillämpningen av

kriterier för att undvika olämpliga deponeringshålsplaceringar är helt tillförlitlig förutom att vissa potentiellt kritiska positioner i änden av tunnlarna inte kan undvikas av rent geometriska skäl. Mänskliga misstag i samband med deponeringshålsplacering har ännu inte analyserats eller beaktats. SSM är heller inte helt övertygad om att den av SKB tillämpade korrelationen mellan sprickstorlek och maximal skjuvrörelse kan anses vara helt tillförlitlig. SSM:s egna analyser pekar dock på att dessa frågeställningar har en mindre betydelse för uppskattning av konsekvenser vid risk för jordskalv. SSM anser att en ytterligare optimering och justering av slutförvarets layout och utformning som innefattar avstånd till deformationszoner bör ge goda förutsättningar för en tillräcklig begränsning av konsekvenser i samband med risk för jordskalv.

SSM konstaterar att SKB har genomfört mycket omfattande analyser av det kombinerade bufferterosion- och kapselkorrosionsfallet. Även om osäkerheter kvarstår så har känslighets- och osäkerhetsanalyser inom SR-Site givit ett underlag för bedömning av deras betydelse i riskanalysen. SSM anser att en tydligare gränssättning och analys av mikrobiella processer och mikrobiell sulfatreduktion kan förbättra underlaget för riskanalysen. Organiska ämnen som finns i både grundvatten och som tillförts via buffert och återfyllnadsmaterial kan exempelvis förbrukas som ett resultat av mikrobiella processer som genererar ytterligare sulfid, vilket har betydelse för ett flertal korrosionsmekanismer. SSM anser dock att de situationer i vilka denna process kan vara betydande är begränsade, så som efter att advektiva förhållanden har etablerats i närheten av kapselytan vilket innefattar ett mindre antal eroderade deponeringshål efter mycket lång tid, samt alternativt i deponeringshål i vilka bufferten förblir omättad under lång tid och i vilka inget svälltryck har hunnit byggas upp. Det sistnämnda fallet innefattar visserligen ett betydligt större antal deponeringshål men det gäller endast under en förhållandevis kort tid i slutförvarets långsiktiga utveckling. SSM konstaterar att påverkan på slutförvarets risk sannolikt är liten men att bland annat mikrobiella processer behöver utredas ytterligare och beaktas bland annat vid detaljutformning av slutförvaret. Förutom frågan kring mikrobiella processer finns ett antal frågeställningar kring spricknätverkets geometri och egenskaper samt andra grundvattenkemiska förhållanden som behöver utredas ytterligare och som kan komma att påverka resultaten från riskanalysen.

SSM anser att SKB:s radionuklidtransportberäkningar, biosfärsmodellering samt hantering av barriärfunktionen fördröjning är hanterad på ett godtagbart sätt i riskanalysen i SR-Site. Detta innebär att SKB:s analys av hur stor risk som är förknippad med en genomgående kapselskada vid en viss tidpunkt i slutförvarets utveckling kan anses vara rimligt tillförlitlig. SSM bedömer dock att SKB:s metodik är delvis svår genomtränglig och behöver vidareutvecklas både med avseende på analysmetodik och redovisningarnas transparens och tydlighet. SKB bör använda en mera transparent metod för urval av beräkningsfall och dessutom tillämpa alternativa modeller för att undersöka modellosäkerheter i kommande säkerhetsanalyser. Frikopplingen av när- och fjärrområdet har också delvis försvårat SSM:s bedömningar. Ytterligare en viktig fråga kring SKB:s analys av radionuklidtransport är fördelningen av bränsleupplösningshastigheter. SSM anser att SKB har motiverat denna fördelning i godtagbar omfattning men att den stora betydelsen av frågan motiverar ett behov av ytterligare insatser för att begränsa betydelsen av kvarstående konceptuella osäkerheter.

SSM anser att det är angeläget att SKB utvecklar ett utökat och mera transparent underlag för att kunna utesluta/bedöma/kvantifiera risken för eventuella tidiga kapselbrott. SKB har visserligen framfört argument mot risken för tidiga kapselbrott i bland annat kapselprocessrapporten (SKB TR-10-46) men SSM anser ändå att vissa konceptuella osäkerheter kring ett antal mekanismer har en betydelse: (i) risk för låg kryptilitet vid mycket långsam pålastning av kopparhöljet i deponeringshål med långa återmättnadstider, (ii) spänningskorrosion som ett resultat av bildning av passiverande sulfidfilmer på

områden av kapselhöljet med genomgående dragspänningar, och (iii) gropkorrosion som ett resultat av bildning av passiverande sulfidfilmer. Den första frågan aktualiseras av behov av mekanistisk förståelse för krypdeformation eftersom denna mycket långsamma process är svår att studera experimentellt med avseende på bland annat inverkan av fosfor och väte på koppars krypegenskaper. De två övriga frågorna kopplar till att signifikanta mängder sulfid möjligen kan bildas i anslutning till kapselytor antingen som ett resultat av en biofilm som bildas direkt på kapselytan under tidsperioden med omättade buffertförhållanden eller att sulfid bildas i återfyllnaden och transporteras via gasfasen i en omättad buffert till kapselytan. En redovisning av dessa processer inom ramen för en scenarioanalys bedöms kunna ge ett utförligt underlag för riskanalysen. SSM konstaterar att ytterligare redovisning av dessa processer behöver tas fram till kommande säkerhetsanalyser, och dessutom att en förväntad fortsatt optimering av förvaret och förvarskomponenterna behöver beakta dessa processer.

SSM anser sammanfattningsvis att föreskriftskravet sannolikt kommer att kunna uppfyllas baserat på gynnsamma förhållanden vid Forsmarksplatsen och med utgångspunkt från SKB:s analys av risken för skadeverkningar från ett slutförvar, även med beaktande av vissa konceptuella osäkerheter kopplat till vissa frågeställningar kring de tekniska barriärernas beständighet.

7.2 Skydd av biologisk mångfald

7.2.1 Krav

6 § SSMFS 2008:37 *Slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall ska genomföras så att biologisk mångfald och hållbart nyttjande av biologiska resurser skyddas mot skadlig verkan av joniserande strålning.*

7.2.2 SSM:s bedömning

För bedömningen med avseende på det övergripande kravet på miljöskydd, uttryckt som att biologisk mångfald och hållbart nyttjande av biologiska resurser ska skyddas, är den centrala frågeställningen ifall SKB:s övergripande metodik och utvärderingskriterier är ändamålsenliga för att verifiera kravuppfyllelse, samt om SKB:s tillämpning av dessa är genomförd på ett sådant sätt att slutsatsen från utvärderingen kan anses vara korrekt och tillräckligt väl underbyggd.

SSM:s allmänna råd pekar ut ICRP:s generella vägledning inom området som en möjlig utgångspunkt för bedömning av miljöskydd. I korthet innebär denna vägledning att exponering uppskattas för ett antal referensdjur och -växter samt för några för området representativa arter. Denna exponering jämförs sedan med ett intervall av exponeringsnivåer framtagna av ICRP för varje referensart. Om exponeringen understiger det lägre värdet i respektive intervall för samtliga referensarter och representativa arter så kan man dra slutsatsen att risken för negativa effekter på populationsnivå är mycket liten.

SKB har tillämpat metodiken ERICA ”integrated approach” genom att använda utvärderingsverktyget ERICA Tool. Denna metodik är konsekvent med den ovan beskrivna vägledningen från ICRP och är dessutom etablerad i internationellt arbete. SSM bedömer att de dosberäkningsverktyg som utgår från aktivitetskoncentrationer i vatten, sediment, jord och luft och som är integrerade i ERICA Tool kan anses vara väl underbyggda. SSM bedömer att SKB:s metodik och utvärderingskriterier är ändamålsenliga. SSM bedömer också att de platsspecifika parametrar som SKB har använt i sina beräkningar, såsom Kd-värden och överföringsfaktorer mellan miljö och olika organismer, s.k. CR-värden, är tillförlitliga.



Eftersom den beräknade exponeringen av olika typer av organismer underskrider utvärderingskriterierna bedömer SSM att det finns förutsättningar för att det planerade slutförvaret för använt kärnbränsle kan uppfylla föreskriftskravet.

7.3 Redovisning av effekter på ekosystem

7.3.1 Krav

7 § SSMFS 2008:37 *Biologiska effekter av joniserande strålning i berörda livsmiljöer och ekosystem ska redovisas. Redovisningen ska bygga på tillgänglig kunskap om berörda ekosystem och ta särskild hänsyn till förekomst av genetiskt särpräglade populationer, såsom isolerade populationer, endemiska arter och utrotningshotade arter samt i övrigt skyddsvärda organismer.*

7.3.2 SSM:s bedömning

Detta föreskriftskrav utgör en precisering av kravet på miljöskydd genom att beskriva vilken redovisning av biologiska effekter som erfordras. Ytterligare vägledning till vad en sådan redovisning bör omfatta finns i de allmänna råden. Där framgår att koncentrationer av radioaktiva ämnen i jord, sediment och vatten bör redovisas, samt att dagens biosfärsförhållanden bör användas även för miljömässiga konsekvenser i ett långtidsperspektiv. För antagna klimat där dagens biosfärsförhållanden är uppenbart orimliga, t.ex. ett kallare klimat med permafrost, är det tillräckligt att göra en översiktlig analys. De allmänna råden förtydligar också aspekter av skyddsvärdhet i form av ekonomiska värden kopplade till exempelvis jakt och fiske, naturvårdsmässiga värden av exempelvis skyddade arter samt kulturhistoriska värden som behöver beaktas vid val av vilka representativa arter som ska ingå i redovisningen.

I redovisningen av risker för växter och djur förknippade med det planerade slutförvaret redovisar SKB beräknade maximala halter i vatten, sediment och jord. Beräkningar av dessa halter samt halter i organismer har till stor del baserats på platsspecifik kunskap om de aktuella ekosystemen som erhållits från platsundersökningarna vid Forsmarksplatsen. Vidare har SKB beaktat tre kriterier för att välja ut representativa arter; biologisk betydelse för ekosystemen (nyckelarter, ekologiska funktioner), hotade och genetiskt särpräglade populationer, samt ekonomiskt och kulturellt viktiga arter. För att komplettera den utvärdering som har gjorts avseende dagens biosfärsförhållande har SKB genomfört en mer översiktlig analys av varmare klimatförhållanden respektive kalla klimatförhållanden med permafrost.

SSM bedömer att SKB:s redovisning innehåller alla efterfrågade komponenter och har förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet.

8. Tidsperioder i säkerhetsanalysen

8.1 Säkerhetsanalysens omfattning, minst 10 000 år

8.1.1 Krav

10 § SSMFS 2008:21 *En säkerhetsanalys ska omfatta så lång tid som barriärfunktioner behövs, dock minst tiotusen år.*

8.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s säkerhetsanalys SR-Site omfattar de tidsskalor som är nödvändiga för bedömning av slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. För tidsskalor längre än en miljon år behövs ingen utförlig redovisning, förutom en redovisning av bränslets långsiktiga



farlighet baserat på sönderfall och kedjesönderfall av radioaktiva ämnen i det använda kärnbränslet och en diskussion om slutförvarets tänkbara utveckling. SSM anser att SKB har tillhandahållit denna information. SKB konstaterar att kapselns livslängd för ostörda deponeringshållspositioner och bergförhållanden kan ha livslängder som väsentligt överskrider en miljon år. Enligt SSM:s bedömning behöver analys av de tekniska barriärernas funktion och skyddsförmåga för dessa extrema tidsskalor kompletteras med fall som bortser från dessa barriärers säkerhetsfunktioner. På extremt lång sikt så som efter många miljoner år begränsas slutförvarets skyddsförmåga möjligen endast av den naturliga barriären, men även i detta fall är det enligt SKB:s beräkningar i SR-Site endast frågan om en liten risk i förhållande till bakgrundsstrålningen. Denna risk är kopplad till radionuklider i sönderfallskedjan för naturligt uran samt vissa bidrag från extremt långlivade fissionsprodukter så som jod-129. Begränsning av risken utan beaktande av skyddsförmågan hos tekniska barriärer tillgodoses då av att bränslet fortfarande är placerat i en tät berggrund på betydande djup i en reducerande kemisk miljö. Den reducerande miljön medför att lösligheten av urandioxidmatrisen och frigörelse och spridning av radionuklider är långsam även om en större mängd uran finns placerad i en relativt liten bergvolym. Låga grundvattenflödes hastigheter bidrar också till begränsad omgivningsrisk i detta fall. För ännu mera extrema tidsskalor då även berggrunden som sådan gradvis förlorar sin barriärfunktion på grund av erosionsprocesser kan den radiologiska risken komma att motsvaras av den från förekomst av höga koncentrationer av naturligt uran på motsvarande djup i berggrunden. Med tanke på den extremt långa halveringstiden för uran-238 upphör aldrig bränslets farlighet helt under all framtid på jorden.

SSM anser att detta föreskriftskrav har förutsättningar att uppfyllas. Ytterligare bedömningar av betydelsen av olika tidsskalor i säkerhetsanalyser och riskanalyser finns i SSM:s bedömning av förutsättningar för att uppfylla kraven i SSMFS 2008:37 (se nedan).

8.2 Säkerhetsanalysens omfattning, två tidsperioder

8.2.1 Krav

10 § SSMFS 2008:37 *En bedömning av ett slutförvars skyddsförmåga ska redovisas för två tidsperioder av sådana storleksordningar som framgår av 11 -12 §§.*

8.2.2 SSM:s bedömning

SSM konstaterar att SKB i SR-Site har redovisat en bedömning av slutförvarets skyddsförmåga för de två tidsperioder som avses i 11 -12 §§ SSMFS 2008:37, nämligen de första 1000 åren och tiden efter de första 1000 åren efter förslutning. Beträffande kravet 12 § SSMFS 2008:37 har SKB redovisat en riskanalys fram till tiden en miljon år efter slutförvarets förslutning. För tiden fram till 10 miljoner år har SKB översiktligt analyserat och diskuterat ett antal faktorer som påverkar förvarsutvecklingen och som har möjliga konsekvenser för barriärernas tillstånd. SSM anser att denna hantering följer de allmänna råden till föreskriften som rekommenderar att en riskanalys bör genomföras för tiden upp till 100 000 år dock längst till en miljon år. SSM anser att tiden efter 100 000 år succesivt bör ses mer som en illustration av slutförvarets skyddsförmåga givet antagna förutsättningar. Resultaten av riskanalysen bör för dessa tider utnyttjas för att identifiera möjliga störningar av slutförvarets skyddsförmåga liksom möjliga åtgärder för att förbättra skyddsförmågan. SSM anser att SKB i kommande steg i SKB:s program behöver beakta SSM:s synpunkter kring bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga för tider efter 100 000 år som framförs i kapitel 6 i denna granskningsrapport om tider efter 100 000 år. SSM bedömer sammantaget att SKB har förutsättningar att uppfylla kravet på redovisning som specificeras av detta föreskriftskrav och förtydligas i de tillhörande allmänna råden.

SSM konstaterar att SKB:s redovisning i SR-Site innefattar fall som utgår från dagens biosfärsförhållanden. Vidare bedömer SSM att SKB på ett godtagbart sätt har redovisat



osäkerheterna i de gjorda antaganden som har betydelse för bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga. SSM anser därför att SKB har förutsättningar att uppfylla detta föreskriftskrav.

8.3 Tiden före 1000 år, kvantitativa analyser

8.3.1 Krav

11 § SSMFS 2008:37 *För de första tusen åren efter förslutning ska bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på kvantitativa analyser av effekterna på människors hälsa och miljön.*

8.3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s redovisning i SR-Site innefattar en bedömning av slutförvarets skyddsförmåga baserat på kvantitativa analyser av effekterna på människors hälsa och miljön för de första tusen åren efter förslutning. SKB har beaktat processer som är viktiga för slutförvarets inledande utveckling såsom återmättnad av slutförvaret, stabilisering av hydrogeologiska och hydrokemiska betingelser samt termisk utveckling. SSM anser dock att dessa förhållanden och processer under slutförvarets tidiga utveckling behöver beskrivas särskilt noggrant och därför behöver vidareutvecklas i kommande analyser. SSM:s granskningsresultat pekar på olika aspekter för vilka SKB kan förbättra beskrivningen av hur de tekniska barriärerna påverkas under återmättnadstiden och perioden för transienta förhållanden i slutförvaret. SSM anser att SKB behöver beakta dessa synpunkter i kommande steg i SKB:s program för etablering av slutförvaret genom att utöka och komplettera redovisningen för de första 1000 åren. SSM bedömer baserat på redovisningen i SR-Site att SKB har förutsättningar för att uppfylla föreskriftskravet med avseende på kvantitativa analyser för de första tusen åren efter förslutning av slutförvaret.

8.4 Tiden efter 1000 år

8.4.1 Krav

12 § SSMFS 2008:37 *För tiden efter tusen år efter förslutning ska bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på olika tänkbara förlopp för utvecklingen av slutförvarets egenskaper, dess omgivning och biosfären.*

8.4.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har redovisat en bedömning av slutförvarets skyddsförmåga för tiden efter 1000 år i SR-Site. SKB definierar och analyserar en referensutveckling som ger en bild av utvecklingen av förvarssystemet, dess omgivning och biosfären under en period på en miljon år för vilken SKB har genomfört en kvantitativ riskanalys. Referensutvecklingen har baserats dels på en upprepning av den 120 000 år långa senaste glaciationscykeln, Weichsel, dels på en klimatutveckling med en inledande 50 000 år lång period av tempererade förhållanden pga. global uppvärmning. Förutom referensutvecklingen som är utgångspunkt för utvärderingen av skyddsförmågan i säkerhetsanalysens huvudscenario beaktar SKB ytterligare scenarier som grundar sig på ett antal alternativa händelseförlopp. SKB belyser även övergripande slutförvarets utveckling efter en miljon år genom att redovisa det använda bränslets radiotoxicitet som funktion av tiden. Dessutom finns en kortfattad kvalitativ diskussion om betydelsen av extremt långa tidsskalor vilken i huvudsak grundar sig på allmänna tektoniska överväganden och indikationer från naturliga analogier. SSM bedömer att SKB har förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet, eftersom en bedömning av slutförvarets skyddsförmåga efter 1000 år kan göras baserat på SKB:s angreppssätt och tidsskalor i SR-Site för redovisning av olika tänkbara förlopp för utvecklingen av slutförvarets egenskaper, dess omgivning och biosfären.



9. Säkerhetsanalysen säkerhetsredovisning

9.1 Förhållanden, händelser och processer

9.1.1 Krav

9 § SSMFS 2008:21 *Utöver bestämmelserna i 4 kap. 1 § Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar gäller att säkerhetsanalyserna även ska omfatta förhållanden, händelser och processer vilka kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning och att sådana analyser ska göras innan slutförvaret uppförs, innan det tas i drift och innan det försluts.*

9.1.2 SSM:s bedömning

SKB:s säkerhetsanalys SR-Site har baserats på en sammanställning av egenskaper, händelser och processer, s.k. FEP ("Features, Events, Processes") som kan påverka slutförvarets långsiktiga säkerhet och strålskydd och som direkt eller indirekt kan leda till spridning av radioaktiva ämnen. Dessa finns sammanställda och beskrivna i en databas och i de så kallade processrapporterna. Den förväntade utvecklingen av slutförvarsmiljön och dess omgivningar, biosfären samt slutförvarets barriärer finns beskrivna och analyserade i den så kallade referensutvecklingen. Referensutvecklingen utgör en grund för analys och definition av SKB:s huvudscenariot. SKB har också definierat säkerhetsfunktioner för olika slutförvarskomponenter vilka om de uppfylls säkerställer tillförlitlighet hos en viss aspekt av slutförvarets skyddsförmåga. Möjliga situationer i vilka dessa säkerhetsfunktioner upphör att fungera på det sätt som eftersträvas har analyserats bland annat för urval av mindre sannolika scenarier och restsценarier. Detta omfattar för kapseln brott orsakat av de två fallen isostatisk last och skjuvlast. Motsvarande fall för bufferten är advektion, frysning och omvandlingar. Fallet med kapslar som fallerar på grund av korrosionsprocesser har inkluderats i SKB:s huvudscenariot. SSM bedömer att SKB har tillämpat de tre scenariokategorierna huvudscenariot, mindre sannolika scenarier och restsценarier i enlighet med de allmänna råden till denna föreskriftsparagraf. SSM konstaterar också att SKB har motiverat såväl varför sannolika händelser och processer har inkluderats i huvudscenariot, som varför vissa händelser och processer har bedömts vara mindre sannolika och följaktligen har kategoriserats och behandlats inom kategorin mindre sannolika scenarier. Händelser och processer som bedöms vara mycket osannolika eller enbart hypotetiska har representerats och illustrerats i de så kallade restsценarierna. SSM anser dock att antalet utförligt redovisade scenarier förutom huvudscenariot hade kunnat utökas för att förtydliga innebörd och konsekvenser av vissa typer av händelser, processer och egenskaper som i SR-Site enbart har hanterats inom FEP-analysen (se nedan).

SSM konstaterar att SKB som en del av huvudscenariot har beaktat spridning av radioaktiva ämnen till följd av kapslar som fallerar på grund av korrosion med ett korrosionsdjup som motsvarar hela kapselns tjocklek. En förutsättning för kapselbrott till följd av korrosion är i detta scenario att bufferten först har fallerat som ett resultat av buffeterosion. Andra fall som exkluderar buffeterosion innefattar korrosion i väsentligt mindre utsträckning, vilken inte leder till genomgående skador hos kapslarna. Mera betydande buffeterosion förutsätter ett förhållandevis kraftigt utspädningsförlopp för grundvatten i anslutning till bufferten samt att erosionen äger rum i deponeringshål med ett grundvattenflöde. Trots att dessa processer tillhör huvudscenariot omfattar fallet i statistisk mening inom säkerhetsanalysen mindre än en fallerad kopparkapsel. En anledning till den låga frekvensen av kapselbrott är enligt SKB:s analys att detta fall endast är möjligt om två var och en för sig förhållandevis osannolika situationer samverkar: det vill säga (i) att kapseln befinner sig i en av de deponeringshålspositionerna



med högst förväntat grundvattenflöde, samt (ii) att kapseln befinner sig i en deponeringshålsposition med högst sulfidhalt.

Det andra fallet som SKB har beaktat i sin säkerhetsanalys och som ger upphov till spridning av radioaktiva ämnen är att kopparkapslarna fallerar på grund av mekaniska belastningar till följd av skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshålen. Dessa skjuvrörelser förutsätts vara inducerade av primära rörelser på grund ett stort jordskalv i någon av de närliggande deformationszonerna. SKB har kategoriserat denna händelse som en del av ett mindre sannolikt scenario. Även detta fall resulterar rent statistiskt i mindre än en fallerad kopparkapsel inom hela säkerhetsanalysens tidsskala. Den låga sannolikheten beror delvis på att SKB planerar att identifiera och undvika positioner i berget som skärs av större sprickor och delvis på att kopparkapseln enligt SKB:s planer kommer att utformas och provas individuellt på ett sådant sätt att den har goda förutsättningar att bevara sin integritet även om den utsätts för relativt stora skjuvbelastningar med skjuvbelopp mindre än 5 cm i den anslutande sprickan i berggrunden. Av betydelse för att minimera kapselskador är också buffertens materialegenskaper och utformning.

Övriga tänkbara scenarier som skulle kunna involvera potentiella bidrag till slutförvarsrisk så som isostatiska kapselbrott, samt omvandlingar och frysning av bufferten har utvärderats av SKB men har därefter klassats som restscenarier som inte medför bidrag till riskanalysen.

SSM anser att SKB:s FEP-beskrivningar, utformning av referensutvecklingen och definition av säkerhetsfunktioner för enskilda barriärer har gjorts på ett korrekt sätt i enlighet med SSM:s föreskriftskrav. SSM konstaterar att SKB har gjort omfattande analyser av de två fallen som i SR-Site leder till spridning av radioaktiva ämnen, dvs. kombinationen bufferterosion och kapselkorrosion samt stora skjuvrörelser tvärs över en kapsel till följd av stora jordskalv. Som framgår av SSM:s detaljerade granskning finns förbättringsbehov inom ett antal frågor kopplade till dessa fall. SSM bedömer dock att förbättring och utveckling av analysen av de två fallen kan göras inom ramen för planerade kommande säkerhetsredovisningar.

SSM anser att det föreligger ett utvecklingsbehov kopplat till angreppsättet för analys av konceptuella osäkerheter och tänkbar risk för förhållandevis tidiga kapselbrott. Behov av att så långt som möjligt analysera och minimera betydelsen av detta scenario är enligt SSM:s bedömning en viktig fråga och den enda rimligt sannolika orsaken till varför förändringar/betydande justeringar av slutförvarskonceptet skulle kunna bli nödvändiga. De frågor som SSM har identifierat inom ramen för granskningen av SR-Site avser: (i) eventuell förekomst av låg kryptuktilitet för kopparhöljet vid långsam pålastning vid uppbyggnad av buffertens svälltryck, (ii) inverkan av väteupptag i koppar som kan påverka kopparhöljets deformationsegenskaper, (iii) gropkorrosion av kopparhöljet till följd av uppkomsten av en passiverande sulfidfilm vid omättade förhållanden och snabb tillförsel av sulfid, samt (iv) spänningskorrosion av kopparhöljet till följd av uppkomsten av en passiverande sulfidfilm vid omättade förhållanden och snabb tillförsel av sulfid. SSM konstaterar även att SKB:s redovisning kring inverkan av långsamma återmättnadstider rent generellt behöver utökas.

SSM konstaterar att SKB har hanterat de ovanstående processerna inom ramen för FEP-analys och kompletteringar till ansökan. SKB har framfört argument varför dessa FEP har eliminerats från den mera detaljerade hanteringen av övriga processer inom scenario- och riskanalysen. SSM anser inte att dessa fall nödvändigtvis behöver ha en påverkan på riskanalysen, men att avsaknaden av explicit hantering av dem i scenarioanalys försvårar bedömningar och medför att deras inverkan riskerar att inte beaktas vid bedömning av



förutsättningar för att optimera slutförvarets skyddsförmåga respektive vidareutveckling av de tekniska barriärerna. Avsaknad av formulering av konstruktionsstyrande fall med koppling till kopparhöljets deformationsegenskaper innebär exempelvis att dessa frågor riskerar att inte bli tillräckligt belysta vid slutlig bedömning av bästa möjliga teknik för kapselns slutliga utformning. SSM bedömer att formulering och analys av ytterligare scenarier kan göras inom ramen för kommande säkerhetsanalyser.

SKB har genomfört beräkningar för ett scenario med oförslutet förvar som lämnas utan övervakning. SSM bedömer att SKB:s scenarioformulering för detta fall är godtagbar och att SKB:s uppskattning av scenariots doskonsekvenser är rimliga. Resultaten från detta fall pekar på den stora betydelsen av att slutligt försluta slutförvaret i perspektivet långsiktig strålsäkerhet.

SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB har förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet.

9.2 Säkerhetsredovisning

9.2.1 Krav

11 § SSMFS 2008:21 *Säkerhetsredovisningen för ett slutförvar ska, utöver vad som framgår av bestämmelserna i 4 kap. 2 § Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar innehålla den information som framgår av bilaga 1 till dessa föreskrifter och som avser tiden efter förslutning.*

Innan slutförvaret försluts ska den slutliga säkerhetsredovisningen förnyas och säkerhetsgranskas i enlighet med 4 kap 3 § Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (SSMFS 2008:1) om säkerhet i kärntekniska anläggningar samt vara prövad och godkänd av Strålsäkerhetsmyndigheten.

9.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser att säkerhetsanalysen behöver baseras på lämpliga och tydligt redovisade metoder för att uppnå tilltro och för att innebörden av erhållna resultat ska kunna värderas på ett tillförlitligt sätt. Kraven i bilaga 1 syftar till att säkerställa att olika aspekter av säkerhetsanalysmetodik finns beskrivna och att myndigheten kan bedöma dess lämplighet.

SKB:s säkerhetsanalys har baserats på elva moment: 1) beskrivning av händelser, processer och egenskaper, 2) beskrivning av det initiala tillståndet, 3) beskrivning av externa förhållanden, 4) framtagning av processbeskrivningar, 5) definition av säkerhetsfunktioner för barriärer, 6) sammanställning av indata till analysen, 7) definition och analys av slutförvarets referensutveckling, 8) val av scenarier, 9) analys av barriärfunktionen inneslutning och barriärfunktionen fördröjning, 10) ytterligare analyser och stödjande argument, 11) slutsatser. Enligt SSM:s bedömning innefattar denna metodik de nödvändiga momenten för genomförande och utvärdering av säkerhetsanalysen och att SKB därför har förutsättningar att uppfylla föreskriftskravet.

Det andra stycket i föreskriftskravet blir först tillämpligt inför förslutning av slutförvarsanläggningen och är därmed inte föremål för bedömning i innevarande prövningssteg.



9.3 Analysmetoder – beskrivning av barriärsystemet

9.3.1 Krav

SSMFS 2008:21 11 § bilaga 1 *Följande ska redovisas beträffande analysmetoder:*

- *hur en eller flera metoder använts för att beskriva det passiva systemet av barriärer i slutförvaret, dess funktion och utveckling med tiden; metoden eller metoderna ska bidra till att ge en klar bild av de förhållanden, händelser och processer som kan påverka barriärernas funktioner samt de inbördes kopplingarna mellan dessa förhållanden, händelser och processer,*

9.3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har tagit fram en godtagbar metod för beskrivning av barriärsystemet. En utgångspunkt för säkerhetsanalysen är konstruktionsförutsättningar för ett KBS-3-förvar, som specificerar krav på komponenter och delar av försvarssystemet med bl.a. utgångspunkt från erfarenheter från tidigare säkerhetsanalyser. SKB planerar baserat på ett iterativt förfarande att fortsätta anpassa konstruktionsförutsättningar till krav som har härletts från SR-Site och säkerhetsanalyser som kommer att tas fram under den stegvisa processen för etablering av ett slutförvar. Det planerade tillvägagångssättet vid utformning och uppförande av anläggningen har översiktligt beskrivits, liksom de tekniska barriärerna och andra slutförvarskomponenter har specificerats i de så kallade produktionslinjerapporterna. I dessa redogörs för utformning, produktion och kontroller som krävs för slutförvarets referensutformning. Forsmarksplatsens egenskaper har beskrivits utförligt i den platsbeskrivande modellen. Dessa moment ingår som steg i SKB:s metodik, vilket kan summeras som framtagning av utförliga beskrivningar av barriärsystemet och dess komponenter.

SSM anser även att SKB:s metoder att beskriva barriärsystemets utveckling i tiden och de förhållanden, händelser och processer som påverkar barriärsystemets funktioner samt deras inbördes kopplingar, är godtagbara.

SKB redogör för säkerhetsfunktioner för barriärer i steg 5 i sin säkerhetsanalysmetodik. SKB utgår från de två barriärfunktionerna inneslutning och fördröjning och delar upp dessa i ett antal delfunktioner för de individuella barriärerna. Varje delfunktion kopplas till en säkerhetsfunktionsindikator som ska indikera om säkerhetsfunktionen är uppfylld eller inte. SKB utvärderar statusen för säkerhetsfunktionsindikatorerna för olika relevanta tidsperioder i slutförvarets långsiktiga utveckling. Dessa kommenteras även mera utförligt i samband med SSM:s bedömning ovan av SKB:s förutsättningar för uppfyllelse av SSMFS 2008:21 9 §.

Detaljerade synpunkter, i synnerhet kring tillämpningen av metodiken för definitionen av säkerhetsfunktioner, återfinns i kapitel 2 av granskningsrapporten.

9.4 Analysmetoder - scenarier

9.4.1 Krav

11 § bilaga 1 SSMFS 2008:21 *Följande ska redovisas beträffande analysmetoder:*

- *hur en eller flera metoder använts för att identifiera och beskriva relevanta scenarier för händelseförlopp och förhållanden som kan påverka den framtida utvecklingen av slutförvaret; bland scenarierna ska finnas ett huvudscenario som tar hänsyn till de mest troliga förändringarna i slutförvaret och dess omgivning,*

9.4.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB har beskrivit metoden för att beskriva och välja ut scenarierna i SR-Site på ett godtagbart sätt. SSM konstaterar att SKB på ett lämpligt sätt har definierat

ett huvudscenario som syftar till att hantera de mest troliga förändringarna i slutförvaret och dess omgivning. För huvudscenariot utgår SKB från referensutvecklingen medan övriga scenarier definieras utifrån slutförvarets säkerhetsfunktioner och deras tänkbara tillstånd. SSM anser även att SKB:s metod för utvärdering av scenarierna med utgångspunkt från jämförelser av säkerhetsfunktionernas tillstånd med kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorerna är godtagbar. Även sannolikheter för olika scenarier har använts på ett rimligt sätt för dess klassificering och för risksummering.

Detaljerade bedömningar och synpunkter, i synnerhet kring tillämpningen av metodiken för val av scenarier, klassificering av scenarier i huvudscenariot, mindre sannolika scenarier samt restscenarier och om risksummeringen återfinns i kapitel 2 i denna granskningsrapport.

9.5 Analysmetoder – modeller och parametervärden

9.5.1 Krav

11 § bilaga 1 SSMFS 2008:21 *Följande ska redovisas beträffande analysmetoder:*

- *tillämpbarheten hos använda modeller, parametervärden och andra förutsättningar som används för beskrivning och beräkning av slutförvarets funktioner så långt det rimligen är möjligt,*

9.5.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB i SR-Site och underliggande dokumentation har lagt rimligt stor vikt vid att beskriva och utvärdera de modeller som har använts i säkerhetsanalysberäkningar. SKB har även redovisat och tillämpat metoder för att utvärdera användningsområden för dessa modeller inklusive deras begränsningar. SSM anser att SKB på ett godtagbart sätt har beskrivit och bedömt de använda datakoderna och värderat deras tillämpbarhet. Kvalitetssäkring har tillämpats i en omfattning som bedömts vara rimlig i förhållande till detta provningssteg, samt att åtgärdernas omfattning har anpassats till säkerhetsbetydelsen för en viss datorkod och för de tillhörande beräkningarna. SKB har redogjort för de parametervärden som har använts i beräkningarna och har värderat dem utifrån deras betydelse och tillämpning i säkerhetsanalysen. SSM konstaterar att den så kallade modellrapporten och datarapporten bidrar till tillämpning av ett strukturerat och konsekvent förhållningssätt till modeller och data över de många vetenskapliga och tekniska områden som ingår i säkerhetsanalysen. SSM anser att denna typ av dokumentation bör vara en utgångspunkt för modelleringsarbeten som ingår i säkerhetsanalysen snarare än dokumentation som tas fram i efterhand. Inom ramen för platsundersökningarna bedömer SSM att SKB har utrett tillämpbarhet för platspecifika modeller och data med omfattande utredningar.

SSM:s föreskrifter ställer höga krav på att redovisningen av modeller, parametervärden och andra förutsättningar ska möjliggöra en bedömning av säkerhetsanalysresultatets tillförlitlighet. SSM anser att SKB behöver beakta de synpunkter som SSM för fram i del 2 i denna granskningsrapport i kommande steg i SKB:s program. SSM bedömer att SKB har goda förutsättningar att kunna uppfylla kravet på redovisning av tillämpbarheten av modeller, parametervärden och andra förutsättningar baserat på en fördjupning av SKB:s metodik i SR-Site som har använts för beskrivning och beräkning av slutförvarets funktioner.

Detaljerade bedömningar och synpunkter, i synnerhet kring tillämpningen av metodiken för val och tillämpning av parametervärden och modeller återfinns i kapitel 2 i denna granskningsrapport.

9.6 Analyismetoder – känslighetsanalys och osäkerheter

9.6.1 Krav

11 § bilaga 1 SSMFS 2008:21 *Följande ska redovisas beträffande analyismetoder:*

- *hur osäkerheter i beskrivningen av barriärsystemets funktioner, scenarier, beräkningsmodeller och beräkningsparametrar samt variationer i barriärernas egenskaper hanterats i säkerhetsanalysen, inklusive redovisning av en känslighetsanalys som visar hur osäkerheterna inverkar på beskrivningen av barriärernas utveckling och analysen av konsekvenserna för människors hälsa och för miljön,*

9.6.2 SSM:s bedömning

SSM anser att en viktig del av säkerhetsanalyismetodiken innefattar beskrivning och hantering av osäkerheter. SKB har klassificerat osäkerheterna i systemosäkerheter, konceptuella osäkerheter, modellosäkerheter och dataosäkerheter. SSM bedömer att denna klassificering är konsekvent med de allmänna råden och lämplig för sitt syfte. SKB har på ett övergripande sätt beskrivit hur dessa typer av osäkerheter systematiskt har hanterats. SKB har även beskrivit hur dessa olika typer av osäkerheter har hanterats på ett integrerat sätt i säkerhetsanalysen. Därutöver har SKB enligt SSM:s bedömning på ett acceptabelt sätt beskrivit metoder för de känslighetsanalyser som har genomförts i samband med konsekvensanalysberäkningarna. Vissa förenklade känslighetsanalyser som har genomförts i samband med analysen av de tekniska barriärernas beständighet bidrar också till förståelse för inverkan av olika typer av osäkerheter. SSM konstaterar att hanteringen av osäkerheter till viss del genomsyrar hela säkerhetsanalysen SR-Site. SSM anser att användningen av känslighetsanalyser i första hand har fokuserats på radionuklidtransportberäkningar och sannolikt kan utökas till att omfatta flera områden med bäring på slutförvarets långsiktiga risk så som jordskalvsmodellering och modellering av kapselns långsiktiga deformation. Med utgångspunkt från argumenten ovan bedömer SSM att SKB har förutsättningar att uppfylla kravet på redovisning av hur osäkerheter har hanterats i säkerhetsanalysen. SSM har även andra synpunkter på SKB:s hantering av osäkerheter i SR-Site som SKB behöver beakta i kommande steg av sitt program.

Detaljerade bedömningar och synpunkter, i synnerhet kring hantering av osäkerheter i alla aspekter av säkerhetsanalysen återfinns i kapitel 2 i denna granskningsrapport.

9.7 Analys – utveckling efter förslutning

9.7.1 Krav

11 § bilaga 1 SSMFS 2008:21 *Följande ska redovisas beträffande analys av betingelserna efter förslutning:*

- *säkerhetsanalysen enligt 9 § omfattande beskrivningar av utvecklingen i biosfär, geosfär och slutförvar för utvalda scenarier; slutförvarets omgivningspåverkan för valda scenarier, inklusive huvudscenariot, med hänsyn till felfunktioner hos tekniska barriärer och övriga identifierade osäkerheter.*

9.7.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har tagit fram en säkerhetsredovisning som omfattar en utförlig analys av betingelser efter förslutning av slutförvaret. Analysen omfattar beskrivningar av utvecklingen i biosfär, geosfär och slutförvar för utvalda scenarier. Därutöver redovisar SKB slutförvarets omgivningspåverkan för de valda scenarierna med hänsyn till felfunktioner hos tekniska barriärer, processer som påverkar barriärfunktionerna för berget och andra identifierade osäkerheter. SSM bedömer baserat på redovisningen i SR-Site att SKB har förutsättningar att uppfylla kravet på redovisning av analys av betingelserna efter förslutning. SSM har granskat analys av säkerheten efter förslutning och resultaten från



denna granskning återfinns i del 2 i denna granskningsrapport. SSM anser att SKB behöver beakta de synpunkter som framförs i del 2 i denna granskningsrapport i kommande steg i sitt program.





Del 2 Granskning av säkerhetsredovisningen

1. Övergripande bedömning av säkerhetsanalysen SR-Site

En viktig del i SKB:s ansökan om att få uppföra, inneha och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle är säkerhetsredovisningen och specifikt säkerhetsanalysen för tiden efter slutlig förslutning av slutförvaret. Säkerhetsanalysen som har bifogats ansökan benämns bilaga SR-Site. SSM:s föreskrift SSMFS 2008:21 9§ kräver en säkerhetsanalys för tiden efter förslutning samt att denna ska omfatta förhållanden, händelser och processer vilka kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning. I detta kapitel redogörs för SSM:s övergripande bedömning av SR-Site utifrån de detaljerade granskningarna i efterföljande kapitel. Fokus ligger på säkerhetsanalysens syfte och dess olika delars betydelse för att uppnå syftet.

1.1 Säkerhetsanalysens syfte

Det huvudsakliga syftet med SKB:s säkerhetsanalys är att visa att det föreslagna slutförvaret inte innebär oacceptabla risker för skador på människors hälsa samt att det upprätthåller skydd av miljön, baserat på de krav som SSM har definierat i sina föreskrifter. Därutöver syftar analysen till att visa på en grundläggande förståelse för slutförvarets funktioner och olika komponenters betydelse i olika tidsperspektiv. Utifrån denna förståelse ska sedan krav på slutförvarets detaljerade funktioner och egenskaper i slutförvarsmiljön identifieras och formuleras. I och med detta stegvisa arbete blir framtagandet av säkerhetsanalysen en iterativ process, i vilken resultaten från en tidigare säkerhetsanalys bidrar till att förbättra underlaget för nästa analys med avseende på slutförvarets konstruktion, framtagande av scenarier och genomförande av ytterligare säkerhetsanalysberäkningar. Framtagning av säkerhetsanalysen SR-Site bygger exempelvis till stor del på resultat från den tidigare säkerhetsanalysen SR-Can från 2006, som i sin tur bygger på säkerhetsanalysen SR-97 från 1999.

SSM anser att SR-Site uppfyller syftet med en säkerhetsanalys i detta provningssteg, nämligen att visa att det planerade slutförvaret har förutsättningar att uppfylla myndighetens krav på skydd av framtida människors hälsa och miljön. En förutsättning för att kunna dra denna slutsats är att säkerhetsanalysen SR-Site bedöms ha genomförts med en tillräckligt väl utvecklad och systematisk metod. SSM anser även att SR-Site återspeglar en godtagbar grundläggande förståelse för slutförvarets funktioner som erfordras för framtagning av mera förfinade konstruktionsstyrande fall och konstruktionsförutsättningar för barriärernas komponenter inför kommande steg i slutförvarsprogrammet. SSM:s detaljerade bedömningar kring förståelsen av slutförvarets funktioner återfinns i efterföljande kapitel i denna rapport.

1.2 Säkerhetsanalysens metodik

För att en säkerhetsanalys ska uppnå en godtagbar tillförlitlighet och omfattning krävs att den följer en tydligt definierad metodik som kan bedömas i förhållande till tillämpliga författningskrav. Metodikens betydelse speglas av att det finns särskilda krav på analysmetoder i SSM:s föreskrifter och att det ges relativt utförliga allmänna råd om hur säkerhetsanalysen bör utformas. SSM:s detaljerade bedömningar i fråga om den metodik som har tillämpats i SR-Site återfinns i kapitel 2 i denna granskningsrapport.

En viktig aspekt under tidiga faser av ett slutförvarsprogram är att det oundvikligen finns osäkerheter kring slutförvarets initialtillstånd som avser tidpunkten då kopparkapslarna har deponerats och deponeringstunnlar har förslutits. Initialtillståndet har en stor betydelse



för slutförvarets utveckling över de långa tidsperioder på en miljon år som SR-Site behandlar. Vissa av osäkerheterna som är förknippade med initialtillståndet kopplar till att information från den färdigställda anläggningen med den slutliga detaljutformningen inte kan finnas tillgängligt i detta steg av processen. Osäkerheter kopplade till initialtillståndet minskar i takt med att utformningens detaljeringsgrad ökar, samt i samband med uppförande och att detaljundersökningar av berget genomförs. Vid en bedömning av en uppdaterad säkerhetsanalys, som ska godkännas innan antingen provdrift eller rutinmässig drift, kan dessa osäkerheter till stor del elimineras eller minskas. En annan typ av osäkerhet avser utvecklingen efter förslutningen av slutförvarets delar samt återstående osäkerheter kring initialtillståndet som kan komma att kvarstå även efter att anläggningen har uppförts. Det ingår i säkerhetsanalysens syfte att beakta och utvärdera effekterna av dessa båda typer av osäkerheter.

Osäkerheter kan klassificeras på olika sätt och SSM har i de allmänna råden till SSMFS 2008:21 föreslagit att osäkerheter som förknippas med scenarier, systemet, modeller, parametrar och dess rumsliga variation bör identifieras och adresseras i analysen.

SSM konstaterar att diskussioner om osäkerheter förekommer i alla följande kapitel i denna granskningsrapport. SKB har exempelvis utvärderat osäkerheter i samband med:

- platsmodellering (SKB TR-08-05, SKB R-08-82)
- framtagning av data till säkerhetsanalysberäkningar (SKB TR-10-52)
- analyser av systemets utveckling baserat på FEP-analys (SKB TR-10-45) och processförståelse (SKB TR-10-12, SKB TR-10-46, SKB TR-10-47, SKB TR-10-48, SKB TR-10-49)
- modeller som används i säkerhetsanalysen (SKB TR-10-51)
- genomförande av känslighetsanalyser och modellering av beräkningsfall (exempelvis SKB TR-10-66, SKB TR-10-50, SKB R-09-22).

SSM godtar till stora delar SKB:s analyser och argumentation i SR-Site, men gör i vissa fall andra bedömningar. Dessa bedömningar och SSM:s åtföljande krav eller rekommendationer på SKB:s framtida program återfinns ämnesvis för olika tidsskalor i efterföljande delar av denna granskningsrapport. På en övergripande nivå bedömer SSM att SKB:s utvärdering av olika typer av osäkerheter i SR-Site är tillräckligt utförlig och har genomförts på ett godtagbart sätt. För vissa resterande frågor kan SKB genom att beakta SSM:s rekommendationer ta fram ett tillräckligt underlag för den uppdaterade säkerhetsredovisningen som krävs för kommande steg i SKB:s program. Se vidare kapitel 9 i denna rapport.

För att kunna genomföra en säkerhetsanalys krävs ett omfattande underlag. Ett vanligt förekommande förenklat arbetssätt inom säkerhetsanalys är dock att göra konservativa eller pessimistiska antaganden för att undvika långtgående arbeten med att ta fram ett dataunderlag och modelleringsunderlag som realistiskt återspeglar en bästa uppskattning av det verkliga systemets egenskaper och utveckling. Dessa förenklade analyser möjliggör i många fall en effektiv indirekt hantering av osäkerheter i systemet. En värdering av analysresultat mot bakgrund av SKB:s egna funktionskrav eller SSM:s föreskriftskrav kan i många fall göras utan tillgång till bästa uppskattningar av alla ingående parametrar. I viss mån kan det iterativa säkerhetsanalysarbetet därmed betraktas som en passningsräkning där mer detaljerat underlag tas fram när det behövs för att de konservativa inslagen inte ska bli så stora att en uppfyllelse av föreskriftskraven inte kan påvisas. En grundförutsättning för denna modelleringsstrategi är att det föreslagna systemet i sin helhet är lämpligt utformat och har goda förutsättningar att uppfylla alla relevanta krav.

Inom SSM:s tillämpliga föreskrifter finns utöver riskkriteriet exempelvis krav på att visa barriärssystemets tålighet, samt tillämpning av optimering och bästa möjliga teknik. I



dessa sammanhang kan dock en tillämpning av konservativa antaganden försvåra bedömningen av hur olika barriärer och barriärfunktioner bidrar till slutförvarets skyddsförmåga. En avsaknad av detaljerad förståelse eller kvantifiering av viktiga processer kan också leda till att inte alla relevanta kopplingar i det komplexa systemet identifieras och bli föremål för en utvärdering. Det gäller till exempel påverkan mellan olika systemkomponenter samt samverkande interna och externa processer. Det är således viktigt att avväga tillämpningen av konservativa antaganden i förhållande till aktuella syften med att beskriva systemet och hur detta påverkar framtagande av bästa uppskattningar med hjälp av tillgänglig data.

SSM har i granskningen av SR-Site gjort bedömningar av SKB:s antaganden och parameterintervall med en hög detaljeringsnivå. För vissa delar av analysen har SSM eller dess externa experter genomfört egna modellstudier för att få ett utförligare underlag för bedömning av SKB:s antaganden och tolkningar av resultat. Generellt sett anser SSM att SKB har gjort rimliga avvägningar mellan användning av konservativa förenklade antaganden och användning av detaljerade modellstudier för att få fram parametrar och underlag för riskanalysen. SKB har lagt ner ett mycket omfattande arbete med att ta fram data till den platsbeskrivande modelleringen (SKB TR-08-05). Data som tillämpas i säkerhetsanalysberäkningar värderas också i den så kallade datarapporten (SKB TR-10-52). I vissa fall bedömer SSM att SKB har lagt för stor vikt vid konservativa antaganden och parameterintervall. Mer realistiska utvärderingar efterfrågas för kommande steg i programmet, bland annat för att förbättra precision och tillförlitlighet vid analys av barriärer och barriärfunktioner, samt vid utvärdering av deras relativa betydelse. Dessa fall framgår i efterföljande kapitel. SKB kan i några fall även ha använt en detaljeringsgrad som kan förefalla vara högre än vad förhållandena kräver. SSM inser dock att det på förhand kan vara svårt att definiera en ändamålsenlig detaljeringsgrad och att en anpassning av olika typer av analyser behöver ske fortlöpande under ett iterativt säkerhetsanalytiskt arbete.

Som ett exempel på behov av en större grad av realism kan nämnas SKB:s beräkningar av buffererosionstider och utvärdering av buffererosionens effekter på kapselkorrosion. SSM anser att beräkningarna av tider tills advektiva förhållanden uppnås i berörda deponeringshål har baserats på en rad förenklade och konservativa antaganden som inte speglar betydelsen av denna buffertprocess för analysen. Pessimistiska eller gränssättande antaganden med avseende på buffertens skyddsförmåga förenklar analysen av buffertens utveckling men innebär samtidigt att konceptuella antaganden kring kapselns förväntade utveckling i samband med korrosionsprocesser istället får en större betydelse. SSM har identifierat ett flertal frågeställningar kopplade till SKB:s presentation av processer som inverkar på kapselns integritet. Att det läggs stor vikt vid kapselns långsiktiga skyddsförmåga i förhållande till buffertens försvårar delvis en helhetsbedömning av barriärsystemets robusthet. Därutöver försvåras en optimering av slutförvarets säkerhetsfunktioner om utvecklingen av en teknisk barriär baseras på bästa uppskattningar och en annan med medvetet pessimistiska skattningar.

SSM har med hjälp av externa experter undersökt SKB:s arbete gällande kvalitetssäkring på en övergripande nivå samt för vissa av SKB:s experiment med kopparkapseln och den hydrogeologiska modelleringen (SSM Technical Note 2012:35, 2012:36, 2014:46, 2015:29). SSM konstaterar mot bakgrund av dessa resultat att SKB:s kvalitetssäkring överlag är ändamålsenlig och håller en lämplig nivå. SSM konstaterar att kvalitetssäkring är ett fortlöpande arbete som SKB behöver vidareutveckla på en nivå som avspeglar de olika arbetsmomentens betydelse för slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet.

Som en del av säkerhetsanalysen behöver ett antal olika scenarier belysas. Bland dessa behöver ett huvudscenario återspegla den mest troliga utvecklingen av de yttre



betingelserna, medan mindre sannolika scenarier behöver användas för att belysa alternativa händelser och tidsförlopp samt osäkerheter som inte behandlas inom huvudscenariot. Restscenarier ingår inte i riskberäkningen men behöver belysa enskilda barriärers betydelse i barriärssystemet och innefatta fall som belyser effekter av oavsiktlig framtida mänsklig påverkan på slutförvaret.

En central fråga är hur scenarierna identifieras och definieras, eftersom detta i en förlängning påverkar säkerhetsanalysens fullständighet och tillförlitlighet. SKB utgår från slutförvarets referensutveckling för att definiera huvudscenariot. För definitionen av de mindre sannolika scenarierna utgår SKB från de två huvudsakliga barriärfunktionerna inneslutning och fördröjning som delas upp i ett antal säkerhetsfunktioner för barriärerna som slutförvarssystemet förväntas kunna upprätthålla under en viss tid, dvs. för kapseln, bufferten, återfyllnaden, pluggar, förslutning och berget (SKB SR-Site huvudrapport, figur 8-2 och 8-3). För varje säkerhetsfunktion för kopparkapseln och bufferten utvärderar SKB vilka egenskaper, händelser och processer, s.k. FEP ("Features, Events, Processes") som skulle kunna leda till att säkerhetsfunktionerna inte upprätthålls givet osäkerheter i initialtillståndet och osäkerheter kring vissa processer och händelser. Utifrån dessa skedens definieras sedan scenarierna. SKB beaktar därvid även vissa osäkerheter och mindre sannolika FEP som inte ingår i huvudscenariot. Efter att ha utvärderat ytterligare scenarier förutom huvudscenariot tar SKB ställning till om dessa ska betraktas som mindre sannolika eller som restscenarier med försumbar sannolikhet att verkligen inträffa.

SSM bedömer att SKB:s användning av referensutvecklingen respektive säkerhetsfunktioner för att identifiera scenarier är förenlig med tillämpliga krav och ligger i linje med internationell praxis. SSM anser dock att val av scenarier och definition av säkerhetsfunktioner behöver kompletteras och utökas i kommande steg av slutförvarsprogrammet för att på ett mera effektivt sätt utnyttja scenariometodik för att illustrera och utvärdera slutförvarets tålighet samt identifiera åtgärder för att säkerställa och förbättra skyddsförmågan. Detta gäller i synnerhet sådana processer och processkombinationer som möjligen skulle kunna ge upphov till förhållandevis tidiga utsläpp av radioaktiva ämnen. Denna typ av processer har SKB beaktat inom FEP-hantering och processbeskrivningar men ännu inte fullt ut inom scenariometodiken. SSM anser att definitionen av säkerhetsfunktioner och scenarier i vissa fall är berättigade för att skapa förståelse för vissa processer och händelser som hittills har hanterats utanför scenarioanalysen. Scenarier utgör en utgångspunkt för definition av relevanta konstruktionsstyrande fall och konstruktionsförutsättningar, vilka i sin tur används för att specificera krav på slutförvarskomponenter. Åtgärder för att minimera risken i samband med potentiella felfunktioner kan därmed förtydligas.

Med utgångspunkt från de scenarier som visar sig vara särskilt viktiga från risksynpunkt har SKB tagit fram ett antal konstruktionsstyrande fall. Dessa fall har tillsammans med kunskap om tillverkningsteknik, genomförbarhet och kontrollerbarhet använts för att på ett systematiskt sätt underbygga konstruktionsförutsättningar såsom krav på barriäregenskaper. SSM bedömer att detta tillvägagångssätt är lämpligt och att konstruktionsförutsättningarna generellt sett är väl underbyggda. SSM noterar dock att vissa förutsättningar inte är kopplade till kvantitativa krav som det är klarlagt hur de kan verifieras i relevanta skeden av uppförande och driftsfaser. SSM anser att SKB i kommande steg behöver förtydliga utvärdering av kvantitativa och verifierbara krav.

SKB har definierat en referensutformning som har förutsättningar att uppfylla konstruktionsförutsättningarna. Denna referensutformning är inte detaljprojekterad men SSM bedömer att den är väl beskriven och tillräckligt specifik för att utgöra en grund för SKB:s säkerhetsanalysberäkningar. Inom ramen för fortsatt stegvis prövning kommer dock SKB inom detaljprojekteringen behöva fastställa acceptanskriterier,



konstruktionslösningar, materialval och slutförvarsutformning med en högre detaljeringsgrad.

Slutförvarsutformningen är grundläggande för att kunna utvärdera kravuppfyllelse och av vikt för optimering med avseende på skyddsförmågan. SSM anser exempelvis att en ytterligare precisering av förvarsdjup är en utformningsfråga som behöver optimeras med hjälp av ytterligare information under en kommande uppförandefas. Ett annat viktigt exempel som SKB betonar är möjligheten att undvika ofördelaktiga deponeringspositioner med hänsyn till höga grundvattenflöden och stora sprickor med potential för betydande skjuvrörelser tvärs över deponeringshålen. SSM konstaterar att dessa typer av optimering behöver vidareutvecklas.

SKB redovisar i SR-Site hur resultaten behöver beaktas för återkopplingen till SKB:s planerade framtida program. Detta avser uppdatering av konstruktionsförutsättningarna och återkoppling till det fortsatta Fud-programmet (forsknings- utvecklings- och demonstrationsprogrammet). SSM anser att detta förfarande utgör en förutsättning för att kunna uppföra och driva en slutförvarsanläggning som har förutsättningar att uppfylla SSM:s föreskriftskrav. En annan viktig återkoppling för SKB är resultat från SSM:s granskning som redovisas i denna granskningsrapport. SSM noterar att SKB har beaktat många av de synpunkter som SSM:s föregångare SKI och SSI framförde i samband med granskningen av SR-Can.

1.3 Slutförvarets förläggningsplats och initialtillstånd

En grundförutsättning för säkerhetsanalysen är kännedom om förläggningsplatsens egenskaper. SKB har genomfört omfattande platsundersökningar vid Forsmark i Östhammars kommun och vid Laxemar/Simpevarpområdet i Oskarshamns kommun. Resultaten har använts för att underbygga valet av plats och för att skapa ett dataunderlag för säkerhetsanalysen. SSM och dess föregångare bevakade platsundersöknings- och platsmodelleringsarbetet inom ramen för Fud-processen (se granskningsrapport *Systemövergripande frågor*, del 2 avsnitt 4 Val av plats slutförvar). SSM:s slutsats är att den platsbeskrivande modellen utgör ett fullgott underlag för SR-Site. SSM har i granskningen uppmärksammat områden som särskilt bör beaktas vid framtida detaljundersökningar för att förbättra den platsbeskrivande modellen inför framtida säkerhetsanalyser. SSM anser även att det är av stor vikt att SKB tar fram ett utförligt program för detaljundersökningar i samband med uppförandefasen. Med tanke på att byggnadsarbetet löper parallellt med undersökningarna anser SSM att SKB behöver säkerställa att kraven som säkerhetsanalysen ställer på utförande och detaljundersökningar kan uppfyllas.

SSM bedömer att förutsättningarna på platsen i allmänhet är goda för att uppföra ett långsiktigt säkert slutförvar. En detaljerad granskning och SSM:s bedömningar återfinns i kapitel 3 i denna rapport.

Utgångspunkten för analysen av slutförvarets långsiktiga utveckling är det tillstånd som råder när deponeringstunnlarna har förslutits, det så kallade initialtillståndet. Det finns av förklarliga skäl osäkerheter kring hur väl den slutliga förvarsutformningen kommer att motsvara referensutformningen som ligger till grund för SR-Site. Detta gäller både de fastställda konstruktionslösningarna och hur väl dessa sedan kan implementeras i slutförvarsanläggningen. SSM konstaterar att den stegvisa processen medger utrymme för en successivt ökad detaljeringsgrad av konstruktionslösningarna. Samtidigt är det viktigt att osäkerheter i nuvarande steg är belysta på ett lämpligt sätt i analysen vilket SSM bedömer att de i tillräcklig grad för detta steg i processen är.

SSM bedömer att SKB:s redovisade initialtillstånd bygger på en rimligt detaljerad referensutformning och att SKB har belyst osäkerheter i initialtillståndet. Detta sker exempelvis genom analys av ett restskenario med initiala defekter i kapseln eller genom att redovisa beräkningsfall med förutsättningen att utförandet inte motsvarar referensutformningen. Ett sådant beräkningsfall är antagandet av avsaknad av en eller flera buffertringar, och ett annat att vissa kriterier för bortval av deponeringspositioner bortses ifrån. SSM bedömer dock att SKB i de scenarier som ingår i riskutvärderingen bör utveckla analyserna av sannolikheter för tillverkningsfel eller mänskliga fel under utförandet som leder till avsteg från referensutformningen. Exempelvis ställer SKB höga krav på materialegenskaper och detektion av defekter i insatsen genom oförstörande provning, samtidigt som det finns frågetecken om dessa tillverknings- och provningsmoment är fullt genomförbara under driftförhållanden. SSM bedömer att SKB inte fullständigt har redovisat att tillverkningstekniken medför en spridning i vissa materialegenskaper. SSM bedömer vidare att SKB behöver dels fastställa och motivera materialkrav för insatsen och kapseln, dels kunna säkerställa att samtliga kvalitetskrav kan uppnås i kommande steg i SKB:s program.

1.4 Referensutvecklingen

Huvudscenariot bör enligt de allmänna råden till SSMFS 2008:21 utgå från den troliga utvecklingen av yttre betingelser samt realistiska, eller där det är motiverat konservativa, antaganden om de inre betingelserna. Det bör omfatta framtida yttre händelser som har hög sannolikhet att inträffa under den tidsrymd som analysen avser. Huvudscenariot bör vidare innefatta antaganden om förekomst av tillverkningsfel och andra ofullkomligheter. För att underbygga huvudscenariot bör därför den troliga långtidsutvecklingen av slutförvaret definieras med detaljerade beskrivningar av olika komponenters utveckling utifrån de antagna yttre betingelserna. SKB definierar en sådan utveckling och benämner den referensutvecklingen i SR-Site.

Yttre betingelser som den långsiktiga klimatutvecklingen kan avsevärt påverka slutförvarets utveckling. SKB delar upp analysen av referensutvecklingen utifrån tre klimattillstånden: den inledande tempererade fasen som antas pågå i 1000-tals år, den återstående delen av glaciationscykeln definierat utifrån Weichsel-istiden och efterföljande glaciationscykler. SKB antar även en alternativ klimatutveckling som inbegriper global uppvärmning. SKB belyser dock även bygg- och driftskedet som en särskild tidsperiod som sedan inte uttryckligen beaktas i den inledande tempererade fasen.

SSM bedömer att SKB:s indelning i tidperioder för analysen av referensutvecklingen återspeglar de olika yttre betingelsernas betydelse för slutförvaret på ett lämpligt sätt. SSM:s föreskrifter kräver mer detaljerade analyser för de första 1000 åren och i allmänna råden till SSMFS 2008:37 anges att en strikt jämförelse av riskberäkningsresultat mot riskkriteriet inte är meningsfull för tider efter ca 100 000 år. SSM har därför fäst särskilt stor betydelse vid dessa två tidsrymder inom sin granskning, vilka beskrivs utförligt i kapitel 4 och 5 i denna granskningsrapport. SSM anser att SKB fortsättningsvis behöver anpassa indelningen av referensutvecklingen så att de första 1000 åren ges en större tyngd.

SKB analyserar flertalet processer fram till en miljon år baserat på en förutsatt upprepning av identiska glaciationscykler. SSM konstaterar att användning av upprepade glaciationscykler är konsekvent med SSM:s allmänna råd. SSM bedömer dock att SKB i sin presentation av beräkningsresultat för tiden mellan 100 000 år och fram till en miljon år har lagt väl stor vikt vid exakta resultat från kvantitativa beräkningar samt risk/dos-uppskattningar. SKB bör utförligare redogöra för systemosäkerheter och konceptuella osäkerheter för dessa mycket långa tidsrymder i samband med tolkning av resultat från riskberäkningar. I enlighet med de allmänna råden till SSMFS 2008:37 betraktar SSM

redovisningen för tiderna efter 100 000 år successivt mer som en illustration av slutförvarets skyddsförmåga givet antagna förutsättningar. Analysen för dessa mycket långa tidsrymder behöver syfta till att identifiera och överväga olika alternativa möjligheter till att förbättra slutförvarets skyddsförmåga.

SKB presenterar en utförlig analys av referensutvecklingen med hänvisningar till ett mycket omfattande underlag. SSM har genomfört en utförlig granskning av detta underlag, delvis med hjälp av externa experter. SSM bedömer att referensutvecklingen är framtagen i linje med rekommendationerna i allmänna råden till SSMFS 2008:21. SSM bedömer vidare att SKB:s analyser av referensutvecklingen till största delen ger trovärdiga och tillförlitliga resultat. I kapitel 4-6 av denna granskningsrapport ges dock i vissa fall exempel på brister och rekommendationer kring hur kunskapsunderlaget och analyserna kan förbättras i kommande steg i slutförvarsprogrammet.

SSM anser att ytterligare arbete krävs i kommande steg med avseende på i synnerhet beskrivningen av buffertens och kapselns utveckling under omättade buffertförhållanden. Detta eftersom SSM anser att långsamma återmättnadsförlopp delvis försvårar analysen av barriärernas utveckling under de första 1000 åren och ökar betydelsen av vissa typer av processer som bidrar till slutförvarsutvecklingens komplexitet, exempelvis förekomst av gasfas, långsam uppbyggnad av buffertens svälltryck och möjlig negativ påverkan i samband med kopparhöljets deformation. Analysens resultat bör i tillämplig grad återkopplas till konstruktionsförutsättningarna och referensutformningen.

1.5 Konsekvensanalys och scenarioutvärdering

SSM:s föreskrifter ställer krav på att risk för skador på människors hälsa och miljön ska vara starkt begränsad. Konsekvenser av att barriärssystemets inneslutande förmåga går förlorad behöver analyseras. Skyddet av människors hälsa bedöms med utgångspunkt från medelårsrisken under en livstid för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken. Den beräknade risken kan uppskattas utifrån en faktor för omvandling av effektiv stråldos till risk. Denna faktor har av ICRP beräknats vara 7,3 procent per Sievert (ICRP, 1990).

För att kunna beräkna konsekvenserna krävs att det finns en förståelse för under vilka omständigheter inneslutningsförmågan kan gå förlorad. Denna förståelse baseras på underlaget för val av scenarier och de definierade scenarierna utgör en utgångspunkt för beräkningsfallen inom konsekvensanalysen. SKB beaktar spridning av radioaktiva ämnen i scenarier med kapselbrott till följd av korrosion och skjuvlast samt hypotetiska scenarier med tänkta bortfall av barriärfunktioner för att belysa systemets robusthet.

SKB baserar konsekvensanalysberäkningarna på beräkningar av radionuklidtransport inom slutförvarets när- och fjärrområde. SKB beräknar punkter där radionukliderna lämnar geosfären och övergår till biosfären med hjälp av partikelspårning som genomförs som en del av hydrogeologiska beräkningar. Dos för ett enhetsutsläpp från geosfären beräknas genom modellering av transport inom biosfären som resulterar i så kallade landskapsspecifika doskonverteringsfaktorer (LDF). Biosfären delas in i relevanta biosfärsobjekt som är knutna till varandra genom ytnära vattenflöden. Beräkningarna utgår från dagens levnadsförhållanden i enlighet med rekommendationerna i allmänna råden till SSMFS 2008:37. Biosfärens utveckling med tiden påverkas i synnerhet av landhöjningen i Forsmarksområdet.

SSM har genomfört omfattande egen modellering och har anlitat ett flertal externa experter för att bedöma SKB:s konsekvensanalysberäkningar. SSM har också granskat SKB:s konsekvensanalysmetodik, modeller, indata, LDF-värden och SKB:s beräknade



resultat för de scenarier som har definierats i säkerhetsanalysen. SSM bedömer att SKB:s modeller för radionuklidtransport i när- och fjärrområdet är väl utvecklade och av samma typ och detaljeringsgrad som används internationellt i liknande sammanhang. SSM är positiv till att SKB använder alternativa modeller för att utvärdera beräkningsresultat från mera komplexa modeller. SSM bedömer att de grundläggande elementen i SKB:s metodik för biosfärmodellering och dosberäkning är förenliga med internationella riktlinjer för biosfärmodellering, men att modelleringens komplexitet i viss utsträckning bidrar till att försvåra granskning av spårbarhet och kvalitetssäkring. Beträffande indata till beräkningarna bedömer SSM att underlaget överlag är acceptabelt. SSM bedömer att bränsleupplösningshastighet kan anses vara grundligt utredd och rimligt välmotiverad. Samtidigt är det en av de mest betydelsefulla parametrarna i konsekvensanalysen och SSM anser därför att behov av vidareutveckling kvarstår inför kommande steg av SKB:s slutförvarsprogram.

För att belysa effekter av framtida mänskliga handlingar i närheten av slutförvaret och oavsiktligt intrång bör ett antal scenarier definieras och utvärderas i enlighet med rekommendationer i de allmänna råden till SSMFS 2008:21 och SSMFS 2008:37. SKB har redovisat en uppsättning scenarier av denna typ vilka bedöms vara lämpligt utformade och rimligt heltäckande.

SSM bedömer att SKB:s analyser av de tekniska barriärernas beständighet som har genomförts inom ramen för huvudscenariot, liksom de tillhörande konsekvensanalysberäkningarna, behöver vidareutvecklas och ytterligare motiveras, bland annat baserat på myndighetens detaljerade granskningskommentarer i denna rapport. SSM anser dock att de hittills framtagna analyserna utgör en godtagbar grund för fortsatt arbete. Beträffande det mindre sannolika scenariot för kapselbrott på grund av jordskalv gör SSM en liknande bedömning även om SSM har vissa avvikande bedömningar bland annat med avseende på jordskalvsfrekvenser. Konsekvenserna av att bedömningarna delvis skiljer sig är dock inte av den karaktären att säkerhetsanalysens slutsatser påverkas på ett betydande sätt. SSM bedömer att risksummeringen i SR-Site har genomförts på ett lämpligt sätt och att SKB:s slutsatser med avseende på riskutspädningseffekter är rimliga. SKB bör inför kommande steg av sitt program tillföra ett scenario för eventuellt tidiga kapselbrott i vilket rimligt sannolika processer som skulle kunna vara betydelsefulla utvärderas mot bakgrund av relevanta förhållanden i slutförvarsmiljön.

Förutom skydd av människors hälsa ställer SSM krav på skydd av miljön. SSM bedömer att SKB:s utvärdering av konsekvenser för organismer i ekosystem är godtagbar.

I SKB:s redovisning bör det ingå en analys som visar att kriticitet inte kan förekomma för bränslets ursprungliga konfiguration eller efter en möjlig omkonfigurering i samband med kapselbrott under slutförvarets långsiktiga utveckling. SKB konstaterar, baserat på en kriticitetsanalys, att risken är försumbart låg. SSM anser att SKB i tillräcklig omfattning visat att konsekvenser och sannolikhet för kriticitet är tillräckligt låg givet de åtgärder som SKB föreslår för att minimera förutsättningarna för kriticitet.

1.6 Säkerhetsanalysens helhet

SSM konstaterar att SKB har genomfört ett omfattande säkerhetsanalyserbete. SR-Site har utgått från resultaten från SKB:s tidigare säkerhetsanalys SR-Can, som var den första som baserades på resultat från platsundersökningarna i Forsmark. SSM:s föregångare granskade SR-Can inom ramen för Fud-processen och gav synpunkter på analysens innehåll. SSM drar slutsatsen att SKB överlag har beaktat dessa synpunkter. SSM anser att det iterativa säkerhetsanalyserbetet ger förutsättningar till en förbättrad analys som

behöver presenteras i samband med den preliminära säkerhetsredovisningen (PSAR) som krävs för ansökan om att påbörja anläggningens uppförande.

SSM bedömer att SKB har tillämpat en godtagbar säkerhetsanalysmetodik, vilket är en förutsättning för att kunna erhålla relevanta och tillförlitliga resultat. Det omfattande platsundersökningsarbetet som sammanfattas i den platsbeskrivande modellen av Forsmark bedöms utgöra ett tillförlitligt underlag för säkerhetsanalysen. Som SSM redovisar i samband med granskning av platsvalet bedömer SSM att Forsmark är en lämplig plats för ett slutförvar baserat på KBS-3-metoden (se granskningsrapport *Systemövergripande frågor*, del 2 avsnitt 4 Val av plats slutförvar). De av SKB presenterade konstruktionsförutsättningarna och referensutformningen bedöms vara tillräckligt detaljerade för detta skede i den stegvisa prövningsprocessen. SSM anser att SKB:s beskrivning av initialtillståndet är godtagbart, givet att underlaget som beskrivningen baseras på kommer att kunna utvecklas under slutförvarets uppförandefas. Detta förutsätter att SKB säkerställer att undersökningsarbetet får det utrymme som krävs under byggnationsskedet.

SSM bedömer vidare att SKB:s utförliga utvärdering av referensutvecklingen ger förutsättningar för att identifiera relevanta scenarier. SSM bedömer dock att SKB i kommande steg behöver lägga mer tyngd på utvärderingen av den omättade fasen och dess påverkan på barriärssystemet. SSM anser att SKB har presenterat godtagbara konsekvensanalysberäkningar. Inverkan av framtida mänskliga handlingar och oavsiktligt intrång har redovisats i enlighet med rekommendationerna i de allmänna råden till SSMFS 2008:37.

SSM anser att det framgår ur information i SR-Site att SKB har etablerat en god förståelse för slutförvarets funktioner och egenskaper. SSM bedömer att KBS-3-konceptet och tillhörande redovisning i säkerhetsanalysen är tillräckligt moget för att kunna utgöra en tillförlitlig grund för de bedömningar kring kravuppfyllelse som SSM redovisar i del 1 av denna granskningsrapport. För att säkerställa att betydelsefulla aspekter av SSM:s synpunkter på säkerhetsanalysen SR-Site har adresserats på ett lämpligt sätt avser SSM att ställa villkor på den fortsatta verksamheten under förutsättning att regeringen meddelar tillstånd för verksamheten.

2. Säkerhetsanalysmetodik

2.1 Metodik

2.1.1 Krav kopplade till säkerhetsanalysmetodik

SSM:s krav på säkerhetsanalysmetodik specificeras i föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i kärntekniska anläggningar (SSMFS2008:1) med fokus på drifttid för en kärnteknisk anläggning inklusive ett slutförvar. För tiden efter slutlig förslutning av ett slutförvar finns kompletterande krav redovisade i föreskrifterna och allmänna råd om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall (SSMFS2008:21) samt om skydd av människors hälsa och miljö vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall (SSMFS 2008:37).

Enligt kap. 4 i SSMFS 2008:1 ska en värdering och redovisning av anläggningens säkerhet, s.k. säkerhetsanalys, genomföras och redovisas. Innan anläggningen uppförs eller ändras och tas i drift (1 §) ska kapaciteten hos anläggningens barriärer att förebygga och lindra radiologiska konsekvenser analyseras med deterministiska metoder. Förutom



deterministiska metoder ska anläggningen även analyseras med probabilistiska metoder för att ge en så allsidig bild som möjligt av säkerheten. Analyserna ska hållas aktuella fram till att tillståndet för anläggningen upphör.

Säkerhetsanalyserna ska vara grundade på en systematisk inventering av de händelser, händelseförlopp och förhållanden som kan leda till radiologiska konsekvenser för människan och miljön efter förslutning av slutförvaret. Analyser för ett relevant urval av scenarier ska visa att barriärsystemet fungerar så att eventuella radiologiska omgivningskonsekvenser är acceptabla (allmänna råd till SSMFS2008:21 och 3 § SSMFS 2008:37). Genom säkerhetsanalyserna identifieras de specifika kraven på funktion och konstruktion av slutförvaret.

Modeller och beräkningsprogram som används för säkerhetsanalyser och för att fastställa konstruktions- och driftsgränser ska vara validerade och verifierade (4 kap. 1 § SSMFS 2008:1). Vidare ska osäkerheter vara beaktade och data kvalitetssäkrade.

Säkerhetsanalyser ska enligt SSMFS 2008:1 (4 kap.1 §) genomföras och omfatta förhållanden, händelser och processer som kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning av slutförvaret (9 § SSMFS 2008:21). Säkerhetsredovisningen ska innefatta, utöver områden specificerade i SSMFS 2008:1 (4 kap. 2 § och 3§), även områden specificerade i Bilaga 1 SSMFS 2008:21. Dessa ska innefatta:

- metoder för att beskriva det passiva barriärsystemet, dess funktion och utveckling med tiden
- förhållanden, händelser och processer som kan påverka barriärfunktionen och dess ömsesidiga kopplingar
- identifiering samt beskrivning av relevanta scenarier. Ett huvudscenario tar hänsyn till de mest troliga förändringarna i slutförvaret och dess omgivning
- tillämpbarhet hos modeller, parametrar och förutsättningar
- osäkerheter samt variabilitet
- känslighetsanalys som visar hur osäkerheterna inverkar på beskrivningen av barriärernas utveckling och konsekvensanalys
- utvecklingen av biosfär, geosfär och slutförvar för utvalda scenarier
- slutförvarets omgivningspåverkan för valda scenarier, inklusive huvudscenariot, med hänsyn till felfunktioner hos tekniska barriärer och övriga identifierade osäkerheter.

I de allmänna råden till 1 § SSMFS 2008:1 återopas att kraven på kvalitetssäkring, säkerhetsgranskning, säkerhetsprogram och återkommande säkerhetsredovisning enligt SSMFS 2008:1 ska uppfyllas. Tillståndshavarna bör förvissa sig om att kraven är tillräckliga med avseende på säkerhet av slutförvaret efter förslutning.

Scenarierna bör delas in i olika kategorier baserat på deras sannolikhet i enlighet med de allmänna råden till 9 § och bilaga 1 SSMFS 2008:21:

- Huvudscenariot: bör grunda sig på den troliga utvecklingen av yttre betingelser och realistiska eller där så är motiverat, konservativa antaganden om de inre betingelserna.
- Mindre sannolika scenarier: bör innefatta varianter av huvudscenariot med alternativ händelse och tidsförlopp, scenarier som beaktar effekter av framtida mänsklig verksamhet samt sådana osäkerheter som inte utvärderas inom ramen för huvudscenariot.
- Övriga scenarier eller restscenarier: bör omfatta händelseförlopp och förhållanden som belyser betydelsen av enskilda barriärer och barriärfunktioner, oberoende av dess sannolikhet.

Brist på kunskap och andra ovissheter i beräkningsförutsättningarna (antagande, modeller, data) benämns i allmänna råden till SSMFS 2008:21 som osäkerheter. Rumslig variation hos parametrarna som används för att beskriva bergets barriärfunktioner innefattas också av osäkerheter. Modeller och parametervärden bör styrkas genom vetenskaplig litteratur, särskilda utredningar och forskningsresultat, laboratorieexperiment i olika skalor, fältförsök och studier av naturliga fenomen (analogier). Vetenskapligt underlag, liksom gjorda bedömningar av experter, bör dokumenteras på ett spårbart sätt genom att noggrant ange referenser till vetenskaplig litteratur och annat underlag.

I SSMFS 2008:37 definieras att ett slutförvar ska utformas så att den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken. Säkerhetsanalysen ska därför också uppfattas som en riskanalys med syfte att belysa ett slutförvars skyddsförmåga och dess konsekvenser med avseende på miljöpåverkan samt risk för människor. I de allmänna råden specificeras att scenarierna i analyserna bör innefatta:

- Klimatutveckling: scenarier med några möjliga framtida klimatutvecklingar behöver omfattas. Valet av klimatutvecklingar bör grundas på känslighetsanalyser och expertbedömningar.
- Mänsklig påverkan: ett antal scenarier för framtida oavsiktlig mänsklig påverkan på slutförvaret bör redovisas.
- Särskilda scenarier: en analys av ett tänkt bortfall under de första tusen åren efter förslutning, av någon eller några barriärfunktioner, bör redovisas separat utanför riskanalysen.

Säkerhetsanalysen bör även redovisa ett antal scenarier som illustrerar konsekvenser av oavsiktlig framtida mänsklig påverkan på slutförvaret (allmänna råden till SSMFS 2008:37). Resultaten bör beaktas i samband med överväganden kring motåtgärder.

Vidare bör olika osäkerheter utvärderas och redovisas på ett systematiskt sätt och värderas med hänsyn till deras betydelse för säkerhetsanalysens resultat (allmänna råden till SSMFS 2008:37). Samtliga beräkningssteg med tillhörande osäkerheter bör redovisas. Oberoende expertbedömningar ("Peer Review") och formaliserade expertutfrågningar ("Expert Panel Elicitation") kan, i de fall dataunderlaget är otillräckligt, användas för att stärka trovärdigheten i bedömningar av osäkerheter.

2.1.2 SKB:s säkerhetsanalysmetodik i elva steg

Enligt SKB har säkerhetsanalysen för slutförvaret för använt kärnbränsle i huvudsak två syften:

- att undersöka om förvaret kan betraktas som radiologiskt säkert över tid samt hur väl de relevanta föreskrifterna om långsiktig strålsäkerhet kommer att uppfyllas
- att ge återkoppling till slutförvarsutformning, till forsknings- och utvecklingsprogram samt till fortsatta undersökningar på den valda platsen i Forsmark.

Metodiken som SKB har använt för säkerhetsanalysen SR-Site bygger vidare på den senaste fullständiga säkerhetsanalysen SR-Can (SKB TR-06-09) och tar hänsyn till synpunkterna från granskningen av SR-Can (SKI Report 2008:19).

Slutförvaret enligt KBS-3-metoden, som ska vara tekniskt möjligt att bygga, har tagits fram genom tillämpning av följande säkerhetsprinciper:

- isolering av det använda kärnbränslet på djupet i en långsiktigt stabil geologisk miljö
- risken för mänskligt intrång minskar genom valet av ett kandidatområde med försumbar naturresurspotential



- flera tekniska och naturliga säkerhetsbarriärer omger det använda kärnbränslet
- barriärernas primära säkerhetsfunktion är att innesluta det använda kärnbränslet
- barriärernas sekundära säkerhetsfunktion är att fördröja ett eventuellt utsläpp av radionuklider
- material till de tekniska barriärerna är stabila på lång sikt i slutförvarsmiljön
- slutförvaret utformas så att temperaturer med en negativ inverkan barriärernas långsiktiga funktion undviks
- utformning och konstruktion av slutförvaret begränsar skadlig inverkan från strålningssinducerade processer på barriärernas funktion
- barriärerna ska vara passiva, dvs. de ska fungera utan aktiv tillförsel av material eller energi.

SKB TR-10-12 beskriver utgångspunkter som tillämpas vid utformning, uppförande och kontroll av KBS-3-förvaret, förvarets funktioner samt de tekniska barriärernas och bergets barriärfunktioner. Detaljerade konstruktionsförutsättningar för de tekniska barriärerna, bergutrymmena och andra delar i KBS-3-förvaret tas fram baserat på beräkningsfall från säkerhetsanalyserna för driften (SR-Drift) samt för den långsiktiga strålsäkerheten (SR-Can och SR-Site) och är nödvändiga för att kunna utforma och projektera slutförvarssystemet. Konstruktionsförutsättningar är därför kopplade till initialtillståndet för de olika delarna i slutförvaret och ska säkerställa att systemet är tillräckligt robust för att uppfylla kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna över tid.

Baserat på dessa principer har SKB tagit fram en referensutformning för KBS-3-förvaret som är anpassat till barriärernas säkerhetsfunktioner samt till egenskaperna hos den valda platsen i Forsmark. I SKB:s metodik för säkerhetsanalysen ingår därefter elva steg som innefattar:

1. FEP-hantering: Erfarenhet från tidigare säkerhetsanalyser och KBS-3-specifika och internationella databaser över relevanta egenskaper, händelser och processer s.k. FEP ("Features, Events and Processes") som påverkar den långsiktiga säkerheten utnyttjas för att identifiera alla signifikanta faktorer som ska ingå i säkerhetsanalysen (SKB TR-10-45).
2. Beskrivning av initialtillståndet: Initialtillståndet definieras baserat på relevanta FEP:ar för geosfären, biosfären, bergutrymmen, installerade tekniska barriärer samt det använda kärnbränslet. Beskrivning av initialtillståndet utgår från Forsmarks platsbeskrivande modell (SKB TR-08-05) samt de så kallade produktionsrapporterna som redovisar hur KBS-3-förvaret är utformat, producerat och kontrollerat. Tidpunkten för initialtillståndet för olika delar i slutförvarssystemet varierar från att gälla det opåverkade berget för geosfären, tidpunkten för förslutning av deponeringstunnlar för tekniska barriärer, eller slutlig förslutning av hela förvaret för övriga delar (SR-Site huvudrapport, avsnitt 5.1).
3. Beskrivning av externa förhållanden: Externa förhållanden delas in i de tre kategorierna "klimatrelaterade frågor", "storskaliga geologiska processer och effekter" samt "framtida mänskliga handlingar" FHA ("Future Human Actions") och relevanta faktorer identifieras. I detta steg ingår definition av externa referensförhållanden för säkerhetsanalysen för tiden efter förslutning. Referensförhållanden förutsätter en upprepning av den senaste glaciala cykeln, den 120 000 år långa Weichselistiden.
4. Beskrivning av processer: De processer som är signifikanta för den långsiktiga utvecklingen hos slutförvarssystemet analyseras med utgångspunkt från tidigare säkerhetsanalyser och FEP-hantering i steg 1. Processerna och deras interaktioner redovisas i processrapporterna som beskriver om processen kan uteslutas, om den ska vara föremål för kvantitativ modellering eller om den beror på ett särskilt villkor som kan vara uppfyllt eller inte beroende på förhållandena under slutförvarssystemets utveckling.



5. Definition av säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer: De grundläggande säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning delas upp i ett antal delfunktioner för barriärerna, dvs. för kapseln, bufferten, återfyllnaden och berget, som slutförvarssystemet ska kunna upprätthålla över tid för att säkerställa den långsiktiga strålsäkerheten. Varje delfunktion kopplas till en säkerhetsfunktionsindikator, dvs. en mätbar eller beräkningsbar egenskap hos den aktuella barriären (SR-Site huvudrapport, avsnitt 8.3 och 8.4).
6. Sammanställning av data: Data som ska användas för att kvantifiera slutförvarsutvecklingen och för att beräkna dos väljs i detta steg och deras osäkerheter diskuteras (SKB TR-10-52).
7. Analys av referensutvecklingen: Referensutvecklingen baseras på de mest troliga externa referensförhållandena. Den tas fram för att få kunskap om systemets övergripande utveckling samt om de osäkerheter som påverkar utvecklingen. Referensutvecklingen fungerar också som hjälpmedel för valet av ytterligare scenarier, bl.a. ett huvudscenario, som upplyser om specifika processer relevanta för den långsiktiga strålsäkerheten av slutförvaret. Två fall av referensutvecklingen analyseras: Ett basfall i vilket klimatutvecklingen under de kommande 120 000 åren antas efterlikna den rekonstruerade klimatutvecklingen under den senaste glaciala cykeln Weichsel, (därefter antas sju upprepningar av samma cykel för att täcka in hela den 1 000 000 år långa period som analyseras) och en variant av referensutvecklingen med global uppvärmning vilken tar hänsyn till den naturliga klimatvariabiliteten och mänsklig påverkan på klimatet.
8. Val av scenarier: En representativ uppsättning scenarier väljs med fokus på de delar av slutförvarsutvecklingen som är relevanta för den långsiktiga säkerheten. De valda scenarierna ska tillsammans täcka alla rimliga framtida utvecklingar av betydelse för förvarets skyddsförmåga och ge en uppskattning av risken som förknippas med slutförvaret och som kvantitativt kan jämföras med riskkriteriet i SSMFS 2008:37.
9. Analys av valda scenarier: Huvudscenariot med referensutvecklingens två klimatfall påvisar att slutförvarets inneslutningsförmåga kan åstadkommas. Ytterligare scenarioanalyser fokuserar på faktorer som skulle kunna leda till situationer där säkerhetsfunktionen i fråga inte upprätthålls och att inneslutningsförmågan därmed inte kan säkerställas. Scenarioanalyserna omfattar endast sådana aspekter av förvarsutvecklingen för vilka det finns betydande skillnader i jämförelse med huvudscenariot. Analys av inneslutningsförmåga så som att tillhandahålla en korrosionsbarriär, att stå emot isostatisk last och att stå emot skjuvlast, redovisas i SR-Site huvudrapport (kapitel 12) med undantag av scenarier som rör framtida mänskliga handlingar (avsnitt 14.2). Analys av fördröjningsförmågan kvantifierar risken för scenarier med möjliga kapselbrott som identifierats i analysen av inneslutningsförmågan (SR-Site huvudrapport, kapitel 13; SKB TR-10-50). Dessa analyser innefattar beräkning av radionuklidutsläpp, radionuklidtransport och dospåverkan. Bedömning av huruvida scenarierna ska betraktas som ett "mindre sannolikt scenario" eller som ett "restscenario" görs i detta steg. De beräknade riskerna från huvudscenariot och från de mindre sannolika summeras för att få den totala risken från slutförvaret för tiden efter förslutning.
10. Ytterligare analyser och stödjande argument: Ytterligare ett antal analyser för att fullborda säkerhetsanalysen redovisas i SR-Site huvudrapport, kapitel 14.
11. Slutsatser: Resultaten från de olika scenarioanalyserna integreras för att dra slutsatser beträffande säkerheten i relation till föreskriftskraven (SR-Site huvudrapport, kapitel 15). Återkoppling rörande förvarsutformning, detaljerade platsundersökningar och SKB:s program för forskning, utveckling och demonstration redovisas också i detta steg.

2.1.3 Syfte med granskningen av säkerhetsanalysmetodik

Det övergripande målet för granskningen inom området säkerhetsanalysmetodik är att utvärdera om metoden som SKB har använt för säkerhetsanalysen har den trovärdighet och kvalitet som krävs för en bedömning om tillstånd enligt kärntekniklagen för att uppföra, inneha och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle kan beviljas. I synnerhet syftar granskningen av säkerhetsanalysmetodiken till att utvärdera om format, metod, hantering av data, FEP, scenarier, osäkerheter, variabilitet samt till resultatens kvalitet, känslighet, tillgänglighet och spårbarhet har förutsättning att uppfylla föreskriftskrav som anges i föreskrifterna SSMFS 2008:1, SSMFS 2008:21 och SSMFS 2008:37 i de fortsatta stegen i SKB:s program för utveckling av ett slutförvar för använt kärnbränsle. Nedan följer en genomgång av respektive område.

2.2 Systemanalys och FEP-hantering

I detta avsnitt redovisas definitionen av initialtillståndet för slutförvarsomgivningen och de tillverkade komponenterna samt undermarksutrymmena som ett steg i konceptualiseringen av slutförvarssystemet. Vidare diskuteras de antaganden och beskrivningar som tillhör redovisningen av slutförvarssystemet. Sist beskrivs SKB:s metodik för att identifiera, utvärdera och klassificera händelser, processer och egenskaper (FEP) som har en säkerhetsbetydelse för slutförvarsutvecklingen efter förslutning.

2.2.1 Konceptualisering

2.2.1.1 Underlag från SKB

Huvudfrågor i säkerhetsanalysen SR-Site är huruvida säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning upprätthålls i tillräcklig omfattning för tiden efter slutförvarets förslutning (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.1). SKB har utformat KBS-3-systemet på så sätt att det är möjligt att demonstrera dess långsiktiga strålsäkerhet. Förvarssystemet definieras övergripande som det deponerade använda kärnbränslet, de tekniska barriärerna som omgärdar bränslet, bergutrymmena, den omgivande bergbarriären samt biosfären i anslutning till förvaret. Det använda kärnbränslet kapslas in i täta, lastbärande kapslar som är motståndskraftiga mot korrosion. Kapslarna deponeras i kristallint berg på 400-700 meters djup och omges av en buffert och återfyllnad som förhindrar vattenflöde och skyddar dem mot naturliga eller inducerade processer. De utrymmen i berget som behövs för deponering av ca 6 000 kapslar kommer att återfyllas och förslutas.

Gränserna mellan det använda kärnbränslet, kapslarna, bufferten, den återfyllda deponeringstunneln och andra förvarsutrymmen är geometriskt väldefinierade medan för det som gäller geosfären och biosfären är en detaljerad geometrisk definition varken relevant eller nödvändig. Biosfären räknas i ett område i storleksordningen 100 till 300 km² ovanför förvaret och sträcker sig till berggrunden som en del av slutförvarssystemet. Övrig storskalig biosfär betraktas däremot som en extern del av systemet. Geosfären i slutförvarssystemet omfattar ett djup i berggrunden ned till omkring 1 000 m. Denna definition kan dock variera beroende på analys syftet: för lokala grundvattenmodelleringar antas en utbredning av markytan på mindre än 100 km², medan för en regional grundvattenmodellering antas en utbredning överstigande 300 km² och i detta fall ett större djup än 1 000 m. Framtida mänskliga handlingar på lokal nivå räknas som interna i förhållande till systemet medan frågor som rör egenskaper och beteende hos det framtida samhället i stort räknas som externa förhållanden.

Konceptualiseringen påverkar hur den platsbeskrivande modellen är uppbyggd, hur de olika objekten är beskrivna samt vilken detaljeringsgrad som erfordras (SKB TR-08-05). Konceptuella antaganden görs för att definiera t.ex. deformationszonsmodellen,

bergdomänsmodellen, sprickdomänsmodellen, bergspänningsmodellen, spricknätverksmodeller (DFN-modeller), hydrogeologiska modeller och geokemiska modeller.

2.2.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB i tillräcklig omfattning har beskrivit grundstenarna i konceptualisering av KBS-3-förvaret genom att: (i) motivera dess grundläggande säkerhetsfunktioner inneslutning och fördröjning; (ii) motivera valet av Forsmark som förlägningsplats och beskriva den funktionellt till de antagna säkerhetsfunktionerna; (iii) etablera en kvantitativ beskrivning av initialtillståndet för geosfären och biosfären för platsen; (iv) etablera en uppsättning av konstruktionsförutsättningar för att kunna utforma ett KBS-3-förvar för vilket den långsiktiga säkerheten ska demonstreras.

Konceptualiseringen av KBS-3-slutförvarssystemet, som innefattar anläggningen och den geografiska platsen som erhåller barriärfunktioner och där konsekvenser av eventuella utsläpp av radionuklider behöver utvärderas mot föreskriftkraven, förknippas med osäkerheter. Generellt bedömer SSM att kvarstående osäkerheter i konceptualisering av KBS-3-förvaret är av sådan karaktär att de inte försvårar förutsättningarna att demonstrera kravuppfyllelse vid kommande steg av SKB:s program. Emellertid kvarstår vissa osäkerheter i förståelsen av specifika processer som berör barriärerna, t.ex. vissa degraderingsprocesser för kapseln samt förvarets påverkan av seismicitet.

2.2.2 Systemanalys

2.2.2.1 SKB:s underlag

KBS-3-slutförvarssystemet kommer att utvecklas med tiden och det framtida tillståndet kommer att bero på systemets initialtillstånd, interna processer och externa faktorer (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.1). Genomgången av processer och betingelser i slutförvaret ges i produktionsrapporterna för de tekniska barriärerna, i Berglinjerapporten (SKB TR-10-18) samt i processrapporterna för bränslet (SKB TR-10-46), geosfären (SKB TR-10-48), biosfären (SKB TR-10-09) och klimatet (SKB TR-10-49). Systemets initialtillstånd, interna processer och externa faktorer är alla specifika för den valda metoden på den valda platsen. SKB har genomfört en utförlig inventering av möjliga/tänkbara förhållanden, händelser och processer (FEP) som en grund för identifiering av de specifika betingelser som är signifikanta för den långsiktiga säkerheten med avseende på vald metod och plats.

Initialtillståndet sammanfattar de egenskaper som kännetecknar: (i) det använda kärnbränslet vid tiden för inkapsling, (ii) kapselns gjutjärnsinsats och kopparhölje, bufferten och återfyllnaden vid tiden för deponering, (iii) bergutrymmen vid tiden för del- eller slutlig förslutning, (iv) geosfären och biosfären vid det ostörda tillståndet innan uppförande av slutförvaret (SKB TR-10-12).

De interna processerna, dvs. ett antal strålningsrelaterade, termiska, hydrauliska, mekaniska, kemiska och biologiska processer som pågår inom förvarssystemet över tid, påverkar slutförvarssystemet före och efter det definierade initialtillståndet. Till de interna processerna hör till exempel sönderfallet av radioaktiva ämnen vilket leder till en uppvärmning av bränslet, de tekniska barriärerna och det omgivande berget. Grundvattenströmningen och kemiska processer som påverkar de tekniska barriärerna är andra exempel.

Till de externa faktorer som påverkar slutförvarssystemet räknas till exempel inverkan av framtida klimat och klimatrelaterade processer, såsom glaciation och landhöjning, uppbyggnad av mekanisk energi i jordskorpan på grund av plattetektoniska rörelser, men även framtida mänskliga handlingar som kan påverka slutförvaret. Baserat på

inventeringen av externa faktorer definierar och analyserar SKB en referensutveckling av Forsmarksplatsen för tiden efter förslutning av slutförvaret som motsvarar hanteringen av klimatutvecklingen och dess osäkerheter i allmänna råd till SSMFS 2008:37 (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.5.3 och kapitel 6). För att fånga in referensutvecklingens osäkerheter gällande klimatrelaterade förändringar, som strandlinjeförskjutning, utvecklingen av permafrost och förekomsten av inlandsisar, har SKB tagit fram ytterligare fyra klimatfall vilka benämns: förlängd global uppvärmning, förlängd inlandsisutbredning, maximal inlandsisutbredning och sträng permafrost.

Systemanalysen fullbordas med fastställande och analys av slutförvarssystemets respons till referensutvecklingen (SR-Site huvudrapport, kapitel 10). Syftet med systemanalysen är att få kunskap om systemets övergripande utveckling samt att identifiera de osäkerheter som påverkar utvecklingen inför val av scenarier och scenarioanalys i den första säkerhetsanalysen av KBS-3-förvaret.

2.2.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer angående systemanalyssteget i SR-Site att SKB har uppnått en rimlig och tillfyllest förståelse för utvecklingen av KBS-3-förvaret på Forsmarksplatsen och att de processer som potentiellt kan leda till bortfall av barriärfunktioner i slutförvaret har identifierats på ett systematiskt och övertygande sätt. Systemanalysen i SR-Site är en fenomenologisk analys som täcker den förväntade utvecklingen av KBS-3-slutförvarssystemet efter förslutning. Genom användning av varianter av klimatutvecklingen har SKB även på ett metodiskt sätt tagit hänsyn till osäkerheter i klimatutveckling under de långa tider efter förslutning som analysen ska täcka in.

SSM noterar att SR-Site säkerhetsanalys är baserad på ett antaget initialtillstånd för slutförvarssystemet. Till exempel anger SKB att initialtillståndet för systemet är ett grundläggande steg för bedömning av säkerheten och behöver ett grundligt belägg (SR-Site huvudrapport, avsnitt S3.3). SKB definierar initialtillståndet som tillståndet vid tidpunkten för deponering eller installation av tekniska barriärer, och för geosfären och biosfären som det naturliga ostörda tillståndet innan utschaktning av berget i slutförvaret har påbörjats (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.5.2 och 5). Dessa definitioner är tydliga och begripliga, men kopplar till en tidigare tidpunkt än den då slutförvaret och dess komponenter kommer att uppfylla samtliga säkerhetsfunktioner. Till exempel så uppnår bufferten inte vissa av sina säkerhetsfunktionsindikatorer förrän bufferten genom vattenupptag uppnår ett visst svälltryck.

2.2.3 FEP-hantering

2.2.3.1 SKB:s underlag

SKB:s analys och hantering av egenskaper, händelser och processer FEP ("Features, Events, Processes") som kännetecknar ett KBS-3-förvar för använt kärnbränsle och dess utveckling efter förslutning har som grund SR-Site:s FEP-databas och FEP-katalog som innehåller alla FEP som beaktas i SR-Site. FEP-databasen har sina rötter i det arbete som SKB genomförde under 1990-talet för att bygga interaktionsmatriser som visar det ömsesidiga beroendet mellan FEP relevanta för säkerheten efter förslutning. Interaktionsmatriserna konstruerades med hjälp av tillvägagångssätt i "Rock Engineering System" (RES, Jiao och Hudson, 1995), där de viktigaste variablerna i geosfärssystemet listas längs den ledande diagonalen i en kvadratisk matris och interaktioner mellan variablerna ges i diagonalelementen. Interaktionsmatriser utvecklades för slutförvarets buffert, närområde och fjärrområde. Dessa interaktionsmatriser presenterades som en del av säkerhetsanalysen SR-97 (SKB TR-99-20).



Även i säkerhetsanalysen SR-97 har interaktionsmatriserna legat till grund för fastställandet av processer och variabler relevanta för slutförvarfunktionerna efter förslutning. Processer, beskrivningar och processdiagram som illustrerar samverkan mellan processer och variabler presenterades i TR-99-07. Rapporten var den första versionen av en processrapport för ett KBS-3-förvar, och både SKB:s egen personal och konsulter involverades i dess framtagning.

Innehållet i processrapporten för SR-97 införlivades i en databas för säkerhetsanalysen SR-Can som utgjorde den första FEP-databasen (SKB TR-06-20). Databasformatet var avsett att underlätta en systematisk analys och dokumentation av FEP och FEP-analys. SR-Can:s FEP-databas och processrapporter lade grunden till SR-Site:s FEP-databas och processrapporter.

SKB:s metodik för hantering av FEP presenteras i SR-Site som det första huvudsteget i SKB:s metodik för att producera säkerhetsanalysen (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.5 och figur 2-2). Detta steg innebär att identifiera alla de faktorer som ska beaktas i säkerhetsanalysen för den långsiktiga strålsäkerheten för ett geologiskt slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark. Ett brett urval av faktorer som kan påverka slutförvaret över relevanta tidsskalor har beaktats. Steget genomförs omfattande och systematiskt, och beslut om behandling av olika faktorer motiveras, kontrolleras och dokumenteras i en digital FEP-databas och i FEP-rapporten för SR-Site (SKB TR-10-45). SR-Site:s FEP-databas inkluderar en FEP-katalog. SR-Site FEP-databas har utvecklats baserat på en systematisk metodik och en iterativ process som pågått under många år. Beskrivningar av FEP och hur dessa har hanterats i säkerhetsanalysen samt motiveringar till varför vissa FEP inte är relevanta för säkerhetsanalysen uppges på olika ställen i säkerhetsanalysen, FEP-databasen, FEP-rapporten (SKB TR-10-45), SR-Site-rapporten (SR-Site huvudrapport) och i processrapporterna.

FEP klassificeras inledningsvis som tillhörande: initialtillstånd, interna processer, externa processer, utvärderingsmetoder, irrelevanta i FEP-rapporten (SKB TR-10-45, avsnitt 1.1 och figur 2-3). FEP för initialtillstånd delas in i två grupper (SKB TR-10-45, avsnitt 4.2): en som relaterar till referensinitialtillståndets variabler; en som relaterar till avvikelser från referensinitialtillståndet. FEP-kategorin som benämns platsspecifika faktorer introducerades i FEP-rapporten (SKB TR-10-45, avsnitt 5.7) och i FEP-databasen.

SR-Site:s FEP-databas innehåller processdiagram som ger en förklarande bild av kopplingen mellan processer och variabler i varje systemkomponent och ”influenstabeller” som kortfattat ger information om vilka dessa kopplingar är och hur de behandlas i säkerhetsanalysen. Influenstabellerna återges även i processrapporterna, som behöver konsulteras för en mer detaljerad diskussion om processer och variabler.

Flödesscheman för utvärderingsmodeller AMF (”Assessment Model Flow Charts”) och AMF-tabeller finns också i SR-Site:s FEP-databas och ger användbara länkar till modeller som används för att bedöma, utvärdera och simulera olika processer.

Experter har genomfört kontroller enligt etablerade kvalitetssäkringsinstruktioner för att säkerställa att det genomförda arbetet är konsekvent i förhållande till motsvarande databaser som utvecklats i andra länder (t.ex. NEA:s internationella FEP-databas) och att samtliga relevanta faktorer för den långsiktiga säkerheten har tagits omhand (SKB TR-10-45, Bilaga 3 till 10).

2.2.3.2 SSM:s bedömning

Övergripande bedömer SSM att redovisningen av egenskaper, händelser och processer (FEP) i analysen av KBS-3-förvaret är ändamålsenlig och relevant som underlag för att demonstrera långsiktig strålsäkerhet. FEP-katalogen innehåller i stora delar den nödvändiga information som möjliggör den fortsatta hanteringen i att identifiera viktiga processer samt att välja relevanta scenarier i SR-Site. Informationen är tydlig och transparent redovisad för de flesta processer presenterade i SKB:s ansökan.

SKB:s tillvägagångssätt för att visa att säkerhetsanalysen SR-Site är tillräckligt omfattande har särskilt utgått från att identifiera och analysera egenskaper, händelser och processer (FEP). FEP-katalogen beskrivs i SR-Site huvudrapporten (SR-Site huvudrapport, avsnitt 3.3). Emellertid har FEP-katalogen beaktats och varit en utgångspunkt vid framtagandet av produktionsrapporter (SKB TR-10-14, TR-10-15, TR-10-16, TR-10-17) och processrapporter (SKB TR-10-46, TR-10-47, TR-10-48), liksom klimatrapporten (SKB TR-10-49), biosfärssyntesrapporten (SKB TR-10-09) och stödande ekosystemrapporter och rapport om framtida mänskliga handlingar (SKB TR-10-53). Dessa rapporter sammanställer systematiskt och på ett tydligt sätt en omfattande beskrivning och analys av radiologiska, termiska, hydrauliska, mekaniska, kemiska, biologiska och egenskaper, händelser och processer. SSM bedömer därför att SKB:s FEP-inventering kan anses vara tillräckligt heltäckande.

Ur ett metodologiskt perspektiv har SR-Site:s FEP-katalog använts av SKB i flera steg av säkerhetsanalysen för KBS-3-förvaret. Syftet med en sådan användning har varit att utveckla (se även OECD NEA 2012):

- FEP-checklistor för beskrivning av processer, initialtillstånd samt externa förhållanden relevanta för KBS-3-förvarets långsiktiga strålsäkerhet
- FEP-diagram som visar hur FEP förhåller sig till säkerhetsfunktioner och säkerhetsindikatorer som har definierats för att utvärdera KBS-3-förvarets långsiktiga strålsäkerhet
- ytterligare scenarier som skulle hanteras i säkerhetsanalysen och som har uppmärksammats i FEP-diagrammen pga. osäkerheter inom vissa processer
- analyser för att stödja exkludering av vissa FEP från säkerhetsredovisningen.

SSM anser dock att SKB:s sätt att länka ihop posterna i FEP-katalogen och i FEP-diagram med informationen i SR-Site huvudrapporten samt i stödande underrapporter kan förbättras. Även om en sådan insats inte skulle få en central roll i SKB:s metodik skulle redovisningens kvalitet förbättras och dess heltäckande omfång skulle styrkas. Bilaga 3 i biosfärssrapporten (SKB TR-10-09) presenterar SKB t.ex. en kartläggning av SR-Site:s FEP mot "projektets FEP" i NEA:s internationella FEP-databas, men denna kartläggning täcker inte FEP kopplade till initialtillståndet vilket SKB inte har kommenterat eller motiverat. SSM noterar också att kopplingen som SKB har etablerat mellan SR-Site FEP-katalogen och interaktionsmatriserna i SR-97 är ofullständig och konsekvensen av detta har inte berörts i SR-Site (SKB TR-10-45, avsnitt 2.3.4, 3.2 och bilaga 1). SSM har även noterat vissa inkonsekvenser i redovisningen av processdiagrammen kopplade till FEP-katalogen, så som att detaljeringsgraden varierar från process till process, och att information i vissa fall saknas helt. Vissa FEP relaterade till radionuklidtransport (C15) och särskilt radionuklidtransport i återfyllnaden (t.ex. BfT19, BfT20, BfT21, BfT22) (SKB TR-10-45, figur 2.2 och 2.3) saknas processdiagram och influenstabeller som enligt SKB:s metodik ska höra till säkerhetsanalysen.

SSM vill också påpeka att för några av de FEP som SKB har bedömt att inte ha någon inverkan på KBS-3-förvarets långsiktiga strålsäkerhet finns endast en ofullständig diskussion innan dessa exkluderas från analyserna i SKB:s redovisning. I vissa fall har argumentationen för varför effekten på den långsiktiga strålsäkerheten av en viss FEP inte

behandlats på ett konsekvent och fullständigt sätt av SKB. SSM bedömer dock att den ofullständiga argumentationen inte är av sådan dignitet att det på ett betydande sätt minskar tillförlitligheten av säkerhetsanalysresultatet.

Enligt SSM:s uppfattning bör SKB regelbundet revidera sin FEP-katalog med hänsyn till säkerhetsanalyser färdigställda och publicerade i andra länder, men som inte har inkluderats i NEA:s internationella FEP-databas från 2002, eller som har färdigställts efter det (t.ex. JNC 2000; Nagra 2002; Mazurek m.fl. 2003; Hwang m.fl. 2006; Miller och Nuria 2007; SNL 2008; ONDRAF/NIRAS 2009; Freeze and Swift 2010; Blink m.fl. 2010; SNL 2011).

2.2.4 Säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier

2.2.4.1 SKB:s underlag

De viktigaste säkerhetsfunktionerna för KBS-3-förvaret är inneslutning av det använda kärnbränslet och fördröjning av spridning av radioaktiva ämnen i fall inneslutningen skulle brista (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.2). Närmare bestämt har SKB definierat ett antal säkerhetsfunktioner för olika komponenter i det föreslagna slutförvarssystemet (SR-Site huvudrapport, avsnitt 8, t.ex. figur 8-2 och 8-3). För några av dessa säkerhetsfunktioner har SKB identifierat säkerhetsfunktionsindikatorer, dvs. specifika parametrar och kvantitativa kriterier mot vilka uppfyllelse av säkerhetsfunktionerna kan bedömas. Säkerhetsindikatorer för en viss säkerhetsfunktion kan vara kvalitativa, kvantitativa eller logiska (t.ex. att funktionen ”finns” eller ”finns inte”).

De grundläggande säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning delas upp i ett antal delfunktioner för barriärerna, dvs. för kapseln, bufferten, återfyllnaden, pluggar, förslutning och berget, som slutförvarssystemet ska upprätthålla över tid för att säkerställa den långsiktiga strålsäkerheten (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.5.5). Varje delfunktion kopplas till en säkerhetsfunktionsindikator, dvs. en mätbar eller beräkningsbar egenskap hos den aktuella barriären. Utvärdering av säkerhetsfunktionsindikatorerna görs mot uppsatta kriterier som avgör om den aktuella säkerhetsfunktionen upprätthålls över tid i slutförvaret. Säkerhetsfunktionsindikatorerna är direkt kopplade till förståelsen av de interna processer som påverkar slutförvaret och deras utveckling över tid från initialtillståndet (FEP). Referensutvecklingen samt scenarierna väljs i syfte att utvärdera om säkerhetsfunktionerna upprätthålls under den långsiktiga utvecklingen av slutförvaret och med hänsyn tagen till osäkerheterna. Detaljerade säkerhetsfunktioner för inneslutning och fördröjning redovisas i SR-Site huvudrapport, avsnitt 8.3 respektive 8.4.

SR-Site ger ett betydande underlag som diskuterar möjliga tillstånd för olika säkerhetsfunktioner i olika skeden av slutförvarets utveckling (t.ex. SR-Site huvudrapport, avsnitt 8.5, 10.3.16, 10.4.11, 10.5. 1, 10.6.4) och använder säkerhetsfunktionerna för att underlätta identifiering av scenarier för säkerhetsbedömning (SR-Site huvudrapport, kapitel 11).

2.2.4.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s användning av säkerhetsfunktioner, säkerhetsindikatorer och kriterier för att beskriva utvecklingen av KBS-3-förvaret efter förslutning är ändamålsenlig för att demonstrera att SKB har förutsättningar att uppfylla föreskriftskraven för den långsiktiga strålsäkerheten. SSM håller med SKB om att säkerhetsfunktioner, säkerhetsindikatorer och kriterier är lämpliga utgångspunkter för inventering och val av scenarier i säkerhetsanalysen.

SKB:s definition av säkerhetsfunktion grundar sig på en uppsättning av potentiella brottmekanismer eller uppkomna brister i de olika barriärerna i KBS-3-förvaret. Detta



gäller t.ex. korrosionsmekanismer samt kapselbrott under skjuvning eller isostatisk last. SSM anser dock att SKB:s sätt att definiera säkerhetsfunktioner kan leda till att vissa relevanta scenarier inte beaktas. Ett exempel är en tänkbar spröd krypdeformation av kopparkapseln som har uteslutits som en relevant brottmekanism i KBS-3-förvaret och krypdeformation har således inte någon definierad säkerhetsfunktion i säkerhetsanalysen. Ett fullständigare urval av säkerhetsfunktioner respektive scenarier som kan visa sig vara både av typen mindre sannolika scenarier och restscenarier skulle förbättra förutsättningarna för att säkerställa att samtliga aspekter av relevans för långsiktig strålsäkerhet beaktas vid såväl detaljutformning av förvarskomponenter som vid riskanalys.

SSM vill också påpeka att användningen av vissa säkerhetsindikatorer kan vara svårt rent praktiskt för de fall där kvantitativa kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer inte har specificerats (SSM Technical Note 2012:24). SKB föreslår att värdet för en viss parameter kopplad till en säkerhetsfunktionsindikator ska kunna vara ”hög” eller ”låg” (t.ex. för vattengenomsläppligheten för bergssprickor i närheten av deponeringshålen). Även om avsikten med att uppge sådana indikatorer är motiverad, blir den objektiva betydelsen av sådana kvalitativa termer oklar. Användning av relativa kriterier bedöms därför reducera användbarheten av säkerhetsanalysberäkningar i samband med verifikation av kravuppfyllelse för en barriär eller barriärfunktion.

2.2.5 Konstruktionsförutsättningar SKB:s underlag

Olika uppsättningar av konstruktionsförutsättningar har tagits fram för att projektera, uppföra, utforma och kontrollera slutförvarssystemet och dessa är därför kopplade till initialtillståndet (SKB TR-10-12, avsnitt 2.1 och 2.5). Konstruktionsförutsättningarna ska säkerställa att systemet är tillräckligt robust så att det kommer att uppfylla kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna över tid. Konstruktionsförutsättningar för slutförvarets tekniska barriärer och bergutrymmen underbyggs med hjälp av ett antal konstruktionsstyrande fall som ingår i säkerhetsanalysen för tiden efter förslutning. Även resultat från känslighetsanalyser gjorda inom säkerhetsanalysen används för att underbygga konstruktionsförutsättningarna. Konstruktionsförutsättningar kan även tas fram för att uppfylla krav från uppförande- samt driftbetingelser, från andra nationella och internationella krav utöver de som reglerar kärntekniska anläggningar, från krav och överenskommelser med nationella intressenter med mera. Tre nivåer av konstruktionsförutsättningar definieras beroende på varifrån de härstammar: (i) från lagar, föreskrifter, beslut samt krav från intressenter; (ii) från konceptet för KBS-3-förvaret i stort; (iii) från KBS-3-förvarets specifika barriärer och säkerhetsfunktioner. De konstruktionsförutsättningar som har använts för utformning av KBS-3-förvaret och som ligger till grund för analyserna i SR-Site togs fram baserat på resultat från den tidigare säkerhetsanalysen SR-Can som med smärre ändringar har redovisats i konstruktionsförutsättningsrapporten för SR-Site (SKB TR-09-22). Härledning av konstruktionsförutsättningarna från övriga projekteringsdetaljer för olika komponenter i KBS-3-förvaret återfinns i produktionsrapporterna för de tekniska barriärerna samt i berglinjerapporten. Konstruktionsförutsättningar är dock inte samma sak som säkerhetsfunktionsindikatorer (SR-Site huvudrapport, avsnitt 5.1.1). Medan avsikten är att säkerhetsfunktionsindikatorer ska upprätthållas genom hela analysperioden, så avser konstruktionsförutsättningarna endast initialtillståndet. Initialtillståndet behöver definieras och utformas på ett sådant sätt att de ger en marginal gentemot degradering som kan uppkomma under säkerhetsanalysperioden så att säkerhetsfunktionsindikatorerna i regel kan upprätthållas.

2.2.5.1 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s användning av konstruktionsförutsättningar för att projektera, analysera, uppföra, utforma och kontrollera KBS-3-förvaret är lämplig. En bra utgångspunkt för specifikation av konstruktionsförutsättningar är användning av relevanta konstruktionsstyrande fall från aktuella samt tidigare säkerhetsanalyser, kompletterande beräkningsfall och förbättringsförslag baserade på säkerhetsanalysens resultat.

SKB:s iterativa metod för att ta fram konstruktionsförutsättningar (SKB TR-09-22, avsnitt 2.1.2) följer i stort sett de allmänna råden till 9 § och bilaga i SSMFS 2008:21 som rekommenderar att ett antal konstruktionsstyrande fall bör identifieras med utgångspunkt från scenarier som kan visa sig vara särskilt viktiga ur riskanalyssynpunkt. Dessa fall bör, tillsammans med annan information om t.ex. tillverkningsteknik och kontrollerbarhet, användas för att underbygga konstruktionsförutsättningar. Detta utgör en förutsättning för att krav på barriäregenskaper, krav om tålighet, tillförlitlighet samt genomförbarhet i 3 kap. SSMFS 2008:1 och 5-7 § SSMFS 2008:21 ska kunna uppfyllas.

Konstruktionsförutsättningarna som SKB använder till KBS-3-förvarets referensutformning i säkerhetsanalysen SR-Site härrör från konstruktionsstyrande fall inkluderade i den tidigare säkerhetsanalysen SR-Can (SKB TR-06-09) samt ytterligare kompletterande analyser (SKB TR-09-22).

Konstruktionsförutsättningarna ska vara uppfyllda vid tidpunkten för barriärens initialtillstånd medan barriär- eller säkerhetsfunktioner däremot är definierad för en tidpunkt efter installationen eller efter förslutning av förvaret. SSM anser att det inte är tydligt hur konstruktionsförutsättningarna beaktar osäkerheter kopplade till utvecklingen av barriär- eller säkerhetsfunktionen mellan dessa två tidpunkter. Detta gäller t.ex. för konstruktionsförutsättningarna om begränsning av vatteninflöde till deponeringshål som kan erodera en viss massa av buffert pga. kanalbildningserosion, om begränsning av bergmassans genomsläpplighet i närområdet för deponeringstunnlar och deponeringshål, om begränsning av buffertdensitet för att innehålla styvhetskrav på buffert, om tillämpning av kriterier för att undvika skjuvrörelser på sprickor i berg som skär deponeringspositioner pga. jordskalv.

SSM vill också påpeka att konstruktionsförutsättningar för kapselns kopparhölje och gjutjärninsats inte fullt ut beaktar scenarier och beräkningsfall kopplade till töjningsgränser, tidsberoende eller inbyggda defekter i materialen. Projektering, utformning och kontroll av barriärerna för att ta fram KBS-3-förvarets referensutformning kan därmed inte utgå från kraven på dessa funktioner.

Utförliga kommentarer och åtgärdsförslag som gäller de sistnämnda konstruktionsförutsättningarna återfinns i kapitel 3, 4 och 5 i denna granskningsrapport.

2.3 Interna och externa förhållanden

2.3.1 Underlag från SKB

Steg 2a, 2b och 2c i SKB:s säkerhetsanalyismetodik är dedikerade till en beskrivning av tillståndet för slutförvarssystemet vid den tidpunkt då man aktivt slutar kunna påverka eller kontrollera materialegenskaperna, geometrin eller tillståndet för de naturliga eller ingenjörsmässiga barriärerna (dvs. kapsel, buffert, återfyllnad, pluggar och förslutning) och för övriga komponenter i slutförvarssystemet (dvs. deponeringshål, deponeringstunnlar, stamtunnlar, centralområde, tillfarter, schakt, borrhål) samt biosfären (SR-Site huvudrapport, kapitel 4, 5 och 6). Kunskapen om initialtillståndet och dess osäkerheter och variation är en grundförutsättning för att kunna utveckla slutförvarets

konstruktion och för att kunna studera dess långsiktiga utveckling och strålsäkerhet efter förslutning. I avsnitt 2.2 i denna rapport redovisas definitionen av initialtillståndet för omgivningen och de tillverkade komponenterna och undermarksutrymmena som ett steg i en konceptualisering av slutförvarssystemet.

Kapitel 4 i SR-Site huvudrapport sammanställer en beskrivning av Forsmarksplatsen baserat på informationen i den platsbeskrivande modellen (SKB TR-08-05), i processrapport för geosfären (SKB TR-10-48) och i platsbeskrivningen avseende ytsystemet (SKB R-08-121). Den platsspecifika utformningen av förvaret i överensstämmelse med fastställda konstruktionsförutsättningar (SKB R-08-116) är också utgångspunkt för initialtillståndet för flera av slutförvarets komponenter samt för utveckling av geosfären vilket har redovisats i berglinjerapporten (SKB TR-10-18) samt i processrapport för geosfären (SKB TR-10-48). Viss ingående data till säkerhetsanalysen måste dock härledas eller extrapoleras från platsundersökningsresultat och platsbeskrivningen vilket görs i datarapporten (SKB TR-10-52). Kapitel 4 diskuterar även tilltron till data för säkerhetsanalysen, osäkerheterna i parameterbestämningen, alternativa modeller samt viktiga kvarvarande osäkerheter i platsbeskrivningen. Det orörda tillståndet för geosfären samt biosfären motsvarar initialtillståndet för säkerhetsanalysen och täcks därför in av beskrivningen i kapitel 4.

Kapitel 5 redovisar utvecklingen av geosfären samt biosfären från sitt initialtillstånd pga. berguttag och relaterade förändrade förhållanden under slutförvarets uppförande. Denna utveckling är viktig i och med att den påverkar randvillkoren för de andra barriärernas initialtillstånd. För de tekniska barriärerna i slutförvarssystemet följer en redovisning av initialtillståndet som till stora delar erhålls från förvarets kravspecifikationer, tillhörande tillåtna toleranser och avvikelser. Tillverknings-, bygg- och kontrollmetoder beskrivs och diskuteras med hänsyn till önskade och oönskade förhållanden vid initialtillståndet, exempelvis pga. att kravspecifikationerna överskrids. Initialtillståndet för förvarssystemets tekniska barriärer beskrivs mer detaljerat i produktionsrapporterna. Relevanta interna processer som påverkar initialtillståndet har identifierats i FEP-rapporten (SKB TR-10-45).

Kapitel 6 i SR-Site huvudrapport innehåller en sammanställning av de externa förhållanden som är relevanta för Forsmarksplatsen och som har identifierats genom FEP-analysen (SKB TR-10-45). De externa förhållanden som diskuteras i detta kapitel berör en relevant geologisk tidsperiod för de närmaste 65 miljoner åren (vilket motsvarar de geologiska tidsperioderna paleogen och neogen, tidigare kallat tertiär). Långsiktiga geologiska processer, som tektonisk upplyftning, diskuteras med utgångspunkt från topografiska aspekter vilka leder till erosion och denudation av glacialt eller icke-glacialt ursprung. Dessa processer är relevanta med hänsyn till att de sänker markytan och därmed exempelvis kan påverka det maximala permafrostdjupet. Isostatiska belastningar och avlastningar orsakar förskjutningar i vertikalled och leder i sin tur till strandlinjeförskjutningar vilka har stor påverkan på biosfären och geosfären. Den framtida strandlinjeförskjutningen i Forsmark är dock främst kopplad till klimatförändringar och klimatrelaterade förändringar såsom glaciationer. Bland de processer som beror på mänskliga handlingar analyseras bl.a. malmpotentialen i Forsmark samt regionala eller globala handlingar som kan påverka platsen. Även sannolikheten för meteoritnedslag diskuteras i kapitel 6.

Kapitel 7 i SR-Site huvudrapport sammanfattar platsspecifika och relevanta processer för slutförvaret i Forsmark. Identifiering, förståelse, relevans samt osäkerheter för processer hämtas från processrapporterna, presentationen av processer pga. berguttag samt biosfären (SKB TR-10-09). Anvisning av hur dessa processer ska hanteras i modellering för referensutveckling, scenarioanalys samt konsekvensanalys ges på ett formaliserat sätt.

Modellscheman AMF ("Assessment Model Flow charts") tas fram för uppförande och driftsfasen samt för den tempererade perioden (figur 7-2) och permafrost och glaciationsperiod (figur 7-4). Länkar mellan processer och analyser i referensutvecklingen (kapitel 10), scenarioanalys (kapitel 12) och konsekvensanalysen (kapitel 13) sammanställs i tabell 7-7 och 7-8 med samma uppdelning som för modellscheman. Processerna är grupperade beroende på dess sammankoppling och uppdelade för olika komponenter i slutförvarssystemet.

2.3.2 SSM:s bedömning

Från en metodologisk synvinkel anser SSM att steg 2, 3 och 4 är mindre kritiska för utfallet av SKB:s säkerhetsanalys. SKB förklarar att dessa steg och tillhörande kapitel i SR-Site huvudrapport är funktionella så att läsaren ska förse med sammanfattningar av förhållandena vid initialtillståndet och interna och externa processer som kan förekomma i slutförvarsmiljön i Forsmark. SSM anser att kontroll av fullständigheten för processtabeller (avsnitt 7.4), modellscheman och länkarna mellan slutförvarssystem (avsnitt 7.5) är centrala för propagering av processer till scenarioanalys och bör därför erhålla speciellt fokus från SKB under de kommande stegen vid etablering av ett slutförvar för använt kärnbränsle.

SSM observerar att SKB i SR-Site huvudrapport inte återger någon detaljerad information om radionuklidinventariet, vilket utgör en brist mot bakgrund av den sammanfattande funktionen hos kapitlen om initialtillstånd samt om externa och interna förhållanden.

2.4 Scenarier

I detta avsnitt sammanfattar och granskar SSM SKB:s användning av den så kallade referensutvecklingen, definitionen av SR-Site huvudscenariot, valet av scenarier samt konstruktionsstyrande fall.

2.4.1 Referensutvecklingen

2.4.1.1 Underlag från SKB

Referensutvecklingen redovisas i kapitel 10 i SR-Site huvudrapport och grundas på ett realistiskt initialtillstånd för slutförvaret och på ett urval av troliga utvecklingar av de yttre förhållandena under analysperioden. Referensutvecklingen för KBS-3-förvaret i Forsmark behövs för att få kunskap om systemets övergripande utveckling samt om de osäkerheter som påverkar utvecklingen och baseras på de framtida mest sannolika externa referensförhållandena. Referensutvecklingen är ett viktigt underlag till huvudscenariot och ger de yttre förutsättningarna till två rimliga utvecklingar av förvarssystemet, samt upplyser om vilka specifika processer som är relevanta för strålsäkerheten av slutförvaret efter förslutning. För att fånga in referensutvecklingens osäkerheter gällande klimatrelaterade förändringar, som strandlinjeförskjutning, utvecklingen av permafrost och förekomsten av inlandsisar, har SKB tagit fram ytterligare fyra klimatfall.

I referensutvecklingen analyserar SKB säkerhetsfunktionerna, deras indikatorer och kriterier för att utforska hur dessa påverkas av de antagna initialtillstånd, utveckling av externa förhållanden samt de rådande processerna i slutförvaret med utgångspunkt från sammanställningen i FEP-diagrammet i figur 8-4 i SR-Site huvudrapport.

Referensutvecklingen täcker slutförvarets utveckling under hela analysperioden på en miljon år. Två fall av referensutvecklingen analyseras: i) ett basfall med externa förhållanden lika med den senaste Weichselistiden för de första 120 000 åren, därefter



antas sju upprepningar av samma cykel täcka in hela den en miljon år långa period som analyseras, och ii) en variant med global uppvärmning orsakad av mänskligt utsläpp av växthusgaser, vilket leder till att dagens biosfärsförhållanden inte förändras.

Basfallet analyseras i avsnitten 10.2 till 10.5 i SR-Site huvudrapport och är indelat i tidsperioder: tiden för bygg- och driftskedet innan slutlig förslutning, den tempererade klimatperioden efter förslutning med fokus på de första 1000 åren samt tiden fram till inledning av periglaciala förhållanden, den återstående delen av glaciationscykeln och efterföljande glaciationscykler.

Referensutvecklingen med de klimatförhållanden som råder under varianten med global uppvärmning presenteras i avsnitt 10.6 i SR-Site huvudrapport. Varianten med ökad global uppvärmning omfattar en 50 000 år lång period med tempererat klimat, följt av referensglaciationscykelns inledande 70 000 år.

För varje tidsskede inom referensutvecklingen presenteras frågor gällande olika säkerhetsfunktioner, deras indikatorer och kriterier i följande ordning: för klimat, biosfär, termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska processer som rör geosfären, termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska processer som rör det tekniska barriärsystemet, dvs. kapsel, buffert, återfyllning och övriga delar av slutförvaret.

Analyserna vid utvärderingen av referensutvecklingen är relaterade till slutförvarssystemets säkerhetsfunktioner och säkerhetsfunktionsindikatorer för kapselns inneslutning i figur 10-2 i SR-Site huvudrapport. Dessa ska visa om säkerhetsfunktionerna upprätthålls under olika tidsskeden och externa förhållanden. För varje tidsskede redovisas utvecklingen av säkerhetsfunktionerna för geosfären, bufferten, återfyllnaden, kapseln samt de slutsatser som kan dras med tanke på hantering av radionuklidtransport inom konsekvensberäkningarna. Avslutningsvis görs en analys av osäkerheterna inom initialtillståndet för de tekniska barriärerna och geosfären, inom klimatutvecklingen samt kring de interna och externa processer som kan påverka bedömningen av slutförvarssystemets säkerhetsfunktioner. Analysen innefattar frågan om kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorer innehålls inom det aktuella tidsskedet eller under de efterföljande tidsskedena. I tabell 10-2 ges en överblick av osäkerheterna relaterade till inneslutning för basfallet och för varianten med global uppvärmning. Denna ligger till grund för valet av scenarier i följande delar av säkerhetsanalysen (SR-Site huvudrapport, kapitel 11). Osäkerheterna som påverkar processerna för det aktuella tidsskedet förs vidare till senare skeden i analysen av referensutvecklingen. Osäkerheter som förs vidare och visar sig få liten betydelse för alla typer av påverkan behöver inte beaktas vid valet av scenarier. De osäkerheter som visar sig få en betydande konsekvens för det aktuella skedet eller för senare skeden av referensutvecklingen förs vidare som fördelningar, värdeintervall eller olika fall till senare skeden i analysen av referensutvecklingen. Motivering för dessa beslut återges i kapitel 10 och 11 i SR-Site huvudrapport.

SKB drar slutsatsen att frågor som rör kapselbrott till följd av korrosion (säkerhetsfunktion Can1) och frågor som rör kapselbrott till följd av skjuvlast (säkerhetsfunktion Can3) är behäftade med betydande osäkerheter och behöver föras vidare till scenarioanalysen. Kapselbrott till följd av isostatisk last (Can2) utesluts däremot av SKB från scenarioanalysen baserat på analys av referensutvecklingen.

2.4.1.2 SSM:s bedömning

Genom analysen av referensutvecklingen av slutförvaret i kapitel 10 samt analyserna i kapitel 12 i SR-Site huvudrapport förenklar SKB säkerhetsanalysen till att omfatta två troliga framtida klimatutvecklingar (referensglaciationen och fallet med global uppvärmning). För att täcka in osäkerheterna med den framtida klimatutvecklingen, och

deras påverkan på slutförvaret, har SKB tagit fram ytterligare fyra klimatfall för slutförvarets utveckling efter förslutning. SSM bedömer att dessa fall ger en tillräcklig belysning av klimatrelaterade frågor och att SKB därför har förutsättning att uppfylla föreskriftskraven i detta avseende (5-7 § SSMFS 2008:37). I enlighet med tillhörande allmänna råd kopplar SKB de valda klimatutvecklingarna, dvs. basfallet och varianten med global uppvärmning, till realistiska uppsättningar av biosfärsförhållanden kompatibla med klimatutvecklingarna och därför kan metodiken även i detta avseende anses vara tillfredställande ur ett kravuppfyllelseperspektiv.

SKB:s metodik i kapitel 11 i SR-Site huvudrapport är också framtagen på så sätt att valet av klimatutvecklingarna leder till att dessa tillsammans belyser de mest betydelsefulla och rikligt förutsägbara sekvenserna av framtida klimattillstånd. SSM anser därmed att det finns förutsättningar till att uppfylla kraven i 5-7 § SSMFS 2008:37.

SSM anser att SKB:s tillämning av sin säkerhetsanalysmetodik som beskrivs i kapitel 12 och 13 i SR-Site huvudrapport ger förutsättningar för en beräkning av risken från slutförvaret som, för varje klimatutveckling, väger samman riskbidragen från ett antal scenarier som tillsammans belyser hur förloppen och de interna och externa processerna samt osäkerheterna påverkar den långsiktiga strålsäkerheten efter förslutning enligt de allmänna råden om tillämpning av 5-7 § SSMFS 2008:37.

För att kunna redovisa och värdera den beräknade risken från slutförvaret mot föreskrifternas kriterium för individrisk har SKB lagt upp en metodik som leder till möjlighet för en separat jämförelse av risken för varje klimatutveckling. På så sätt anser SSM att SKB:s metodik gör det möjligt att visa att slutförvaret kan komma att uppfylla riskkriteriet enligt 5 § SSMFS 2008:37 för de valda alternativa klimatutvecklingarna.

Redovisningen av referensutvecklingen i kapitel 10 i SR-Site huvudrapport ger, enligt SSM:s bedömning, förutsättning för SKB att kunna uppnå en grundläggande förståelse av slutförvarets funktion i olika tidsrymder samt för att identifiera krav på funktion och konstruktion av slutförvarets olika delar enligt de allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21.

Förutsättningarna för den fenomenologiska analysen av slutförvaret etableras av SKB i kapitel 7 i SR-Site huvudrapport, där interna processer identifieras och deras ömsesidiga påverkan och interaktion kartläggs genom de sammanfattande AMF-modellscheman (Assessment Model Flowcharts) för olika tider efter förslutning (figur 7-3 och 7-4). SKB delar upp den fenomenologiska analysen av inre och yttre betingelser i slutförvaret efter förslutning i en del som berör säkerhetsfunktionerna (kapitel 10 och 12 i SR-Site huvudrapport) och en del som berör konsekvensanalysen (kapitel 13 i SR-Site huvudrapport). Emellertid kommer behandlingen av vissa processer i AMF-modellscheman att redan ha bestämts vid metodiksteget i kapitel 7, och de processer som inte tillhör den mest troliga utvecklingen av yttre betingelser kommer inte att genomgå en fenomenologisk analys tillsammans med de mest realistiska eller konservativa antagandena om de inre betingelserna såsom för referensutvecklingen. SSM anser att det vore önskvärt om potentiella, men inte troliga interna processer, som t. ex. deformation och/eller förspridning av koppar, hanterades på samma sätt som de troliga processerna i referensutvecklingen, så att kopplingen mellan dessa potentiella processer och valet av scenarier blir tydligare. Bedömningen att dessa inte leder till bortfall av säkerhetsfunktioner kunde på detta vis grundas på uppskattningar av sannolikhet och konsekvens i scenarioanalysen för slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet snarare än enbart genom processbeskrivningarna i kapitel 7. Uppskattningen av sannolikhet för att scenarierna och beräkningsfallen ska inträffa är funktionell för att beräkna riskerna och rekommenderas i de allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21. Ett sådant angreppssätt skulle på ett mer övertygande sätt motivera varför vissa processer bedöms påverka säkerheten



obetydligt och att de därför inte leder till någon risk för människors hälsa och påverkan på den omgivande miljön.

SKB:s redovisning av referensutvecklingen är indelad i tidsperioder efter förslutning av slutförvaret som metodologiskt definieras i enlighet med SSM:s föreskrifter:

- Säkerhetsanalysen omfattar tidsperioden de första 1000 åren efter förslutning för vilken bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga baseras på kvantitativa analyser av effekterna på människan och miljön (dvs. dos och risk) med dagens biosfärförhållanden. SSM bedömer därmed att SKB har förutsättningar att uppfylla kraven enligt bestämmelserna i 11 § SSMFS 2008:37
- Säkerhetsanalysen omfattar en nästkommande fullständig glaciationscykel som beräknas vara i storleksordningen 100 000 år, vilket överensstämmer med de allmänna råden till 10 § SSMFS 2008:21 samt 10-12 §§ SSMFS 2008:37. SSM bedömer därför att det finns förutsättningar att uppfylla kraven enligt 10 § SSMFS 2008:21 samt 12 § SSMFS 2008:37
- Säkerhetsanalysen omfattar tiden fram till 1 000 000 år efter förslutningen av förvaret i enlighet med de allmänna råden till 10-12 § SSMFS 2008:37. SSM att detta leder till att förutsättning finns till kravuppfyllelse enligt 10 § SSMFS 2008:21
- Säkerhetsanalysen omfattar även en diskussion om tiden bortom 1 000 000 år (SR-Site, avsnitt 14.5). Denna är dock mycket begränsad, men i sin bedömning tar SSM hänsyn till svårigheterna att göra meningsfulla analyser för extremt långa tider annat än att redovisa av farligheten hos radioaktiva ämnena i slutförvaret vilken avtar med tiden. SSM anser därför att det finns förutsättning till kravuppfyllelse enligt 10 § SSMFS 2008:21.

2.4.2 Huvudscenariot

2.4.2.1 Underlag från SKB

Figur 11-2 i SR-Site huvudrapport visar hur SKB med utgångspunkt från inventering av betydande osäkerheter samt analysen av referensutvecklingen definierar huvudscenariot samt ytterligare scenarier för analys av inneslutningsförmågan samt konsekvensanalys av eventuella kapselbrott. Med anledning av de två valda klimatutvecklingsvarianterna finns två olika huvudscenarier, ett baserat på återkommande Weichselistider, dvs. basfallet, och ett som tar hänsyn till global uppvärmning, dvs. varianten med global uppvärmning. SKB bedömer att det inte är meningsfullt att dela upp de ytterligare scenarierna i figur 11-2 innan de har analyserat vad dessa har för konsekvenser samt hur de påverkar varandra.

Uppskattning av sannolikhet för vart och ett av scenarierna är avgörande för att bestämma klassificering som huvudscenario, mindre sannolika scenarier eller restscenarier som har analyserats för att visa att slutförvarssystemet har tålighet mot förhållanden, händelser och processer som kan påverka slutförvarsbarriärernas funktioner efter förslutning. Innan denna klassificering kan göras behöver dock SKB analysera samtliga scenarier i figur 11-2. Detta har gjorts genom att först analysera tre scenarier som tar hänsyn till försämrade funktioner hos bufferten, dvs. buffert med advektiva förhållanden, frusen buffert och omvandlad buffert, och sedan propagera dessa buffertscenarier till tre kapselbrottscenarier, dvs. kapselbrott orsakad av korrosion, isostatisk last eller skjuvlast.

Scenarier inom buffertanalysen som kan klassificeras som restscenarier har inte förts vidare till kapselbrottfallen. Kapselbrottfallet pga. isostatisk last klassificeras som restscenario och exkluderas av SKB från referensutvecklingen och risksummeringen med motiveringen att även vid de mest ogynnsamma förhållandena finns det breda säkerhetsmarginaler mot kapselbrott (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.9.1).

Skjuvlastfallet har klassificerats som ett mindre sannolikt scenario med motivering att dess sannolikhet är så pass låg. Fallet ingår i referensutvecklingen och dess bidrag ska räknas i risksummeringen (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.9.1). Inom kapselbrottfallet pga. korrosion finns ett fall med den semikorrelerade varianten av den hydrogeologiska DFN-modellen i kombination med SR-Site-modellen för buffererosion som betraktas som central korrosionsvariant. Den centrala korrosionsvarianten är enligt SKB kompatibel med initialtillståndet, processerna samt externa förhållanden som antas i referensutvecklingen samt har en uppskattningsbar sannolikhet. Med motivering att den semikorrelerade DFN-modellen är mest kompatibel med platsdata från Forsmark och att SR-Site-modellen för buffererosion är den bästa representationen av nuvarande kunskap om denna process som finns att tillgå, väljer SKB att klassificera den centrala korrosionsvarianten som det scenario om inneslutningsförmåga som är representativ och ska ingå i huvudscenariot (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.9.2). För denna variant anser SKB att analyser av radionuklidtransport och dos ska göras. Övriga korrosionsscenarioer klassificeras av SKB som mindre sannolika scenarier som bidrar till risksummeringen (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.3).

2.4.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s metodik för val av scenarier, som innefattar att uppskatta sannolikheten för de valda scenarierna och därmed kunna indela dem i kategorierna huvudscenariot, mindre sannolika scenarier samt restsценarier, är lämplig och följer de allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21. SSM bedömer att SKB har grundat huvudscenariot på en trolig utveckling av yttre betingelser och på realistiska eller konservativa antaganden om de inre betingelserna som kan påverka slutförvarets strålsäkerhet efter förslutning. Grunden för huvudscenariot är analysen av slutförvarets referensutveckling (SR-Site huvudrapport, kapitel 10) i kombination med den så kallade centrala korrosionsvarianten (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2). Detta förfarande följer de allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21 gällande huvudscenariot.

Referensutvecklingen i kapitel 10 i SR-Site huvudrapport är en fenomenologisk redovisning av den mest troliga utvecklingen av slutförvaret vilket är den centrala delen i ett huvudscenario enligt bilaga 1 samt de allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21. SSM anser att detta inte tillräckligt tydligt framgår av SKB:s redovisning. Däremot möjliggör SKB:s metodik i kapitel 10 en bedömning av hur de mest trovärdiga antagandena samt ofullkomligheter och deras osäkerheter påverkar barriärfunktionerna i slutförvaret. Baserat på analys av hur osäkerheter kring yttre och inre betingelser påverkar barriärfunktionerna definierar SKB scenarier som ska visa barriärsystemets tålighet mot sådana förhållanden, händelser och processer efter förslutning och som redovisas i kapitel 11 och 12 i SR-Site huvudrapport. På detta sätt följer SKB bilaga 1 samt de allmänna råden till 9 § SSMFS2008:21 som rekommenderar att inverkan av osäkerheter på barriärfunktionerna bör belysas samt att ett antal beräkningsfall i huvudscenariot även ska innefatta fallerade kopparkapslar vid någon tidpunkt efter förslutning av slutförvaret.

Metodiken med analys av referensutvecklingen (SR-Site huvudrapport, kapitel 10) möjliggör en lämplig hantering av osäkerheter med avseende på förhållanden, händelser och processer som kan påverka slutförvaret efter förslutning. SSM anser även att modeller, parametrar och rumslig variation för parametrar har hanterats enligt rekommendationerna i de allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21. Även slutsatserna från analysen av referensutvecklingen (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.7) bedöms vara funktionella för att propagera osäkerheter inom externa förhållanden, inneslutnings- samt fördröjningsfunktionen hos slutförvaret vidare till valet av scenarier för att visa slutförvarets tålighet mot förhållanden, händelser och processer efter förslutning.



I enlighet med de allmänna råden i 9 § SSMFS 2008:21 har SKB även i analysen av referensutformningen inkluderat förekomsten av tillverkningsfel eller defekter i till exempel kopparsvetsen (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.1.1), sprickliknande defekter i gjutjärninsatsen samt variationer i buffertens initiala densitet (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.5).

2.4.3 Val av scenarier

2.4.3.1 Underlag från SKB

I avsnitt 2.5.8 (SKB TR-11-01) beskriver SKB en generell metod för att välja scenarier. Metoden förklarar i) hur ett huvudscenario som är nära relaterat till referensutvecklingen definieras, och ii) principerna för att välja ett antal ytterligare scenarier, med utgångspunkt från säkerhetsfunktioner.

En mer detaljerad beskrivning av tillvägagångssättet för val och analys av ytterligare scenarier ges i kapitel 11 (SKB TR-11-01). SKB:s angreppssätt som använts i SR-Site är att använda säkerhetsfunktionerna, med tillhörande indikatorer och indikatorkriterier enligt figur 10-2 i SKB TR-11-01, för att definiera en uppsättning scenarier som kännetecknas av säkerhetsfunktionernas olika tillstånd. Scenarierna beaktar således olika fall, för vilka risken för att en eller flera av säkerhetsfunktionerna helt eller delvis faller bort utvärderas. Exempel på härledda scenarier innefattar fall då kapselbrott sker på grund av korrosion, isostatiskt övertryck eller skjuvrörelser. Scenarierna har definierats utan att hänsyn tagits till hur stor sannolikheten är för att de verkliga inträffar.

Figur 11-2 i SKB TR-11-01 visar strukturen och de huvudkomponenter i val av scenarier och analysförfarande där säkerhetsfunktioner för kapsel och buffert har använts för att härleda ytterligare scenarier. Vid härledningen av ytterligare scenarier används referensutvecklingen som en utgångspunkt. Huvudkomponenterna i figur 11-2 kan beskrivas i följande punkter:

- att analysera en heltäckande referensutveckling som används som grund för huvudscenariot
- att välja ytterligare scenarier utgående från säkerhetsfunktioner
- att utvärdera om säkerhetsfunktionerna kan hotas genom att ta hänsyn till alla relevanta osäkerheter.

Scenarierna omfattar ett huvudscenario som bygger på referensutvecklingen med två varianter av klimatutvecklingen (Weichsel och en variant med global uppvärmning, se avsnitt 2.4.2.1 i denna rapport). Ytterligare scenarier har valts för att demonstrera osäkerheter som inte inkluderats i huvudscenariot. Valet utgår från en analys av faktorer som kan leda till att en säkerhetsfunktion förloras. Totalt identifieras ytterligare tre scenarier med olika felfunktioner för buffert respektive kapsel, vilka kategoriseras som mindre sannolika eller restscenarier. Utifrån en analys av parvisa kombinationer av dessa scenarier kommer SKB fram till att endast kombinationen ”advektiva förhållanden i deponeringshålet” och ”kapselbrott pga. allmän korrosion” samt skjuvbrottsfallet behöver inkluderas i risksummering. Övriga scenarier kategoriseras som restscenarier.

Baserat på en bedömning av rimligheten av förlopp som leder till situationen där säkerhetsfunktionen i fråga inte bibehålls, karakteriseras scenariot som ett "mindre sannolikt" scenario. Om scenarier klassificeras som ”mindre sannolika” tas riskbidrag från scenarierna med i risksummeringen.

I SR-Site finns inget numeriskt gränsvärde för den sannolikhet under vilken ett scenario betraktas som ett restscenario. Det angreppssätt som använts är att om det kan hävdas att



ett scenario inte är fysikaliskt rimligt, dvs. mot bakgrund av försiktiga utvärderingar av nuvarande kunskap om exempelvis barriäregenskaper, processer och effekter av framtida klimatförändringar betraktas ett sådant scenario som ett restscenario. I händelse av ett "restscenario" tas konsekvenserna av scenariot inte med i risksummeringen för förvaret.

Restscenarierna innefattar två mycket osannolika fall; isostatlastscenariot och scenariet med ett växande pinnhål i kapseln. Förutom dessa två fall har SKB analyserat fem fall i syfte att utföra barriärfunktionsanalys. Dessa fem fall är: A) initial avsaknad av buffert i deponeringshål; B) initial genomgående/penetrerande håldefekt i alla kapslar; C) initial stor öppning i alla kapslar; D) en kombination av fall A och C (initial stor öppning i alla kapslar och advektiva förhållanden till följd av buffertförlust för alla deponeringshål); E) en kombination av fall C med ett antagande om snabb bränsleupplösning och metallkorrosion.

Enligt SSMFS 2008:21 ska scenarier som rör mänskligt intrång och som leder till en försämring av systemets funktioner betraktas som "mindre sannolika scenarier", men belysas i restscenarier. I de allmänna råden (SSMFS 2008:21) framgår det att restscenarier bör tas fram för att belysa skador på människor som gör intrång i slutförvaret och fall som visar på följderna av ett förvar som varken är förslutet eller övervakat. Men enligt de allmänna råden till SSMFS 2008:37 behöver inte dessa tas med i risksummeringen. En uppsättning scenarier som rör framtida mänskliga handlingar har definierats och analyserats av SKB såsom intrång genom borrhning, andra fall av mänsklig påverkan t ex. uppförande av närliggande berganläggning samt betydelsen av ett ofullständigt förslutet förvar.

2.4.3.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB i sin redovisning i säkerhetsanalysen SR-Site har visat att slutförvarets skyddsförmåga och omgivningskonsekvenser kan utvärderas genom en uppsättning av scenarier (huvudscenariot, mindre sannolika scenarier, restscenarier samt scenarier för mänskligt intrång enligt SSMFS 2008:21) som tillsammans illustrerar de viktigaste förloppen av betydelse för utvecklingen av slutförvarets egenskaper, dess omgivning och biosfären i enlighet med de allmänna råden om tillämpning av 5-7 § SSMFS 2008:37.

SSM anser även att metodiken i kapitel 10 och 11 i SR-Site huvudrapport har förutsättning att uppfylla kravet i 9 § SSMFS 2008:21, bilaga 1 samt allmänna råden med avseende på analys av händelser, förlopp och processer som kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning av slutförvaret genom att kunna leda till identifiering av ett urval av relevanta scenarier för att visa slutförvarets strålsäkerhet efter förslutning. SKB:s metodik i kapitel 11, 12 och 13 i SR-Site huvudrapport möjliggör även en kvantitativ uppskattning av risken från slutförvaret och hur den är fördelad över tiden efter förslutningen och den följer därför bilaga 1 samt de allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21. Genom att en kvantitativ riskuppskattning ligger till grund för jämförelse med föreskriftens kriterium för individrisk i 5 § SSMFS 2008:37 bedömer SSM att SKB ur metodologisk synvinkel har förutsättningar att uppfylla föreskriftkravet.

SSM anser att de principer för val av scenarier som redovisas (SR-Site huvudrapport, kapitel 2) är i överensstämmelse med SSM:s föreskrifter. Val av scenarier är steg 8 i SKB:s elva huvudsteg i säkerhetsanalysen SR-Site. SSM anser att användningen av säkerhetsfunktioner för att identifiera scenarier är en lämplig princip som ligger i linje med internationell praxis. Dock anser SSM att vissa frågor kvarstår med tillämpningen av metoden, som härrör främst från SKB:s definition av säkerhetsfunktioner. Dessa har definierats i termer av en uppsättning av potentiella skademekanismer (korrosion, skjuvning, isostatisk lastning) snarare än på en mer allmän nivå. Andra potentiella

skademekanismer har dock uteslutits som grund för en säkerhetsfunktion, det vill säga de har inte beaktats som en process som kan leda till felfunktioner hos tekniska barriärer. Distinktionen mellan de olika angreppssätten är viktig eftersom utelämnande av vissa säkerhetsfunktioner innebär att möjligheten att på ett spårbart sätt definiera kriterier och konstruktionsförutsättningar går förlorad. En robust metod är att definiera ett kriterium och/eller en konstruktionsförutsättning och sedan visa att dessa krav kan uppfyllas, snarare än att använda ett förenklat screening argument för att utesluta effekter av potentiella skademekanismer som inte ingår som del av scenarioanalysen. Som nämnts av SKB ska scenarierna i detta steg definieras utan hänsyn till hur stor sannolikheten är för att de verkligen inträffar. Härledningar för val av scenarier skall vara fullständiga för att kunna identifiera alla relevanta scenarier. I nästa steg utvärderas inneslutningspotentialen för vart och ett de identifierade scenarierna. På detta sätt kan en transparent process för val och analys av scenarier påvisas. Potentiella skademekanismer som enligt SSM bör vara föremål för överväganden med avseende på val av scenarier beskrivs nedan:

- I analysen av det isostatiska lastfallet beaktar SKB endast effekterna av spänning men däremot inte effekterna av sträckning och risken för att kryp kan påverka kapselns integritet. SSM:s granskning har identifierat en rad frågor som rör krypegenskaper av koppar och hur dessa påverkas av närvaron av fosfor, svavel och väte i koppar (avsnitt 4.12 i denna rapport).
- SSM anser att det finns vissa kvarstående frågor om processer för lokal korrosion, inklusive distribution av och tillgång till sulfid, både i grundvatten och som en potentiell följd av mikrobiell aktivitet (avsnitt 4.12 i denna rapport).

Dessutom noterar SSM att SKB:s beskrivning av val och definition av huvudscenariot är otydliga (se avsnitt 2.4.2.2 i denna rapport). Detta påverkar inte slutliga riskberäkningar, men skapar svårigheter att förstå tillämpningen av den metod SKB använder för val av scenarier. I SR-Site huvudrapport kapitel 2 uttrycker SKB t. ex. "Ett huvudscenario definieras utifrån referensutvecklingen ..." (SKB TR-11-01, s.71) och "Inneslutningsförmåga analyseras inte ytterligare i huvudscenariot." (SKB TR-11-01, s.73). I samma rapport, kapitel 12, säger SKB "Baserat på analyserna i korrosionsscenario i avsnitt 12.6.2 ses den centrala korrosionsvarianten som representativ för huvudscenariot ..." (SKB TR-11-01, p.621). SSM anser att det fortfarande finns utrymmen för SKB att vidareutveckla sin metodik för val och analys av scenarier. Bedömningar av SKB:s analyser av inneslutningspotentialen för de valda scenarierna ges i kapitel 9.

SSM anser att SKB:s tillvägagångssätt att kategorisera mindre sannolika scenarier baserat på ytterligare scenarier som tar hänsyn till osäkerheter i referensutvecklingen är lämpligt. Däremot anser SSM att SKB:s metod för att identifiera ett antal beräkningsfall för att täcka in alla tänkbara osäkerheter behöver förbättras (se även avsnitt 2.5.1.2).

De fem "what-if"-beräkningsfall som valts ut av SKB för att illustrera funktionen av kapsel och buffert genom att selektivt ta bort dem från modellen bedöms ge en rimlig täckning av de restscenarier som SSM efterfrågar i sina allmänna råd. SSM anser dock att den metod SKB använder för urvalet kan göras mera transparent genom att t.ex. definiera kriterier för att visa hur "what-if"-beräkningsfall väljs ut (se granskningskommentar i avsnitt 7.4.2.2).

Enligt SSM:s allmänna råd ska säkerhetsredovisningen för ett slutförvar innefatta framtida oavsiktliga mänskliga intrång, dvs. hur förvarets skyddsförmåga påverkas efter framtida mänsklig verksamhet. Ett syfte med dessa scenarier bör vara att ge underlag för att värdera åtgärder som kan minska risken för mänsklig påverkan i enlighet med kravet på bästa möjliga teknik. Detaljerade granskningskommentarer till SKB:s redovisning som rör framtida mänskliga handlingar ges i kapitel 8 i denna rapport.

2.4.4 Konstruktionsstyrande fall

2.4.4.1 Underlag från SKB

Baserat på resultaten av scenarioanalysen i SR-Can (SKB TR-06-09) har SKB tagit fram en uppsättning konstruktionsstyrande fall från vilka konstruktionsförutsättningar för över 30 olika komponenter i slutförvarssystemet har härletts, dvs. kapsel, buffert, deponeringshåll, deponeringstunnlar, mekaniska- hydrauliska-termiska-kemiska egenskaper i bergmassans närområde, återfyllning av tunnelsystem, försegling av borrhål, pluggar samt förslutning (SKB TR-09-22).

Utfallet från den mera utvecklade säkerhetsanalysen i SR-Site är naturligtvis inte exakt detsamma som för SR-Can, vilket innebär att konstruktionsstyrande fall samt konstruktionsförutsättningar har behövts ändras, dels med anledning av en utvecklad scenarioanalys (kapitel 12 i SR-Site huvudrapport), dels med anledning av förändrade och förfinade konstruktionsförutsättningar som kopplar till nåbara, mätbara och kontrollerbara egenskaper för komponenterna i slutförvarssystem (se t.ex. SKBdoc 1434717 om konstruktionsförutsättning för inflöde till deponeringshåll mindre än 150 kubikmeter samt SKBdoc 1395038, om komplettering rörande konstruktionsförutsättningar för bufferten, bottenplattan och pluggen).

Återkopplingen mellan säkerhetsanalysen SR-Site görs i avsnitt 15.4 för och konstruktionsstyrande fallen respektive avsnitt 15.5 för referensutförande samt relaterade konstruktionsförutsättningar i SR-Site huvudrapport. Här tas till exempel upp behovet av att ändra konstruktionsförutsättningen för isostatisk last för kapseln som istället för 45 MPa bör ökas till 60 MPa baserat på resonemang om maximala istjocklekar. På ett annat ställe lyfter SKB problemet med mätbarhet hos skadezonen runt tunnlar för att undvika större sammanlänkade hydrauliskt konduktiva partier vilka påverkar radionuklidtransporten.

2.4.4.2 SSM:s bedömning

Med utgångspunkt i scenarier som kan visa sig vara särskilt viktiga ur risksynpunkt har SKB tagit fram ett antal konstruktionsstyrande fall. Dessa fall har tillsammans med kunskap om tillverkningsteknik, genomförbarhet och kontrollerbarhet har använts för att på ett systematiskt sätt underbygga konstruktionsförutsättningar såsom krav på barriäregenskaper enligt de allmänna råden i 9 § SSMFS 2008:21. SSM anser därför att SKB:s metodik är lämplig och ger förutsättningar för att uppfylla föreskriftkraven.

Enligt 4 kap. 2 § samt Bilaga 2 i SSMFS 2008:1 ska en säkerhetsredovisning innehålla information om konstruktionsprinciper, konstruktionsförutsättningar och konstruktionsregler som har styrt anläggningens konstruktion och utförande. SSM bedömer att SKB:s metodik i SR-Site i frågan om konstruktionsstyrande fall och konstruktionsförutsättningar innefattar tillräckligt detaljerade beskrivningar av anläggningens utförande med ingående system, deras funktion samt drift- och säkerhetsuppgifter som är lämpliga för detta steg i SKB:s program för etablering av ett slutförvar för kärnbränsle. Processen med återkoppling från säkerhetsanalysresultaten till revidering av konstruktionsstyrande fall och konstruktionsförutsättningar bedöms också ha utvecklats. Det finns därför förutsättning för kravuppfyllelse med avseende på krav på fortlöpande systematisk analys och bedömning av säkerheten under den tid anläggningen kommer att tas i drift enligt 2 kap. 10 § SSMFS 2008:1. SSM anser dock att denna process skulle ha kunnat formaliseras med en tydligare koppling till säkerhetsredovisningar för de kommande stegen i SKB:s program för etablering av ett slutförvar i Forsmark och för dess uppförande- och driftsfas.



2.5 Metod för riskberäkning

Enligt SSMFS 2008:37 krävs att "Ett slutförvar för använt kärnbränsle eller kärnavfall ska utformas så att den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken." Allmänna råd i SSMFS 2008:37 anger följande: "Individrisken bör beräknas som ett årligt medelvärde utifrån en uppskattning av livstidsrisken för samtliga relevanta exponeringsvägar för varje individ." Omvandlingen mellan effektiv dos och risk ska göras med hjälp av ICRP:s sannolikhetskoefficient 0,073 per Sievert för cancer och ärftliga skador (SSMFS 2008:37). En årlig risk på 10^{-6} motsvarar en effektiv dos på cirka $14 \mu\text{Sv}/\text{år}$.

2.5.1 Analys av valda scenarier

2.5.1.1 Underlag från SKB

SKB har delat upp analysen av de valda scenarierna i två steg: analys av inneslutningsförmåga och av fördröjningsförmåga (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.5.9). Beträffande analys av inneslutningsförmåga för de ytterligare scenarierna är SKB:s fokus på faktorer som skulle kunna leda till situationer där säkerhetsfunktionen i fråga inte bibehålls. I detta steg är målet att för varje scenario antingen avfärda det baserat på att inget troligt sådant förlopp kan identifieras, eller att utvärdera scenariots sannolikhet och dess konsekvenser med hjälp av ett antal beräkningsfall och varianter. Mall för analys av scenarier baserade på säkerhetsfunktioner kan beskrivas i följande punkter:

- beaktad(e) säkerhetsfunktionsindikator(er)
- hantering av frågan i referensutvecklingen
- kvalitativ beskrivning av förloppen som leder till denna situation
- kvantitativ beskrivning av förloppen som leder till denna situation
- kategorisering som "mindre sannolikt scenario" eller "restscenario"
- slutsatser.

Beträffande analys av fördröjningsförmåga för de ytterligare scenarierna beräknas radionuklidutsläpp, radionuklidtransport och dospåverkan för de möjliga kapselbrott som har identifierats för varje scenario i analysen av inneslutningsförmågan. I allmänhet har ett antal beräkningsfall för varje scenario definierats och konsekvenserna har beräknats i de fall som analyseras för de ytterligare scenarierna. Beräkningsfallen har formulerats så att de tar hänsyn till osäkerheter som rör både inneslutningsförmågan och fördröjningsförmågan. För varje scenario hanteras därför säkerhetsfunktionerna för fördröjning på ett liknande sätt som det som användes för att hantera funktionerna för inneslutning.

Känslighetsanalyser av hur resultaten påverkas av osäkerheter i indata har utförts baserat på de probabilistiska beräkningarna.

2.5.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser att metoden/mallen som SKB beskrivit för analys av valda scenarier innehåller de centrala komponenterna som behövs för säkerhetsanalysen. Analys av valda scenarier är steg 9 av SKB:s elva huvudsteg i säkerhetsanalysen SR-Site. I detta steg ingår många moment: i) att uppskatta scenariots sannolikhet; ii) att kategorisera scenariot som "mindre sannolikt scenario" eller "restscenario"; iii) att identifiera ett antal konstruktionsstyrande fall för att definiera slutförvarets referensutformning; iv) att identifiera ett antal beräkningsfall för valda scenarier för att ta hänsyn till osäkerheter som rör både referensutvecklingen och inneslutningsförmågan; och v) att genomföra konsekvensberäkningar för de utvalda fallen.



När det gäller kategorisering av scenarier som ”mindre sannolikt scenario” eller ”restscenario” har vissa farhågor kring möjligheten att minimera avvikelser vid tillverkning av segjärnsinsatser och kopparhöljet samt att helt utesluta vissa potentiella felfunktioner för kapslar diskuterats i SSM:s granskning. SSM anser därför att SKB bör förstärka redovisningen med avseende på dessa frågor och därefter eventuellt kategorisera isostatlastfallet som ett mindre sannolikt scenario snarare än som ett restscenario.

Beträffande identifiering av beräkningsfall är det viktigt att osäkerheter förknippade med förloppen som leder till situationer där säkerhetsfunktionen i fråga inte bibehålls är fullständigt undersökta. De beräknade riskbidragen från dessa fall ska summeras för att få den totala risken för slutförvaret över tid. SKB nämner att beräkningsfallen har formulerats så att de tar hänsyn till osäkerheter som rör inneslutningsförmågan, men hur osäkerheter hanteras har inte explicit inkluderats i rubrikerna i mallen. Det saknas t.ex. kriterier för att vägleda hur osäkerheter kan undersökas i SKB:s beskrivning av metoden/mallen. Exempelvis i avsnitt 7.4.4.2 i denna granskningsrapport påpekar SSM att de osäkerheter som är förknippade med att SKB:s korrosionsmodell inte har undersökts fullt ut genom analys av tillhörande beräkningsfall. SSM bedömer dock att robustheten i SKB:s uppskattning av förväntat antal kapselbrott till följd av korrosion är rimlig. Denna bedömning baseras delvis på SSM:s egna beräkningar kring gränssättande fall (se avsnitt 7.4.4.2). SSM anser att SKB i kommande säkerhetsanalyser behöver beskriva metoden för att identifiera beräkningsfall kopplade till scenarierna på ett utförligare sätt för att säkerställa en tillräckligt bra täckning av samtliga rimligt relevanta frågeställningar.

Granskning och bedömning av SKB:s analys av inneslutningsförmågan för de ytterligare scenarierna och de ytterligare scenarier som SSM identifierat ovan (avsnitt 2.4.2.2) ges i detalj i kapitel 9. Granskning och bedömning av SKB:s analys av fördröjningsförmågan för de ytterligare scenarierna ges i detalj i kapitel 7.

2.5.2 Risksummering

2.5.2.1 Underlag från SKB

Enligt de allmänna råden till 5-7§§ SSMFS 2008:37 bör för varje antagen klimatutveckling risken från slutförvaret beräknas genom att väga samman riskbidragen från ett antal scenarier som tillsammans belyser hur de mer eller mindre sannolika förloppen i slutförvaret och det omgivande berget påverkar slutförvarets skyddsförmåga och omgivningskonsekvenser.

Angreppssättet i SR-Site är att beräkna risken som en summa av riskbidrag från ett antal scenarier som utformas för att täcka in huvuddragen i ett antal representativa möjliga framtida utvecklingar. Tillsammans har de till uppgift att ge en rimlig bild av möjliga framtida exponeringssituationer.

I princip skulle risken kunna beräknas för varje scenario och variant och därefter vägas samman med hjälp av sannolikheten för varje scenario/variant. I praktiken måste scenariosannolikheterna ofta överskattas pessimistiskt d.v.s., formuleringen av scenarier, varianter och beräkningsfall samt efterföljande sammanvägning av dessa till en total risk syftar till att överskatta risken.

2.5.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har redovisat risksummering enligt de allmänna råden till SSMFS 2008:37 genom att väga samman beräknade riskbidrag från huvudscenariot och från de ytterligare scenarier som hör till kategorin ”mindre sannolika” scenarier för att få den totala risken för förvaret över tid. SSM noterar att de summerade riskbidragen från de analyserade scenarierna med mest pessimistisk antagande från SKB har stor marginal till

riskkriteriet. Men som noteras ovan (avsnitt 2.5.1.2 i denna rapport) har SSM identifierat ett behov av en utökad uppsättning beräkningsfall som ett stöd för kvantifiering av scenariots riskbidrag. SSM anser därför att SKB behöver öka omfattningen av scenarier och beräkningsfall i kommande säkerhetsanalyser.

2.5.3 Den exponerade gruppen

2.5.3.1 Underlag från SKB

För att utvärdera föreskriftskravet kopplat till individrisk måste storleken av den grupp för vilken den övre riskgränsen gäller definieras. De allmänna råden i SSMFS 2008:37 anger ”Ett sätt att definiera den mest exponerade gruppen är att inkludera de individer som erhåller en risk i intervallet från den högsta risken ner till en tiondedel av denna risk. Om ett större antal individer kan bedömas ingå i en sådan grupp bör det aritmetiska medelvärdet av individriskerna i gruppen användas vid prövningen mot föreskrifternas kriterium för individrisk.” Råden anger också ”Om endast ett fåtal individer ingår i gruppen kan föreskrifternas kriterium för individrisk anses vara uppfyllt om den högsta beräknade individrisken inte överstiger 10^{-5} per år.”

I SR-Site avsnitt 13.2.3 definieras den mest exponerade gruppen som den grupp av individer som tar emot den högsta exponeringen i alla utsläppsområden (dvs. biosfärsobjekt) i landskapet. En representativ individ av den mest exponerade gruppen antas spendera all sin tid i det kontaminerade området, och få sitt fulla behov av mat och vatten från detta område.

2.5.3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s definition av den mest exponerade gruppen som den grupp av individer som tar emot den högsta exponeringen i det kontaminerade området (dvs. biosfärsobjekt) i landskapet är i linje med SSM:s föreskrifter. Men de av SKB tillämpade antagandena om exponeringsvägar och kost för dosberäkningarna används inte internationellt inom liknande biosfärsanalyser. Det är viktigt för SSM att förstå den potentiella betydelsen av dessa antaganden och hur de förhåller sig till andra, mer traditionella, dosberäkningsmetoder.

SSM gav i uppdrag till externa experter att göra egna dosberäkningar med hjälp av alternativa modeller baserat på ett mera traditionellt synsätt kring exponeringsvägar samt kost för dosberäkningarna för att undersöka möjliga effekter av dessa antaganden (detaljerna av denna granskning ges i avsnitt 7.2 och 7.4). Bland annat baserat på dessa externa experters underlag (SSM Technical Note 2014:34; SSM Technical Note 2014:54; SSM Technical Note 2015:22) bedömer SSM att SKB:s antaganden gällande exponeringsvägar och kost för dosberäkningarna är rimliga.

2.5.4 Riskutspädning

2.5.4.1 Underlag från SKB

Riskutspädning är en oundviklig konsekvens av riskkriteriet såsom det anges i SSM:s föreskrifter, dvs. ett riskkriterium som ska tillämpas som funktion av tid och där kvantiteten som ska fastställas är medelvärdet med hänsyn tagen till alla relevanta osäkerheter. Frågan om riskutspädning bör därför enligt de allmänna råden till SSMFS 2008:37 tas upp i samband med att konsekvenserna av utsläpp av radioaktiva ämnen från slutförvaret analyseras.



Flera metoder har vidtagits för att beakta riskutspädning i SR-Site.

- Beträffande den första typen av riskutspädning orsakad av parameterosäkerhet, är det viktigt att osäkerheter i indata utvärderas så noggrant som möjligt, så att aktuella fördelningsfunktioner med stor påverkan på riskberäkningar inte breddas i onödan.
- En metod som används i SR-Site för att hantera den andra typen av riskutspädning är att ersätta probabilistiska indata för exempelvis tidpunkter för kapselbrott med en fastställd tidpunkt.
- För vissa fall med kortvariga utsläpp används en "ackumulerad kortsiktig risk" för att hantera riskutspädning enligt bilaga 1 till SSMFS 2008:37 (se nedan).
- Ett annat alternativ för att fånga upp effekterna av riskutspädning i linje med SSM:s föreskrifter är att använda "riskutspädningskvot", dvs. kvoten mellan "maximum av medelvärdet" och "medelvärdet av maximivärdena".

2.5.4.2 SSM:s bedömning

En detaljerad granskning av riskutspädning redovisas i avsnitt 7.4.6.2. SSM bedömer att SKB:s övergripande slutsats, att riskutspädningen inte är en fråga som riskerar att kullkasta de generella slutsatserna om tillräckligt skydd för människors hälsa i SR-Site, är motiverad. Denna bedömning baseras på de beräkningar av "ackumulerad kortsiktig risk" som SKB redovisar i SR-Site (SKB TR-11-01). SKB hanterar kontinuerliga utsläpp och pulsutsläpp separat i riskberäkningar förknippad med tidpunkten för händelserna eftersom SKB motiverade att effekt av pulsutsläpp kan försummas i probabilistiska riskberäkningar. SSM bedömer att SKB:s resonemang om försummelse av IRF-pulsutsläpp i probabilistiska beräkningar av en årlig medelvärderisk är rimlig. Dock anser SSM att SKB behöver hantera pulsutsläpp i ett integrerat system, dvs. så att kontinuerliga och att pulsutsläpp inte hanteras separat i kommande säkerhetsanalyser.

2.6 Hantering av osäkerheter

2.6.1 Underlag från SKB

I avsnitt 2.8 i SKB TR-11-01 anger SKB att det inte finns något unikt sätt att klassificera osäkerheter i en säkerhetsanalys. Klassificeringen som SKB använder är emellertid förenlig med internationell praxis (NEA 1991, 1997) i denna typ av analys. SKB har diskuterat klassificering och typer av osäkerheter i detalj i tidigare säkerhetsanalyser (SKB TR-99-09, SKB TR-06-09). Eftersom hantering av osäkerheter genomsyrar hela säkerhetsanalysen är det viktigt att beakta betydelsen av osäkerheter i relation till säkerhetsanalysens ändamål. I säkerhetsanalysen SR-Site har osäkerheter i stora drag kategoriserats som systemosäkerhet, konceptuell osäkerhet/modellosäkerhet och dataosäkerhet.

Systemosäkerhet avser säkerhetsanalysens fullständighet, dvs. frågan huruvida alla frågeställningar av betydelse för säkerhetsutvärderingen har identifierats och om analysen täcker in de identifierade frågorna på ett kvalitativt korrekt sätt, exempelvis genom val av en lämplig uppsättning scenarier.

Konceptuell osäkerhet/modellosäkerhet avser i huvudsak förståelsen av beskaffenheten hos de processer som är involverade i förvarsutvecklingen. Detta rör inte endast den mekanistiska förståelsen av en process eller en uppsättning kopplade processer utan även hur väl de är representerade – och vad som inte är representerat – i en ibland avsevärt förenklad matematisk modell av förvarsutvecklingen.



Dataosäkerhet rör alla kvantitativa indata som används i analysen. Det finns flera faktorer att ta hänsyn till vid hanteringen av dataosäkerhet. Dessa innefattar korrelationer mellan data, distinktion mellan osäkerhet på grund av avsaknad av kunskap och på grund av naturlig variabilitet samt situationer där konceptuell osäkerhet behandlas med en vidgad datafördelning.

Hantering av osäkerheter täcker nästan alla steg i säkerhetsanalysen. De tre kategorierna av osäkerhet som nämns ovan analyseras i olika delar av systemet och för olika scenarier. Eftersom olika delar av systemet har olika karaktär behandlas osäkerhet på olika sätt. I avsnitt 2.8.4 i SKB TR-11-01 beskriver SKB två exempel på integrerad hantering av osäkerheter för huvudscenariot respektive ytterligare scenarier som har baserats på ett potentiellt bortfall av säkerhetsfunktioner.

2.6.2 SSM:s bedömning

SSM är enig med SKB om att det inte finns en standardiserad metod för att genomföra osäkerhetsanalyser för slutförvar för använt kärnbränsle. SKB har utvecklat en metodik för hantering av osäkerheter under många år och myndigheten har följt utvecklingen genom granskning av tidigare säkerhetsanalyser, t.ex. SR-97 (SKB TR-99-06) och SR-Can (SKB TR-06-09). SSM anser att metodiken överensstämmer med internationell utveckling inom området och är i linje med OECD/NEA:s arbete (NEA 1991, 1997, 2004). SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s hantering av osäkerheter generellt sett är ändamålsenlig. I samband med granskningen har SSM uppdragit åt konsulter att granska och ge synpunkter på SKB:s metodik av hantering av osäkerheter. SSM har genomfört två externa expertgranskningar som underlag för sin bedömning av SKB:s metodik för hantering av osäkerheter (SSM Technical Note2012:36; SSM Technical Note 2015:05).

SKB använder deterministiska, stokastiska och probabilistiska metoder för att hantera tre kategorier av osäkerheter (system-, konceptuella/modell- respektive dataosäkerheter) för olika delar av systemet och scenarier. Dataosäkerheter behandlas ibland med hjälp av sannolikhetsfördelningar och i andra fall av pessimistiska antaganden kring data i modellering. Den stokastiska metoden används exempelvis för att generera realiseringar av flödesfördelningen baserade på olika DFN ("Discrete Fracture Network") modellvarianter (okorrelerade, semikorrelerade och korrelerade). Analyser av val när det gäller scenarier, modellantaganden och beräkningsmodeller görs oftast helt enkelt genom deterministisk testning av ett val mot ett annat, helst på ett grundligt, heltäckande och systematiskt sätt. SSM anser att de olika metoder som SKB använder för hantering av osäkerheter är rimliga. De tre kategorierna av osäkerheter som SKB identifierat är i linje med SSM:s föreskrifter och allmänna råd (SSMFS 2008:21). Hantering av osäkerheter inom områden som scenarioval, val av konceptuella antaganden och modellering är av stor vikt för säkerhetsanalysen och för att uppnå och bedöma den långsiktiga säkerheten. Valda arbetssätt och är avgörande för att förstå var de viktigaste osäkerheterna finns och vad konsekvenserna blir av deras existens. Granskning och bedömning av hanteringen av osäkerheter, exempelvis initialtillståndet för förvaret, den mekaniska utvecklingen av berget, hydrogeologisk utveckling, förloppen som leder till advektion i bufferten, kapselbrott till följd av bergets skjuvrörelse, kapselbrott till följd av korrosion och konsekvensanalys, ges i respektive kapitel 3, 4, 5, 6 och 7. Bedömningar rörande behovet av SKB:s förbättring av genomförandet av hantering av osäkerheter ges enligt följande.

Propagering av osäkerheter för korrosionsscenario har utförts genom en kombination av deterministiska, stokastiska och probabilistiska beräkningar. Osäkerheter i flöden modellerade med hydro DFN-modeller utvärderades genom jämförelse av resultat från tre varianter av modeller; okorrelerade, semikorrelerade och fullt korrelerade avseende



relationen mellan sprickors storlek och transmissivitet. Dessutom har flera realiseringar av den underliggande DFN-modellen genererats för varje modellvariant. Osäkerheter i buffertdensiteten utvärderades genom beräkningar för tre deterministiska fall. De tre fallen är basfallet med SR-Site erosionsmodellen (SKB TR-10-64), och de två gränssättande fallen med initial advektion i alla deponeringshål respektive ingen advektion alls under hela beräkningsperioden. Fallet där initiala advektiva förhållanden uppstår i varje deponeringshål bedöms oralistiskt, men det illustrerar pessimistiskt effekten av samtliga osäkerheter som omfattas av bufferterosion. Figur 12-18 i SKB TR-11-01 sammanfattar osäkerheten i det beräknade genomsnittliga antalet kapselbrott för korrosionsscenarioet för de ovan beskrivna fallen. Osäkerheter förknippade med SKB:s korrosionsmodell är dock inte inkluderade i osäkerhetsanalysen, exempelvis har potentiellt viktiga effekter av rumsliga och tidsmässiga variationer av både grundvattenflöde och sulfidkoncentration i grundvattnet (Strömberg m.fl., 2015; SSM Technical Note 2015:05). SSM anser att SKB behöver vidareutveckla metoden för att propagera en bred uppsättning av olika typer av osäkerheter i samband med analys av scenarier på ett mer strukturerat och fullständigt sätt. Detaljerade granskningskommentarer om osäkerheter av SKB:s beräkningar av korrosionsfallet ges i avsnitt 7.4 i denna granskningsrapport.

SKB:s metodik för biosfärsmodellering som använder sig av platsspecifik information bidrar till en förståelse av processinteraktioner och effekter av biosfär utveckling. Slutprodukten från biosfärsmodelleringen är landskapsspecifika doskonverteringsfaktorer (LDF). LDF-värdet för en viss radionuklid definieras som medelårsdosen för en representativ individ i den mest exponerade gruppen vid en kontinuerlig konstant utsläppshastighet på 1 Bq/år. Utveckling av biosfärsobjekt förutspås av landskapsutvecklingsmodeller som bygger på den befintliga platsens topografi och på den förväntade strandlinjeförskjutningen. Det innebär en fortsatt men avtagande landhöjning som successivt kommer att förvandla delar av Östersjöns botten till flera olika biosfärstyper med skog, sjö, myr och åkermark. Utvecklingen av enskilda biosfärsobjekt avseende tid och area anges noggrant, men utvecklingen av det framtida landskapet representeras bara med en enda realisering i SR-Site. SKB:s metod för biosfärsmodellering är den fasta beskrivningen av landskapsutvecklingen vilken används som grund för alla beräkningar av LDF-värden. Detta innebär att alla egenskaper inom biosfärsobjekten är fixerade i tid, vilket inte tillåter hantering av osäkerheter fullt ut för potentiellt viktiga aspekter, såsom längre tidsperioder för ackumulation av radionuklider i sediment eller förändringar av storleken på avrinningsområden. SSM:s externa experter har för SSM utfört två beräkningar med alternativa modeller för att utvärdera lämpligheten av SKB:s biosfärsmodellering samt modellosäkerheter (SSM Technical Note 2014:34; SSM Technical Note 2014:54; SSM Technical Note 2015:22; Walke m.fl. 2015; Klos m.fl. 2015). Den alternativa modellrepresentationen har bidragit till att skapa förståelse i de mer komplexa modelleringsmetoderna genom att tillhandahålla avgränsande resultat, kontrollera rimligheten i mer komplexa modelleringar, belysa osäkerheter som införs genom konceptuella antaganden och hjälpa till att kvantifiera konservativa antaganden. Mer detaljerad analys ges i avsnitt 7.4 i denna rapport. SSM anser att SKB behöver använda liknande tillvägagångssätt i kommande säkerhetsanalys för att skapa förståelse i de mer komplexa modelleringsmetoderna och ge förtroende för beräknade resultat både till en teknisk och icke-teknisk publik.

SSM noterar att metoderna för hantering av parameterosäkerheter i olika delar av SKB:s konsekvensanalys skiljer sig något, vilken kan bero på att olika grupper har bedrivit osäkerhetsanalyser i konsekvensanalysen på olika sätt. Ett exempel är att när det gäller radionuklidtransport i när- och fjärrområdet har SKB:s beräkningar baserats på sannolikhetsfördelningar av de flesta parameter som oftast är förskjutna åt det pessimistiska hållet. Däremot används den bästa uppskattningen och därmed mer realistiska värden för att fastställa parametervärden som används för att beräkna LDF-



värden inom biosfärmodelleringen. Användning av en blandning av pessimistiska och realistiska värden i säkerhetsanalysen är delvis oundvikligt men det behöver beaktas att det leder till att tolkningen av beräkningsresultat försvåras. SSM förväntar sig att SKB:s metoder för osäkerhets- och känslighetsanalyser kommer att vara konsekventa och mera heltäckande i framtida säkerhetsredovisningar.

SSM instämmer med sin externa expert (SSM Technical Note 2015:05) att SKB:s hantering av osäkerheter och känslighetsanalyser för konsekvensberäkningar har genomförts med väletablerade metoder och valet av metoder har motiverats på ett bra sätt. Dock håller SSM med sin externa expert att ytterligare systemförståelse hade kunnat uppnås om känslighetsanalyser genomförts inte bara för dosberäkningarna utan även för beräkningar av säkerhetsfunktionsindikatorer.

2.7 Tillämpbarhet av modeller, parametervärden och andra förutsättningar

2.7.1 Underlag från SKB

SKB:s modeller som rör aspekter av slutförvarssystemutvecklingen diskuteras i kapitel 10 i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB TR-11-01). SKB:s modeller för radionuklidtransport beskrivs främst i kapitel 12 och 13 i samma rapport. För det som gäller tillämpning av dessa ges i SR-Site kortfattade beskrivningar av använda data och modeller samt utvalda modellresultat och slutsatser. Huvudrapporten för säkerhetsanalysen SR-Site återger ingen detaljerad information om till exempel radionuklidinventariet i det använda kärnbränslet. Mera detaljerad information om modeller, parametervärden och andra förutsättningar redovisas av SKB i datarapporten (SKB TR-10-52) samt modellrapporten (SKB TR-10-51) med även i andra mera detaljerade rapporter för geosfären, biosfären, klimat etc.

SKB TR-11-01 innehåller övergripande information om data och modeller som SKB använt för beräkningar av utsläpp och transport av radionuklider som bygger på redovisningarna i datarapporten (SKB TR-10-52) och radionuklidtransportrapporten (SKB TR-10-50). Dessa innehåller information om radionuklidinventarium, antagna löslighetsgränser samt transportberäkningar.

2.7.2 SSM:s bedömning

SSM observerar att det inte är möjligt att endast baserat på säkerhetsanalysen SR-Site (SKB TR-11-01) i detalj förstå eller spåra hur SKB kommit fram till sina statistiska beräkningar av antalet deponeringshål i vilka advektion kan leda till buffererosion och efter att detta har hänt antalet deponeringshål i vilka kapselbrott kan inträffa. Resultat från granskning utförd av SSM:s externa experter pekar på samma sak (SSM Technical Note 2012:24). Denna slutsats har framförallt bäring på beskrivningarna av SKB:s modellering av grundvattenflödet och hur modelleringsresultat för grundvattenflödet relaterar till konceptualiserade eller hypotetiska placeringar av deponeringshålen inom grundvattenströmningsfältet.

Det noteras vidare att SKB i flera fall i säkerhetsanalysen SR-Site har baserat sin analys på delvis empiriska modeller utgående från experimentella data. Detta gäller exempelvis bentonitens kanalbildning i SKB TR-11-01 avsnitt 10.2.3, fysikalisk och kemisk erosion i SKB TR-11-01 avsnitt 10.3.11, samt extrapolering för långa tidsintervaller av krypduktilitet för koppars (SKB TR-10-28; SKB TR-09-32). SKB bör dock använda modeller med en konceptuell, teoretisk, mekanistisk eller fenomenologisk grund som kan



möjliggöra en god förståelse för processer och därmed säkrare extrapolering utanför parameter- eller tidsintervallen som omfattas av tillgängliga experimentella data.

SSM har uppdragit konsulter att granska hanteringen av data och modeller med avseenden dokumentation och kvalitetssäkring (SSM Technical Note 2012:35). En slutsats från denna granskning är att mängden och relevansen hos tillgänglig information varierar betydligt bland de koder som granskats. Vissa koder är väldokumenterade och tillgängliga dokument bidrar till ett stort förtroende för att koderna är lämpliga och tillförlitliga för att utföra erforderliga analyser. Den tillgängliga informationen kopplad till flera av de koder som har undersökts beskriver däremot inte tydligt hur koden visats vara kapabel att generera tillräckligt noggranna resultat. Några koder uppfyller inte SKB:s egna krav för att fastställa att de utvecklade koder som tagits fram för att hantera projektspecifika frågeställningar fungerar som avsett. SSM rekommenderar därför att SKB bör ta fram erforderlig information för att bibringa en större tilltro till att alla koder tillämpade i säkerhetsanalysen SR-Site producerar tillförlitliga resultat.

Hydrologisk modellering är central för säkerhetsanalysen SR-Site men SSM bedömer att detta område är ofullständigt beskrivet i SKB TR-11-01 (SSM Technical Note 2012:35). Begränsad information finns tillgänglig om effekter under delvis mättade förhållanden och det är inte tydligt vilka av analyserna som är gränssättande för bedömning av tålighet samt för förmågan att förhindra och fördröja spridning av radionuklider vid eventuella kapselskador. Det är viktigt att mer i detalj förstå SKB:s arbete med återmättnadsanalyser för buffert och återfyllning (t.ex. i SKB TR-10-11 och SKB TR-10-44).

SSM anser att det är nödvändigt att kontrollera på vilket sätt kvalitetssäkring och verifiering har genomförts för de koder och modeller som SKB har använts i säkerhetsanalysen, särskilt för de som SKB har ändrat och anpassat till SR-Site (t.ex. COMP23 Matlab/Simulink solver, analytiska modeller inbäddade i COMP23 och FARF31). Detaljerade kommentarer om denna fråga återfinns i kapitel 3, 4, 5, 6 och 7 i denna rapport.

SKB har använt etablerade metoder för att identifiera och utvärdera osäkerheter för ingående parametrar som beskriver förlägningsplatsen för slutförvaret i säkerhetsanalysen. SR-Site ger flera starka argument till varför det är nödvändigt att påbörja undersökningarna under jord på den föreslagna slutförvarsplatsen för att i någon större omfattning ytterligare kunna reducera några av de återstående kritiska osäkerheterna med avseende på i säkerhetsanalysens ingående parametrar. SSM instämmer med SKB om att så är fallet och anser att det är rimligt att osäkerheterna kommer att minska allt eftersom nya data insamlas från platsen.

SSM anser att SKB bör där så är tillämpligt under utvecklingen av kommande säkerhetsanalyser klargöra hur information i sammanfattningsrapporten för koder, modeller och dess referenser gäller för de olika versionerna av koderna som använts (SKB TR-10-51). Detta klargörande behövs eftersom varje enskild version av en kod behöver var för sig visas producera korrekta resultat.



2.8 Återkoppling till SKB:s kärnavfallsprogram

2.8.1 Underlag från SKB

I sitt avslutande kapitel med slutsatser understryker SKB vikten av en tydlig och genomarbetad koppling mellan säkerhetsanalysen SR-Site och argument för kravuppfyllelse (avsnitt 15.3), slutförvarets konstruktionsstyrande fall (avsnitt 15.4), referensutformningen och konstruktionsförutsättningar (avsnitt 15.5), fortsatta platsundersökningar och platsmodellering (avsnitt 15.6) samt programmet för forskning, utveckling och demonstration (avsnitt 15.7).

2.8.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att det är viktigt att en tydlig koppling och en verifieringskedja visar att data och antaganden i SR-Site säkerhetsanalys, och som används i bedömningarna av kravuppfyllelse, baseras på resultat från fortsatt forskning och utveckling, platsundersökningar och ingenjörsarbete under utvecklingen av SKB:s program för etablering av ett kärnbränsleförvar. Därför bör ett program för prestandabekräftelse för slutförvaret etableras (se SSM Technical Note 2014:40) så att det innefattar:

- Bekräftelse av att verkliga undermarksförhållanden och förändringarna i dessa förhållanden under uppförande- och driftfasen ligger inom de gränser som förutsattes i SR-Site säkerhetsanalysen.
- Kontroll och monitorering av tekniska och naturliga barriärer för att det i den mån det är möjligt säkerställa önskade egenskaper efter förslutning av slutförvaret.
- Genomförande av platsspecifik demonstration i större skala och/eller under längre tider för att minska osäkerheter, förkasta olämpliga modellalternativ och osannolika processer, samt utvärdera tillämpligheten hos teknologier som har utvecklats funktionellt till slutförvaret.
- Möjligen förstärka den samhälleliga tilltron genom ett mångsidigt och spårbart program som bekräftar att krav på slutförvarets prestanda och säkerhetsfunktioner som syftar att mycket långsiktigt skydda människors hälsa och miljön kan uppnås.

2.9 Tillämpning av kvalitetssäkringssystem

2.9.1 Underlag från SKB

Kvantifiering av slutförvarsutveckling och dos- och riskkonsekvenser görs av SKB genom matematisk modellering med lämpligt definierade modeller som representerar relevanta konceptualiseringar av olika typer av processer. Förutom krav på kvalitetssäkrade indata (SKB TR-10-52) behövs det modelldokumentation (SKB TR-10-51) samt etablerade rutiner för att upptäcka mänskliga fel genom t.ex. att använda alternativa beräkningsmetoder (t.ex. SKB TR-11-01, kapitel 13). SKB:s vägledande princip är att modeller och data ska dokumenteras tillräckligt detaljerat för att beräkningarna ska kunna reproduceras och granskas.

SKB har utvecklat instruktioner för kvalitetssäkringssystem för olika aspekter av hanteringen av egenskaper, händelser och processer s.k. FEP:s (SKBdoc 1082128, SKBdoc 1082130), inklusive framtagning av interaktionsmatriser som tydliggör kvalitetssäkringsstrategin samt identifiering av en pool av projektexperter som ska delta i SKB:s kvalitetssäkring.



2.9.2 SSM:s bedömning

SSM anser med stöd av granskningsresultat från externa experter att vissa delar av säkerhetsanalysen SR-Site inte är tydliga eller tillräckligt spårbara med avseende på dataursprung, dataanvändning, datakvalitet, modelleringsresultat samt dess vidareanvändning i analysen. Till exempel gäller detta för de beskrivningarna av hydrologisk modellering och för "F-faktorerna" i kapitel 10 och 12 i SKB TR-11-01. Som resultat av detta finns det farhågor att vissa analyser i SR-Site inte kan reproduceras oberoende utan att efterfråga betydande kompletterande information från SKB.

I vissa fall gör SKB logiska hänvisningar från säkerhetsanalysen SR-Site (SKB TR-11-01) till andra-nivårapporter (t.ex. processrapporterna eller produktionsrapporter), men i andra fall görs hänvisningar direkt till tredje eller lägre rapportnivå, även om samma information återfinns ibland i relevanta andra-nivårapporter. Snarlika uppgifter förekommer på flera ställen och i flera rapporter vilket kan medföra transkriptionsfel och osäkerheter i vilken den egentliga datakällan är.

Bland referenser inom säkerhetsanalysen SR-Site finns några fall av cirkel- och uppåt-referens mellan rapporter som beskriver säkerhetsanalysen. Till exempel, gällande korrosionsmodelleringen i SKB TR-11-01 avsnitt 12.6.2 hänvisas läsaren till den mer detaljerade rapport SKB TR-10-66. Vid en närmare granskning av den sistnämnda referensen hänvisas läsaren emellertid tillbaka till SKB TR-11-01.

SKB anger att vissa delar i instruktionen för att utveckla processbeskrivningarna (SKB, 2008a) inte är tillämpliga för utvecklingen av beskrivningar av biosfärsprocesser, biosfären sammanfattande rapport (SKB TR-10-09) och biosfär processrapporten (SKB R-10-37), men dessa instruktioner används trots detta i dessa biosfärsrapporter. SSM konstaterar att det därför är otydligt hur SKB har följt den formella kvalitetssäkringsprocessen för att etablera och kontrollera av biosfärens processlista och processbeskrivningar.

2.10 Sammanvägd bedömning av säkerhetsanalysmetodiken

Sammanfattningsvis bedömer SSM att SKB har vidtagit lämpliga åtgärder för att visa att säkerhetsanalysen SR-Site är så heltäckande som möjligt, och har utvecklat och tillämpat en säkerhetsanalysmetod som är komplett i den meningen att den, på en hög nivå, innehåller alla viktiga och förväntade moment och bedömningar för att demonstrera KBS-3-förvarets förutsättningar att uppfylla föreskriftskraven för den långsiktiga strålsäkerheten. SKB:s metodik i 11 steg som presenteras i SR-Site är övergripande mogen, lämplig och passar för ändamålet att visa bland annat slutförvarssystemets tålighet mot förhållanden, händelser och processer efter förslutning, samt slutförvarets långsiktiga risk.

SKB har byggt upp och beskrivit SR-Site säkerhetsanalys i enlighet med en väl dokumenterad metodik (SKB TR-11-01, avsnitt 2, figur 2.1). SKB:s metodik för säkerhetsanalys överensstämmer med internationell bästa praxis för långsiktiga säkerhetsanalyser för tiden efter förslutning av ett slutförvar för använt kärnbränsle (t.ex. Röhlig m.fl. 2012). Detta bidrar till att bygga upp förtroendet för korrekthet, robusthet och fullständigheten hos säkerhetsbedömningen för en anläggning av denna säkerhetsbetydelse.

Redan i den internationella granskningen av den preliminära säkerhetsanalysen SR-Can (Sagar m.fl., 2004) noterades att SKB:s utveckling och användning av säkerhetsfunktioner och säkerhetsindikatorer som ett led i analysen av det långsiktiga slutförvarssystemets prestanda erbjuder ett innovativt och praktiskt sätt att beskriva säkerhet för olika



komponenter i ett slutförvar. Även om uppfyllelse av säkerhetsindikatorernas riktvärden inte nödvändigtvis innebär att riskkriteriet kommer att uppfyllas vid en viss tidpunkt under slutförvarets utveckling, eller att kraven i föreskrifterna per automatik uppfylls, kan ett sådant tillvägagångssätt på ett tillfredställande sätt stödja demonstrationen av robusthet för ett slutförvarssystem med multipla barriärer. Användning av säkerhetsindikatorer leder till framtagning av komplementära kvantitativa analyser som i kombination med konventionella utsläpp/transport/konsekvensanalyser bidrar till de många resonemang som ökar förtroendet för den långsiktiga säkerhetsdemonstrationen i SR-Site.

SKB har i SR-Site åstadkommit en: (i) en tydlig avgränsning av barriärfunktionerna som är förknippade med slutförvarssystemet; (ii) en transparent analys av bidraget från varje barriär till isolering och inneslutning för en rad olika möjliga framtida tillstånd; (iii) en systematisk analys av barriärfunktioner genom analys av huvudscenariot och övriga scenarier. Det finns dock enligt SSM:s uppfattning vissa mindre luckor i SKB:s säkerhetsmetodik där argumentationen endast med viss svårighet kan spåras.

Den systematiska strategin för att bedöma slutförvarsutvecklingen genom beaktande av delsystemens brottmekanismer och felfunktioner, och som samtidigt baseras på flera säkerhetsindikatorer följer internationellt etablerat praxis och SKB kan anses ligga i framkant av utvecklingen på detta område. I bedömningen av förutsättningarna för kravuppfyllelse anser SSM att SKB:s metod för riskanalys är lämplig för att kunna tillhandahålla en trovärdig och konservativ uppskattning av den årliga individrisken som härrör från förvaret.

Baserat på granskningen av SR-Site huvudrapport, har olika frågor som avser ofullständig information kring detaljer i hur SKB:s metodik har implementerats identifierats av SSM. Detta gäller exempelvis:

- tydlighet i beskrivning av modellering av grundvattenströmningen runt slutförvaret och hur den kan leda till kapselkorrosion
- detaljeringsgrad i riskbedömningen
- uppgifterna som SKB tillför för att illustrera tillämpning av bästa möjliga teknik (BMT).

3. Initialtillstånd

I detta kapitel redovisas SSM:s bedömning av SKB:s redovisning kring slutförvarets initialtillstånd efter förslutning. Initialtillståndet är ett resultat av uppförandet av slutförvarsanläggningen i berget vid Forsmark, tillverkning av tekniska barriärer, inkapsling av använt kärnbränsle, installation av de tekniska barriärerna, inplacering av inkapslat kärnbränsle samt tunnlarnas förslutning. SKB definierar initialtillståndet utifrån platsförutsättningar, det använda kärnbränslets egenskaper samt konstruktionsförutsättningar som har tagits fram baserade på erfarenheter från tidigare säkerhetsanalyser. En tillräckligt god kännedom om initialtillståndet utgör en grundförutsättning för analysen av slutförvarets långsiktiga säkerhet och strålskydd. Den naturliga och de tekniska barriärernas tillstånd och egenskaper vid tidpunkten för slutlig förslutning av slutförvaret påverkar slutförvarets långsiktiga risk för människors hälsa och miljön. En bedömning av genomförbarheten kopplar till förutsättningarna för att tillverka tekniska barriärer och andra komponenter i slutförvaret samt att uppföra och driva slutförvaret under höga kvalitetskrav och till rimliga kostnader. SSM:s bedömningar avser förutsättningar för Forsmarksplatsen, konstruktionsförutsättningar för tunnlar och tekniska barriärer, det använda bränslets egenskaper, tillverkning och kvalitetskontroll av komponenter i slutförvaret samt inverkan av uppförande- och driftfaserna på förvarets långsiktiga säkerhet och strålskydd efter förslutning. För SSM:s utvärdering av säkerhet



under drift hänvisas till granskningsrapport *Uppförande och drift av slutförvarsanläggning*.

SKB redovisar i ansökan övergripande principer för design och produktion av ett KBS-3 förvar (SKB TR-10-12) samt konstruktionsförutsättningar för ett KBS-3 förvar (SKB TR-09-22). Konstruktionsförutsättningarna avser t.ex. specifikationer av krav på komponenter i slutförvarssystemet som behöver uppnås för att tillgodose avsedda barriärfunktioner i slutförvarsmiljön. De utgör en grund för detaljutformningen av slutförvarssystemet. Den detaljerade informationen om den opåverkade geosfären och biosfären återfinns i den platsbeskrivande modellen (SKB TR-08-05). Den detaljerade informationen om bränslets initialtillstånd redovisas i bränslerapporten (SKB TR-10-13). Den detaljerade informationen om uppförande, konstruktion och inplacering av olika komponenter och delsystem redovisas i SKB:s produktionsrapporter (buffertlinjen SKB TR-10-15; kapsellinjen SKB TR-10-14; återfyllnadslinjen SKB TR-10-16; förslutningslinjen SKB TR-10-17; berglinjen SKB TR-10-18).

SKB anser att det inte finns någon entydig tidpunkt för en lämplig definition av initialtillståndet. I SR-Site definieras initialtillståndet för det tekniska barriärsystemet utifrån tidpunkterna för kapseldeponering, buffertinstallation i ett enskilt deponeringshåll och återfyllnad av en enskild deponeringstunnel. För geosfären och biosfären definieras initialtillståndet som tidpunkten då berguttaget för förvaret inleds (SKB TR-11-01, avsnitt 5.1). SKB betraktar tidpunkten för slutlig förslutning av förvaret som mindre lämplig som en utgångspunkt för initialtillståndet eftersom den hydrauliska, termiska och kemiska utvecklingen i enskilda deponeringshåll kommer att variera väsentligt under slutförvarets långa driftperiod.

SSM håller med SKB om att det inte är ändamålsenligt att definiera initialtillståndet utifrån en enskild tidpunkt. Ur SSM:s perspektiv är dock tidpunkten då det ingenjörsmässiga arbetet vid uppförandet och driften av slutförvaret slutförs en särskilt viktig utgångspunkt för initialtillståndet eftersom myndigheten då inte längre kan utöva direkt tillsyn över den förslutna anläggningen. SSM behandlar de planerade bergarbetena som en del av detta kapitel. Även SKB:s preliminära planer för slutlig förslutning bedöms inom detta kapitel. De tekniska barriärernas hydrauliska, termiska och kemiska utveckling i enskilda deponeringshåll redovisas däremot i avsnittet om slutförvarets utveckling under de första 1 000 åren även om vissa delar av utvecklingen inträffar före den slutliga förslutningen. SSM bedömer förläggningsplatsens lämplighet utifrån bergets och biosfärens tillstånd vid den tid då SKB genomförde platsundersökningar. Initialtillståndet för använt kärnbränsle antas i detta avsnitt vara tidpunkten då bränslet inkapslats i kopparkapseln.

Utgångspunkten för att precisera slutförvarets tänkta initialtillstånd är föreskriftskraven som innebär att slutförvaret ska utformas för att på bästa sätt kunna motstå belastningar och degraderingsprocesser under mycket lång tid i slutförvarsmiljön. SKB har baserat nuvarande konstruktionsförutsättningar (SKB TR-09-22) och den aktuella referensutformningen av ett KBS-3-förvar på SKB:s näst senaste säkerhetsanalys SR-Can som publicerades 2006. Tidigare har ett antal alternativa utformningar av enskilda förvarskomponenter tagits fram och utvärderats men senare ersatts, vilket har redovisats i SKB:s och reaktorinnehavarnas Fud-program. Nya uppdaterade och förfinade konstruktionsförutsättningar för ett KBS-3-förvar och en uppdaterad referensutformning behöver utarbetas baserad på resultatet av nuvarande säkerhetsanalys SR-Site inklusive dess granskning. En ny version av referensutformningen och konstruktionsförutsättningarna bildar en grund för framtagandet av säkerhetsredovisningen PSAR inför en eventuell start av konstruktionsarbeten vid Forsmarksplatsen (t.ex. SKBdoc 1471283). Erfarenheter från arbetet med en kommande PSAR och SSM:s synpunkter på



redovisningen samt informationen från den initiala uppförandefasen, vilket inkluderar detaljundersökningar av berget, behöver i sin tur utnyttjas för utvecklingen av en ytterligare preciserad referensutformning, tillverkning av slutförvarskomponenter med slutgiltig specifikation för användning i slutförvaret, samt en ny säkerhetsredovisning (SAR) som skulle behöva godkännas av SSM innan en eventuell provdrift av ett slutförvar blir möjlig.

Säkerhetsanalyserarbetet kan dock inte vara den enda utgångspunkten för referensutformning för förvaret och de konstruktionsförutsättningar som preciserar krav på barriärsystemet liksom tillverkningskrav och acceptanskriterier för enskilda komponenter. Praktiska aspekter så som begränsningar hos tekniska system, möjliga mänskliga misstag och i slutändan kostnader behöver beaktas. SKB:s program har sedan KBS-3-systemet började utvecklas gått från faser med fokus på grundvetenskap kring förhållanden på stora djup, platsförutsättningar, konceptstudier av slutförvarsutformningar, platsval och platsundersökningar, till numera ett större fokus på detaljerade konstruktionslösningar, tillverkning, oförstörande provning, bergarbeten m.m. inför en kommande konstruktions- och driftsfas. SSM har i bedömningarna inom detta kapitel beaktat SKB:s dokumenterade erfarenheter kopplade till praktisk genomförbarhet från SKB:s demonstrationsstudier vid Äspölaboratoriet samt kapsellaboratoriet och bentonitlaboratoriet i Oskarshamn.

Denna successiva utveckling av barriärsystemen inklusive kravspecifikationer baserade på resultat från säkerhetsanalyser liksom praktiskt utvecklingsarbete utgör en grund för att skapa förutsättningar att uppfylla myndighetens krav på tålighet och bästa möjliga teknik (5-6 §§ SSMFS 2008:21; 4§ SSMFS 2008:37). Dessa föreskriftskrav utgör en väsentlig utgångspunkt för SSM:s bedömning av SKB:s redovisning kring initialtillståndet. Samtliga komponenter som i ett eller annat väsentligt avseende påverkar det långsiktiga strålskyddet och säkerheten så som berget, tekniska barriärer, uppförda bergvolymerna samt slutförvarets förslutning behöver bedömas ha gynnsamma egenskaper och vara lämpligt utformande i perspektivet långsiktig strålsäkerhet. Föreskriftskravet kopplat till barriärsystemets tålighet innebär att t.ex. materialval, utformning och dimensionering av tekniska barriärer, samt layout, tunnelutformning och platsanpassning behöver beakta aktuella och förväntade betingelser på förvarsdjup samt ha visats vara lämpliga under sådana omgivningsbetingelser. Det behöver visas att komponenter som SKB har tillägnat barriärfunktioner ger ett väsentligt bidrag till slutförvarets långsiktiga säkerhet och strålskydd. För uppfyllelse av kravet på bästa möjliga teknik (6§ SSMFS 2008:21) behöver det visas att andra utformningar av barriärsystemet som är industriellt möjliga att använda inom detta område är mindre lämpliga ur säkerhetssynpunkt än de som föreslås i tillståndsansökan. Alternativa utformningar av förvarskomponenter och förvarsutformningar har övervägts i olika faser av SKB:s program. För uppfyllelse av kravet på bästa möjliga teknik (4§ SSMFS 2008:37) behöver det dessutom visas att förläggningsplats och drift av slutförvaret har valts och utformats för att förhindra, fördröja och begränsa utsläpp från både tekniska och geologiska barriärer så långt som är rimligt möjligt. Bedömning av SKB:s förutsättningar att uppfylla dessa föreskriftskrav kan dock inte göras enbart med utgångspunkt från det initiala tillståndet varför sådana bedömningar inte ingår i detta avsnitt.

I detta tidiga steg i prövningsprocessen kan SKB:s konstruktionsförutsättningar, funktionsspecifikationer, referensutformning och tillverkningskrav inte betraktas som slutliga versioner avsedda för slutförvarets driftsfas. SKB planerar för ett idrifttagande av förvaret först i slutet av 2020-talet och kraven på ett fortsatt utvecklingsarbete kan i viss utsträckning förväntas leda till modifikationer och justeringar. Med tanke på att SKB:s program fortfarande är i en utvecklingsfas förväntar sig SSM även en gradvis ökad detaljeringsgrad i underlaget. Inom ramen för prövningen inför ett tillstånd bedömer SSM

förutsättningarna för SKB att demonstrera uppfyllelse av SSM:s föreskriftskrav givet den befintliga referensutförningen av ett KBS-3-förvar. Om det blir aktuellt med kommande uppförande- och driftfaser kommer SSM bedöma kravuppfyllelse med utgångspunkt i uppdaterade och mer detaljerade varianter av SKB:s konstruktionsförutsättningar, funktionsspecifikationer, referensutförning och tillverkningskrav som bildar underlag för kommande säkerhetsanalyser. Vid bedömning av förutsättningarna för SKB att senare kunna demonstrera kravuppfyllelse inför drift av anläggningen beaktar SSM möjligheter att med rimliga utvecklingsinsatser åtgärda utvecklingsförslag kopplade till den nuvarande redovisningen av det initiala tillståndet som myndigheten har identifierat inom ramen för den föreliggande granskningen. Ett antal sådana förslag finns identifierade i den föreliggande granskningsrapporten. Inom granskningen specificerar SSM såväl åtgärder som SSM anser vara nödvändiga för SKB att beakta för att kunna påbörja anläggningsarbeten (som utgör grunden för formulering av tillståndsvillkor), liksom synpunkter och rekommendationer som SKB i kommande steg bör kunna visa hur de har hanterats.

Bedömning av SKB:s förutsättningar att visa kravuppfyllelse (5-6 §§ SSMFS 2008:21 liksom 4§ SSMFS 2008:37) redovisas i Del 1 av granskningsrapporten vilket även inbegriper myndighetens analys av den strålsäkerhetsmässiga betydelsen av kvarvarande osäkerheter kopplade till initialtillståndet. Initialtillståndet för slutförvaret har även i ett mer indirekt sammanhang stor betydelse för SSM:s bedömning av förutsättningarna för SKB att visa kravuppfyllelse i förhållande till andra aktuella föreskriftskrav så som skydd av människors hälsa (5§ SSMFS2008:37), miljöskydd (6§ SSMFS2008:37) samt kravet på flerfaldiga barriärer (7§ SSMFS2008:21). I detta avsnitt görs vetenskapliga och tekniska bedömningar inom olika sakområden.

3.1 Forsmarksplatsens initiala egenskaper

Detta avsnitt beskriver SSM:s granskning av kandidatbergets och biosfärens initiala egenskaper vid Forsmark som en utgångspunkt för analysen av långsiktig säkerhet för ett slutförvar. De initiala egenskaperna avser i detta fall bergets tillstånd innan det blivit påverkat av konstruktionsarbeten vid uppförande av ett framtida slutförvar. Biosfärens egenskaper avser även dagens förhållanden. Information om bergets och biosfärens initiala egenskaper kommer från de platsundersökningar som SKB genomförde mellan 2002 och 2009. Bergets utveckling i samband med konstruktionsarbeten samt dess utveckling under olika perioder efter slutlig förslutning av ett förvar återges i avsnitt 3.2 samt i kapitel 4-6.

I samtliga koncept för geologisk slutförvaring av radioaktiva avfall har bergets egenskaper och långsiktiga utveckling en avgörande betydelse för långsiktig strålsäkerhet. Berget ska på ett betydande sätt bidra till att isolera avfallet och begränsa spridning av radioaktiva ämnen (IAEA, 2011). Kunskap kring bergets egenskaper är av stor betydelse för förståelsen för dess säkerhetsfunktioner, men även för hur andra barriärers säkerhetsfunktioner påverkas av den omgivande miljön. Som en utgångspunkt för bedömning av bergets långsiktiga utveckling krävs även en rimligt bra förståelse för hur berget uppnått sitt nuvarande tillstånd. Berget ska bidra till gynnsamma mekaniska, kemiska, hydrologiska och termiska förhållanden i slutförvaret. Begränsad transport och grundvattenflöde bidrar både till tekniska barriärers beständighet och till långsam radionuklidtransport. Berget har också en betydelse för att göra avfallet oåtkomligt och försvåra tillträde. På stora djup är berget också förhållandevis opåverkat av klimatutvecklingen vid ytan.

Kunskap om biosfärens egenskaper behövs för att analysera konsekvenserna av utsläpp av radioaktiva ämnen i samband med att slutförvarets förmåga att innesluta de radioaktiva



ämnena vid något tillfälle av något skäl har upphört. Den platsspecifika informationen är ett underlag till SKB:s beskrivning av exponeringsvägar och radioaktiva ämnens transport i den ytnära miljön.

Det svenska kärnavfallsprogrammet fokuserade redan från början på den Fennoskandiska urbergsskölden och ett förvar i kristallint berg. Många andra länders kärnavfallsprogram har fokuserat på sedimentära geologiska formationer så som vissa typer av salt- och lerformationer, men sådana finns endast i en liten omfattning eller inte alls i Sverige. Betydelsen av olika egenskaper hos berg i perspektiv av långsiktig säkerhet och strålskydd samt byggbarhet har undersökts på olika platser i landet främst via borrhålsundersökningar sedan början på 1980-talet. SKB:s undersökningar vid Stripagruvan på 1980-talet och anläggandet av Äspölaboratoriet under 1990-talet hade också betydelse för förståelsen av vilka krav som behöver ställas på bergets egenskaper. Dessa insikter användes under SKB:s platsvalsprocess med förstudier, länsvisa översiktsstudier och analys av typområden. För att visa att förutsättningarna för att bygga ett säkert slutförvar baserat på KBS-3-metoden i den svenska granitiska berggrunden var goda genomförde SKB säkerhetsanalysen SR-97 (SKB TR-99-06). Det definitiva underlaget för att motivera SKB:s platsval utgjordes av en komplettering till Fud-program 98 som sammanfattade tillgänglig information av betydelse. Efter att underlaget hade granskats av myndigheterna och efter att regeringen förklarat att de inte hade några invändningar mot SKB:s platsundersökningsprogram fanns förutsättningar för att påbörja undersökningar vid de identifierade kandidatområdena. Innan starten definierade SKB för första gången kvantitativa krav för viktiga kemiska och fysikaliska parametrar för att berget som helhet skulle kunna betraktas som lämpligt i slutförvarssammanhang (SKB TR-00-12). Baserat på kunskapen om faktorer av betydelse för ett slutförvars långsiktiga säkerhet tog SKB först fram ett generiskt platsundersökningsprogram (SKB R-01-10) och därefter platsspecifika undersökningsprogram (SKB R-01-42; SKB R-01-44). I början av platsundersökningsfasen fokuserade SKB undersökningarna i Oskarshamn främst på Simpevarshalvön nära Oskarshamns kärnkraftverk. Efter bearbetning och bedömning av preliminära data ansåg SKB att denna plats var mindre lämplig i jämförelse med den alternativa Laxemarplatsen vid vilken borrhål redan fanns anlagda innan starten på platsundersökningarna. SKB fokuserade de fortsatta platsundersökningarna därefter på delområden inom Laxemarområdet. I Forsmark var undersökningsområdet redan från början väl avgränsat till den så kallade Forsmarkslinsen söder om Forsmarks kärnkraftverk. SKB annonserade ursprungligen att platsundersökningar även skulle genomföras i Tierps kommun, men kommunen avböjde en fortsatt medverkan i SKB:s program.

SSM utvärderar i detta avsnitt både platsundersökningarna och Forsmarksplatsens lämplighet ur perspektiv av de fem huvudsakliga ämnesområdena geologi, bergspänningsfält, grundvattenkemi, hydrogeologi och det ytnära systemet. Vissa frågeställningar av en mer begränsad omfattning kopplad till bergets initiala egenskaper har dock hanterats i andra kapitel så som bergets termiska egenskaper samt bergets icke flödesberoende retardationsegenskaper. SSM:s bedömningar i detta avsnitt avser endast Forsmarksplatsens egenskaper medan den föregående platsvalsprocessen kommenteras inom ramen för systemövergripande frågeställningar. SSM har inte gjort en lika omfattande bedömning av den alternativa Laxemarplatsen, men bedömningar har tagits fram kopplade till de faktorer som har varit avgörande för SKB:s val av Forsmark framför Laxemar. Dessa bedömningar och jämförelser mellan de två kandidatområdena redovisas inom ramen för systemövergripande frågeställningar. SSM gör dock i slutet av detta avsnitt en övergripande bedömning av platsens lämplighet för ett slutförvar för använt kärnbränsle från perspektivet av de fem huvudsakliga ämnesområdena som kopplar till bergets initiala egenskaper. Det bör dock betonas att en slutlig bedömning av en plats lämplighet bara kan göras efter att alla faktorer som kan påverka den långsiktiga



utvecklingen har granskats. Denna bedömning gör SSM i samband med granskningen av säkerhetsanalysen som en helhet.

På SSM:s begäran har SKB tagit fram kompletterande information om ett antal frågor kopplade till Forsmarksplatsens egenskaper. Följande svar har inkommit till SSM:

- Svar på SSM:s begäran om förtydligande information rörande hydrogeologiska utredningar (SKBdoc 1372882).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering rörande bergspänningar i Forsmark (SKBdoc 1372575).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering rörande osäkerheter i hydrogeologiska beräkningar (SKBdoc 1396324, 1396325 och 1416510)
- Svar på SSM:s begäran om komplettering kring data till radionuklidmodellen för biosfären (SKBdoc 1338712).

3.1.1 Säkerhetsfunktioner för berget, platsundersökningar samt platsbeskrivande modeller

3.1.1.1 Underlag från SKB

SKB:s platsundersökningar har till stor del varit inriktade på att samla in information som har betydelse för de säkerhetsfunktioner som tillskrivs berget inom säkerhetsanalysen. Dessa säkerhetsfunktioner har utvecklats inom ramen för tidigare säkerhetsanalyser som genomförts inom SKB:s program. SKB:s SR-Can har haft en stor betydelse i och med att denna analys har utgjort en utgångspunkt för SKB:s definition av konstruktionsförutsättningar för slutförvaret (SKB TR-09-22). I rapporten finns även bergets eller geosfärens säkerhetsfunktioner beskrivna. Den information som har samlats in under platsundersökningarna har kvalitetskontrollerats och förts in i SKB:s databaser Sicada och GIS. Informationen har sedan bearbetats och tolkats inom SKB:s platsbeskrivande modeller. Processen utvecklades stegvis med framtagning av successivt förfinade versioner. De sista versionerna 2.2 och 2.3 bildade underlag för SKB:s slutrapport från platsundersökningarna i form av en platsbeskrivande modell (SDM) för Forsmark (SKB TR-08-05). En SDM är en beskrivning av platsen i form av en integrerad modell för geologi, termiska egenskaper, bergmekanik, hydrogeologi, hydrogeokemi, berggrundens transportegenskaper och en beskrivning av ytsystemet. Platsbeskrivningen ska användas för att ge indata till säkerhetsanalyser. En motsvarande rapport finns framtagen för den alternativa Laxemarplatsen (SKB TR-09-01). Den platsspecifika informationen från Forsmark bildar en viktig utgångspunkt för framtagandet av säkerhetsanalysen SR-Site som är en del av ansökan. Platsundersökningsresultaten är dock inte enbart en utgångspunkt för säkerhetsanalysen utan bildar även underlag för miljökonsekvensbeskrivningen och framtagning av en layout för tunnlarna i slutförvaret.

SKB har definierat säkerhetsfunktioner för berget som avser dels termiska, hydrologiska, mekaniska och kemiska egenskaper och förhållanden (THMC) som har betydelse för de tekniska barriärernas långsiktiga beständighet, dels de som avser hydrologiska och kemiska egenskaper som har betydelse för retardation av radionuklider ifall isoleringen av bränslet i kapslarna av något skäl bryts. THMC-förhållanden av betydelse för bufferten och återfyllnaden avser främst påverkan på erosionsbenägenheten och kemiska omvandlingar av bentonitlera. Motsvarande förhållanden av betydelse för kapselns integritet avser påverkan på korrosionsprocesser och mekanisk påverkan på kopparkapslar i form av isostatisk belastning respektive eventuella skjuvlaster. I punktlistan nedan finns en sammanställning av de säkerhetsfunktioner som SKB tillskriver berget. I vissa fall finns gränsvärden framtagna som definierar vad som anses vara lämpliga förhållanden i berget, medan i andra fall anges bara generella trender som att ett högt eller lågt värde är fördelaktigt utan att närmare precisera ett gränsvärde för att uppfylla säkerhetsfunktionen.



- Fördelaktiga kemiska förhållanden, dvs. kemisk sammansättning av grundvatten på slutförvarsdjup; 1) reducerande Eh för att begränsa kapselkorrosion och bränsleupplösning, 2) tillräckligt låg salinitet för att upprätthålla buffertens och återfyllnadens svälltryck, 3) jonstyrka $\Sigma[M^{qt}] > 4$ mM för att undvika kemisk erosion, 4) begränsade koncentrationer i grundvattnet av komponenterna sulfid, vätgas, metan, organiskt kol, kalium och järn, med syfte att begränsa kemiska omvandlingar av bufferten och korrosion av kopparkapseln, 5) pH < 11 med syftet att begränsa kemiska omvandlingar av buffert och återfyllnadsmaterial, 6) kloridhalt < 2 M och pH > 4 för att undvika kloridkorrosion av koppar.
- Fördelaktiga hydrogeologiska och transportförhållanden, vilket innebär att grundvattenflödet bör vara lågt och bergets retardationsförmåga för radionuklider bör vara högt; 1) transportmotståndet i sprickor F bör vara högt, vilket bidrar till retardation, 2) det ekvivalenta flödet i gränsskiktet mellan buffert och berg Q_{eq} bör vara lågt vilket leder till högt transportmotstånd, 3) låga koncentrationer av kolloider, vilket begränsar radionuklidtransport med kolloider, 4) gynnsamma förhållanden för matrisdiffusion och hög sorptionskapacitet, vilket förbättrar förutsättningarna för radionuklidretardation.
- Stabila mekaniska förhållanden i berget vilket bidrar till att upprätthålla kapselns mekaniska integritet; 1) skjuvrörelser < 5 cm i berget vilka skär deponeringshål, 2) skjuvhastighet < 1 m/s, 3) grundvattentrycket begränsat för att undvika isostatisk kollaps av kopparkapseln.
- Gynnsamma temperaturförhållanden i berget, vilket har betydelse för buffertens och kapselns säkerhetsfunktioner, 1) temperaturen i bufferten ska vara > -4°C för att undvika buffertfrysning, 2) temperaturen vid kapselytan ska vara > 0°C för att analysen av kapselns påverkan vid skjuvbelastning ska vara giltig.

Information från platsundersökningarna och definition av det initiala tillståndet möjliggör en bedömning av de opåverkade förhållandena för Forsmarksplatsen i utgångsläget. Att gynnsamma bergförhållanden har identifierats och att gränssatta kriterier är uppfyllda utgör dock ingen garanti för att dessa betingelser blir bestående i det långsiktiga perspektivet efter förslutning av förvaret. För att kunna göra den svårare bedömningen kring det långsiktiga perspektivet krävs en fullständig utvärdering av slutförvarets långsiktiga utveckling. Å andra sidan anger SKB att samtliga säkerhetsfunktioner inte nödvändigtvis måste vara uppfyllda under hela säkerhetsanalysens tidsrymd. Avvikelser från optimala betingelser och upphävelse av vissa säkerhetsfunktioner under olika tidsperioder innebär dock behov av ingående analyser. En annan utgångspunkt förutom geosfärens nuvarande tillstånd och dess utveckling under säkerhetsanalysens tidskala är förståelsen för dess tidigare utveckling. Arbetet med att utveckla en sådan förståelse bidrar med tilltro till säkerhetsanalysens resultat. SKB har framförallt fokuserat sina insatser på att modellera den geokemiska och hydrogeologiska utvecklingen av de båda kandidatområdena under kvartärperioden (SKB TR-10-58).

SKB delade in platsundersökningen vid Forsmark i en inledande fas från 2002-2004 (ISI) och en fullständig fas från 2005-2007 (CSI). Undersökningarna vid Laxemarplatsen pågick parallellt om än något tidsmässigt förskjutet vilket bl.a. var kopplat till att de första undersökningarna i Oskarshamns kommun avsåg Simpevarpsshalvön snarare än Laxemar. Olika versioner av platsbeskrivande modeller togs fram med syfte att ge en samlad bild av uppnådda resultat vid en viss tidpunkt och att identifiera angelägna åtgärder för att erhålla en så tillförlitlig bild av de båda kandidatområdena som möjligt. För att kunna arbeta rationellt med olika versioner av platsbeskrivande modeller användes datafrys, vilket innebar en definitiv tidsgräns för vilken information som beaktades. Den sista datafrysningen för information till den platsbeskrivande modellen SDM-Site var i mars 2007. Undersökningarna under ISI-fasen fokuserades på framtagning av stora mängder data från borrhålsundersökningar, medan arbetet under CSI mer handlade om att skaffa

kompletterande och verifierande information. Under slutet av CSI-fasen påbörjades också en fas med monitorering och långsiktiga observationer som även fortsatt efter att den egentliga platsundersökningsfasen hade avslutats (SKB R-07-34).

Mellan de båda faserna publicerade SKB även preliminära säkerhetsbedömningar från de båda kandidatområdena i vilka SKB stämde av uppfyllelse av krav och gjorde en samlad bedömning kring de båda platsernas lämplighet (SKB TR-05-12; SKB TR-05-16; SKB TR-06-05). SKB bedömde att platserna hade förutsättningar att uppfylla säkerhetskraven. Olika osäkerheter av varierande dignitet vid de båda platserna lyftes dock upp inom de huvudsakliga ämnesområdena, vilka senare utgjorde underlag för planering av den fullständiga platsundersökningsfasen. De preliminära säkerhetsbedömningarna granskades även av myndigheterna (se nedan).

SKB anger att den så kallade detaljundersökningsfasen är av stor betydelse för att få ett mer fullständigt underlag för fortsatta säkerhetsanalyser och för framtagning av uppdaterade förvarslayouter. Detaljundersökningsfasen är tänkt att genomföras i samband med uppförande av förvaret och skillnaden jämfört med den avslutade platsundersökningsfasen är att undersökningar kan göras från tillfartsvägar i berget och tunnlar på förvarsdjup istället för endast från undersökningsborrhål från ytan. SKB planerar att minska befintliga osäkerheter genom ett program av kartering av tunnelväggar, geologiska och geofysiska borrhålsundersökningar, bergmekaniska undersökningar samt fortsatt insamling av hydrogeologiska och grundvattenkemiska data (SKB R-10-08). Målet med en fortsatt platsmodellering under detaljundersökningsfasen är att verifiera och förfinna den platsbeskrivande modellen från platsundersökningsskedet.

3.1.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB bedrivit ett systematiskt långsiktigt säkerhetsanalyserbete som givit en bra grundläggande förståelse av vilka krav som behöver ställas på berget för att ett KBS-3-förvar ska upprätthålla en hög skyddsförmåga. Geosfärens egenskaper har en särskilt stor betydelse med tanke på dess dubbla funktioner att dels fungera som en barriär för radionuklider som av något skäl och vid någon tidpunkt passerat de tekniska barriärerna, dels bidra med gynnsamma betingelser för att långsiktigt upprätthålla de tekniska barriärernas långsiktiga integritet. SKB:s säkerhetsanalyser under de senaste 20 åren (SR-97, SR-Can, SR-Site) har visat på en gradvis ökad betydelse för att berget har lämpliga hydrogeologiska egenskaper och en lämplig grundvattenkemi för att så långt som möjligt underlätta upprätthållandet av kapselns och buffertens långsiktiga integritet. SSM bedömer att denna utveckling delvis har blivit föranledd av att osäkerheter kopplade till erosionsprocesser för bufferten och korrosionsprocesser för kapseln har blivit identifierade och mer utförligt analyserade. Bergets egenskaper nära deponeringshålen har en stor betydelse för att begränsa den lokala materieöverföringen i närområdet som degraderingsprocesser för de tekniska barriärerna är beroende av. Frånvaro av stora sprickor har också en betydelse för att minska risken för en alltför stor mekanisk skjvbelastning av kopparkapslarna.

Enligt SSM:s bedömning är SKB:s säkerhetsfunktioner inklusive funktionsindikatorer för berget ett lämpligt hjälpmedel för att tydliggöra geovetenskapliga faktorer av betydelse för den långsiktiga säkerheten. De funktioner som SKB har identifierat har också blivit föremål för analyser inom säkerhetsanalysen SR-Site. Säkerhetsfunktionerna utgör en grund för att bedöma bergets lämplighet och ger en vägledning kring vilka frågor som behöver särskilt långtgående analyser. SSM noterar dock att det i SKB:s redovisning finns få definitiva gränsvärden för att definiera uppfyllelse av en viss säkerhetsfunktion. Detta kan möjligen motiveras av att säkerhetsanalysen inte är helt avhängig av uppfyllelse av detaljerade säkerhetsfunktioner. SSM inser att det är endast säkerhetsanalysen i sig som kan möjliggöra en samlad bedömning av ett slutförvars långsiktiga skyddsförmåga och en



viss plats lämplighet. SSM anser dock att det är något otillfredsställande att SKB i vissa fall inte har konkretiserat säkerhetsfunktioner i SR-Site med någon typ av referensvärden som anger en förväntad kapacitet hos en viss säkerhetsfunktion.

SSM håller med SKB om att samtliga säkerhetsfunktioner inte alltid måste vara uppfyllda i alla tidsskalor. Det är rimligt att beakta att bränslets avklingning medför att behov av specifika säkerhetsfunktioner kan minska som funktion av tiden. Olika säkerhetsfunktioner kan också ha olika dignitet beroende på platsspecifika förutsättningar, varav följer att ett KBS-3-förvar kan fungera något annorlunda på olika platser beroende på olika egenskaper i berget, men kan ändå erbjuda en likvärdig skyddsförmåga. Skillnader avseende olika platsers förmåga att upprätthålla säkerhetsfunktioner behöver inte nödvändigtvis innebära att det går att definitivt avgöra att en plats är mer fördelaktig än en annan. I de fall där säkerhetsfunktioner inte förväntas vara uppfyllda i säkerhetsanalysens tidsskala finns dock ett behov av att utvärdera barriärsystemets utformning för att säkerställa uppfyllelse av krav kopplade till bästa möjliga teknik och barriärsystemets tålighet.

De tidigare myndigheterna SKI och SSI (Statens kärnkraftinspektion och Strålskyddsinstitutet) deltog i enlighet med regeringsbeslut (regeringsbeslut 22, 2001-11-01) aktivt i granskningen av SKB:s platsundersökningar redan från starten. Synpunkter och frågor till SKB påtalades vid ett flertal tillfällen under protokollförda samrådsmöten. De formella samrådsmötena gjorde det möjligt för myndigheterna att fortlöpande hålla sig informerade om SKB:s pågående arbete samt att påtala möjliga problem under den period då platsspecifika mätningar genomfördes. Tanken var att SKB skulle ges möjlighet att på ett tidigt stadium kunna omhänderta kritiska synpunkter. Ett annat syfte med samrådet var att förbereda granskning av SKB:s kommande ansökningar genom att bidra till myndigheternas kunskap om de båda kandidatområdena. Bedömningar som avser Forsmarksplatsen och som redovisas i detta avsnitt har således delvis sin grund i den myndighetsgranskning som genomfördes under åren 2002-2008.

Myndigheterna genomförde i samband med avslutandet av den inledande platsundersökningsfasen en granskning av SKB:s preliminära säkerhetsbedömningar för Forsmark och Laxemar (SKI-rapport 2008:03, SSI-rapport 2008:01). Myndigheterna ansåg att de inspektioner som då hade genomförts visade att SKB:s organisation gradvis hade förbättrats sedan inledningen av platsundersökningarna. SKB:s genomförande av mätprogram ansågs vid tidpunkten för preliminära säkerhetsbedömningar vara ändamålsenligt, men myndigheterna påpekade dock att en otillfredsställande liten mängd representativ hydrokemisk information hade framkommit. Det påpekades också att det för de båda kandidatområdena fanns mycket begränsad information från de tilltänkta förvarsvolymer i berget och att den tillgängliga informationen avsåg främst områden utanför de tilltänkta deponeringsvolymer. En bristande mängd information kunde också konstateras gällande bergspänningsmätningar och övergången mellan geosfär och biosfär. Det pressade tidsschemat ansågs vara det viktigaste skälet till att SKB:s underlag skulle kunna vara ofullständigt.

SSM kan nu flera år efter att platsundersökningarna avslutats konstatera att SKB under den fullständiga platsundersökningsfasen åtgärdat brister som påtalades efter den inledande platsundersökningsfasen. Så som påtalas i kommande ämnesvisa genomgångar av SKB:s redovisning kring berget vid Forsmark så finns dock fortfarande exempel på områden där den tillgängliga informationsmängden är relativt liten. SSM anser emellertid att upptag av ytterligare undersökningsborrhål endast marginellt kan förbättra förståelsen av förhållanden på förvarsdjup och att ytterligare information snarare bör inhämtas under ett kommande detaljundersökningsskede som innefattar konstruktion av tillträdesvägar ner till förvarsdjup.



SSM anser att det är av stor betydelse att SKB inför en eventuell byggstart ytterligare konkretiserar och specificerar (SKB R-10-08) kommande detaljundersökningar av berget för att bland annat säkerställa att mätningar kopplade till långsiktig säkerhet ges tillräcklig tid och en tillräckligt hög prioritet i samband med konstruktionsarbeten i berget. SSM anser att det erfordras en gradvis vidareutveckling och uppdatering av platsbeskrivande modeller som ett underlag för kommande säkerhetsanalyser. Det behövs parallellt också en fortsatt utveckling av säkerhetsanalysens hantering av återstående osäkerheter kring bergets egenskaper eftersom samtliga osäkerheter inte kan förväntas bli eliminerade ens i samband med kommande detaljundersökningar eller i samband med slutförvarets driftsfas.

Det bör påpekas att en stor del av granskningsarbetet under SKB:s platsundersökningsprogram genomfördes av externa experter. De båda myndigheterna SKI och SSI organiserade var sin grupp av externa experter till stöd för granskningen av SKB:s platsundersökningsprogram. SKI:s grupp INSITE bestod av externa experter inom områdena hydrogeologi, strukturgeologi, bergmekanik, grundvattenkemi, samt övergripande strategi för platsundersökningar samt koppling till säkerhetsanalys. INSITE-gruppens ansvarsområde var granskning av SKB:s karakterisering av bergets egenskaper. INSITE-gruppen arbetade med granskning av SKB:s delrapportering inom olika områden, litteraturstudier samt granskning av den pågående fältverksamheten. Ett 60-tal granskningsrapporter från INSITE-gruppens aktiviteter togs fram under SKB:s platsundersökningsprogram. SSI organiserade gruppen OVERSITE med ansvar för granskning av SKB:s arbeten kring karakterisering av biosfären, och den ytnära hydrologin vid Forsmark och Laxemar. SSI:s OVERSITE-grupp bestod av externa experter inom områdena exponeringsvägar i biosfären, hydrologi, radionuklidens egenskaper i miljön, övergripande strategi-platsundersökningar samt koppling till säkerhetsanalys. Även OVERSITE-gruppen tog fram ett antal granskningsrapporter under SKB:s platsundersökningsprogram. De båda granskningsgrupperna organiserade möten med SKB under vilka särskilt kritiska frågeställningar diskuterades. Grupperna tog fram listor med begäran på kompletteringar och förtydliganden som etappvis besvarades av SKB ("tracking issues list").

INSITE-gruppens övergripande bedömning är att SKB under platsundersökningarna har samlat in tillräckligt omfattande information av tillräckligt god kvalitet för en tillståndsprövningsprocess. SKB har generellt haft ett ändamålsenligt angreppssätt för utplacering av undersökningsborrhål och mätpunkter, att SKB har använt godtagbara mätmetoder samt att SKB har gjort stora ansträngningar för att få ett så omfattande och representativt dataunderlag för analysen av slutförvarets långsiktiga säkerhet och strålskydd som möjligt. Samtidigt finns behov av hantering av osäkerheter inom säkerhetsanalys som inte kan elimineras genom ett fortsatt platsundersökningsarbete (se nedan). INSITE ansåg vidare att SKB:s rapportering av platsundersökningsresultat i form av platsbeskrivande modeller var tillförlitlig och välmotiverad. OVERSITE ansåg att SKB genomfört ett imponerande program av mätningar och modellering för att förstå ekosystemen vid Forsmark och att den sammanställda informationen på ett avsevärt sätt ökat kunskapen om processer i dagens biosfär. Vare sig SSM eller de tidigare myndigheterna gjorde några formella ställningstaganden till de båda externa expertgruppernas bedömningar under platsundersökningsskedet. I samband med denna tillståndsprövning kan dock SSM bekräfta en samstämmighet med INSITE/OVERSITE-gruppernas generella omdömen om platsundersökningarnas kvalitet, ändamålsenlighet och rapportering. SSM:s detaljerade omdömen om SKB:s hantering av ämnesspecifika frågor och detaljer överensstämmer dock inte alltid nödvändigtvis med INSITE/OVERSITE vilket framgår av efterföljande avsnitt i denna rapport.



Trots den överlag positiva bedömningen av SKB:s platsundersökningar har både INSITE och OVERSITE identifierat en rad olika områden inom vilka förbättringsbehov har identifierats. Ytterligare information behöver tas fram under detaljundersökningsskedet i samband med uppförande av slutförvaret. Ytterligare insatser behövs även kopplade till frågor som främst hanteras som konceptuella- och dataosäkerheter inom säkerhetsanalysen. SSM konstaterar att INSITE/OVERSITE-gruppernas kritiska synpunkter är relevanta för såväl det aktuella steget i prövningsprocessen, som för ett tillkommande detaljundersökningsskede. Följande frågeställningar bedöms vara angelägna att uppmärksamma:

- Det finns en osäkerhet kring fördelning av mindre vanliga bergarter och bergomvandlingar som inte rimligtvis kan elimineras genom fortsatta undersökningar med hjälp av borrhål. Mindre vanliga bergarter och bergomvandlingar kan påverka bergets kvalitet och termiska egenskaper, och de behöver därför beaktas i SKB:s detaljundersökningar och under uppförandet av förvaret.
- Egenskaper hos större deformationszoner samt deras exakta positioner på förvarsdjup är svåra att utförligt karaktärisera från undersökningsborrhål. Osäkerheter angående dessa frågor är särskilt angelägna om de avser förvarsvolymen och de behöver därför beaktas i SKB:s kommande layouter av slutförvaret.
- Det finns osäkerheter kring SKB:s spricknätverksmodeller som behöver fortsatta insatser, t.ex. avseende samband mellan sprickstorlek och intensitet, samt relationer och möjliga rumsliga korrelationer mellan olika typer av sprickor.
- Det finns frågor kopplade till hur det diskreta spricknätverket i berget är kopplat till både större och mindre deformationszoner. Den befintliga flödesmodellen representerar inte en unik tolkning utan det finns kvarvarande frågeställningar kring hur flödesvägarna är förbundna med varandra, och om flödet kan vara kanaliserat eller uppdelat.
- Det finns en seismisk risk kopplad till uppvärmningen av bergvolymen på grund av bränslets resteffekt. Den termiska expansionen av bergvolymen kan påverka spänningsfältet med risk för uppsprickning, reaktivering av deformationszoner samt en påverkan på de tekniska barriärerna.
- Vissa aspekter av systemets dynamiska uppträdande är inte helt klarlagda så som in- och utströmningsförhållanden, ytligt grundvattenflöde nära gränsskiktet mellan geosfär och biosfär, samt hydrogeologiska och grundvattenkemiska effekter av kommande glaciationscykler. Den paleohydrogeologiska förståelsen av platsens tidigare utveckling påverkar tilltron till förutsägelser kring platsens troliga långsiktiga utveckling.
- Grundvattnets sammansättning på förvarsdjup är osäker med avseende på t.ex. uppströmning av djupa salta grundvatten, redox-buffringsreaktioner och förhöjda halter av uran och sulfid. Dessa frågor bör utredas vidare vid en eventuell uppförandefas.
- Bergets förhöjda och anisotropiska spänningsfält behöver utvärderas ytterligare under en eventuell uppförandefas.
- SKB bör i större utsträckning arbeta med alternativa hydrogeologiska modeller för att ta hänsyn till kvarvarande osäkerheter.
- Det hade varit möjligt att använda ett mer strukturerat och utförligt sätt att propagera osäkerheter för att tillgodose säkerhetsanalysens informationsbehov.
- Det finns en överskattning av betydelsen av modellering av kol-omsättningen i biosfären, eftersom kol inte nödvändigtvis representerar omsättning/upptag av radioaktiva ämnen i miljön.

- SKB:s platsbeskrivande modeller för ytliga system har baserats på dagens förhållanden. För användning inom säkerhetsanalysen krävs dock mer uppmärksamhet kring extrapolation av data till andra omgivningsförhållanden.
- Även om SKB har samlat in en ansevärd mängd data för ytliga system så finns ingen tydlig indikation kring omfattning av rumslig eller tidsmässig variabilitet som behöver beaktas vid användning av platsundersökningsdata.
- Med tanke på varierande förhållanden i de olika typer av ekosystem som beaktas i biosfärmodelleringen finns osäkerheter kopplade till kvantifiering av sorption av radionuklider som inte har beaktats. Kd-värden är nyckelparametrar för radionuklidtransport i ytliga system.

3.1.2 Geologi

3.1.2.1 Underlag från SKB

Platsundersökningarna av Forsmarksområdets geologi har utförts successivt och systematiskt med en sekvens av successivt mer förfinade geologiska platsmodeller: ver. 0 (SKB R-02-32), ver. 1.1 (SKB R-04-15), ver. 1.2 (SKB R-05-18), steg 2.1 (SKB R-06-38), steg 2.2 (SKB R-07-45; SKB-R-07-46), steg 2.3 (SKB R-08-128, SKB R-08-64). Till dessa platsmodeller hör även ett stort antal underrapporter (sammanfattas i SKB R-07-45, Bilaga 1, tabell A1-2). Bergarterna och deras tredimensionella fördelning definierades i ett relativt tidigt skede under platsundersökningarna. Senare borrhål har bekräftat den geologiska modellen och endast mindre justeringar har gjorts. En sammanfattning av genomförda platsundersökningar, områdets geologiska utveckling och berggrundsgeologi redovisas i den platsbeskrivande modellen SDM ("Site Descriptive Model"; SKB TR-08-05, kapitel 2, 3, 5). SKB har även genomfört en systematisk utvärdering av sin egen tilltro till den platsbeskrivande modellen (SKB R-08-82). Frågan om naturresurser i Forsmarksområdet har lyfts av Östhammars kommun och MKG inom ramen för mark- och miljödomstolens remissförfarande vars dokumentation även tillställts SSM. Med anledning av detta har SKB kompletterat ansökan gällande ett förtydligande om Forsmarksområdet malmpotential (SKBdoc 1382754).

Platsundersökningarna inleddes med geologisk kartering av exponerade berggrundsytor, inkluderande detaljerad sprickkartläggning och markradar-mätningar på rengjorda berggrundsytor, vilka tillsammans med batymetrisk data, topografisk data, flygbilder och helikopterburna geofysiska mätningar (magnetometri, spektrometri och elektromagnetometri) utgjorde underlaget till en berggrundsgeologisk karta av målområdets markyta (SKB R-05-18). Helikopterburna geofysiska mätningar och tolkning av topografin och batymetri har varit viktiga verktyg vid identifiering av lineament (linjära geofysiska anomalier respektive linjära strukturer i landskapet), vilka kan orsakas av ytliga sprickzoner i berggrunden. Högupplösta magnetiska markmätningar och borrhåll utförda i områden som saknar exponerade berggrundsytor förbättrade berggrundskartan vars slutliga beskrivning presenterades i SKB R-08-128. För att få en inblick i bergartsfördelningen och möjliga sprickzoners uppträdande på djupet har SKB utfört tyngdkraftsmätningar samt reflektions- och refraktionsseismiska undersökningar i kandidatområdet. Upptag av kärn- och hammarborrhål har bidragit till en säkrare bild av bergarternas fördelning och strukturer på djupet. Forsmarksområdet har naturmiljöer med höga bevarandevärden. Detta medförde vissa begränsningar beträffande placering av borrhåll. För att få så mycket information som möjligt från de tillgängliga tolv borrhållarna borrades flera borrhål på samma plats fast i olika riktningar. Sammanlagt har 26 kärnborrhål borrats inom kandidatområdet och 20 av dessa ligger i målområdet (SKB TR-08-05, figur 2-1). Sammanlagt har 38 hammarborrhål borrats antingen för att stödja kärnborrhål eller för att undersöka specifika mål, till exempel för att fastställa huruvida lineament indikerar förekomsten av sprickzoner. Utöver geologisk kartering av borrhåll

och kaxprover, inkluderande kartering av bilder tagna av kärn- och hammarborrhålsväggen med hjälp av BIPS ("Borehole Image Processing System"), har borrhålsloggning med geofysiska mätningar i borrhål genomförts. Baserat på dessa undersökningar har SKB tagit fram geologiska modeller som beskriver:

- bergdomäner som är en litologisk uppdelning av berggrunden
- placering av deformationszoner > 1 km representerad av en deterministisk modell
- sprickdomäner och diskreta spricknätverk med en uppdelning av berggrunden huvudsakligen baserat på dess sprickfrekvens, vilka hanteras var för sig vid den stokastiska modelleringen av sprickor och deformationszoner < 1 km.

Berggrundsytan i Forsmarksområdet utgörs av en relativt flack erosionsyta med svag lutning mot öster. Denna erosionsyta är en del av det vidsträckta prekambrika peneplanet som bildades för mer än 540 miljoner år sedan. Baserat på bergartstyp, kornstorlek, homogenitet samt typ och grad av plastisk deformation delar SKB in berggrunden i bergdomäner. Kandidatområdet domineras av bergdomän RFM029 och RFM045 vilka huvudsakligen utgörs av metamorfoserad, medelkornig granitoid med mindre inslag av pegmatit och mafiska intrusiv (SKB R-07-45, tabell 4-5). Mafiska intrusiv, främst amfibolit, förekommer i regel som cm-tjocka lager/linsor längs med den tektoniska foliationen, men ställvis kan de mafiska lagren vara upp till flera meter i tjocklek (SKB R-07-45, figur 3-10). Storlek och rumslig fördelning av mafiska bergarter på förvarsdjupet är osäker (SKB R-08-82, avsnitt 3.2.5). De äldsta bergarterna i området utgörs av felsiska metamorfoserade vulkaniska bergarter, s.k. metavulkaniter. Mindre järnmineraliseringar är associerade med felsiska metavulkaniter sydväst om kandidatområdet (SKB R-04-18, figur 4-1). Dessa mineraliseringar stupar brant mot sydväst, vilket indikerar att de inte förekommer i kandidatområdet. Nordost om kandidatområdet utanför kusten förekommer felsiska till intermediära metavulkaniter vilka tillhör bergdomän RFM021. Inga järnmineraliseringar har observerats i RFM021, men eftersom merparten av domänen ligger under Östersjön varifrån inga mineralogiska data finns framtagna kan järnmineraliseringar i denna bergdomän inte helt uteslutas. SKB bedömer baserat på genomförda geofysiska undersökningar i kandidatområdet att den huvudsakliga granitiska berggrunden har försumbar malmpotential (SKB R-04-18). Förvaret i sig kan dock framträda som en geofysisk anomali vilket kan föranleda prospekteringsverksamhet och borrhning i förvaret. Med anledning av detta har SKB simulerat ett förvars geofysiska respons (SKB P-10-39). Simuleringen visar att av de undersökta metoderna var det bara reflektionsseismisk modellering som lyckades detektera förvaret. De vanligaste bergartsomvandlingarna i Forsmark är hematitdisseminering och albitisering (SKB R-07-45, avsnitt 3.4.4). Hematitdisseminering förekommer i anslutning till deformationszoner och ger en karakteristisk rödfärgning till sidoberget och sprickmineral. Albitisering förekommer i äldre granitiska bergarter i anslutning till yngre mafiska- och felsiska intrusiv. Betydligt mindre vanligt är omvandlingen som resulterat i bildning av episyenit (porös granit). Liksom hematitdisseminering är episyenitbildning associerad med deformationszoner, men det finns även enstaka förekomster av episyenit på andra platser i berggrunden (SKB R-07-45, tabell 3-7, 3-8, 3-9).

Forsmarksområdet utgörs av en tektonisk lins omgiven mot nordost och sydväst av regionala deformationszoner såsom Singö-, Forsmark- och Eckarfjärden (SKB R-05-18, figur 5-51). Dessa VNV till NV strykande deformationszoner har varit aktiva vid flera tillfällen och uppvisar en med tiden övergång från plastisk till spröd deformation. Berggrunden i den tektoniska linsen är, jämfört med deformationsgraden i de omgivande deformationszonerna, i mindre utsträckning påverkad av plastisk deformation och domineras av graniter vilka uppvisar en veckad tektonisk foliation; själva målområdet är beläget i de centrala delarna av en storskalig veckstruktur. Inuti linsen är två grupper av spröda strukturer ≥ 1 km vanligt förekommande; branta och flacka sprickzoner med ONO till NNO strykning (SKB TR-08-05, figur 5-26). Branta sprickzoner är vanligare i linsens

nordöstliga delar, medan flacka sprickzoner är vanligare i linsens sydvästliga delar dvs. utanför kandidatområdet. I mindre utsträckning förekommer även NNV strykande vertikala till branta sprickzoner. Jämfört med de brant stupande sprickzonerna är frekvensen av öppna sprickor och krosszoner högre i de flackt stupande sprickzonerna. Att flacka sprickzoner är vanligare i sydväst kan förklaras av veckstrukturen i området; i sydväst är den tektoniska foliationen och bergartskontakten mellan amfiboliter och granitoider flackare än i nordväst (SKB R-07-45, figur 5-6). De VNV till NV strykande deformationszonerna är de äldsta strukturerna i området och tillhör ett flera hundra km brett deformationsbälte som bildades för mellan 1,89 och 1,85 miljarder år sedan under den Svekokarelska orogenesen (bergskedjeveckningen). I slutet av den Svekokarelska orogenesen lyftes området upp till en högre nivå i jordskorpan där deformationen huvudsakligen är av spröd karakter. I samband med denna fas och senare tektoniska händelser under prekambrium bildades och reaktiverades de spröda strukturerna i området (SKB TR-08-05, figur 5-26). Senare geologiska processer relaterar främst till upprepade belastnings- och avlastningscykler av sediment och inlandsis som huvudsakligen resulterat i reaktivering av äldre sprickor och deformationszoner samt bildningen av bankningsplan (sprickor sub-parallella med bergöverytan) (SKB R-07-45, avsnitt 5.2).

SKB har genomfört omfattande undersökningar i ett > 6 000 km² stort område i nordöstra Uppland med syftet att undersöka om större förkastningsrörelser ägt rum efter den senaste istiden till följd av postglacial reaktivering av befintliga deformationszoner i närheten av Forsmark (SKB R-05-51). Undersökningarna har baserats på flygbildstolkning och studier av den kvartära lagerföljden i ett fyrtiotal aktiva sand- och grustäkter samt i 48 utgrävda undersökningsschakt vid 18 olika lokaler. Deglaciale sekvenser av löst packad sand eller grovsilt täckt av leriga lager är vanligt förekommande längs med de utgrävda undersökningsschakten. Dessa jordlager bedöms ha goda förutsättningar att utveckla seismiskt inducerade deformationsstrukturer, som likvifiering och vattenflyktstrukturer, men endast två av de undersökta lokalerna mer än 50 km sydväst om Forsmark uppvisar tecken på detta. Liknande studier utförda i Norrbotten och Västerbotten, där flera postglaciala förkastningar har dokumenterats, visar att skred, likvifiering och/eller vattenflyktstrukturer i den glaciala och de-glaciala lagerföljden är mycket utbredd (Lagerbäck och Sundh, 2008). Detta indikerar att eventuell postglacial reaktivering i Forsmarksområdet inte genererat lika kraftiga jordskalv som vid exempelvis Lansjärv-förkastningen (SKB R-05-51), vars magnitud uppskattats till >7 (Muir-Wood 1993). Sydost om Forsmark är den glaciala leran ofta veckad vilket har tolkats som att den har uppkommit i samband med submarina skred. Vad som orsakat skreden är osäkert; det går inte att utesluta att de kan ha orsakats av mindre jordskalv i närområdet eller av mer distalt belägna men kraftigare jordskalv (SKB R-05-51).

Av stor betydelse för identifiering och geometrisk modellering av deformationszoner är seismiska undersökningar, magnetiska mätningar samt borrhålsdata. Deformationszoner som enbart har baserats på linjära geofysiska anomalier, s.k. lineament, har enligt SKB:s bedömning en lägre grad av tilltro, medan deformationszoner baserade på både borrhålsintercept och geofysiska data bedöms ha hög tilltro. Fördelning av deformationsstrukturer ≥ 1 km i kandidatområdet redovisas i SKB:s lokala deterministiska deformationszonsmodell. Sextio deformationszoner i vilka förgreningar har inräknats har modellerats (SKB-R-07-45 tabell 5-2). SKB bedömer att flertalet av dessa har hög tilltro. Dessa strukturer domineras av vertikala till brant stupande strukturer (48 st.) varav huvuddelen (30 st.) stryker i ONO till NNO riktning. Två brant stupande zoner (ZFMENE0060A, ZFMENE0062A) med en spårlängd vid markytan på > 3km skär den prioriterade bergvolymen i sydost. Ytterligare två brant stupande zoner (ZFMWNW0123, ZFMNW0017) med en spårlängd vid markytan på > 3km förekommer i utkanten av kandidatområdets sydöstra del. Fem flacka ONO till NNO strykande sprickzoner förekommer i anslutning till förvarsvolymen (ZFMA2, ZFMA8, ZFMF1, ZFMB7,



ZFM1203; SKB TR-08-05, figur 5-30). Av dessa har bara ZFMA2 en spårlängd vid markytan > 3 km och två skär inte markytan (ZFMF1, ZFMB7). Alla deformationsstrukturer utom ZFMVNV0123 uppvisar enbart spröd deformation; deformationszonernas tjocklek är upp till 52 m (SKB R-07-45, tabell 5-2). I den deterministiska modelleringen finns även 28 brant stupande sprickzoner < 1 km identifierade, varav huvuddelen (16 st.) bedöms ha hög tilltro (SKB R-07-45, tabell 5-3).

En grundläggande osäkerhet beträffande branta deformationszoners orientering på djupet är dels svårigheten att korrelera magnetiska lineament med specifika deformationszoner utefter borrhålen, dels antagandet gällande lineamentens stupning (SKB R-07-45, tabell 5-2 och 5-3). Kärnborrhål uppborrade i senare skeden av platsundersökningarna har resulterat i endast mindre ändringar av den deterministiska deformationszonsmodellen. Dessa mindre ändringar avser främst modellerade deformationszoner med lägre tilltro (SKB R-08-64, tabell 4-7). Kvarvarande osäkerheter i den deterministiska modelleringen gäller främst storleken hos flacka deformationszoner, särskilt för zoner som inte skär markytan, s.k. blinda zoner, med få kärnborrhålsskärningar. Denna typ av osäkerhet accentueras av frånvaro av seismiska data från de nordöstra delarna av den regionala modellvolymen. SKB hanterar de kvarvarande osäkerheterna genom att extrapolera de flacka zonerna till närmaste brant stupande deformationszon (SKB R-08-82, avsnitt 3.2.1). Ytterligare en osäkerhet avser orientering och storlek av möjliga deformationszoner i borrhål som inte kan korreleras med lågmagnetiska lineament eller seismiska reflektorer. SKB bedömer att dessa strukturer antingen är mindre deformationszoner, vilket stöds av att de vanligtvis förekommer längs med korta borrhålsintervall, eller förgreningar från intilliggande redan modellerade deformationszoner (SKB R-08-82, avsnitt 3.2.2).

Utöver ovan nämnda osäkerheter är deformationszonernas lokalisering i viss mån påverkade av osäkerheter för borrhålspositioneringen på djupet samt osäkerheter vid positioneringen av seismiska reflektorer och lågmagnetiska lineament. Krökningsmätning av borrhål är i regel behäftad med en osäkerhet på < 10 m i horisontalplanet och < 6 m i vertikalled medan positioneringen av magnetiska lineament är behäftad med en osäkerhet på ±10 m och ±20 m vid markmätningar respektive helikopterburna mätningar. Positioneringen av seismiska reflektorer är behäftad med en osäkerhet på ±15 m (SKB R-07-45, avsnitt 5.6).

SKB delar upp kandidatområdet som domineras av bergdomänen RFM029 och RFM045 i fyra sprickdomäner (SKB R-07-45, figur 6-1). Tre av sprickdomänerna i kandidatområdet har baserats på fördelningen av sprickor och mindre deformationszoner (< 1 km) mellan de deterministiska modellerade deformationszonerna. Ytterligare en sprickdomän har baserats på berggrundens omvandling:

- FFM01; Karaktäriseras av en låg andel, företrädesvis läkta, branta och flacka sprickor mellan branta ENE till NE strykande deformationszoner. Förekommer vid slutförvarsdjup. Sannolikt hög in-situ spänning.
- FFM02; Karaktäriseras av ett komplext nätverk av öppna, flacka sprickor mellan branta ENE till NE strykande deformationszoner. Förekommer vid markytan. Låg in-situ spänning.
- FFM03; Karaktäriseras av både flacka och branta sprickor, mellan flacka ENE till NE strykande både öppna och läkta deformationszoner. Förekommer vid markytan. Låg in-situ spänning.
- FFM06; Liknar sprickdomän FFM01, men är dominerad av albitiserad granit tillhörande bergdomän RFM045. Den albitiserade graniten är även kvartsrikare och finkornigare jämfört med den ursprungliga icke omvandlade graniten. Omvandlingen kan ha betydelse för sprickkaraktäriseringen i det albitiserade berget vilket har föranlett SKB att identifiera en separat sprickdomän för



bergdomänen RFM045 i kandidatområdet. Förekommer vid slutförvarsdjup.
Sannolikt hög in-situ spänning.

Den enskilt största osäkerheten vid allokeringen av bergvolymen i olika sprickdomäner härrör från att den geometriska modelleringen av sprickdomäner är baserad på ett fåtal kärnborrhål (SKB R-07-45, avsnitt 6.1). SKB beskriver orientering, frekvens, storlek och rumslig fördelning av spröda strukturer (< 1 km) i sprickdomänerna statistiskt med modeller för diskreta spricknätverk DFN ("Discrete Fracture Network"). DFN-modellerna är baserade på ytdata och borrhålsdata. Direkta data avseende sprickstorlekar finns enbart från strax under eller vid markytan. Detta leder till en osäkerhet beträffande sprickstorlekar i den potentiella förvarsvolymen som utgörs av sprickdomän FFM01 och FFM06, vilka inte finns exponerade vid markytan (SKB R-08-82, avsnitt 3.2.4). För att hantera denna osäkerhet använder SKB fyra alternativa DFN-modeller (SKB TR-08-05, avsnitt 5.6.4):

- OSM+TFM ("Outcrop Scale Model+Tectonic Fault Model"): Baseras på sprickkartering på hällar och i borrhål, respektive sprickidentifiering via lineament och deformationszoner. Sprickradien varierar mellan 0,5-564 m.
- TCM ("Tectonic Continuum Model"): Antar att sprickorna i häll och borrhål utgör delar av samma sprickpopulation som representeras av lågmagnetiska lineament och deformationszoner. Antalet sprickor antas öka linjärt med modellvolymen, s.k. euklidisk skalning. Sprickradien varierar mellan 0,5-564 m.
- TCMF: en variant av TCM som antar att förhållandet mellan sprickfrekvensen och modellvolymen är icke-linjär med fraktal skalning.
- r0-fixerad: en variant av TCM som undviker sprickdata från markytan.

3.1.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har genomfört en detaljerad och ändamålsenlig karakterisering av Forsmarksplatsens geologi. Detta arbete har resulterat i stora mängder geologiska och geofysiska data som har sammanställts i ett antal rapporter. All insamlad geologisk och geofysisk fältdata är kvalitetsgranskad och lagrad i SKB:s databas SICADA. Värt att notera är att SKB:s platsundersökningar har utgjort underlag för flertalet doktorsavhandlingar, publikationer i internationella vetenskapliga tidskrifter samt presentationer vid internationella möten. SSM granskar här som en del av tillståndsprövningen SKB:s undersökningar av Forsmarksplatsen, men det bör påtalas att den mest omfattande granskningen av geologifrågor gjordes i samband med platsundersökningens genomförande, främst av SSM:s externa INSITE-grupp (SSM Report 2010:30; INSITE M-09-06).

SSM bedömer i likhet med INSITE att SKB:s platsundersökningar resulterat i en trovärdig berggrundsmodell omfattande en beskrivning av områdets regionala geologi liksom förekomsten av de vanligaste bergarterna i den föreslagna förvarsvolymen. Det finns dock osäkerheter kring förekomsten av pegmatit och amfibolit vilka har mindre gynnsamma mekaniska respektive termiska egenskaper. Myndigheten anser att SKB under platskarakteriseringen av slutförvarsplatsen i tillräcklig omfattning visat att kandidatområdet huvudsakliga granitiska berggrund har försumbar malmpotential. SSM konstaterar dock att dessa slutsatser behöver verifieras under en eventuell kommande uppförandefas. SSM bedömer vidare, i likhet med SKB, att stråket med metavulkaniter sydöst om förvaret har låg malmpotential. SSM konstaterar att även om det i en framtid sker gruvdrift i detta stråk bedömer SSM att det inte har någon betydelse för förvarets säkerhet (se avsnitt 8.3.2.2). SSM noterar att viss osäkerhet föreligger gällande malmpotentialen i bergdomän RFM021 nordöst om kandidatområdet. INSITE-gruppen har tidigare kommenterat detta och konstaterat att det inte går att utesluta att framtida prospektering och gruvdrift kan komma att bedrivas i bergdomän RFM021 (SSM Rapport 2010:30). SSM är enig med denna slutsats men bedömer att brytning i denna domän inte

påverkar förvarets säkerhet (se avsnitt 8.3.2.2). INSITE-gruppen har tidigare efterlyst att SKB bör modellera vilken geofysisk signatur ett förvar med KBS-3-metoden har (SSM Rapport 2010:30). SSM ser därför positivt på att SKB genomfört en sådan och noterar att förvaret inte utgör en kraftig geofysisk anomali varför förvaret sannolikt inte blir föremål för framtida malmprospektering. Det föreligger vissa kvarvarande osäkerheter beträffande fördelningen av omvandlingszoner på förvarsdjup, främst avseende albitisering och episyenitbildning. Av dessa omvandlingar är det främst den senare som är betydelsefull eftersom episyenitbildning resulterar i en selektiv kvartsupplösning. En sådan kvartsupplösning har en stark påverkan på bergartens egenskaper så som en ökad porositet samt minskad densitet, magnetisk susceptibilitet och resistivitet. SSM tillstår dock att den rumsliga fördelningen av pegmatit, amfibolit och episyenit på förvarsdjup är svår att prognostisera även om ytterligare markbaserade undersökningsmetoder hade genomförts. Detta gäller i synnerhet de fall där episyenitisering inte är associerad med deformationszoner. SSM bedömer i likhet med SKB att dessa underordnade bergarter är lätta att identifiera under slutförvarets uppförande, och att kvarvarande osäkerheter går att hantera via platsanpassning. Ytterligare diskussioner om amfibolit och episyenitiserings inverkan på bergmassans termiska och hydrologiska egenskaper redovisas i avsnitt 3.1.5 respektive 3.2.3.

Enligt SSM:s bedömning visar SKB:s arbete att det är rimligt att anta att större postglaciala jordskalv, liknande sådana som förekommit i norra delen av Sverige (Lagerbäck och Sundh, 2008), inte har skett i Forsmarksområdet sedan avsmältningen av Weichselistäcket. Det är dock viktigt att påpeka att detta inte innebär att SKB kan bortse från risken för stora framtida skalv i sin säkerhetsanalys. SSM anser att SKB bör göra ytterligare studier för att bekräfta om de störningar som observerats i den kvartära lagerföljden sydost om Forsmark (SKB R-05-51) kan associeras med hittills oidentifierade topografiska lineament. SSM redogör nedan för några kommentarer beträffande identifiering av topografiska lineament och SKB:s kvartärgeologiska studier i Uppland (SKB R-05-51). Nästan alla tidigare identifierade postglaciala förkastningsbranter och skred i glaciala avsättningar så som morän ligger i Lappland ovanför den Högsta Kustlinjen (HK) (Lagerbäck och Sundh, 2008, figur 2). Detta innebär att förkastningsbranterna efter sin uppkomst varken har utsatts för vågerosion eller har täckts av yngre sedimentära sekvenser. Flertalet av förkastningsbranterna är även lokaliserade till områden där skogstäcket är glesare. Det finns därför en viss risk att frånvaron av mer sydligt belägna postglaciala förkastningsbranter kan bero på svårigheten att från flygbilder detektera topografiska lineament. Två nyligen publicerade studier indikerar att kraftiga jordskalv har förekommit även i de södra (Vättern; Jakobsson m. fl., 2014) och centrala delarna av Sverige (Bollnäs; Smith m. fl., 2014) med uppskattade magnituder på 7.5 respektive >5.5. SSM noterar att det topografiska lineamentet till det centralt belägna postglaciala skalvet ligger under HK och har identifierats med en digital höjdmmodell baserad på flygburen laserskanning LiDar ("Light Detection and ranging"). Denna metod har blivit allt vanligare under de senaste åren för att identifiera och kartera postglaciala förkastningar (Mikko m. fl., 2014; SSM Technical Note 2013:34). SSM ser därför positivt på att SKB avser att bevaka Lantmäteriets arbete med att ta fram en LiDar-baserad rikstäckande höjdmmodell (Fud-2013, avsnitt 26.8). SSM uppmanar vidare SKB att använda LiDar-mätningar med syftet att ta fram en detaljerad geomorfologisk karta över Forsmarksområdet. En sådan karta kan klargöra om den deformerade deglaciala stratigrafien i Uppland (SKB R-05-51) kan associeras med topografiska lineament som flygbildstolkningen inte har kunnat identifiera. Även tillgängliga batymetriska data från området utanför Forsmark bör uppdateras till dagens tekniska standard för att säkerställa att det inte finns några okända batymetriska lineament på havsbotten (SSM Technical Note 2014:34). Sådana studier kan ge betydelsefull information för att ta ställning till hypotesen att fem kraftiga postglaciala skalv har skett i Forsmarksområdet efter Weichselisens avsmältning (Mörner, 2003). SSM anser vidare att en blockmodell

jämförbar med den som finns framtagen för sydvästra Finland bör tas fram för att få en bättre förståelse för olika generationer av regionala deformationszoner i norra Uppland och angränsande havsområden (SSM Technical Note 2012:54). Framförallt bör förkastningar associerade med senare blockförkastningar studeras eftersom dylika spröda strukturer, dels sannolikt har den mest betydande påverkan på grundvattencirkulationen, dels kan ha den största potentialen att hysa framtida jordskalv (SSM Technical Note 2012:54).

Beträffande SKB:s deterministiska modellering av deformationszoner bedömer SSM, liksom extern expert (SSM Technical Note 2012:54), att den befintliga modellen ger en rimlig uppskattning av mängden deformationszoner > 1 km i målområdet. SSM noterar dock att den deterministiska modelleringen är behäftad med vissa osäkerheter kring deformationszonernas strykning, stupning och karaktäriseringen av deras interna struktur och längd. Dessa osäkerheter medför att läget på modellerade deformationszoner kan avvika från deras verkliga läge i försvarsområdet (SSM Technical Note 2012:54). Likaså finns det en viss risk att deformationszonerna utefter borrhärdar som inte kan korreleras med geofysiska anomalier kan utgöra blinda deformationszoner > 1 km som inte har redovisats i modellen. Detta innebär att det faktiska antalet deformationszoner > 1 km på försvarsdjup kan vara större än vad SKB:s deterministiska deformationsmodell visar. Sammantaget kan dessa osäkerheter i den deterministiska deformationszonsmodellen påverka den faktiskt tillgängliga bergvolymen för slutförvaret (se även avsnitt 3.2.9). SSM anser dock att osäkerheterna i den deterministiska modellen kan minskas om SKB genomför ytterligare undersökning och karaktärisering av försvarsvolymen under uppförandefasen. Sådana insatser bör sedan ligga till grund för kontinuerliga uppdateringar av den deterministiska modellen (INSITE M-09-06, avsnitt 2.1.3).

SSM noterar även att de branta deformationszonernas längd vilka representeras av lågmagnetiska lineament är behäftade med viss osäkerhet. SKB:s högupplösta markmätningar visar att flera brant strykande deformationszoner kan förlängas, vilket är särskilt noterbart för zon ZFMWNW0123 som har förlängts in i kanten på den västra delen av det preliminära deponeringsområdet (SKB-R-08-64, avsnitt 2.3). Det är av stor betydelse att SKB tar hänsyn till denna zon, eftersom den kan medföra behov av förändringar av slutförvarslayouten D2 (SKB R-07-33). Även flera NO till ONO strykande zoner har förlängts, tvärs över NV strykande deformationszoner > 3 km, mot eller till den i sydväst belägna regionala deformationszonen Eckarfjärden. Även om det är ett rimligt antagande att deformationszonerna stannar vid Eckarfjärden innebär avsaknaden av högupplösta markmätningar i en sydvästlig riktning att de NO till ONO strykande deformationszonernas sydvästliga utsträckning är osäker. Den högupplösta markmätningen har även detekterat tidigare okända lågmagnetiska lineament > 1 km, varav ett (MFM2074G) har en central position i den potentiella försvarsvolymen (SKB-R-08-64, figur 2-3).

Deformationszonerna utgör områden med förhöjd sprickfrekvens i jämförelse med det omgivande berget och kan därmed potentiellt hysa höga vattenflöden. SSM anser att zonernas rumsliga fördelning samt hur de avslutas och skär varandra är av stor vikt för modelleringen av vattenflöden, liksom vid framtagandet av försvarslayouten. De lågmagnetiska lineamentens avslutningsmönster indikerar att främst branta deformationszoner < 1 km inte länkas ihop med andra deformationszoner (SKB R-08-64, figur 2-2). SKB har dock inte i närmare detalj beskrivit deformationszonernas avslutning (INSITE M-09-06, avsnitt 2.5). Skärningar mellan korsande spröda deformationszoner kan leda till rörformade zoner med förhöjd sprickfrekvens vilka kan hysa höga vattenflöden. Eftersom dylika skärningar inte redovisas i den geologiska modellen (INSITE M-09-06, avsnitt 2.2) uppmanar SSM att SKB uppdaterar den lokala modellen



med visualiseringar av korsande spröda strukturer för att kartlägga deras rumsliga utbredning samt med beskrivningar av deformationszonernas avslutning.

SSM bedömer att DFN-modelleringen har särskilt stor betydelse för säkerhetsanalysen eftersom den påverkar modellerna för grundvattenflöde (avsnitt 3.5.3), antalet kritiska deponeringspositioner i slutförvaret med hänsyn till jordskalv (avsnitt 3.4.1) samt den möjliga utnyttjandegraden av deponeringshålspositioner (avsnitt 3.5.8). SSM anser att en betydande svårighet vid den platsbeskrivande modelleringen är att ta fram en DFN-modell för bergvolymen på förvarsdjup som kan anses vara representativ baserat på detaljerade sprickarteringar av exponerade berggrundsytor och information från relativt få kärnborrhål där avståndet mellan borrhålen på förvarsdjup oftast är mer än 500 m. SKB redovisar dock tydligt en medvetenhet om att både sprickstorleksfördelningen och sprickfrekvensen på förvarsdjup är osäkra, och att dessa osäkerheter begränsas genom användning av alternativa konceptuella DFN-modeller som täcker ett brett spektrum av sprickkonfigurationer (SKB R-08-82, avsnitt 3.2.4a). Ytterligare en betydelsefull osäkerhet avser sambandet mellan antalet sprickor och spricklängd, så som huruvida euklidisk eller fraktal skalning ska användas, samt variationen av sprickfrekvensen i förhållande till närliggande deformationszoner. Dessa typer av osäkerheter har en inverkan på den långsiktiga säkerheten främst därför att de påverkar spricknätverkets hydrologiska konnektivitet. SSM anser dock att osäkerheterna är tillräckligt väl definierade och analyserade i SKB:s ansökan. SSM bedömer i likhet med SKB att en betydelsefull minskning av osäkerheterna bara kan åstadkommas med detaljundersökningar i samband med en eventuell uppförandefas av slutförvaret, dvs. när sprickdata blir tillgängliga från bergvolymen på förvarsdjup. Vissa svårigheter kommer dock kvarstå även under denna fas, exempelvis hantering av osäkerheter som föreligger vid uppskattning av den verkliga storleken av tunnelskärande sprickor med geofysiska metoder (SSM Technical Note 2014:07). Den exakta fördelningen av sprickstorlekarna på djupet kan därför till viss del komma att begränsas av observationer i tunnelskala. SSM ser ett behov av att SKB kontinuerligt uppdaterar sina alternativa DFN-modeller i takt med att mer data blir tillgängliga under uppförandet av slutförvaret.

3.1.3 Bergspänningsfält

3.1.3.1 Underlag från SKB

Bergspänningstillståndet på förvarsdjup är ett resultat av det litostatiska trycket och av de geologiska processerna som under nästan 1900 miljoner år har påverkat regionen. En övergripande förändring har skett över tid; från aktiv bergskedjeveckning under den Svekokarelska orogenesen till upprepade belastnings- och avlastningscykler av sediment och inlandsis. Det nuvarande spänningstillståndet är starkt påverkat av horisontell kompression, vilken till stor del orsakas av havsbottenspridningen vid den mittatlantiska ryggen. Bergspänningarnas storlek, riktning och anisotropi (skillnad i storlek mellan olika riktningar) påverkar flera aspekter av projektering, uppförande, stabilitet och beständighet av bergutrymmen i slutförvaret. Bergspänningsfältet påverkar även indirekt de tekniska barriärerna och bergmassan under drift och efter förslutning av slutförvaret.

Kunskap om in-situ eller initiala tillståndet för bergspänningarna är ett grundläggande krav för att kunna modellera bergmassans mekaniska egenskaper under uppförande, drift och efter förslutning av slutförvaret. Det initiala spänningstillståndet kommer senare förändras av: i) bergschaktningen vid uppförandet av slutförvarsanläggningen (avsnitt 3.2); ii) den termiska belastningen från det använda bränslet (avsnitt 4.4); iii) framtida klimatförändringar och relaterade processer såsom belastningen från inlandsisar (avsnitt 5.3). Berget och spricksystemet påverkas av förändringar i bergspänningstillståndet, vilka orsakas av schaktning, slutförvarets värmeutveckling och klimatrelaterade processer.



Dessa förändringar påverkar i sin tur bergmassans mekaniska stabilitet och flödet av grundvatten till deponeringshålen och genom slutförvarets bergvolym. Det initiala bergspänningsfältets karaktär påverkar i viss utsträckning de flesta termo-hydro-mekaniska aspekterna av slutförvarets långsiktiga utveckling, samt säkerhet under drift. Exempel på områden är skador i bergväggarna (EDZ) pga. berguttag, spjälkning under den termiska fasen, sprickbildning under framtida glaciationscykler pga. ökade laster och vätsketryck samt magnituden på möjliga jordskalv på befintliga förkastningar och deformationszoner vid Forsmark.

SKB tar vid projekteringen av slutförvarets utformning hänsyn till bergspänningstillståndet, så att bergutrymmena orienteras optimalt med avseende på deras funktion och stabilitet. Detta gäller även vid valet av de mest lämpliga schaktnings- och bergförstärkningsmetoderna. SKB redovisar i processrapporten för geosfären (SKB TR-10-48, avsnitt 4) och i underliggande rapporter förståelsen av bergspänningarna och deras variabilitet i bergmassan samt deras påverkan på bergets säkerhetsfunktioner.

SKB förlitar sig främst på bergspänningsmodellen av Martin (SKB R-07-26). Denna spänningsmodell indikerar en revers förkastningsregim. Portrycket antas ha en hydrostatisk gradient från markytan. Modellen benämns i SR-Site som den "mest sannolika", men ytterligare en "osannolik maximal" och en "osannolik minimal" bergspänningsmodell används för utvalda analyser av de initiala bergspänningarnas effekter på slutförvaret (t.ex. SKB R-08-116). Den största och den minsta horisontella samt den vertikala spänningen antas vara huvudspänningarna med magnituder på 41, 23 respektive 13 MPa vid ett djup på 500 m. Riktningen för den största horisontella huvudspänningen är genomsnittligt mot sydöst (N145°E). Den vertikala spänningen beräknas från vikten av den överliggande bergmassan.

Modellen baseras huvudsakligen på bergspänningsmätningarna ner till 500 m djup med överborrningsmetoden (OC, "Over Coring"). Dessa mätningar exkluderar tidigare bergspänningsmätningar på förvarsdjup utförda med den hydrauliska spräckningsmetoden (HF, "Hydraulic Fracturing") och hydraulisk provning av redan existerande sprickor (HTPF, "Hydraulic Testing of Preexisting Fractures"). Ett större antal bergspänningsmätningar misslyckades eller gav otillförlitliga resultat på grund av svårigheter kopplade till tillämpning av de specifika mätmetoderna i Forsmark. SKB har lagt stor vikt vid de första bergspänningsmätningarna som utfördes av Ingevald och Strindell (1981) i borrhål DBT1 och DBT3 under uppförandet av Forsmarks kraftverk 3, vilka dock ligger utanför själva slutförvarsvolymen. SKB:s slutsats är att bergspänningen i Forsmark är onormalt hög relativt den genomsnittliga svenska berggrunden, möjligen p.g.a. den "tektoniska lins" som är formad av skärningen mellan de regionala zonerna Forsmark, Eckarfjäden och Singö.

Det har genomförts omfattande analyser av tillgängliga bergspänningsdata vid Forsmark. Sjöberg m.fl. (SKB R-05-35, 2005) har granskat spänningsmätningarna som har genomförts fram till 2004. Martin (2007) har tagit fram SKB:s "mest sannolika" bergspänningsmodell. Ask m.fl. (SKB P-07-206) har dessutom genomfört en översyn och omräkning av utvalda mätningar. SKB har också tagit fram flera storskaliga modeller för att beskriva bergspänningsvariationen ner till ca 10 km djup (t.ex. SKB TR-10-23; SKB TR-08-11). Dessa modeller används för att studera stabiliteten hos förkastningar och deformationszoner idag och för tiden efter förslutning av slutförvaret. Bergspänningsmodellerna innefattar olika domäner (yttnära, slutförvarsdjup och djupare bergmassa), spänningsmagnituder och deras gradienter med djupet, spänningsorienteringar samt osäkerhets- och variabilitetsintervaller. Modellerna motsvarar: 1) en revers spänningsregim på alla djup; 2) en strike-slip spänningsregim på alla djup; 3) en kombination av strike-slip och reversa spänningsförhållanden, där reversa



förkastningsförhållanden dominerar ner till ca 1 km och en strike-slip förkastningsregim dominerar på djup större än 1 km.

SSM har begärt kompletteringar i frågan om bergspänningstillståndet i Forsmark, vilket resulterade i ett förtydligande av den dokumentation som ingick i SR-Site (kompletteringsbegäran SSM2011-2426-83; SKB:s svar SKBdoc 1372575).

3.1.3.2 SSM:s bedömning

SSM noterar att SKB har gjort stora ansträngningar och har lagt ner omfattande resurser för att förstå bergspänningsregimen på djupet i Forsmark (SSM Report 2010:30). Enligt SSM:s bedömning måste dock SKB:s slutliga metodval av överborrningsmetoden som grund för uppskattning av bergspänningarna på djupet ifrågasättas. Modeller byggda enbart på överborrningsmätresultat kan förväntas tendera att överskatta bergspänningarna. SSM ser dock generellt positivt på den omfattande insatsen att karaktärisera bergspänningsförhållandena i Forsmark, där olika mätmetoder har använts och ett adekvat holistiskt tillvägagångssätt vid framtagning av modellerna har använts.

SSM anser att de bergspänningsmodeller som SKB tagit fram generellt representerar förhållanden som är ogynnsamma med hänsyn till sprickbildning (avsnitten 3.2.2; 3.4.7), stabilitet av förkastningar och deformationszoner i Forsmark idag och för tiden efter förslutning av slutförvaret. De bör därför betraktas som konservativa. I fall där mycket höga vattentryck är inblandade som vid kommande glaciationer är dock inte alltid höga bergspänningar det mest konservativa fallet och av detta skäl är det viktigt att beakta ett bredare intervall av troliga bergspänningar. SSM har granskat den tillgängliga informationen i syfte att försäkra sig om att alternativa tolkningar av bergspänningsdata inte leder till att kritiska parametrar hamnar betydligt utanför de intervall som kan anses vara acceptabla för slutförvarets långsiktiga säkerhet.

I de granskningsresultat som redovisas nedan ingår detaljerade utvärderingar av SKB:s bergspänningsmätningar och bergspänningsmodeller. SSM har även beaktat mottagen kompletterande information från SKB begärd efter SSM:s inledande granskningsfas (SSM2011-2426-71; SSM2011-2426-83).

SSM har identifierat tre frågor av särskild betydelse för bedömning av SKB:s analys av bergspänningar vid Forsmark. Det gäller:

- tillförlitlighet, representativitet och spårbarhet hos bergspänningsmätningar
- tillförlitligheten hos bergspänningsmodeller
- planer för ytterligare bergspänningsmätningar.

Beträffande SKB:s bergspänningsmätningar anser SSM att det föreligger problem gällande mätresultatens tillförlitlighet, representativitet och spårbarhet. SSM bedömer att antalet tillförlitliga bergspänningsmätningar från slutförvarsdjupet är otillräckligt för att kunna bestämma vilken spänningsregim som kan förväntas påträffas under uppförandet av slutförvaret. SSM anser dock att SKB har antagit vad som kan betraktas som en konservativ lokal modell med en hög horisontell huvudspänning som även innefattar de mest ogynnsamma belastningsfallen.

Tidigare har både INSITE-gruppen och SSM:s externa experter dragit slutsatsen att de mest lämpliga och pålitliga mätresultaten sannolikt erhållits från de hydrauliska metoderna HF och HTPF (spräckning och injektering av befintliga sprickor) samt att bergspänningarna i Forsmark bör vara jämförbara med vad som är normalt för svensk kristallin berggrund. SSM:s externa experter anser att kriterierna för urval av data till SKB:s ”mest sannolika” bergspänningsmodell inte kan anses vara försvarbara (SSM Technical Note 2012:39; SSM Technical Note 2014:10). Den ursprungliga



dokumentationen om bergspänningsmätningarna ansågs vara utspridd och komplex med en bristfällig spårbarhet. Experterna föreslog därför att en enhetlig sammanfattning av mätningar, analyser och antaganden borde tas fram för att fastställa bergspänningsregimen i Forsmark, med trender och deras aktuella djupintervall. SKB:s övergripande svar på SSM:s kompletteringsbegäran avseende dessa frågor (SSM2011-2426-83) var att de är medvetna om problemen, men att en säkrare bestämning av bergspänningsfältet endast kan göras när det ges tillfälle att mäta spänningarna under jord. SKB anser att de hittills genomförda bergspänningsmätningarna är baserade på de bästa tillgängliga metoderna för mätningar på stora djup och i smala borrhål.

Beträffande tillförlitligheten hos bergspänningsmodellerna anser SSM att SKB:s användning av en icke-linjär djupvariation för den största huvudspänningen är inkonsekvent med avseende på de geologiska betingelserna och jämfört med djupvariationen för de övriga huvudspänningarna. SSM noterar även att den antagna ”positiva korrelationen” mellan de största, mellersta och minsta bergspänningskomponenterna inte motiveras i SKB:s redovisning. Detta antagande kan resultera i en felaktig spänningsregim för förhållanden på stora djup.

Bergspänningsmodellerna för Forsmark har granskats noggrant av SSM och de tidigare myndigheterna SKI och SSI under hela platsundersökningsfasen. Bergspänningsmodellering var också en central fråga för SKI:s INSITE-grupp (SSM Report 2010:30). Mellan 2005 och 2008 deltog INSITE-gruppen i tre specialistmöten med SKB gällande bergspänningsmätningar och bergspänningsmodeller. Även ett tekniskt fältbesök genomfördes för att observera pågående bergspänningsmätningar. SSM har dessutom med stöd av externa experter och som en del av den pågående granskningen av tillståndsansökan utvärderat frågan om tillförlitligheten hos den ”mest sannolika” bergspänningsmodell som SKB tagit fram samt dess representativitet för slutförvarsvolymen (SSM Technical Note 2014:10).

Resultaten från förkastningsreaktiveringsanalysen (”Stress Polygon Approach”) som SSM har låtit genomföra (SSM Technical Note 2014:10) tyder på att bergspänningsfältet på förvarsdjup är mer förenlig med en strike-slip förkastningsregim än en revers regim. SKB:s ”mest sannolika” bergspänningsmodell ligger strax utanför det tillåtna stabila området i förkastningsreaktiveringspolygonens reversa regim. Detta innebär att flacka sprickzoner, exempelvis ZFMA2, ZFMF1 och ZFMF2, om modellen är riktig skulle vara instabila eller benägna till reaktivering. Det bör dock noteras att inga aktiva skjuvrörelser har observerats vid Forsmark (SKB TR-08-05). Bergspänningsfältet från Ask m.fl. (2007) ligger vid utkanten av det stabila strike-slip bergspänningsområdet, men innanför förkastningsreaktiveringspolygonen. Detta resultat stöder den förkastningsreaktiveringsanalys som föreslagits av SSM:s externa experter, dvs. att strykningssparallell aktivering av deformationszoner på förvarsdjup bör vara den rådande bergspänningsregimen. Även SKB:s bergspänningsfall ”osannolik minimal” antyder en strike-slip bergspänningsregim för stora djup.

SSM anser sammanfattningsvis att både de storskaliga och de lokala bergspänningsmodellerna för att studera stabiliteten hos förkastningar och deformationszoner i Forsmark förefaller innehålla brister som t.ex.: i) antagandet att förkastningsregimen på djupet fortfarande är revers, ii) djupförhållandet mellan huvudspänningsmagnituderna kan innebära en ökande kvot mellan horisontell och vertikal spänning, iii) huvudspänningsriktningarna kan rotera 90°. Det första antagandet motsäger den rådande uppfattningen att strike-slip förhållanden gäller i Forsmark vid seismogeniskt djup på några kilometer (SKB TR-90-30; SKB R-06-67) vilken stöds av data från Siljans borrhål (Lund och Zoback, 1999) och studier från Baltiska skölden (Stephansson m.fl., 1991) samt av tidigare utförda bergspänningsmätningar vid Forsmark (SKB P-07-206).



Den på djupet ökande kvoten mellan horisontell och vertikal spänning i SKB:s bergspänningsmodell (SKB R-07-26) motsäger t.ex. Brown och Hoek (1978) medan rotationen av huvudriktningarna motsäger det i nordvästra Europa generella horisontella spänningstillskottet från väster, vilken orsakas av havsbottenspridningen vid den mittatlantiska ryggen (SKB TR-90-30).

Orienteringen för huvudspänningarna i vertikal eller i horisontell riktning är allmänt accepterade för Forsmark (SSM Technical Note 2014:10). Den gällande riktningen för den största huvudspänningen, som alla direkta och indirekta mätmetoder pekar på, är riktningar inom ett variations- och osäkerhetsintervall om $145^{\circ} \pm 15^{\circ}$ som SKB har angivit för slutförvarsdjup även i en regional skala. Lokala variationer av huvudspänningsriktningarna kommer att ingå bland de parametrar som SKB behöver ta hänsyn till vid platsanpassningen av slutförvarsanläggningen under en eventuell uppförandefas. Dessa variationer medför dock främst en projekteringsrisk snarare än en risk kopplad till den långsiktiga säkerheten.

Beträffande planer för ytterligare bergspänningsmätningar anser SSM:s experter att det vore fördelaktigt att försöka utöka antalet mätningar från markytan ytterligare (SSM Technical Note 2014:10). SSM anser dock att ytterligare djupa borrhål endast marginellt kan förbättra förståelsen för bergspänningar vid Forsmark. Detta ska vägas mot den potentiella risken att ytterligare djupa undersökningsborrhål i slutförvarsvolymen medför en eventuell negativ påverkan på den geologiska barriärens skyddsförmåga. Ytterligare djupa undersökningsborrhål i slutförvarsvolymen bör endast uppföras om väsentliga data saknas, vilka inte kan erhållas på annat sätt eller som inte kan kompenseras med konservativa antaganden i analysen av slutförvarets långsiktiga säkerhet.

SSM anser att SKB inför ett kommande steg i prövningen behöver inkomma med ett program gällande bergspänningsmätningar. Detta bör även vara kopplat till detaljundersökningsprogram för uppförandefasen samt program för fortsatt vetenskaplig fördjupning, utveckling och demonstration i för slutförvaret representativa demonstrationstunnlar. Dessa mätningar bör sedan genomföras i samband med uppförandet av slutförvarsanläggningen. Kompletteringsprogrammet bör även inkludera en metodik för regelbunden uppdatering av bergspänningsmodellerna. Med tanke på de påpekade problemen med kvalitet och spårbarhet för de nuvarande bergspänningsanalyserna avser SSM att efterfråga att SKB tydligt redovisar hur omfattningen för nya mätningar fastställs, hur nya data sammanfogas med befintliga data samt hur bergvolymer med homogena bergspänningar isoleras genom en stegvis process kopplad till byggetapperna. Det har föreslagits att en probabilistisk hantering av bergspänningsdata kan vara fördelaktig för hantering av omfattande variabilitet och osäkerhet (SSM Report 2010:30). SSM anser att SKB bör undersöka förutsättningarna för en probabilistisk hantering särskilt med hänsyn till strategier för projektering, uppförande, drift och säkerheten efter förslutning av slutförvaret.

3.1.4 Grundvattenkemi

Detta avsnitt behandlar grundvattenkemiska frågor kopplade till det initiala tillståndet för det opåverkade Forsmarksberget. En bedömning av hur ett uppförande av ett slutförvar påverkar den grundvattenkemiska situationen återfinns i avsnitt 3.4.8.

3.1.4.1 Underlag från SKB

SKB:s redovisning i ansökan kring grundvattenkemiska frågor grundar sig på information från platsundersökningsfasen som redovisas i den platsbeskrivande modellen för Forsmarksplatsen (SKB TR-08-05). Särskilda rapporter finns också framtagna med mer detaljerad information om SKB:s tolkning av grundvattenkemidata (t.ex. SKB R-08-47).



SKB utnyttjar vid tolkning av platsdata principalkomponentanalys och blandningsberäkningar snarare än traditionell grundvattenkemisk modellering (t.ex. SKB TR-09-05). Detta arbetssätt motiveras i huvudsak med att grundvattenkemisk sammansättning för en plats som Forsmark i många avseenden påverkas mer av blandningsförhållanden mellan vattentyper av olika ursprung snarare än geokemiska processer. I SR-Site används inte bara kunskap om sammansättningen hos grundvatten i bergets sprickor utan även den kemiska sammansättningen av matrisvatten i intakt berg (SKB R-08-105). Användning av denna typ av mätningar kan betraktas som ett nytt angreppssätt för att skapa förståelse för långsiktiga förändringar hos grundvattnets kemiska sammansättning. Som en bakgrund för bedömning av Forsmarksplatsens grundvattenkemi finns kunskaper och erfarenheter från karaktärisering av den parallella kandidatplatsen Laxemar (SKB R-08-93).

Den mest betydande informationen kopplad till grundvattnets sammansättning vid Forsmark kommer från grundvattenprovtagning i ca 25 kärnborrhål med ett djup ned till 1 000 m. Grundvattenprovtagning sker företrädesvis i positioner i borrhålen med betydande grundvattenflöden, vilket innebär att mätfrekvensen i djupled i ett borrhål är beroende av bergets strukturgeologi. Kunskap om porvattensammansättning har erhållits genom lakningsförsök med borrhålskärnor från samma borrhål. Olika typer av mätserier har utnyttjats för att få fram representativa prover som ger information om grundvattensammansättning på aktuellt djup. SKB:s viktigaste information kommer från mätserier någon månad efter upptag av borrhål i tätade borrhålssektioner, s.k. CCC karaktärisering ("Complete Chemical Characterisation"). Olika överväganden och åtgärder erfordras för att proverna ska kunna betraktas som representativa (t.ex. SKB TR-99-42). Längre mätserier i öppna borrhål har använts för kompletterande information kopplade till specifika grundvattenkemiska parametrar som t.ex. sulfidhalt ("Hydrochemical Monitoring"). Kemiska analyser har genomförts vid egna eller kommersiella laboratorier. I samtliga prover analyseras elektrisk ledningsförmåga, pH, Eh samt huvudkomponenter i grundvattnet, men för ett urval av prover analyseras även spårämnen samt relevanta stabila och radioaktiva isotoper.

SKB:s grundvattenprover har klassats beroende på deras kvalitet och representativitet och har därmed olika användbarhet. Uppnås vissa grundläggande kvalitetskrav har SKB genomfört fullständiga kemiska analyser av grundvattenproverna. Kvalitetskraven innefattar t.ex. andelen borrhvatten och laddningsbalans för joner i lösning. För vissa prover har dessutom mätningar genomförts inte bara med avseende på lösta ämnen utan även lösta gaser, mikrober och kolloider. Karaktärisering och provtagning av sprickfyllnadsmineral och reaktiva mineral i berggrunden ger viss ytterligare information av relevans för förståelsen av processer som påverkar grundvattenkemi och i slutändan förvarets långsiktiga säkerhet. Olika generationer av sprickfyllnadsmineral från olika tidsperioder i berggrundens utveckling ger ledtrådar kring tidigare förhållanden i berget (SKB R-08-102).

En grundläggande förståelse för de aspekter av grundvattenkemi som har betydelse för slutförvaring har arbetats fram under lång tid. SKB:s arbete med att karaktärisera grundvattenkemi började i samband med de s.k. typområdesundersökningarna vid ca 15 platser runt om i landet under 1980-talet, vilket innefattade provtagning av djupa grundvatten från borrhål. SKB har gradvis utvecklats och förfinat metodiken för att få fram och mäta ostörda grundvattenprover till djup överstigande 1 000 m med en kemisk sammansättning som bedöms vara representativ för ett visst djupintervall. SKB har också byggt upp en kunskap om grundvattensammansättningar på olika djup i berggrunden och från ett antal platser i landet. En omfattande insats i samband med grundvattenkemisk karaktärisering innan de aktuella platsundersökningarna genomfördes i samband med anläggandet av Äspölaboratoriet. Under denna period utvecklades provtagningsutrustning



samt en fördjupad förståelse för grundvattensystemets egenskaper. Dessa tidiga arbetsinsatser har bidragit till förståelse kring hur kontaminering av grundvattenprover kan ske och hur man erhåller prover med en godtagbar representativitet för ett visst djupintervall i berget (SKB TR-92-31).

Undersökning av grundvattnets sammansättning behöver genomföras för att få nödvändig information för bedömning av de tekniska barriärernas beständighet samt bedömning av förutsättningarna för radionuklidtransport. Vissa grundvattenkemiska parametrar har också stor betydelse för förståelse av platsens tidigare utveckling under olika perioder, i första hand de senaste 10 000 åren dvs. sedan den senaste inlandsisen försvann. SKB har t.ex. använt viss grundvattenkemisk data så som salinitet och koncentrationer av syre-18 för att utvärdera resultat från modellering av kopplad hydrogeologi och grundvattenkemi under den senaste glaciationscykeln. Det finns också spår från interaktioner mellan grundvatten och mineral i vattenförande sprickor som är mycket äldre och kan ha ägt rum upp till 100-tals miljoner år tillbaka i tiden. En sådan fråga rör i vilken omfattning större sprickor på stora djup vid något tillfälle blivit exponerade för oxiderande betingelser. Viktiga aspekter är karaktärisering av det grundvattenkemiska systemets rumsliga variabilitet i förvarsvolymen respektive dess tidsmässiga stabilitet dvs. dess förmåga att begränsa variationer som funktion av tiden.

3.1.4.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har genomfört en tillräckligt omfattande karaktärisering av grundvattenkemiska förhållanden i olika djupintervall för att ge underlag för bedömning av Forsmarksplatsens lämplighet samt för analyser av hur grundvattenkemiska parametrar påverkar ett slutförvars långsiktiga säkerhet. SKB:s kännedom om grundvattenkemiska betingelser vid Forsmark är inte fullständig, men bedöms vara godtagbar för den pågående granskningen av tillståndsansökan. SSM anser att kvarvarande osäkerheter är hanterbara inom säkerhetsanalysen. Det bör dock noteras att informationsmängden i vissa avseenden är förhållandevis liten och att det finns ett behov av ett omfattande och väl genomtänkt mätprogram för grundvattenkemi under en eventuell uppförandefas. SSM anser att SKB inför kommande steg behöver presentera en plan för grundvattenprovtagning i samband med en uppförandefas.

SSM konstaterar att SKB:s platsundersökningsdata visar att grundvatten på förvarsdjup för närvarande är kemiskt reducerande med frånvaro av löst syre, har en tillräcklig salthalt för att motverka bufferterosion samt att sulfidhalterna överlag är låga. Enligt SSM:s bedömning innebär detta sammantaget att den nuvarande grundvattenkemin i kandidatområdet främjar de tekniska barriärernas beständighet. De nuvarande kemiska betingelserna är också relativt gynnsamma för att främja en långsam bränsleupplösning och retardation av flertalet radionuklider i händelse av kapselbrott, vilket är kopplat till pH och redoxbetingelser i det djupintervall som är aktuellt. De nuvarande gynnsamma grundvattenkemiska förhållandena kan dock komma att förändras som ett resultat av en uppförandefas och den långsiktiga klimatutvecklingen. En bedömning med avseende på betydelsen av långsiktig utveckling av grundvattenkemi kan därför inte göras enbart med utgångspunkt från SKB:s platsundersökningsprogram.

En grund för SSM:s bedömning av grundvattenkemifrågor är att den säkerhetsmässiga betydelsen av grundvattenkemiska parametrar tidigare har analyserats och granskats av de tidigare myndigheterna SKI och SSI inom ramen för flera fullständiga säkerhetsanalyser innan SR-Site, t.ex. SR-Can och SR-97. Den tidigare säkerhetsanalysen SR-97 utgjorde en grund för att planera SKB:s program för karaktärisering av grundvattenkemi vid Forsmark. SSM:s bedömning av osäkerheter kring grundvattenkemi baseras även på resultat från liknande platsundersökningar vid flera andra liknande platser, t.ex. Äspö, Laxemar och den finländska platsen Olkiluoto. Grundvattenkemiska data och tolkningar



är i många avseenden likartade för dessa platser nära Östersjökusten vilket ökar tilltron till förståelsen av förhållanden som påverkar viktiga grundvattenkemiska parametrar. Betydande skillnader mellan olika platser för vilka grundvattenkemi har karaktäriserats kan i vissa fall förklaras mot bakgrund av konceptuell förståelse av platsernas tidigare utveckling.

INSITE-gruppens granskning innefattade ursprungligen preliminära bedömningar och utvecklingsbehov kopplat till de metodbeskrivningar som fanns tillgängliga vid inledningen av platsundersökningarna (SKI-INSITE TRD-03-02). De mest omfattande insatserna avsåg observationer och bedömningar av fältmässiga procedurer och specifika problem i samband med provtagning, provhantering och kemiska analyser (SKI-INSITE TRD-06-01). Granskningen har även innefattat bedömning av hur preliminära grundvattenkemiska modeller och tolkningar byggs upp till stöd för fortsatta undersökningar (SKI-INSITE TRD-04-08). Innan platsundersökningarna påbörjades gjordes även oberoende bedömningar av vilka grundvattenkemiska parametrar som platsundersökningen behövde baseras på (Bath, 2012). INSITE-gruppens övergripande slutsats är att SKB gjort alla rimliga ansträngningar för att erhålla representativa prover och få ett acceptabelt underlag avseende rumslig variabilitet av de viktigaste grundvattenkemiska parametrarna (SSM Report 2010:30). SSM instämmer i denna slutsats.

SSM har till stöd för bedömning av grundvattenkemiska data också låtit genomföra egna begränsade modellstudier för att belysa betydelsen av vissa frågor med koppling till den grundvattenkemiska situationen så som modellering av redox-reaktioner som är styrande för grundvattnets redoxpotential (SSM Report 2009:28) och vittringsprocesser som kan påverka grundvattnets salthalt (SSM Report 2011:22). Dessa studier ger underlag för bedömning av geokemiska processer som påverkar löst järn och svavel liksom katjoner i berggrunden. Dessa processer har visat sig vara betydelsefulla för ett slutförvars långsiktiga säkerhet. SSM kan konstatera att de kemiska processer som styr redoxförhållanden och tillförsel av katjoner från kemiska vittringsprocesser efter en lång period med forskning i princip är väl kända, men att det fortfarande finns osäkerheter avseende deras relativa betydelse för grundvattenkemiska betingelser.

Det är generellt en svår uppgift att ta fram grundvattenprover som ger säker information om den grundvattenkemiska situationen och detta gäller även för Forsmarksplatsen. SKB har dock ägnat uppmärksamhet åt att minimera felkällor. SSM bedömer liksom INSITE-gruppen att SKB:s metoder för att karaktärisera grundvatten inklusive provtagningsrutiner och kemiska analyser är godtagbara. Provtagning av grundvatten är förknippad med osäkerheter för reaktiva komponenter i grundvattnet samt i perspektivet representativitet för ett visst djupintervall. Detta beror på att en viss påverkan av grundvatten alltid sker vid upptag av borrhål liksom i samband med provtagning för kemiska analyser.

En svårighet är det begränsade antalet vattenprover som kan sägas representera den tilltänkta förvarsvolymen. SSM anser dock att SKB:s provtagning är tillräcklig eftersom resultaten ger en rimligt konsekvent bild av grundvattenkemiska förhållanden på förvarsdjup. Svårigheten att få fram representativa prover hänger samman med Forsmarkslinsens täthet och de till antalet få vattenförande sprickorna på förvarsdjup. Få identifierade vattenförande sprickor i förvarsvolymen kan innebära att grundvattenprover som representerar deformationszoner får ett stort genomslag. Det finns därför behov av ytterligare undersökningar för att framförallt verifiera grundvattenkemiska förhållanden i tilltänkta förvarsvolymer av berget om en konstruktionsfas för slutförvaret blir aktuell.

En annan svårighet är att det vid Forsmark saknas provtagning av salta grundvatten på mycket stora djup (större djup än ca 1 km). Detta vatten påverkar inte förvarets säkerhet

inledningsvis, men sådant vatten förväntas kunna tränga upp och interagera med vatten i förvarsvolymen under olika faser av förvarets utveckling. En viss kännedom om sammansättningen krävs därför för analysen av förvarets långsiktiga utveckling. SSM anser att SKB:s användning av vissa data från de djupa borrhålen vid Laxemar för att representera Forsmark är godtagbar. Säkerhetsbetydelsen av rimliga avvikelser från den antagna sammansättningen av mycket djupa grundvatten bör vara begränsad. SSM konstaterar ändå att avsaknaden av platspecifik data för djupa salta grundvatten utgör en osäkerhet för analysen av den långsiktiga grundvattenkemiska utvecklingen som behöver beaktas i samband med fortsatt säkerhetsanalyser och detaljerad geokemisk modellering.

Som anges ovan anser SSM att den nuvarande grundvattenkemiska situationen vid Forsmark med avseende på de viktigaste grundvattenkemiska parametrarna är väl känd trots begränsade data från förvarsvolymen respektive från stora djup. I ansträngningarna att utröna ursprung och ålder av olika grundvattentyper är dock det begränsade antalet mätpunkter mer problematiskt. INSITE-gruppen konstaterar att SKB har haft begränsad framgång att med hjälp av geokemiska indikatorer verifiera förståelse av den hydrogeologiska utvecklingen under och efter den senaste nedisningen. INSITE-gruppen har dock förståelse för svårigheterna att dra definitiva slutsatser kring grundvattensystemets komplexa dynamik under hela glaciationscykler. SSM konstaterar att osäkerheter som identifieras under platsundersökningsfasen liksom under en eventuell kommande konstruktions- och driftsfas behöver hanteras och propageras inom säkerhetsanalysen.

Grundvattnet innehåller organiskt material och lösta gaser som kan utnyttjas för mikrobiell sulfatreduktion. SKB anser att lösta organiska ämnen som återfinns på stora djup i berggrunden generellt bör karaktäriseras av låg reaktivitet bland annat av det skälet att de blivit bestående trots lång uppehållstid i grundvattnet (Kalinowski, 2013). SSM anser dock att eftersom mikrobiell sulfatreduktion har stor betydelse för slutförvarets långsiktiga säkerhet bör det lösta organiska materialet i djupa grundvatten karaktäriseras ytterligare. Dess tillgänglighet som substrat för sulfatreducerande bakterier bör ytterligare undersökas. Det är mycket troligt att mikrobiell sulfatreduktion påverkar SKB:s mätserier och de observationer som antyder onormalt höga sulfidhalter för den förhållandevis näringsfattiga och järnrika djupa grundvattenmiljön. SSM anser även att SKB mer utförligt bör undersöka betydelsen av en varierande tillgång till löst järn(II) som kan motverka en långsiktig uppbyggnad av onormalt höga sulfidhalter via järnsulfidutfällningar så länge som järn finns tillgängligt i grundvattnet eller kan tillföras grundvattnet genom mineralreaktioner.

SSM anser att SKB:s arbete med utförlig karaktärisering av stagnanta porvatten i bergmatrisen är en utveckling som väsentligt bidragit till förståelsen av grundvattenkemisk utveckling (SKB R-08-105). Avvikelser i kemisk sammansättning mellan grundvatten i bergets sprickor och stagnant porvatten utgör en grund för förståelse av platsens dynamiska utveckling. Det finns sannolikt goda möjligheter att vidareutveckla denna forskningsinriktning genom förbättringar av analysmetoder, ytterligare provtagning och analys av flera komponenter i matrisvattnet.

3.1.5 Hydrogeologi

I detta avsnitt redovisas den orörda hydrogeologiska situationen vid Forsmark. Fokus ligger på data, konceptuella modeller samt parametrar till SKB:s modeller. SSM:s bedömningar kopplade till efterföljande tidsfaser redovisas närmare i avsnitten om den hydrogeologiska utvecklingen under de första tusen åren (avsnitt 4.5) och tiden därefter fram till 100 000 år (avsnitt 5.4). Konstruktionsförutsättningar kopplade till inflöden till



deponeringshål bedöms i avsnitt 3.2.1. I SR-Site huvudrapport ges en kortfattad beskrivning av den hydrogeologiska modelleringen (SKB TR-11-01, avsnitt 10.1.3).

3.1.5.1 Underlag från SKB

Initialtillståndet för Forsmark beskrivs i SKB:s platsbeskrivande modell (SKB TR-08-05, kapitel 8), som baseras på ett antal underliggande rapporter (SKB R-07-48, SKB R-07-49, SKB R-08-23, SKB R-08-95). Dessa rapporter hänvisar i sin tur till ett stort antal rapporter med mätresultat från platsundersökningarna (se appendix B i SKB R-08-95 med hänvisningar till över 100 rapporter med data för parametrering av hydrauliska domäner).

Platsen för det tilltänkta slutförvaret kännetecknas av ett flackt landskap med en landhöjning på ca 6 mm per år som långsamt förändrar strandlinjen samt en årlig nettonederbörd på ca 150 mm. De översta 150 m av berget kännetecknas av hög transmissivitet och betydande horisontell anisotropi. Detta hänger ihop med förekomsten av bankningsprickor som sträcker sig över området (SKB TR-08-05, figur 8-27). Pumptester pekar på att bankningsprickorna är förbundna med Östersjön. Där bankningsprickorna förekommer har de översta 150 m av berget en förmåga att jämna ut hydrauliska gradienter som främst orsakas av topografin. Till skillnad från de översta 150 m i berget uppvisar volymerna nedanför 400 m djup få vattenförande sprickor utanför deformationszonerna vilka kännetecknas av en djupavtagande transmissivitet (SKB TR-08-05, avsnitt 8.5). SKB bedömer att den ytterst låga sprickfrekvensen på förvarsdjup skapar exceptionellt goda förutsättningar för upprätthållandet av de tekniska barriärernas integritet (SKBdoc 1416510).

SKB har tillämpat en konceptuell modell för flödet genom bergvolymen (SKB TR-08-05, avsnitt 8.1.1) som delar upp berget och överliggande jordlager i en hydraulisk jorddomän HSD ("Hydraulic Soil Domain"), en hydraulisk ledardomän HCD ("Hydraulic Conductor Domain") och en hydraulisk bergmassedomän HRD ("Hydraulic Rock mass Domain"). Dessa har sedan parametriserats baserat på data från platsundersökningarna.

SKB:s konceptuella modell har representerats dels som en diskret spricknätverksmodell DFN ("Discrete Fracture Network"), dels som en ekvivalent poröst kontinuum medium modell ECPM ("Equivalent Continuum Porous Medium").

I DFN-modellen representeras flödet explicit genom avgränsade deformationszoner och mindre sprickor. I denna modelltyp förekommer inget flöde utanför dessa sprickor och deformationszoner. Sprickzoner med en radie större än 500 m representeras deterministiskt medan de mindre sprickorna genereras stokastiskt. Den minsta sprickstorleken i SDM-Site-modellen har en yta av 100 m², vilket motsvarar en radie av 5,6 m. Modelldomänen utgörs av de sprickdomäner som SKB har definierat baserat på den tillgängliga karteringen av berghällar och undersökningsborrhål.

I ECPM-modellen representeras flödet genom ett poröst kontinuum vars hydrauliska egenskaper har baserats på en uppskalning av DFN-modellen. ECPM-modelleringen har sammanlagt baserats på 13 undermodeller (SKB R-08-23, tabell 2-1). Utanför de karterade sprickdomänerna antas två skikt med homogena hydrauliska egenskaper. Modellen är således utanför sprickdomänerna en så kallad porös kontinuum modell CPM ("Continuum Porous Media") som inte är baserad på en diskret spricknätverksmodell. Såväl DFN- som ECPM-modellen implementeras i beräkningsverktyget Connectflow (Serco, 2008).

SKB har även genomfört hydrogeologiska beräkningar som fokuserar på det ytnära systemet med modelleringsverktyget MIKE-SHE (SKB R-08-09, SKB R-08-08, samt



referenser däri) och andra beräkningsverktyg (SKB R-08-08 avsnitt 4). SSM:s granskning av dessa beräkningar har genomförts inom ramen för konsekvensanalysen (avsnitt 7.2.2.2), även om de i viss mån berör grundvattensystemet.

SKB har parametriserat modellerna utifrån hydrogeologiska data som togs fram under platsundersökningarna i Forsmark (SKB TR-08-05, appendix 3, tabell 4). Dessa innefattar bland annat injektionstester PSS ("Pipe String System") i 21 av kärnborrhålen och flödesloggning PFL ("Posiva Flow Log") i 15 av kärnborrhålen. PFL-mätningarna genomfördes med en testsektionslängd ned till 0,1 m.

SKB har som ett första steg i den hydrauliska parametriseringen av HCD och HRD beskrivit deras geometri. Geometri för HCD beskrivs deterministiskt baserat på lineament och borrhålsdata (se exempelvis SKB TR-08-05, figur 8-13). Geometri för sprickorna i HRD beskrivs stokastiskt för sex olika sprickdomäner utifrån kalibrering mot borrhålsdata (SKB R-07-48, avsnitt 11.4) och med hjälp av statistiska fördelningar för sprickornas lokalisering, orientering och storleks-intensitets samband (SKB R-08-95, tabell C-1 till C-3). Den geologiska DFN-modellen (geo-DFN) innefattar alla sprickor, dvs. även sådana som inte är del av det flödande nätverket. SKB har antagit fyra olika konceptuella modeller för geo-DFN; OSM + TFM ("Outcrop Scale Model in combination with Tectonic Fault Model"), TCM ("Tectonic Continuum Model with Euclidean size-intensity scaling"), TCMF ("Tectonic Continuum Model with Fractal size-intensity scaling") och r0 fixed model (SKB TR-08-05, avsnitt 5.6.3, 5.6.4). Den hydrogeologiska DFN-modellen är baserad på r0 fixed-modellen.

SKB har bestämt de hydrauliska egenskaperna för HCD utifrån hydrauliska tester och en analys av det samlade dataunderlaget (SKB TR-08-05, figur 8-14). Enligt SKB:s tolkning visar data på en djupavtagande transmissivitet i deformationszonerna. Parametrering av zonernas transmissivitet i punkterna där de skär borrhålen listas i SKB R-08-23 (tabell C-1).

SKB antar tre skikt med homogen hydraulisk konduktivitet utanför de sprickdomäner som har karterats (SKB R-09-22, tabell 2-6). För att representera konduktivitetens djupavtagande är den hydrauliska konduktiviteten mindre i det djupare lagret. Konduktivitetsvärden baseras på data från undersökningarna i Finnsjön (SKB TR-91-24). Porositeten antas vara konstant med djupet.

SKB har redogjort för de hydrauliska egenskaperna för jorddomänen HSD i SKB R-08-23 (avsnitt 3.4) och i SKB R-09-19 (tabell 2-5 och 2-6).

SKB har valt en modellomän i form av ett rätblock med ett vertikalt borrhål i mitten för att kalibrera sprickgeometrin och flödesegenskaperna i HRD. Blockets dimensioner är 400 m × 400 m × 1 200 m (SKB R-07-48, avsnitt 11.4 - 11.5). Sprickor med radier från ca 4 cm och upp till 500 m genereras i den modellerade volymen baserat på en rad parametrar som kan varieras. I det modellerade borrhålet jämförs sedan modellresultaten med borrhålsdata (TR-08-05, avsnitt 8.5.2). Eftersom borrhålsdata pekar på djupberoende sprickintensiteter och flödesparametrar har kalibreringen utförts med upp till tre separata djupintervall.

SKB har valt att genomföra kalibrering av hydro-DFN-modellen av HRD med tre olika samband mellan sprickstorlek och transmissivitet. Dessa antar att sprickstorlek och transmissivitet är antingen okorrelerade, perfekt korrelerade eller korrelerade med en viss spridning av transmissiviteten kring ett medelvärde för varje sprickstorlek; det så kallade semi-korrelerade fallet (SKB TR-08-05, tabell 8-6). De parameteruppsättningar som ger bäst passning väljs sedan som indata till flödesmodelleringarna i SR-Site. En värdering av



resultaten sker i datarapporten (SKB TR-10-52, avsnitt 6.6, DFN-parametrar listas i avsnitt 6.6.10).

De hydrauliska randvillkoren i kalibreringsmodellen är konstant vattenpelarhöjd på 0 m på alla sidor förutom botten som antas vara tät och konstant vattenpelarhöjd på -10 m i borrhålet. Modellen antar konstanta flöden över tid och därför krävs inga initialvillkor.

För ECPM-modellen ansätts olika rand- och initialvillkor beroende på val av modelleringsfall (SKB R-07-49, avsnitt 3.17.3). Generellt sett ansätts konstant höjd vattenpelare på delar som är täckta av Östersjön och ett specificerat flöde per ytenhet eller flux vid markytan. Sidorna på modellen antas vara täta. För den paleohydrogeologiska modelleringen förändras randvillkoren på övre modellranden med tiden p.g.a. landhöjningen och förändringen av vattnets sammansättning av lösta ämnen. Pumpstesterna representeras med specificerat flöde i borrhålen. För tidsberoende simuleringar ansätts initialvillkor vid 8000 f.Kr. för vattnets kemiska sammansättning som definieras av blandningsförhållanden av ett flertal vattentyper (SKB R-07-49, avsnitt 3.17.4).

SKB har inom ramen för SDM-Site genomfört simuleringar med ECPM-modellen för att undersöka predikteringsförmågan för fördelning av klorid i olika strata av grundvattensystemet och för att få en förutsägelse av partikelbanor från ett tänkt slutförvar. Framräknade kloridvärden har jämförts med resultat från platsundersökningarna vid Forsmark. Dessa modelleringsinsatser har genomförts för att utvärdera modellens predikteringsförmåga. Eftersom den hydrogeologiska modellen i SDM-Site inte innefattar någon slutförvarsanläggning kan den dock inte direkt användas inom SR-Site och analysen av slutförvarets långsiktiga säkerhet.

Resultat från SDM-Sites hydrogeologiska delar som även används i SR-Site är parameteruppsättningar och i tillämpliga fall rand- och initialvillkor som har baserats på hydrokemiska utredningar och modelleringen av strandlinjeförskjutningen. I SR-Site reviderades ECPM-modellen något i förhållande till SDM-modellen (SKB R-09-20, appendix C).

SKB bedömer i SDM-Site att det finns en god förståelse för de hydrogeologiska förhållandena i målområdet för slutförvarsanläggningen och att förtroendet för den utvecklade modellen är högt. SKB har även tagit fram en sammanställning och bedömning av resterande osäkerheter beträffande den platsbeskrivande och hydrogeologiska modellen (SKB R-08-82, avsnitt 3.4; SKB R-12-04, avsnitt 4.7). SKB bedömer att det finns resterande osäkerheter beträffande den rumsliga variationen av de hydrauliska egenskaperna, t.ex. inom hydro-DFN-modellen. Enligt SKB:s uppfattning vore det föga meningsfullt att ta fram ytterligare information med hjälp av nya borrhål från ytan, eftersom denna förmodligen inte skulle kunna minska osäkerheterna nämnvärt. Denna bedömning styrker SKB med det faktum att data som erhöles från det sista borrhålet stämde väl överens med de prediktioner som gjordes innan mätningarna i det sista hålet påbörjades. SKB bedömer att även hydrauliska egenskaper hos deformationszoner, dess rumsliga variabilitet, anisotropi och skalning är behäftade med osäkerheter. Samtidigt bedömer SKB att dessa egenskaper har underordnad betydelse för säkerhetsanalysen eftersom transportmotståndet i deformationszonerna ändå antas vara mycket lågt. Det bör dock beaktas att deformationszonernas hydrauliska egenskaper kan påverka utvecklingen av grundvattnets kemiska sammansättning.

3.1.5.2 SSM:s bedömning

SSM anser sammanfattningsvis att den hydrogeologiska platsbeskrivande modellen på en övergripande nivå är tillräckligt tillförlitlig för detta skede i den stegvisa processen och utgör en lämplig utgångspunkt för säkerhetsanalysarbetet som har genomförts i SR-Site.



SSM bedömer att platsens flacka topografi bör begränsa grundvattenströmningens storlek. De i stora delar av slutförvarsområdet förekommande bankningssprickorna bör ha en positiv inverkan för att begränsa flödet på försvarsdjup genom att utjämna de topografiska gradienterna. Myndigheten konstaterar att den låga förekomsten av vattenförande sprickor som indikeras i kärnborrhålen bör ge förutsättningar för att begränsa kopplingarna mellan slutförvarets deponeringshål, det flödande nätverket i berget och i slutändan exponeringsvägarna i biosfären. SSM bedömer därför att de hydrogeologiska platsförutsättningarna i allmänhet är goda.

SSM anser dock att ytterligare insatser inom området erfordras. SKB bör inför kommande steg upprätta detaljerade planer för datainhämtning och modellering under uppförande- och driftfaserna. SSM anser vidare att SKB under uppförandefasen bör bekräfta att förekomsten av bergarten episyenit inte är av betydelse för platsbeskrivningen. SKB behöver inför en eventuell ansökan om kommande steg av slutförvarsanläggningen ytterligare utvärdera och om påkallat i säkerhetsanalysen hantera osäkerheter i spricknätverkets geometri och parametrisering av dess hydrauliska egenskaper. SSM anser slutligen att SKB inför kommande steg behöver säkerställa att analysen av kanalbildningserosionens omfattning inte påverkas av PFL-metodens mätnoggrannhet.

SSM har i granskningen utgått från SKB:s redovisning som sammanfattas ovan i avsnitt 3.3.5. Förutom detta material har SSM beaktat SKB:s kompletteringar samt granskningsarbete som har utförts av externa experter på uppdrag av SSM (SSM Technical Note 2012:37, SSM Technical Note 2012:41, SSM Technical Note 2012:67, SSM Technical Note 2014:05, SSM Technical Note 2014:46 och SSM Technical Note 2015:40). Med hjälp av detta underlag har SSM bedömt SKB:s insatser kopplade till mätprogram, tolkning av hydrauliska data, konceptuella modeller samt beräkningarnas riktighet och relevans.

SSM har som en del av granskningen genomfört en värdering av den hydrogeologiska platsbeskrivande modellens omfattning, kvalitet och tillförlitlighet som underlag för säkerhetsanalysen. SSM anser att SKB genomfört ett mycket omfattande mätprogram och ett omfattande modelleringsarbete för att skapa förståelse för de hydrogeologiska betingelserna vid Forsmark. SSM:s bedömning baseras till en betydande del på erfarenheter gjorda av SSM:s rådgivande grupp INSITE som fortlöpande granskade SKB:s insatser inom hydrogeologiområdet medan platsundersökningarna ännu pågick (SSM Report 2010:30). INSITE drog slutsatsen att SKB:s platsundersökningar generellt sett har utförts med en hög ambitionsnivå och kompetens samt att lämpliga metoder har använts som kan anses motsvara den senast tillgängliga tekniken (INSITE M-09-06). SSM delar INSITE-gruppens bedömningar i dessa frågor. SSM bedömer även att SKB har tillämpat acceptabla kvalitetssäkringsrutiner i samband med de mätningar som har genomförts (SKI-INSITE TRD-03-03; SKI-INSITE TRD-04-10). Även den hydrogeologiska modelleringen har utförts med lämplig grad av kvalitetssäkring, vilket har blivit belyst av de externa experter som granskat SKB:s arbete (SSM Technical Note 2014:05).

SSM bedömer i likhet med INSITE att SKB har tagit fram en tillräcklig mängd data kopplad till den hydrogeologiska beskrivningen av Forsmark. SSM instämmer i huvudsak med SKB:s egen bedömning av tillförlitligheten för de hydrogeologiska delarna av platsbeskrivningens databas (SKB R-08-82, avsnitt 2). INSITE-gruppens bedömningar kring betydelsen av återstående frågor av hydrogeologisk art (SSM Technical Note 2012:30; INSITE M-09-06) stämmer också i grova drag överens med SKB:s egna motsvarande bedömningar (SKB R-08-82, avsnitt 3.4 och 3.6).

SSM anser att SKB genomfört ett omfattande modelleringsarbete för att beskriva platsen och att succesiv vidareutveckling av modeller utifrån tillgängliga data vid de olika datafrysningarna har varit ett lämpligt arbetssätt. SSM konstaterar dock att det i slutresultatet, dvs. i SR-Site-modelleringen, är svårt att identifiera var diskussionerna om olika antaganden förs eftersom redovisningen är uppdelad i flera steg.

SSM noterar att SKB valt att tillämpa en stokastisk DFN-modellering som kännetecknas av en hög grad av komplexitet. SSM anser att stokastisk DFN-modellering är ett godtagbart angreppssätt med tanke på att flödet på förvarsdjup uppträder i diskreta sprickor som är glesa. Därutöver har DFN-modelleringen fördelen att flödet kan beskrivas ned till deponeringshållsskala, vilket SKB drar nytta av i säkerhetsanalysberäkningarna. DFN-modelleringen kräver att sprickornas geometri beskrivs. Med de tillgängliga data från kärnborrhålen förblir den resulterande geometrin osäker. SSM anser att dessa osäkerheter är godtagbara under förutsättning att de beaktas i säkerhetsanalysberäkningarna. SKB har valt att föra vidare enbart en stokastisk modell för spricknätverkets geometri (SKB R-08-95, tabeller C1 till C3) till säkerhetsanalysberäkningarna. Detta är en anledning till att SSM anser att osäkerheterna möjligtvis inte är fullt ut hanterade i SR-Site. SSM har därför begärt en komplettering som handlar om osäkerheter i den hydrogeologiska modelleringen (SSM2011-2426-109). SKB:s svar (SKBdoc 1396324, SKBdoc 1396325, SKBdoc 1416510) ger ytterligare information och förtydligar SKB:s ståndpunkter.

SSM har granskat SKB:s kompletterande information om osäkerheterna i den hydrogeologiska modelleringen (SKBdoc 1416510) och värderat den information som SSM:s externa experter har tillfört granskningen. Baserat på detta anser SSM att följande aspekter av SKB:s redovisning av de hydrogeologiska betingelserna behöver belysas ytterligare i kommande steg i den stegvisa processen att etablera ett slutförvar:

- hydro-DFN-modellernas geometri
- planer för datainsamling under en uppförandefas
- SKB:s arbete med att kalibrera och styrka DFN-modellen
- PFL-metodens noggrannhet
- inverkan av bergarten episyenit
- deformationszonernas hydrauliska egenskaper.

Den första punkten i listan rör främst osäkerheter i spricknätverkets geometri. SSM bedömer i likhet med SKB och SSM:s externa experter att det finns återstående osäkerheter när det gäller spricknätverkets geometri på förvarsdjup (SKB R-08-82 avsnitt 3.4.2, SSM Rapport 2010:30, SSM Technical Note 2012:37, SSM Technical Note 2012:41, SSM Technical Note 2014:05). SSM delar även SKB:s bedömning att ytterligare undersökningar från markytan inte nämnvärt kan minska dessa osäkerheter och därför inte är påkallade.

SSM delar SKB:s synpunkt att det hydrogeologiska systemet skulle skilja sig mest från det som har modellerats i SR-Site om flödet är begränsat till smala och glest uppträdande kanaler på sprickyrtorna (SKBdoc 1416510). En sådan konceptuell modell har förordats av en av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2012:37).

SKB argumenterar för att ett glest nätverk av kanaler är osannolikt eftersom generaliserad radial flödesanalys ("generalised radial flow analysis") pekar på att endast ca 20 procent av de hydrauliska testerna ger låga flödesdimensioner. Samtidigt anger SKB att transport kommer att ske längs starkt kanaliserade flödesvägar och att DFN-modellerna i den platsbeskrivande modellen inte återspeglar alla relevanta effekter av kanalisering (SKB R-08-82, avsnitt 3.6.1). SSM anser att det inte kan uteslutas att även kanaliserat flöde kan leda till höga flödesdimensioner (Doe och Geier, 1990). SSM anser dessutom att de 20



procent av testerna med låga flödesdimensioner kan vara betydelsefulla med tanke på att det endast förekommer ett fåtal flödande sprickor på förvarsdjup och att endast de med mest betydande flöde har en stor betydelse ur ett säkerhetsanalysperspektiv. Således kvarstår frågan ifall det förekommer kanaliserat flöde på förvarsdjup och i så fall hur detta påverkar den långsiktiga säkerheten.

SSM delar SKB:s uppfattning att modeller för kanaliserat flöde inom sprickorna med data från undersökningsborrhål skulle vara behäftade med betydande osäkerheter (SKBdoc 1416510). För hittills framtagna modeller som inkluderar variabilitet inom sprickplanen är de delar av sprickorna som är öppna beroende på sprickstorlek (SKBdoc 1416510). Dessa återspeglar därför inte en situation med smala glesa kanaler på sprickytorna. Modellen kan visserligen ge en indikation på effekter av variabilitet inom sprickorna men enligt SSM:s bedömning kan resultaten inte fullt ut svara på frågan om effekter av glesa smala kanaler på sprickorna. SSM anser visserligen att SKB:s bedömning kan vara korrekt, dvs. att alternativa hydro-DFN-modeller som beaktar rumslig variabilitet inom sprickorna ger liknande resultat som modellerna i SDM-Site. SSM anser dock att detta inte är väl underbyggt i kompletteringen till ansökan (SKBdoc 1416510). Enligt SSM:s bedömning skulle flöde i glesa kanaler kunna leda till betydande skillnader med fler deponeringshål som skärs av vattenförande sprickor (SSM Technical Note 2015:40). SSM anser därför att det finns återstående osäkerheter som inte fullt ut har analyserats och vars säkerhetsbetydelse därmed inte har beaktats.

SSM noterar att SKB avser att utveckla den hydrogeologiska analysen med en bredare uppsättning av alternativa modeller för att bättre förstå konceptuella osäkerheter (SKB R-12-04, avsnitt 9). Det finns också förslag på att undersöka effekter av kanaliserat flöde och alternativa sprickformer. SSM anser att SKB inför eventuell kommande prövning bör analysera effekter av glesa nätverk på flödesfördelningar till deponeringshålen och på antalet deponeringshål som kopplar till det omgivande nätverket av strukturer med grundvattenflöde.

Sambandet mellan intensitet och storlek på öppna sprickor kan påverka fördelningar av hydrogeologiska prestandamått på ett betydelsefullt sätt (SKBdoc 1416510). Enligt SKB:s bedömning kan dock osäkerheter kopplade till detta samband endast kvantifieras med tillgång till ytterligare data från en uppförandefas. SSM anser att dessa osäkerheter bör föranleda SKB att genomföra åtgärder som exempelvis inkluderar modellstudier som baserar sig på befintliga data och som undersöker prestandamåttens känslighet för olika samband mellan intensitet och storlek. Dessa osäkerheter bör hanteras i eventuella säkerhetsanalysberäkningar som ligger till grund för säkerhetsredovisningen. SSM noterar att SKB avser att utveckla den hydrogeologiska analysen med en bredare uppsättning av alternativa modeller för att belysa betydelsen av kvarvarande osäkerheter (SKB R-12-04, avsnitt 9).

SSM påtalade ett behov av att SKB förtydligar hur tillämpningen av sambanden mellan sprickstorlek och intensitet som har tagits fram för geo-DFN-modellerna skulle påverka hydro-DFN-modellen. SSM har låtit genomföra en analys med en förenklad modell som pekar på att antalet deponeringshål som utsätts för betydande flöde endast under vissa konservativa antaganden påverkas nämnvärt. Fördelningen av prestandamåtten skiljer sig inte på ett betydelsefullt sätt åt för något av de undersökta fallen (SSM Technical Note 2015:40). SSM delar därför SKB:s syn att alternativa sprickstorlek-intensitet-samband för geo-DFN-modellerna sannolikt inte skulle ha någon avgörande betydelse för utfallet av den hydrogeologiska modelleringen i SR-Site.

SKB tillämpar en Poisson-fördelning för sprickornas intensitet. SSM har låtit genomföra en egen modellstudie med en alternativ heterogen intensitetsfördelning för sprickorna

(SSM Report 2011:13). I denna studie förutsattes att större sprickor har en benägenhet att omgärdas av mindre sprickor. Denna hydro-DFN-modell benämns i SSM:s rapport halo-modell. SSM anser att halo-modellen inte kan uteslutas baserat på tillgängliga borrhålsdata. När den geologiska informationen på slutförvarsdjup blir tillgänglig under en eventuell uppförandefas bör det dock vara möjligt att klargöra vilka hydro-DFN-varianter som representerar verkligheten bäst. Halo-modellen resulterade i en fördelning med större andel med höga flöden till deponeringshålen. SSM konstaterar dock att halo-modellen utgår från de sprickfördelningsparametrar som SKB kalibrerade in när SKB:s hydro-DFN-basmodell togs fram. Det är därför möjligt att effekterna av sprickfördelningsantagandet skulle minska om halo-modellens sprickfördelningsparametrar kalibrerades direkt mot borrhålsdata. SKB argumenterar i komplettering av ansökan (SKBdoc 1416510) för att flödande sprickor är extremt glesa och att de förekommer som enskilda diskreta enheter. SKB bedömer därför att osäkerheterna i intensitets-storleksförhållandena är av större betydelse än den rumsliga modellen. SSM anser att SKB inför kommande steg bör undersöka om effekterna av en heterogen fördelning för sprickornas intensitet behöver beaktas.

Den andra punkten i listan om betydelsefulla hydrogeologiska frågor avser SKB:s planer för datainsamling under en uppförandefas. Vissa av de hydrogeologiska osäkerheter som har identifierats kan minskas med hjälp av ytterligare data som insamlas under en uppförandefas. SSM anser att SKB inför eventuell byggstart bör upprätta detaljerade planer för datainhämtning och modellering under en uppförandefas. Denna information ska kunna ligga till grund för uppdatering av den platsbeskrivande modellen och förväntas bli betydelsefull för definition och analys av hydrauliska kriterier för val av deponeringshålspositioner.

Den tredje punkten i listan med betydelsefulla hydrogeologiska frågor avser SKB:s arbete med att kalibrera och styrka hydro-DFN-modellerna. SSM konstaterar att det finns en avsaknad av jämförelser mellan uppmätta och modellerade tryckvärden på förvarsdjup. Sådana jämförelser är i andra sammanhang vanliga vid kalibrering och bedömning av hydrogeologiska modeller. Under platsundersökningarna i Forsmark erhöll dock SKB få tillförlitliga tryckmätningar i borrhål, vilka hade kunnat vara det mest lämpliga dataunderlaget med minst störningar (INSITE M-06-02, avsnitt HT-A4). I avsaknad av lämpliga tryckdata har SKB dock inte haft tillgång till ett underlag för meningsfulla jämförelser. SKB har visserligen genomfört storskaliga interferenstester, men dessa fokuserades på mätningar i intervall där deformationszoner skär borrhålen (SKB R-07-49, avsnitt 5.2.1). SSM noterar att modellen för de storskaliga interferenstesterna inte förefaller vara känsliga för HRD:s egenskaper (SKB R-07-49, avsnitt 5.2.4).

SKB har på andra sätt försökt att verifiera de hydrogeologiska förhållandena på förvarsdjup. SKB adresserar frågan om överensstämmelse mellan PFL-mätningar och modellresultat genom att HRD:s hydrauliska egenskaper kalibreras mot tre olika storheter som beräknas ur inflödet och avsänkning i borrhålen (SKB R-07-48, avsnitt 11.5). SSM anser att detta tillvägagångssätt är godtagbart givet förutsättningarna i Forsmark. SKB har valt parameteruppsättningar baserat på modellörens erfarenhet och bedömt passningarna mot de olika storheterna okulärt (SKB R-07-48, avsnitt 11.5). Enligt SSM:s uppfattning medför dock den okulära kalibreringen ett visst mått av subjektivitet. SSM:s externa experter bedömer att passningarna inte är särskilt övertygande och att det finns utrymme för förbättringar (SSM Technical Note 2012:37; SSM Technical Note 2014:05).

SSM anser att kalibreringsmomentet i sig inte kan leda till en parameteruppsättning för hydro-DFN-modellen som återspeglar verkliga hydrogeologiska förhållanden. De konceptuella osäkerheterna medför att kalibreringen inte kan säkerställa att en bra passning betyder en noggrann återspeglning av verkliga förhållanden. SSM anser av detta



skäl att det inte är meningsfullt att lägga alltför stor vikt på att optimera kalibreringen. Det måste anses vara viktigare att skapa och redovisa förståelse för känsligheten för tänkbara konceptualiseringsvarianter, alternativa geometriska spricknätverksbeskrivningar, rimliga parameterintervall, variation mellan stokastiska realiseringar samt mätnoggrannhet för hydrauliska data. Den erhållna förståelsen för kvarvarande osäkerheters betydelse bör sedan återspeglas i säkerhetsanalyseräkningarna. SSM anser därför att frågeställningar kring hydromodellernas representativitet som diskuteras i detta avsnitt bör belysas ytterligare i SKB:s framtida redovisningar.

Den fjärde punkten i listan med betydelsefulla aspekter av SKB:s redovisning kring hydrogeologiska frågor avser PFL-metodens mätnoggrannhet. En stor del av det modellerade inflödet per borrhålslängd ligger under eller i närheten av mätnoggrannheten för PFL-mätningarna för sprickor på förvarsdjup i sprickdomänen FFM01. De högsta modellerade värdena ligger över de uppmätta värdena (SKB R-07-48, figur 11-15). SSM:s externa experter framför att mätningarna med PSS-tekniken visar att merparten av det flödande systemet inte inkluderas i PFL-mätningarna på grund av att mätnoggrannheten för PFL begränsar möjligheterna att upptäcka lågtransmissiva sprickor (SSM Technical Note 2012:37).

SSM bedömer att de lågtransmissiva sprickor som identifieras med PSS-metoden är betydelsefulla för grundläggande vetenskaplig förståelse av flödessystemet samt eventuellt för frågor kopplade till kanalbildningserosion innan förvaret har återmättats. SSM anser därför att PFL-metodens mätnoggrannhet i dessa sammanhang kan vara en begränsning. Samtidigt pekar SR-Site på att det är deponeringshålspositionerna med de högsta flödena i systemet som har störst inverkan på riskberäkningarna (förtydligas bl.a. i SKBdoc 1416510). SSM bedömer därför att SKB:s angreppssätt att använda PFL-mätningar som bas för modellering av det hydrogeologiska systemet är försvarbart ur säkerhetsanalysens perspektiv. Detta förutsätter dock att kanalbildningserosion kan förutsägas med nödvändig precision. SSM bedömer därför att SKB behöver säkerställa att analysen av kanalbildningserosionens omfattning inte påverkas av PFL-metodens mätnoggrannhet.

Den femte punkten i listan med betydelsefulla hydrogeologiska aspekter som behöver belysas närmare är inverkan av bergarten episyenit. INSITE-gruppen pekar på att SKB:s platsbeskrivande hydrogeologiska modell inte innefattar någon modell för episyenits rumsliga fördelning i berggrunden (INSITE M-09-06 avsnitt 3.2). INSITE menar att detta är en svaghet i den platsbeskrivande modellen. Episyenit har relativt hög porositet och skulle kunna vara del av nätverket med grundvattenflöde. SSM noterar dock att antalet inflöden till borrhålen som är uppmätta med PFL-metoden är litet på förvarsdjup och antalet förekomster av episyenit i kärnborrhål är begränsat (INSITE M-06-02, avsnitt HT-A16). SSM bedömer därför att förekomst av episyenit sannolikt inte har någon stor betydelse för den hydrogeologiska platsbeskrivningen. SKB bör dock under en uppförandefas bekräfta att förekomst av episyenit inte är av betydelse.

Den sjätte punkten i listan med betydelsefulla hydrogeologiska aspekter avser deformationszonernas hydrauliska egenskaper. SKB anger att de hydrauliska egenskaperna av HCD, deras rumsliga variabilitet, anisotropi och skalning i målområdet för närvarande är osäkra (SKB R-08-82). SSM delar denna bedömning och anser att framförallt antagandet om generellt djupavtagande transmissivitet kan ifrågasättas. SSM bedömer dock att dessa osäkerheter är mindre viktiga än sambanden för sprickornas intensitet, storlek och transmissivitet, vilket även uttrycks i SKB:s egna skrivningar (SKBdoc 1416510) samt av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:05). Sprickornas egenskaper påverkar förhållanden i slutförvarets närområde medan osäkerheterna i HCD har en begränsad betydelse för närområdet under förutsättningen att deformationszoner beaktas vid placering av deponeringshålen. De hydrogeologiska



egenskaperna för HCD påverkar dock förståelsen av det hydrogeologiska systemet som en helhet och har en påverkan på den grundvattenkemiska utvecklingen.

3.1.6 Det ytnära systemet

3.1.6.1 Underlag från SKB

SKB har genomfört en detaljerad karaktärisering av biosfären i Forsmarksområdet under åren 2002-2007 och har sammanfattat resultaten i den platsbeskrivande modellen (SKB TR-08-05). Forsmarksområdet är unikt på många sätt. Postglacial landhöjning i kombination med flack topografi innebär en snabb strandlinjeförskjutning. Detta har lett till ett mycket ungt landekosystem som innehåller ett antal nytillkomna sjöar och våtmarker.

I SR-Site (SKB TR-11-01, avsnitt 4.10) beskriver SKB landskapet i Forsmark. Området har relativt platt topografi och mer än 90 procent av det regionala modellområdet är täckt av kvartära avlagringar. Sjöarna i Forsmark är små (som mest cirka 0,6 km²) och grunda. Det maximala djupet varierar mellan 0,4 och 2 m. Inga stora vattendrag rinner genom den centrala delen av kandidatområdet. Bäckarna är vattenförande under större delen av året men kan vara torrlagda under långa perioder under torra år. Hydrauliska data visar att den horisontella hydrauliska konduktiviteten inne i moränen är signifikant högre än den vertikala konduktiviteten. Vidare är grundvattennivåerna i de kvartära avlagringarna ytliga och beror av topografin.

Moränen och den glaciala leran är rika på kalciumkarbonat. Tillsammans med den sentida höjningen av området över havsnivån påverkar detta kemin hos både ytvatten och ytliga grundvatten genom att ge upphov till högt pH och högt innehåll av komponenter som kalcium och vätekarbonat. Dessutom är ytvatten rika på kväve och fattiga på fosfor. Detta är karakteristiska egenskaper hos de oligotrofa kalkrika sjöar som är typiska för Forsmarksområdet.

Skog täcker 73 % av landytan i Forsmark. Våtmarker är vanliga och täcker 10 till 20 % av de tre större avgränsade avrinningsområdena. Jordbruksmark täcker knappt 5 % av landarealen och ligger främst i den sydöstra delen av kandidatområdet.

SKB anser att återstående osäkerheter i beskrivningen av det ytnära systemet i huvudsak är förbundna med den rumsliga fördelningen av mäktigheten hos det överliggande sedimentlagret och de hydrauliska egenskaperna hos den ytliga berggrunden. Andra kvarvarande osäkerheter rör den kemiska sammansättningen hos biota, den rumsliga kemiska variationen i de kvartära avlagringarna, påverkan av kemiska processer på transporten av olika ämnen och på kvantitativa uppskattningar av processer som t.ex. upptag i växter och respiration. SKB bedömer att dessa kvarstående osäkerheter har relativt liten betydelse för såväl den långsiktiga säkerheten som för förvarsutformningen, men osäkerheter som rör påverkan av kemiska processer på transport av olika ämnen ger ett signifikant bidrag till osäkerheter i analysen i SR-Site av dos till människa och påverkan på miljön.

3.1.6.2 SSM:s bedömning

Under SKB:s platsundersökningsprogram följde SSM:s föregångare SKI och SSI arbetet med karaktärisering av det ytnära systemet/biosfären. SKB använde data från de inledande platsundersökningarna som underlag för preliminära säkerhetsbedömningar för Forsmark och Laxemar. I myndigheternas granskning (SKI-rapport 2008:03, SSI-rapport 2008:01) gjordes bedömningen att SKB:s inledande platsundersökningar har tillräcklig omfattning, håller tillräckligt hög kvalitet och omfattar de data som behövs för kommande säkerhetsanalyser. Myndigheterna ansåg dock att SKB:s beskrivning av biosfären i större

utsträckning borde baseras på statistiska metoder för att beskriva dataosäkerheter. Vidare ansåg myndigheterna att en högre rumslig och tidsmässig upplösning också hade kunnat förbättra beskrivningen av dataosäkerheter. I de kompletta platsundersökningarna har SKB utökat och utvecklat biosfärsdata ytterligare (SKB TR-08-05). SSM har noterat att för biosfären fortsatte SKB platsundersökningarna och att detta arbete finns redovisat i tre rapporter om de marina, limniska och terrestra ekosystemen samt i en rapport om ämnesspecifika parametrar (Kd- och CR-värden) (SKB TR-10-01, SKB TR-10-02, SKB TR-10-03, SKB R-10-28). Dessa data utgör underlag till SR-Site. SSM och anlidade externa experter har granskat biosfärsdata i samband med granskningen av biosfärsanalysen i SR-Site. Denna granskning inkluderar en speciell datagranskning av Kd- och CR-värden (avsnitt 7.3.4.2) eftersom de är starkt kopplade till riskanalysen och den långsiktiga säkerheten. SSM:s bedömning finns redovisad i avsnitt 7.5.

SSM anser att betydande osäkerheter kring biosfärens långsiktiga utveckling är oundvikliga i de långa tidsskalor som är relevanta för geologisk slutförvaring. SSM håller med SKB om att de kvarstående osäkerheterna för insamlade data för det ytnära systemet har relativt liten betydelse för såväl den långsiktiga säkerheten som för förvarsutformningen. Vidare instämmer SSM i SKB:s bedömning att vissa osäkerheter som rör de kemiska processernas inverkan på transport av radionuklider har en betydande påverkan på riskanalysen och osäkerheterna kring uppskattning av dos till människa och påverkan på miljön (SKB TR-11-01, avsnitt 4.10).

SSM anser att den metod som tillämpas för biosfärsanalys ska hantera osäkerheter på ett så lättförståeligt sätt som möjligt för att skapa förtroende för resultaten av biosfärsanalysen och beräknad dos/risk. För att kunna förmedla en bra förståelse av biosfärsanalysen behövs ett stort mått av transparens. SSM:s bedömning av SKB:s hantering av osäkerheter i biosfärsanalysen finns redovisade i avsnitt 7.2.2.2 och 7.4.4.2.

3.1.7 Sammanfattande bedömning Forsmarkplatsen

De övergripande bedömningar som SSM redovisar nedan innefattar dels frågeställningen kring huruvida SKB:s platsundersökningsprogram kan anses vara godtagbart, dels frågeställningar kring Forsmarksplatsens lämplighet ur perspektiven geologi, bergspänningar, grundvattenkemi samt hydrogeologi.

SSM anser att SKB har genomfört ett omfattande platsundersökningsprogram av god standard vid både Forsmark och Laxemar. SKB har med utgångspunkt från tidigare säkerhetsanalyser identifierat de informationsbehov och undersökningsmetoder som behövs för bedömningen av Forsmarksplatsens lämplighet i slutförvarssammanhang liksom för bedömningen av förutsättningarna för att uppfylla krav på långsiktig säkerhet och strålskydd. SKB har också tagit fram information som behövs i samband med miljökonsekvensbeskrivning liksom vid framtagande av en preliminär förvarslayout. SSM anser att SKB:s strategi för placering av undersökningsborrhål, mät- och analysmetoder samt mätprogram är godtagbara. SSM anser också att SKB har ägnat uppmärksamhet kring identifiering, analys och minimering av felkällor vid de mätningar som har genomförts. SKB har dokumenterat platsundersökningarna på ett acceptabelt sätt med bland annat dokumenterade planer och program, metodbeskrivningar, rapportering av primära undersökningsresultat, databasarbete och bearbetning av data. Ett antal brister har noterats framförallt i platsundersökningarnas tidiga skede, men ingen är av den arten att de förändrar SSM:s generella slutsatser. SSM bedömer att SKB:s platsbeskrivande modell för Forsmark kan tillmätas en tillräcklig tillförlitlighet i detta skede i SKB:s program. SKB:s platsundersökningar vid Forsmark kan sammanfattningsvis anses vara mångsidiga, väl genomförda och av tillräcklig omfattning för att bilda en god uppfattning om förhållanden vid den opåverkade Forsmarksplatsen.

SSM bedömer att SKB definierade bergarterna och deras tredimensionella fördelning vid Forsmark i ett relativt tidigt skede under platsundersökningarna. Senare borrhål har bekräftat den geologiska modellen och endast mindre justeringar har gjorts. Enligt SSM:s bedömning tyder detta dels på att SKB har en bra förståelse av områdets geologiska utveckling, dels på att de geologiska förhållandena i Forsmarksområdet är relativt enkla att prognostisera. Platsundersökningarna visar att den potentiella förvarsvolymen domineras av granitoider med lämpliga termiska och mekaniska egenskaper för att hysa ett slutförvar för använt kärnbränsle. Förvarsvolymen har lokaliserats till en tektonisk lins; ett relativt opåverkat parti av berggrunden som omges av regionala deformationszoner inom vilka deformationen under områdets geologiska utveckling har koncentrerats. SKB:s platsundersökningar visar vidare att det är ett rimligt antagande att inga större jordskalv skett i Forsmarksområdet efter den senaste istiden. Detta innebär dock inte att SKB kan bortse från risken för stora framtida skalv i sin säkerhetsanalys. SSM bedömer att kvarvarande osäkerheter, vilka främst gäller den rumsliga fördelningen och storleken av spröda strukturer som deformationszoner och sprickor på förvarsdjup är hanterbara genom att förvaret platsanpassas efter de faktiska förhållanden som senare kan konstateras på förvarsdjupet. SSM bedömer därför att det ur ett geologiskt perspektiv finns förutsättningar att uppföra ett slutförvar på den tilltänkta platsen.

Beträffande bergspänningsfältet ser SSM generellt positivt på de omfattande mätinsatserna vid Forsmark där ett flertal mätmetoder har använts parallellt. Enligt SSM:s bedömning bör dock SKB:s slutliga metodval av överborrningsmetoden som grund för uppskattning av bergspänningarna på djupet ifrågasättas. Modeller byggda enbart på överborrningsmätresultat förväntas att överskatta bergspänningarna. Det föreligger också problem beträffande mätresultatets tillförlitlighet, representativitet och spårbarhet och SSM bedömer att antalet tillförlitliga bergspänningsmätningar från slutförvarsdjup är otillräckligt för att kunna bestämma vilken spänningsregim som kan påträffas under en eventuell uppförandefas. Det finns därför ett behov av ytterligare mätningar för att verifiera bergspänningsregimen under en eventuell kommande uppförandefas. Tidigare har INSITE-gruppen och SSM:s externa experter dragit slutsatsen att bergspänningarna i Forsmark bör vara jämförbara med vad som är normalt för svensk kristallin berggrund baserat på resultat från hydrauliska mätmetoder. SSM anser dock att de bergspänningsmodeller som SKB tagit fram är konservativa och generellt representerar förhållanden som är ogynnsamma med hänsyn till sprickbildning (avsnitten 3.2.2; 3.4.7 nedan) samt stabilitet av förkastningar och deformationszoner i Forsmark idag och för tiden efter förslutning av slutförvaret. Det finns möjligheter att anpassa konstruktionsarbeten till den konstaterade bergspänningsnivån, så bergspänningsregimen har begränsad betydelse för SKB:s platsval.

SSM anser att SKB har genomfört en tillräckligt omfattande karaktärisering av grundvattenkemiska förhållanden för att ge underlag för bedömning av Forsmarksplatsens lämplighet samt för analyser av hur grundvattenkemiska parametrar påverkar ett slutförvars långsiktiga säkerhet. SSM anser liksom INSITE-gruppen att SKB gjort rimliga ansträngningar för att erhålla representativa grundvattenprover av god kvalitet. Det bör dock noteras att informationsmängden i vissa avseenden är förhållandevis liten och att det finns ett behov av ett omfattande och väl genomtänkt mätprogram för grundvattenkemi under en eventuell uppförandefas. En grund för SSM:s bedömning av området grundvattenkemi är att grundvattenkemiska data och tolkningar i många avseenden är likartade i jämförelse för andra platser nära Östersjökusten så som Äspö, Laxemar och Olkiluoto. Resultat från Forsmarksundersökningen kopplat till viktiga parametrar som salthalt, Eh och pH avviker inte väsentligt från vad som skulle kunna ha förväntats med utgångspunkt från tidigare erfarenheter. De förhållandevis fåtalet mätpunkterna vid



Forsmark är dock mer begränsande i ansträngningarna att utröna ursprung och ålder av olika grundvattentyper.

SSM konstaterar att SKB:s platsundersökningsdata visar att grundvatten på försvarsdjup för närvarande är kemiskt reducerande med frånvaro av löst syre, har en tillräcklig salthalt för att motverka bufferterosion samt att sulfidhalterna överlag är låga. Detta innebär sammantaget att den nuvarande grundvattenkemin i kandidatområdet enligt SSM:s bedömning främjar de tekniska barriärernas beständighet. De nuvarande kemiska betingelserna är också gynnsamma för att främja en långsam bränsleupplösning och retardation av flertalet radionuklider i händelse av kapselbrott, vilket är kopplat till pH- och redoxbetingelser i det djupintervall som är aktuellt. En bedömning av om dessa förhållanden kan förväntas bli bestående kan dock inte göras enbart med utgångspunkt från platsundersökningsdata. SSM anser att eftersom mikrobiell sulfatreduktion har stor betydelse för kopparkorrosion och slutförvarets långsiktiga säkerhet bör det lösta organiska materialet i djupa grundvatten karaktäriseras ytterligare. Dess tillgänglighet som substrat för sulfatreducerande bakterier bör undersökas ytterligare.

SSM:s granskning pekar på att SKB har gjort omfattande hydrogeologiska undersökningar som är av god kvalitet och att den resulterande platsbeskrivande modellen är tillräckligt tillförlitlig för tillståndsprövningen. SKB:s platsbeskrivande modell visar på en flack topografi som bör begränsa grundvattenströmningens storlek. SSM delar SKB:s bedömning att de i stora delar av slutförvarsområdet förekommande bankningssprickorna bör ha en positiv inverkan för att begränsa flödet på försvarsdjup genom att utjämna de topografiska gradienterna. Myndigheten konstaterar att den låga förekomsten av vattenförande sprickor som indikeras i kärnborrhålen bör ge förutsättningar för att begränsa kopplingarna mellan slutförvarets deponeringshål, det flödande nätverket i berget och i slutändan exponeringsvägarna i biosfären. För slutförvaret är det generellt sett fördelaktigt att få deponeringspositioner är kopplade till nätverket av sprickor i berget med grundvattenflöde. Det är också fördelaktigt med låga flöden för att begränsa degradering av tekniska barriärer, liksom transporten av radioaktiva ämnen om de tekniska barriärerna skulle falla. I vissa situationer och för vissa radionuklider bidrar låga flöden med en ökad inträngning i bergmatrisen vilket i sin tur ger mer tid för avklingningen. SSM bedömer därför att de hydrogeologiska platsförutsättningarna i allmänhet är goda.

SSM anser dock att ytterligare insatser inom området hydrogeologi erfordras i senare steg av prövningen. SKB bör inför kommande steg upprätta detaljerade planer för datainhämtning och modellering under uppförande- och driftfaserna. SSM anser vidare att SKB under uppförandefasen bör bekräfta att förekomsten av bergarten episyenit inte är av betydelse för platsbeskrivningen. SKB behöver i kommande steg av processen ytterligare utröna och om påkallat i säkerhetsanalysen hantera osäkerheter i spricknätverkets geometri och parametrisering av dess hydrauliska egenskaper. SSM anser slutligen att SKB inför kommande steg behöver säkerställa att analysen av kanalbildningserosionens omfattning inte påverkas av PFL-metodens mätnoggrannhet.

Beträffande biosfären håller SSM med SKB om att de kvarstående osäkerheterna för insamlade data för det ytnära systemet har relativt liten betydelse för såväl den långsiktiga säkerheten som för försvarsutformningen.

Ovanstående bedömningar avseende Forsmarksplatsens lämplighet för ett slutförvar för använt kärnbränsle har baserats på granskning och tolkning av resultat från SKB:s platsundersökningar.



3.2 Bergutrymmen och deras närområden

Utsprängda och uppborrade bergutrymmen i kärnbränsleförvaret möjliggör tillträde, transport, hantering och deponering av kopparkapslar, samt hantering och inplacering av övriga tekniska barriärer och annan utrustning som behövs vid driften av ett slutförvar vid Forsmark. Dessa bergutrymmen består av tillfartstunnlar, schakt och bergutrymmen i centralområdet, stamtunnlar, transporttunnlar, deponeringstunnlar samt deponeringshål. Tillräcklig kännedom om dessa utrymmen och deras påverkan på de platsspecifika bergförhållandena utgör en förutsättning för analysen av ett slutförvars långsiktiga strålsäkerhet. Med berget eller bergmassan avses i fortsättningen i detta avsnitt deformationszoner och sprickzoner samt angränsade bergvolymmer i vilka kärnbränsleförvaret är tänkt att placeras.

Säkerhetsfunktioner kopplade till berget går ut på att kemiska, mekaniska och hydrogeologiska förhållanden är gynnsamma för de tekniska barriärernas beständighet. Dessutom bör berget ge en god förmåga att fördröja spridningen av radionuklider som kan ha passerat de tekniska barriärerna. De konstruerade bergutrymmena har en viss påverkan på bergets säkerhetsfunktioner och behöver därför beaktas och optimeras ur perspektivet långsiktig säkerhet. Ur ett bergtekniskt perspektiv fyller bergmassan som omger bergutrymmena en bärande och vattenisolerande funktion vilken påverkas av bergets hållfasthet och sprickdensitet. Bergutrymmenas installationer så som byggnadsdelar, injektering och dräneringssystem behöver utformas med hänsyn till såväl driftförhållanden som den långsiktiga säkerheten.

Uppförandet av bergutrymmena påverkar geometrin för de utrymmen där buffert, kapsel, återfyllnad, betongpluggar och förslutningssystem ska installeras. Även de kemiska, hydrogeologiska och mekaniska förhållandena i bergutrymmena påverkar installationen av dessa komponenter.

Inducerade spänningsnivåer samt spänningskoncentrationer som uppstår i berget påverkas exempelvis oavsett vald schaktningsteknik av bergutrymmets geometri, storlek och orientering. Schaktningstekniken påverkar dock omfattningen av skadat berg runt bergutrymmena som uppkommer vid konstruktion av anläggningen, vilket i sin tur manifesterar sig exempelvis som förändringar i bergets vattengenomsläpplighet.

Den grundvattenkemiska situationen i berget kommer att påverkas av en konstruktionsfas. Förändringar i grundvattnets salthalt, redoxförhållanden och koncentration av sulfid är möjliga beroende på kontakten med luftsyre och tunnelinflöden. Under omättande förhållanden kan sulfid transporteras snabbare via gasfasen i jämförelse med vattenfasen vilket har en betydelse för kapselkorrosion.

I slutförvarets platsanpassning ingår val av förvarsdjup samt fastställande av en preliminär layout för deponeringstunnlar, transporttunnlar, centralområde och tillfartsvägar. En preliminär layout kallat D2 har tagits fram med utgångspunkt från platsundersökningsdata. Under en eventuell kommande uppförandefas avser SKB att vidareutveckla förvarslayouten baserat på den så kallade observationsmetoden. Val av deponeringsområden kommer att anpassas bland annat baserat på mer detaljerad information kring deformationszoners exakta positioner i berget. Val av förvarsdjup baseras på överväganden kring såväl långsiktigt strålskydd och säkerhet, strålskydd och säkerhet vid uppförande och drift samt ekonomi.

SKB redogör för utformning och konstruktion av bergutrymmen i slutförvaret i SKB TR-10-18. Konstruktionsförutsättningar av relevans för bergutrymmen är inkluderade i SKB TR-09-22. Grundläggande principer för konstruktion och utförande av ett slutförvar framgår av SKB TR-10-12.



På SSM:s begäran har SKB tagit fram kompletterande information om ett antal frågor kopplade till utformning och konstruktion av bergutrymmen i slutförvaret. Följande svar från SKB har inkommit till SSM:

- Svar på SSM:s begäran om komplettering rörande konstruktionsförutsättning inflöde till deponeringshål mindre än 150 kubikmeter (SKBdoc 1434717).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering rörande kritiska faktorer för val av deponeringspositioner (SKBdoc 1372560).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering rörande förvarsdjup (SKBdoc 1372558)
- Svar på SSM:s begäran om förtydligande rörande EFPC (SKBdoc 1427787)
- Svar på SSM:s begäran om komplettering rörande planer för demonstrationsdeponering (SKBdoc 1392898).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering om grundvattenkemisk utveckling på förvarsdjup på kort- respektive medellång sikt (frågor avseende inläckage av syre till försluten deponeringstunnel, tidig snabb mikrobiell sulfatreduktion respektive utspädning pga. ytvatteninträngning) (SKBdoc 1437441).
- Svar på SSM:s begäran om förtydligande avseende svar på tidigare begäran om komplettering rörande grundvattenkemi på kort och medellång sikt (SKBdoc 1476865).

3.2.1 Konstruktionsförutsättningar av relevans för bergutrymmen

I detta avsnitt granskas först allmänt kring konstruktionsförutsättningar för bergutrymmen, därefter granskas teknik för berguttag samt geometriska toleranser för bergutrymmen, termisk modellering och bergets termiska egenskaper, acceptanskriterier för deponeringshål kopplat till stabila mekaniska betingelser, acceptanskriterier för deponeringshål kopplat till hydrogeologiska betingelser, bergskadезonen runt deponeringstunnlar, spjälkning runt deponeringshål, grundvattenkemi under förvarets konstruktion och drift, påverkan av tillförda konstruktionsmaterial samt platsanpassning. Avsnittet avslutas med SSM:s sammanfattande bedömning av SKB:s planer för uppförande av bergutrymmen.

3.2.1.1 Underlag från SKB

Konstruktionsförutsättningar för bergutrymmen har tagits fram av SKB med utgångspunkt från deras långsiktiga säkerhetsfunktioner för ett förslutet slutförvar (SKB TR-09-22).

Dessa är:

- Deponeringshål får inte placeras närmare än 100 m från deformationszoner med en längd som överstiger 3 km.
- Deponeringshål ska så långt som möjligt väljas för att undvika potential för skjuvrörelser i berget som överstiger 50 mm med en hastighet på 1 m/s. Detta innebär att det s.k. EFPC-kriteriet ska användas för val av deponeringshålspositioner.
- Den totala volymen av grundvatten som får passera ett deponeringshål från installation av buffert tills den är fullständigt återmättad ska begränsas så att maximalt 100 kg förloras genom kanalbildningserosion. Detta innebär att den ackumulerade vattenvolymen ska vara mindre än 150 m³. SKB har senare ändrat denna konstruktionsförutsättning, se nedan.
- Sprickor som genomskär deponeringshål bör ha en tillräckligt låg transmissivitet.
- Avstånd mellan deponeringshål ska väljas så att temperaturen i bufferten inte överstiger 100°C.
- Innan deponering av kapseln kan förekomma ska den konnekterade effektiva transmissiviteten integrerad längs hela deponeringshålets längd visas vara mindre än 10⁻¹⁰ m²/s.

- Den störda zonen runt deponeringstunnlarna ska vara begränsad och ska inte ge upphov till en konnektad effektiv transmissivitet, över en signifikant del av tunneln (dvs. minst 20-30 m) och medelvärdesbildad över tunnelgolvet, som är högre än 10^{-8} m²/s. Detta krav gäller även för de flesta övriga tunnlar under toppförslutningen, dock inte för centralområdet eller tunnelområden som passerar transmissiva zoner i berget.
- Förvarsdjupet ska vara tillräckligt med tanke på frysning av buffert och återfyllnad, kapselns mekaniska egenskaper, yterosion av berget samt oavsiktligt intrång. Djupet ska vara minst 400 m.
- Förvarsdjupet ska också vara lämpligt med avseende på tillgång av lämpliga bergvolymmer för deponeringshål.

SKB har som en del av kompletteringsförfarandet under prövningen av ansökan klargjort att kravet på ett för varje deponeringshål maximalt ackumulerat inflöde på 150 m³ under återmättnadsfasen inte kommer tillämpas (avsnitt 3.4.7). SKB avser istället att tillämpa ett kriterium som innebär att deponeringspositioner som under driften av slutförvaret uppvisar ett inflöde på mer än 0,1 l/min ska förkastas (SKBdoc 1434717).

SKB:s konstruktionsförutsättningar för bergutrymmen och deras närområde har utvecklats med utgångspunkt från säkerhetsfunktioner för berget relaterade till barriärfunktionerna isolering av använt kärnbränsle i täta kopparkapslar samt till retardation av radionuklider för det fall att en eller flera kopparkapslar har förlorat sin isolerande funktion (SKB TR-11-01 avsnitt 8.4). I det föregående fallet är de viktigaste säkerhetsfunktionerna relaterade till förekomst av; i) stabila mekaniska betingelser, ii) gynnsamma temperaturbetingelser, iii) gynnsamma hydrologiska betingelser och begränsad transport, iv) gynnsamma kemiska betingelser. För barriärfunktionen retardation finns ingen dedikerad konstruktionsförutsättning, men gynnsamma hydrologiska och kemiska betingelser är fördelaktiga för retardation och begränsad transport.

SKB har som en del av säkerhetsanalysberäkningar analyserat betydelsen av konstruktionsförutsättningen kopplad till den störda zonen runt deponeringstunnlarna. Beräkningar för fallet med ”pin hole” visar att uppfyllelse av detta krav som kopplar till gynnsamma hydrologiska betingelser och begränsad transport har betydelse för slutförvarets funktion och dos/risk-beräkningar (SKB R-09-20; SKB TR-10-50). Den ökade transmissiviteten i bergskadезonen i tunnelgolvet har dock inte någon avgörande betydelse för slutförvarets funktion.

3.2.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att konstruktionsförutsättningarna för bergutrymmen och deras närområde är av rimlig omfattning och detaljeringsgrad samt har tagits fram med utgångspunkt från insikter från analysen av den långsiktiga strålsäkerheten för slutförvaret. Det förefaller dock som vissa krav, t.ex. kraven kopplade till låg transmissivitet, har tagits fram mer med utgångspunkt från vad som är användbart från beräkningssynpunkt snarare än vad som för närvarande är möjligt att mäta under en uppförandefas. Enligt SSM:s bedömning är detta problem möjligt att åtgärda genom att vidareutveckla mätmetoder och sedan visa att tillgängliga mätmetoder kan verifiera att kraven har uppnåtts. Sådana tester av detekteringsförmågan bör göras i en rimligt representativ bergmiljö. Om det inte skulle vara möjligt att visa detta för samtliga krav behöver SKB istället definiera andra krav som tydligare kan kopplas till mätningar och observationer som kan göras under en eventuell uppförandefas. En förutsättning är dock att kraven med rimlig precision kan kopplas till analyser av hur de inverkar på den långsiktiga strålsäkerheten. SSM anser att SKB inför kommande steg behöver uppdatera konstruktionsförutsättningarna för bergutrymmen och deras närområden baserat på granskningen av säkerhetsanalysen SR-Site.

SSM anser att SKB:s motivering av förvarsdjup är tillräcklig för det pågående prövningssteget, men SKB bör under en eventuell konstruktionsfas samla in ytterligare data för en förnyad analys av optimalt förvarsdjup (avsnitt 3.4.1). Justering av förvarsdjupet behöver övervägas och redovisas med tanke på att det är ett viktigt beslut kring förvarsutformningen för den plats man har valt. Vissa säkerhetspåverkande faktorer talar för större djup så som risk för nedträngning av glaciala smältvatten, men SSM anser även att säkerhet och strålskydd under drift av slutförvaret liksom ekonomiska överväganden behöver beaktas. SSM anser att SKB innan förvarsdjupet slutligt fastställs bör göra en mer utförlig motivering och analys av optimalt förvarsdjup, vid en eventuell uppförandefas.

SSM anser att kraven kopplade till kontroll av temperaturbetingelser är godtagbara, liksom även SKB:s metod för att demonstrera uppfyllelse av dessa krav (avsnitt 3.4.9). SKB behöver dock överväga att införa krav i konstruktionsförutsättningarna för att möjliggöra bortval av bergpartier med för låg värmeledningsförmåga.

Enligt SSM:s bedömning är SKB:s acceptanskriterier för placering av deponeringshål för att minimera konsekvenser av ett eventuellt jordskalv praktiskt tillämpbara och godtagbara för den innevarande prövningen. Det finns dock vissa resultat som antyder att de nuvarande kriterierna vare sig är helt tillförlitliga eller optimala för att identifiera kritiska positioner i berget, varför det kvarstår ett behov av fortsatt utvecklingsarbete (avsnitt 3.2.4.2).

SSM noterar att SKB inte har redovisat en analys av den sammantagna effekten av de hydrogeologiska konstruktionsförutsättningarna radionuklidtransport, risk för nedträngning av syresatta glaciala smältvatten samt riskbidrag från scenariot med buffererosion och kopparkorrosion under advektiva betingelser. SSM anser att SKB behöver visa att konstruktionsförutsättningarna sammantaget är ändamålsenliga. SSM noterar vidare att SKB anser att det finns en utvecklingspotential för kriterier för val av deponeringshål som kopplar till scenariot med buffererosion och kopparkorrosion under advektiva betingelser (SKB TR-11-01, avsnitt 14.3.2).

Beträffande konstruktionsförutsättningar kopplade till bergskadezon konstaterar SSM att SKB har föreslagit ett flertal mätmetoder men att utvecklingsnivån ännu inte kommit så långt att en tydlig strategi för att demonstrera kravuppfyllelse har redovisats (avsnitt 3.4.6). En liknande slutsats kan dras avseende SKB:s konstruktionsförutsättning kopplad till den faktiska transmissiviteten i deponeringshålväggar. SSM bedömer att SKB behöver genomföra ytterligare insatser för att visa med vilka metoder och med vilket förfarande som kraven kan verifieras (avsnitt 3.4.7).

SSM bedömer att långtgående kvalitetssäkringsåtgärder kommer bli nödvändiga för att säkerställa att hela slutförvaret konsekvent uppfyller konstruktionsförutsättningarna. Det kommer att krävas ett omfattande mätprogram för att verifiera och demonstrera uppfyllelse av krav. En särskilt krävande utmaning kan bli verifikation av stabila mekaniska betingelser, gynnsamma hydrologiska betingelser och begränsad radionuklidtransport. SSM anser att SKB i första hand bör arbeta på att vidareutveckla mätmetoder för verifikation av konstruktionsförutsättningarna samt för att identifiera olämpliga positioner i berget för deponeringstunnlar och deponeringshål. SSM anser dock att detta arbete bör kompletteras med framtagande av lämpliga beräkningsfall som belyser effekter av att konstruktionsförutsättningarna inte fullständigt uppnås i slutförvaret som en helhet. Resultatet av sådana beräkningsfall kan styra omfattning och behov av kvalitetssäkringsåtgärder i samband med uppförande av slutförvarsanläggningen. De kan också tjäna som underlag för vidare utveckling av kvalitetssäkringsrutiner när erfarenheter från uppförande och drift blir tillgängliga.

3.2.2 Teknik för berguttag samt geometriska toleranser för bergutrymmen

3.2.2.1 Underlag från SKB

SKB har definierat referensmetoder för berguttag i deponeringstunnlar och deponeringshål samt redovisat hur utfall från dessa metoder förhåller sig till konstruktionsförutsättningar samt toleranser (SKB TR-11-01, avsnitt 5.2.3; SKB TR-10-18). SKB föreslår skonsam sprängning som huvudsaklig metod för tunnelbygge. Uppfyllande av kvalitetskrav och anpassning till specifika platsförhållanden i samband med berguttag styrs genom val av salvlängd, sprängämne, borrhingsprecision, salvhålens stickning och avstånd samt optimering av sprängladdning och tändningstid. SKB anser att sprängtekniken är avgörande för att begränsa bergskadezonen EDZ ("Excavation Damaged Zone") så att konstruktionsförutsättningen för den effektiva konnekterade transmissiviteten längs med deponeringstunnlarna uppfylls (SKB R-04-73; SKB TR-08-08; SKB R-09-17; SKB R-09-45). Geometriska toleranser för deponeringstunnlarna behöver uppfyllas för att möjliggöra en godtagbar installation av återfyllnaden. Uppfyllelse av återfyllnadens önskade initialtillstånd har också verifierats av SKB med befintlig teknik i tunnlar vid Äspölaboratoriet (SKB R-09-17). Toleranser innefattar krav på maximal avvikelser för tunnelvolym, maximal lokal överberg samt ingen förekomst av underberg. SKB bedömer att krav på en jämn tunnelsula för återfyllnadsinstallation kan medföra behov av vajersågning. SKB planerar att använda befintliga och väl beprövade tekniker som geodesi, laserskanning och fotogrammetri för att mäta deponeringstunnlarnas geometri efter uttag av berg.

SKB föreslår vertikal fullortsborrning för berguttaget i deponeringshålen eftersom det ger begränsad skadeeffekt på omkringliggande berg samt möjligheten att erhålla en regelbunden geometri (SKB TR-11-01, avsnitt 5.2.3; SKB TR-10-18). SKB anser att denna berguttagsteknik vid måttliga bergspänningar begränsar skadezonens djup till några få centimeter. SKB drar utifrån resultat av tretton fullortsborrningar i Äspölaboratoriet slutsatsen att deponeringshålens geometri uppfyller samtliga kravsatta toleranser. Toleranserna har definierats för att möjliggöra en tillfredställande installation av bufferten så att dess önskade initialtillstånd kan uppnås (avsnitt 3.5.5). SKB har också projekterat en bottenplatta i betong och koppar för att uppfylla kravet på begränsad lutning i deponeringshålets botten (SKB TR-10-18). SKB bedömer att det finns metoder och instrument som är lämpliga för att mäta deponeringshålens geometri efter berguttag så som t.ex. laserskanning och geodetiska metoder. Ytterligare arbete med att anpassa dessa metoder för den specifika tillämpningen i deponeringshålen erfordras dock. SKB planerar att vajersåga avfasningen i överkanten av deponeringshålen för att uppnå den avsedda geometrin (SKB TR-10-18, figur 5-2; SKBdoc 1393791, figur 2-1). För att genomföra ursparingen i berget till förankring av pluggarna planerar SKB att tillämpa konventionell teknik (SKB TR-10-18, avsnitt 5.2.5).

SKB planerar att genomföra berguttaget i schakt, ramper, transporttunnlar och i slutförvarets centralområde med sprängning (SKBdoc 1199888, kapitel 5). SKB avser att begränsa mängden främmande material från sprängnings- och installationsarbeten som tillåts komma i kontakt med berget samt minimera påverkan på grundvattensituationen med syfte att undvika en negativ inverkan på slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet.

3.2.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s underlag för val av teknik för berguttag för slutförvaret är godtagbart och bör anses vara tillräckligt för den pågående granskningen av tillståndsansökan. Motiv till denna slutsats framgår från granskningen av följande områden:

- kontroll av skadezonen runt deponeringstunnlar och deponeringshål
- kontroll av skadezonen runt ramper och schakt
- geometriska toleranser för installation av buffert, kapsel och återfyllnad.

SSM konstaterar att SKB planerar att använda etablerade och beprövade metoder för berguttag i deponeringstunnlar och deponeringshål. En godtagbar tillämpning av dessa metoder är dock i sig inte tillräcklig för att säkerställa uppfyllelse av de tillämpliga konstruktionsförutsättningarna så som den effektiva konnekterade transmissiviteten under deponeringstunnels sula (avsnitt 3.2.6) och den faktiska konnekterade transmissiviteten integrerad utefter deponeringshålsväggen (avsnitt 3.2.7). Kontroll av skadezonen runt bergutrymmen erfordrar tillämpning av en kombination av kontroller av sprängning, lokal geologi, utrymmenas geometri samt den resulterande sprickbildningen i berget orsakad av berguttag samt bergspänningskoncentrationer. SSM bedömer att kravet på skonsam sprängning ska behållas för att så långt det är rimligt möjligt minimera förekomsten av sprängskadezonen i berget runt deponeringstunnlarna. På samma sätt bedömer SSM att vertikal fullortsborrning är en lämplig metod för att minimera skadezonen i berget runt deponeringshålen. SSM anser att vajerågning av berg vid avfasningen vid överkanten av deponeringshålet är ett skonsamt sätt att bredda ut deponeringshålen som inte bör medföra ytterligare skador i berg. Metoden är beprövad och har demonstrerats på uppdrag av SKB i samband med berguttag för Citybanan i Stockholm (SKB R-13-06) som liknar produktionen av en deponeringstunnel. Metoden måste dock i många fall kombineras och kompletteras med andra metoder så som spräckning och knackning eller eventuellt sprängning. Tack vare metodens måttliga påverkan används den även för provtagning av berg för undersökning av skador orsakade av andra uttagsmetoder såsom sprängning (SKB R-09-17). SSM ser även positivt på att vajerågning sannolikt kommer att användas för att genomföra ursparingen där pluggarna förankras i berget (SKB P-13-18).

SSM bedömer att sprängning är en lämplig metod för uttag av berg i ramper och schakt för slutförvaret. SKB behöver emellertid ta fram ytterligare underlag som visar att konstruktionsförutsättningen med en begränsad integrerad och konnekterad effektiv hydraulisk konduktivitet runt ramper och schakt kan uppfyllas, vilket är en del av slutförvarets förslutning (avsnitt 3.6).

SSM bedömer att SKB:s metoder för berguttag i samband med uppförande av deponeringstunnlar och deponeringshål har förutsättningar att uppfylla krav kopplade till installation av buffert, kapsel och återfyllnad. SKB har genomfört fullskaliga experiment i Äspölaboratoriet som visar att toleranserna bör kunna uppfyllas för ett slutförvar i Forsmark (SKB R-04-73; SKB TR-08-08; SKB R-08-122; SKB R-09-17; SKB R-10-31). Detta avser både skonsam sprängning av tunnlar och vertikal fullortsborrning av deponeringshålsprototyper. SKB har även demonstrerat att det finns tillgängliga metoder för verifiering av kravsatta toleransnivåer. Dessa metoder kan dock behöva en viss industriell anpassning för att tillämpas under jord och systematiskt användas upprepade gånger i slutförvaret. För att toleranserna på bergutrymmena ska kunna uppfyllas krävs kontinuerlig platsanpassning och optimering av teknik för berguttag som bygger på precisionskontroller av utförda pilothål, salvhål och den lokala geologin. Detta kan uppnås exempelvis genom karteringar, MWD-metoden ("Measuring While Drilling"), anpassade sprängladdningar och tändningsplan samt slutmätning och kvalitetssäkring av de resulterande geometrierna för bergutrymmen.

SSM vill påpeka att SKB än så länge inte föreslagit metoder för kvantifiering av tillåten förekomst av spjälkning genom kontroll av deponeringshålsvolymen och transmissiviteten runt deponeringshålen. Dessa är kopplade till kraven på buffertdensitet (avsnitt 3.5.5) och den begränsade faktiska konnekterade transmissiviteten i deponeringshålsväggen (avsnitt 3.2.7). En bedömning av referensmetoden för bottenplattan i deponeringshålen återfinns i avsnitt 3.5.2.2.

3.2.3 Termiska egenskaper hos berg samt termisk dimensionering av slutförvaret

3.2.3.1 Underlag från SKB

För att undvika geokemiska omvandlingar av bentonitbufferten som kan äventyra dess långsiktiga inneslutningsförmåga och gynnsamma mekaniska egenskaper behöver SKB säkerställa en maximal temperatur på mindre än 100°C i bufferten, vilket föreskrivs i konstruktionsförutsättningarna (SKB TR-09-22, avsnitt 3.3.4). Detta krav innebär att kapslar inte får deponeras för nära varandra samtidigt som onödigt långa avstånd mellan kapslarna innebär en ineffektiv och kostsam användning av befintliga bergvolymen för förvaret.

Det finns tre delområden av betydelse för bedömningen av förutsättningarna att uppfylla detta krav:

- bergmassans termiska egenskaper
- modeller för temperaturutveckling i och omkring slutförvaret
- termisk dimensionering av slutförvaret med bestämning av avstånd mellan deponeringshål.

Beträffande bergmassans termiska egenskaper har SKB mätt bergets värmeledningsförmåga för de viktigaste bergarterna från Forsmark med hjälp av Sveriges Tekniska Forskningsinstitut (SP-laboratoriet) och TPS-metoden ("Transient Plane Source") (SKB TR-08-05 tabell 6-1). Bergprover har tagits från borrhälar bestående av intakt berg för representativa bergarter. Mätningarna har genomförts vid rumstemperatur på vattenmättade skivprover med en volym på ca 10 cm³ (SKB TR-10-52). Den uppmätta termiska värmeledningsförmågan för huvudbergarten medelkornig granit till granodiorit är i genomsnitt 3,68 W/(m·K) med maximala och minimala värden på 4,01 respektive 3,25 W/(m·K). Det lägre värdet för värmeledningsförmåga har använts för den termiska dimensioneringen av förvaret (SKB R-09-04). Värmeledningsförmågan för de övriga bergarterna har uppskattats med SCA-metoden ("Self Consistent Approximation") som baseras på användning av korrelationen mellan mineralsammansättningen och värmeledningsförmåga hos enskilda mineraler. Även underordnade bergarter som amfibolit, tonalit samt diorit som har låg värmeledningsförmåga liknande amfibolit på grund av lägre kvartsinnehåll eller genomgången kvartsupplösning, inkluderas i de stokastiska analyserna. Bergvolymen med låg värmeledningsförmåga som kan vara förknippade med dioritgångar och svärmar av mindre amfibolitlinser är däremot inte inkluderade i analyserna.

Bergets mineralsammansättning har bestämts från en modalanalys av bergarterna. En bra överstämmelse mellan värmeledningsförmåga från TPS-metoden och SCA-metoderna uppnåddes för en och samma bergart. SKB har skickat bergprover till olika laboratorier för att verifiera resultaten från TPS- och SCA-metoderna.

Beträffande modeller för temperaturutveckling har SKB definierat en strategi för stokastisk simulering av temperaturutveckling med beaktande av bergets termiska egenskaper. Den stokastiska simuleringsmetoden som har använts under



platsundersökningarna i Forsmark samt vid validering av metodens tillförlitlighet har utförts vid Äspölaboratoriet (SKB IPR-07-01). Vid användning av metoden definieras först bergvolymen som ska modelleras, vilket motsvarar storleken på bergdomänerna från den platsbeskrivande modellen (SKB TR-08-05). Därefter identifieras termiska bergklasser från stokastiska simuleringar baserade på håll- och borrhärdkartering. Baserat på ovan beskrivna termiska data uppmätta vid SP-laboratoriet konstrueras en rumslig statistisk modell för de termiska egenskaperna för varje termisk bergklass TRC ("Thermal Rock Class") i en bergdomän. Detta resulterar i en statistisk fördelning och ett variogram för varje TRC. Därefter skapas realiseringar av de termiska egenskaperna för varje TRC. Genom att kombinera dessa realiseringar med förekommande TRC skapas syntetiska realiseringar av de termiska egenskaperna för bergdomäner som RFM029, RFM045 och deras underdomäner. SKB har presenterat modeller för värmeledningsförmåga, värmekapacitet och anisotropi för dessa domäner i olika skalor (1 m och 5 m). Realiseringarna av värmeledningsförmåga och i synnerhet "svansen" med låga konduktivitetsvärden har stor betydelse för utformningen av förvarslayouten.

Modellering av den långsiktiga temperaturutvecklingen vid ett slutförvar i Forsmark har genomförts som en del av ansökan, och denna modellering ger också de spänningstillskott som orsakas av bergets termiska expansion (SKB TR-10-23). Modellen baseras på de termiska och mekaniska egenskaperna hos omgivande berg samt förvarslayouten inklusive kapsel- och tunnelavstånd. SKB:s analys baseras på antagandet att varje kapsel alstrar 1700 W värme. Maximitemperaturen i bufferten påverkas även av deponeringshastigheten och deponeringssekvensen. Med en antagen simultan deponering av alla kapslar i slutförvaret uppskattas dock osäkerheten till endast mindre än 0,1°C.

Beträffande termisk dimensionering av slutförvaret definierar SKB först ett avstånd från centrum av en deponeringstunnel till centrum på nästa tunnel på 40 m (center-till-center-avstånd eller c-c-avstånd). Därefter beräknas c-c-avståndet mellan deponeringshålen genom att anta den lägsta värmeledningsförmågan för alla bergarter som potentiellt kan påträffas i slutförvaret som dimensionerande. SKB tar också hänsyn till osäkerheter pga. initial temperatur, geometri för luftspalten mellan kapsel och buffert, variation av alstrad värme längs med kapseln, variation av värmeledningsförmågan i berget längs med deponeringshålen samt anisotropi och bias för värmeledningsförmåga. SKB drar slutsatsen att en säkerhetsmarginal på 4,5°C bör antas för den maximala temperaturen i bufferten när man dimensionerar c-c-avståndet mellan deponeringshålen (SKB R-08-83). Dimensioneringen genomförs först preliminärt med hjälp av ett nomogram från en analytisk lösning (SKB R-09-04) och därefter bekräftas de preliminära c-c-avstånden för slutförvaret med en numerisk modellering med olika realiseringar av värmeledningsförmågan i berget. Med denna metod uppskattar SKB att den maximala temperaturen i bufferten för slutförvarlayouten D2 blir 95,18°C för bergdomän RFM029 med ett c-c-avstånd på 6 m respektive 95,23°C för bergdomän RFM045 med ett c-c-avstånd på 6,7 m (SKB R-07-47). Center-center-avståndet mellan deponeringstunnlarna blir tio gånger större än bredden (4 m) för deponeringstunnlarna, vilket är tillräckligt stort för att utesluta mekanisk påverkan mellan intilliggande tunnlar. Pelaren är större än två tunnelbredder för lika stora parallella tunnlar i ett isostatiskt spänningstillstånd (Bray, 1987). Beräknade maximitemperaturer innefattar en korrigering på mellan 0,4°C och 0,6°C som tar hänsyn till variationen av de termiska egenskaperna med temperaturen. Av praktiska skäl väljer SKB ett c-c-avstånd i bergdomän RFM045 på 6,8 m som också var resultatet från tidigare beräkningar (SKB R-07-47). Båda värdena hamnar under säkerhetsmarginalen på 4,5°C från den maximala tillåtna temperaturen i bufferten på 100°C. Slutliga c-c-avstånd är tänkta att beräknas utan någon hänsyn till mer gynnsamma termiska egenskaper som kan förekomma i vissa delar av slutförvaret (SKB R-08-116).



Beträffande detaljkaraktärisering i fält har SKB i samarbete med Posiva (den finska motsvarigheten till SKB) testat den finska TERO-mätutrustningen (på finska ”TERmiset Ominaisuudet”, dvs. termiska egenskaper) för in-situ bestämning av termiska egenskaper i borrhål (Korpisalo m.fl. 2013). Baserat på mätningar uppskattas de termiska egenskaperna med hjälp av både en numerisk optimering och en enkel analytisk lösning baserat på en modell av en oändlig linjevärmekälla. Värden på värmeledningsförmågan från TERO-mätningarna ger högre värden än motsvarande laborietester (Korpisalo m.fl., 2013). Därmed är resultaten från olika testmetoder och laborier inte helt överensstämmande.

3.2.3.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB överlag har en lämplig strategi för termisk analys och dimensionering av ett slutförvar för använt kärnbränsle med acceptabla metoder för bestämning av termiska egenskaper, temperaturberäkningar samt termisk dimensionering. Beträffande bergmassans termiska egenskaper anser SSM att de resultat som presenteras i ansökan är tillräckliga för denna tillståndsgranskning. Mer detaljerad kunskap kommer dock att behöva finnas framme vid eventuell fortsatt prövning av slutförvaret. Då förväntas ytterligare platsspecifika data samt resultat från demonstrationsförsök i Forsmark att finnas tillgängliga. Bergets termiska egenskaper för torrt samt mättat tillstånd kommer att behövas liksom kompletterande data för termiska egenskaper för mindre förekommande bergarter med potentiellt låg värmeledningsförmåga.

SSM:s tidigare rådgivande grupp INSITE hade en överlag positiv syn på SKB:s strategi för att samla in och modellera de termiska egenskaperna i olika skalor för bergarterna och bergdomänerna i Forsmark (SSM Report 2010:30). INSITE delade SKB:s slutsats i SR-Can för Forsmark (SKB TR-06-09; SKB R-07-24) att ytterligare laboriemätningar behövs för att bättre förstå variabiliteten hos de termiska egenskaperna i olika skalor. INSITE ansåg att försiktighet behövs vid uppskalning av termiska egenskaper från kärnprov uppmätta i laboratorium till deponeringshållsskala eller större. De uppskalade termiska egenskaperna behöver också bekräftas för några representativa fall på plats i Forsmark för att validera prediktionsförmågan i en eventuell fortsatt ansökan av slutförvarsanläggningen. SSM instämmer med dessa slutsatser.

SSM konstaterar att SKB inte har genomfört några detaljerade studier av hur värmeledningsförmågan påverkas av variationer av mikrosprickor, porositet och anisotropi hos de olika bergarterna i Forsmark. SKB kan därför ha en ofullständig förståelse för de grundläggande ingångsparametrarna för analysen av kopplade termiska (T), hydrauliska (H), mekaniska (M) processer i samband med uppvärmning. Ett exempel är de kopplade THM-processerna orsakade av den kombinerade effekten på termiska och hydrauliska drivna processer som bl.a. kan relateras till skadepåverkan runt tunnlar och borrhål (EDZ), deformations- och spänningskoncentrationer samt spjälkning. SKB utförde inte några laborieundersökningar där variationen av termiska egenskaper och deras anisotropi vid högt tryck eller hög temperatur studerades. Beaktande av sådana variationer kan medföra en ökning av den resulterande värmeledningsförmågan, vilket i sin tur kan leda till en besparing på mellan 1 % till 5 % i användningen av bergvolym för slutförvaret (SSM Technical Note 2015:01).

Beträffande modeller för temperaturutveckling anser SSM att SKB:s modeller för att beskriva den termiska utvecklingen är tillräckliga för denna granskning av tillståndsansökan. SKB har presenterat godtagbara resultat som visar att den valda marginalen på 5°C är lämplig för att uppnå konstruktionsförutsättningen att bufferttemperaturen behöver vara mindre än 100°C (se även SSM Technical Note 2012:51). Med beaktande av temperaturkorrigeringen drar SKB slutsatsen att mindre än en kapsel i hela slutförvaret ur statistisk synvinkel har en maximitemperatur för bufferten som är högre än 95°C. Cirka 98 % av kapslarna har en marginal av 10°C eller mer (SKB

TR-10-23, figur 5-7). SSM anser att detta är acceptabelt. Eftersom SKB har tillämpat både verifierade analytiska metoder (SKB TR-03-09) och numeriska modeller (SKB R-08-83; SKB R-08-116) för att studera olika aspekter av den termiska utvecklingen av slutförvaret finns därför enligt SSM:s bedömning att de av SKB uppskattade osäkerheterna är väl avgränsade och trovärdiga.

Enligt SSM:s bedömning är den största osäkerheten för den termiska utvecklingen värmetransport-egenskaperna i bergpelaren mellan deponeringshålen och i synnerhet kopplingen till om berget är i torrt eller i vattenmättat tillstånd. SSM anser att mätnadsgraden i berget påverkar temperaturen i bufferten så pass mycket att SKB i framtiden behöver ta hänsyn till denna parameter när man verifierar uppfyllelsen av konstruktionsförutsättningen med maxtemperaturen på 100°C i bufferten (se även SSM Technical Note 2012:51). Värmeledningsförmågan för torra bergprover i granitiskt berg är lägre än för mättade prover, vilket kan leda till högre temperaturer i bufferten. SSM anser även att effekter kopplade till värmetransportegenskaperna i bergpelaren bekräftas genom resultat från CAPS-experimentet i Äspölaboratoriet (SKB IPR-08-08). Stor variation i omfattning av spjälkning p.g.a. uppvärmning observerades i åtta borrhål i en tunnel där mindre spjälkning förekom i de hål som var omgivna av torrt berg. SKB hävdar att osäkerheter i bergets termiska egenskaper (värmeledningsförmåga, anisotropi och dess variabilitet) har en effekt på sluttemperaturen i bufferten på mellan 1°C och 2°C, vilket är mindre jämfört med den ogynnsamma effekten av torrt tillstånd i deponeringshålen på mellan 3°C och 4°C.

SSM noterar att ett stort antal testfall och ”benchmark”-tester kring termomekaniska modelleringsproblem har genomförts under mer än 20 års tid, delvis som ett resultat av initiativ från myndighetssidan (se t.ex. Stephansson m.fl., 1996). Tack vare detta arbete finns idag en allmän enighet om att termiska simuleringar generellt har en hög tillförlitlighet och de ger i allmänhet en god överensstämmelse mellan experiment och modelleringsresultat. Simuleringar av kopplade spänningar och förskjutningar i berg är dock fortfarande mer problematiska (SSM Technical Note 2015:01). Oberoende modellering med sex olika simuleringsverktyg har genomförts på uppdrag av SSM för att bringa klarhet i frågan om det planerade slutförvarets värmeutveckling. Dessa studier bekräftar i huvudsak SKB:s resultat gällande utvecklingen av temperatur, bergspänningar och hävning av markytan så länge som studierna har baserats på liknande ingångsparametrar (SSM Technical Note 2015:01). Modellerna påverkas dock i viss mån av osäkerheter kring antaganden kopplade till temperaturen vid bergväggen i deponeringshålen, sprickigheten, vattenmättnadsgraden samt närheten till deformationszoner.

Beträffande termisk dimensionering av slutförvaret liksom termiska effekter på bergets stabilitet bedömer SSM att SKB:s underlag till ansökan är tillräcklig för denna tillståndsprövning. Nya beräkningsfall avseende bergets stabilitet i slutförvarsskala kommer emellertid att behövas inför kommande steg av processen. Detta är endast möjligt att genomföra efter att SKB har fått möjlighet att samla in mer platsspecifik data gällande bergets termiska egenskaper i torrt samt vattenmättat tillstånd.

SSM noterar att c-c-avståndet mellan deponeringstunnlarna är tio gånger större än bredden för deponeringstunnlarna, vilket är tillräckligt stort för att utesluta mekanisk påverkan mellan intilliggande tunnlar (Bray, 1987). När hänsyn tas till värmealstrande kapslar i deponeringshålen tillkommer dock ytterligare spänningar i bergpelarna mellan deponeringshålen och mellan deponeringstunnlarna. SSM har granskat SKB:s modelleringsarbete i syfte att studera stabilitet och dimensionering (SKB R-08-83; SKB R-09-04; SKB TR-10-23). SSM har även låtit genomföra egna modelleringar av den termiska utvecklingen av slutförvaret (sammanställda i SSM Technical Note 2015:01).



Såväl SKB:s modeller som SSM:s oberoende verifierande beräkningar visar att slutförvaret inte kan utsättas för så stora termiska tilläggsspänningar så att storskalig instabilitet kan uppstå t.ex. i form av sprickpropagering på ett horisontellt plan som omfattar deponeringstunnelsystemet (SSM Technical Note 2014:58). Vissa partier i slutförvaret (t.ex. deponeringstunnlarna, avsnitt 4.4) kan lokalt komma att påverkas av spjälkning under den termiska fasen, men detta förväntas inte ha någon omfattande effekt på vare sig drift eller långsiktig strålsäkerhet. Vissa effekter på deponeringshålen är dock däremot inräknade i relevanta scenarier för utvecklingen av slutförvaret efter förslutning (avsnitt 4.4).

SSM bedömer att det finns förutsättningar för att temperaturen i bufferten kan hållas under 100°C i alla delar av slutförvaret med valda c-c-avstånd baserade på den minsta acceptabla värmeledningsförmågan för berget i Forsmark med 2,84 W/(m·K) i RFM029 respektive 2,46 W/(m·K) i RFM045. Det bör noteras att de dominerande bergarterna i slutförvaret i genomsnitt har en högre värmeledningsförmåga kring 3,7 W/(m·K). SSM anser att genom att tillämpa ett kriterium för bortval av deponeringspositioner vid särskilt ogynnsamma termiska förhållanden kan viss ytterligare marginal till den maximala tillåtna temperaturen i bufferten på 100°C erhållas med endast en liten försämring av nyttjandegraden i termer av det totala antalet kapselpositioner som slutförvaret kan rymma. Även om SSM inte har genomfört egna beräkningar för att bekräfta de maximala tillåtna temperaturerna i bufferten bedömer SSM att de numeriska modelleringarna av temperaturfördelningar i berget runt om deponeringshålen har en hög tillförlitlighetsgrad.

SSM anser att kunskapen om värmeledningsförmågan i bergmassan är viktig för tillförlitliga uppskattningar av temperaturutvecklingen. Beträffande detaljkaraktärisering av berget anser SSM att SKB till nästa steg i prövningen behöver presentera en utförlig redovisning av en lämplig strategi för att bestämma de termiska egenskaperna hos berget under uppförandefasen av slutförvaret. Termisk dimensionering av panelerna i slutförvaret behöver ske innan borring av deponeringshålen (SSM Technical Note 2015:01). Därför anser SSM att SKB bör demonstrera sin detaljkaraktäriseringsstrategi i tunnlar på förvarsdjup för slutförvaret. Dessa tunnlar bör användas för utveckling av metoder, etablering av empiriska samband samt bestämning av den optimala skalan för framtagning av de termiska egenskaperna hos berget i Forsmark.

SSM anser att interpolation och extrapolation genom ”variogram” och ”kriging” är ett lämpligt verktyg för att generera rumsligt korrelerade termiska egenskaper i berget. Detta ansågs av INSITE-gruppen vara ett stort framsteg i SKB:s tidiga redovisning inom hanteringen av den naturliga variabiliteten hos bergets egenskaper i Forsmark (INSITE M-09-06). Metoden kan även ge indikationer på den detaljeringsgrad som karaktäriseringen bör ha samt vilken skala som är optimal för att ta fram de efterfrågade parametrarna för termisk dimensionering av panelerna i slutförvaret. SSM anser att SKB:s detaljkaraktäriseringsprogram bör ta vara på rapporterade studier om empirisk uppskattning av värmeledningsförmåga hos berget baserad på bergarternas densitet och/eller P-våghastighet som kan erhållas genom en kombination av geofysiska borrhålsmetoder och laborietester (SSM Technical Note 2014:07). För närvarande planeras forskning och utveckling av ISRM (”International Society for Rock Mechanics”) för en in-situ-testmetod för utvärdering av de termiska egenskaperna hos berget på en relevant måttkala på 3 till 5 meter. Detta arbete bör noggrant följas av SKB.

3.2.4 Krav på deponeringshål kopplat till stabila mekaniska förhållanden

3.2.4.1 Underlag från SKB

SKB har definierat krav på placering av deponeringshål i berget för att minimera risken för att kapslarna skadas av framtida stora jordskalv. Kapslarna ska konstrueras så att de klarar 50 mm skjuvrörelse i berget under vissa rimliga förhållanden (SKB TR-09-22, avsnitt 3.1.2). Positioner i berget där det finns strukturer som kan aktiveras och som kan hysa skjuvrörelser större än 50 mm skall därför undvikas. SKB hävdar inte att det är möjligt att under alla omständigheter identifiera sådana positioner, men genom att införa särskilda acceptanskriterier för deponeringshålen avses att så långt som möjligt minimera risken för att kapslar skadas av framtida stora jordskalv genom ett selektivt val av deponeringspositioner.

SKB använder sig av konceptet ”respektavstånd” för att undvika positioner i berget där skjuvrörelser kan förväntas vara större än 50 mm (SKB TR-11-01, säkerhetsfunktion R3b). Denna skjuvrörelse kan för sprickor över viss längd (s.k. kritiska sprickor) överskridas på avstånd kortare än ett respektavstånd från de deformationszoner i förvarsområdet som är längre än tre kilometer. Därför bör kapseldeponering undvikas i sådana positioner som skärs av långa sprickor (dvs. lika långa eller längre än kritiska sprickor). SKB gör antagandet att sprickrörelser från ett jordskalv avtar med avståndet från skalvets hypocentrum och att rörelsen är mindre för kortare sprickor. Genom att också välja bort deponeringshål som skärs av långa sprickor minskar därför sannolikheten för kapselbrott på grund av skjuvning.

SKB anser att man, genom att identifiera sprickor eller sprickzoner på deponeringstunnlarnas väggar, golv och tak, kan undvika att deponeringshålen korsas av stora sprickor. En spricka eller sprickzon utgör en genomskärning av deponeringstunneln om den kan följas runt hela tunnelperiferin, en s.k. FPI (”Full Perimeter Intersection”). SKB:s grundläggande FPI-kriterium innebär att alla sprickor som beräknas skära kapselns plats i deponeringshålet kommer att förkastas oavsett sprickans verkliga storlek (SKB TR-10-21).

SKB har även definierat ett utökat kriterium, EFPC (”Extended Full Perimeter Intersection”), som innefattar ett tilläggskrav som innebär att även deponeringshål som korsas av en stor horisontell spricka som kan detekteras i fem eller fler intilliggande deponeringshål behöver uteslutas. SKB anser att av de sprickor som kan påvisas i ett deponeringshål ska endast de som har en genomskärning runt hela omkretsen för kapselpositionen i deponeringshålet ge upphov till att dessa deponeringshål måste förkastas (SKB TR-10-21, avsnitt 6.5).

Tillämpningen av enbart FPI/EFPC-kriteriet bör göra det möjligt att sortera bort branta sprickor med en sprickdiameter på minst 6 m och flacka sprickor med en sprickdiameter på minst 24 m. Vissa kritiska deponeringshålspositioner kommer dock undgå upptäckt vilket huvudsakligen kan härledas till svårigheten att upptäcka flacka sprickor och kritiska positioner vid deponeringstunnlarnas mynning mot huvudtunneln eller vid tunnel Slut (SKB TR-11-01, tabell 10-17 och 10-18). Antalet kritiska positioner kan minskas om den geologiska och geofysiska informationen tillgänglig från angränsande tunnlar används. Ytterligare pilothål kan även placeras vid fronten för deponeringstunneln så att ytterligare fyra fiktiva eller riktiga deponeringshål kan studeras bortom det sista planerade deponeringshålet. Längden av deponeringstunnlarna spelar också roll då ändeffekten minskar med minskande antal tunneländar i slutförvaret. SKB redovisar i ramprogrammet för detaljundersökningarna hur slutförvarets platsspecifika bergförhållanden och konstruktionsförutsättningar ska hanteras under uppförande och drift av anläggningen (SKB R-10-08).

I SKB:s modeller för jordskalvberäkningar är deformationszoner oändligt långa och uppemot 16 km breda och djupa, vilket representeras genom användning av symmetriplan för att begränsa storleken på den numeriska modellen. De modellerade zonerna motsvarar de regionala deformationszonerna Forsmark, Eckarfjärden och Singö som har uppmätta längder på 30 till 70 km (SKB TR-08-05, Appendix A15). Vidare antar SKB att det finns ett linjärt samband mellan storleken för en spricka (s.k. sekundär spricka) och dess skjuvrörelse pga. jordskalv på en intilliggande deformationszon. Den minsta sekundära sprickan som kan hysa en skjuvrörelse överstigande 50 mm definieras av SKB som kritisk och dess diameter benämns ”kritisk diameter”. SKB visar att sekundära sprickrörelser minskar med avståndet från den aktiva zonen.

Det FPI/EFPC-kriterium som SKB utvecklat används för att räkna fram antalet kapslar med använt kärnbränsle som kan ligga i kritiska positioner i slutförvarslayouten D2 med avseende på risken för kapselbrott på grund av jordskalvsinducerad skjuvning (SKB TR-10-21). SKB:s beräkningar baseras på tillämpningen av följande komponenter:

- En stokastisk geologisk beskrivning av sprickorna genom ett diskret spricknätverk Geo-DFN på skalor upp till en km i slutförvarsvolymen (SKB R-07-46)
- En deterministisk beskrivning av deformationszoner längre än tre km vilka betraktas som potentiella källor till framtida jordskalv (SKB TR-08-05)
- FPI/EFPC-kriteriet för att undvika stora sprickor vid val av positioner i berget för deponeringshål (SKB TR-10-21)
- Modelleringsresultat avseende skjuvrörelser hos enstaka sekundära sprickor som ett resultat av hypotetiska jordskalv hos närliggande deformationszoner längre än tre km (SKB TR-08-11).

Av praktiska skäl delar SKB upp bergvolymer i slutförvaret i områden mellan 100-200 m, 200-400 m, 400-600 m och bortom 600 m från en potentiell aktiv deformationszon med en längd större än tre km (SKB TR-08-11, tabell 7-2). SKB fastställer att den minsta kritiska sprickan för det närmaste avståndet i varje område gäller över hela området. På så sätt väljs för varje område storleken för den minsta kritiska diametern (t.ex. 125 m för en spricka mellan 100 och 200 m från en aktiv deformationszon längre än 5 km) för en sekundär spricka som kan skjuvas mer än 50 mm vid jordskalv. Olika kritiska diametrar gäller för flacka sprickor (stupning mellan 0° och 55°) eller branta sprickor (stupning mellan 55° och 90°). SKB antar att alla sprickor närmare än 100 m från deformationszonen kan hysa sekundära skjuvrörelser som är större än 50 mm. Ett respektavstånd på 600 m tillämpas på de regionala deformationszonerna i Forsmark.

SKB har beräknat antalet ”kritiska positioner” som undgår upptäckt vid tillämpning av FPI/EFPC-kriteriet i samband med Geo-DFN-spricknätverksmodeller för Forsmark (SKB R-07-46). SKB räknar fram antalet kritiska positioner i förhållande till olika deformationszoner längre än tre km för olika varianter av Geo-DFN-modeller, nämligen ”r0-fixerad”, ”OSM+TFM” (hållskalemmodell + tektonisk zonsmodell) och ”TCM” (tektonisk kontinuum modell). SKB har beaktat ett kriterium (”probabilistiskt slip-kriterium”) som tar hänsyn till att deponeringshålet inte behöver skära alla längre sprickor där skjuvrörelsen är störst, dvs. nära sprickans mitt, även om skjuvrörelser på en spricka överstiger 50 mm kan skjuvrörelsen just vid deponeringshålet understiga det värdet. SKB:s beräkningar visar att antalet kritiska positioner varierar mellan 0,0008 och 0,12 för de två antagna förkastningsregimerna, i blandade eller reversa spänningsförhållanden (SKB TR-11-01, tabell 10-17 och 10-18).

SKB har redogjort för vissa planer att på sikt ersätta FPI/EFPC-kriteriet med geologiska och geofysiska undersökningsmetoder för att undvika stora sprickor (SKB TR-11-01, avsnitt 15.5.12).



SKB har använt beräkningskoden 3DEC (version 3.0, Itasca, 2003) i sina modelleringar av sekundära rörelser i bergsprickor bortom deformationszonen som kan hysa ett jordskalv (SKB R-04-17; SKB R-06-48; SKB TR-08-11; SKBdoc 1403906). Koden hanterar bergmassan som ett medium uppbyggt av en samling av block som interagerar via deras kontaktytor vilka representerar sprickor ("Distinkt Element Metod", DEM). Med denna metod kan koden hantera dynamiska problem som simulering av jordskalv. I och med att blocken i modellerna definieras i initialtillståndet förblir sprickornas geometri oförändrad oavsett vilka belastningsfall som simuleras. SKB:s implementering av 3DEC-modellerna bygger på förenklade representationer av deformationszoner, spricknätverk och sprickplan där:

- deformationszoner är plana och rektangulära
- sekundära sprickor är plana och cirkulära
- spricknätverk är regelbundna och består av sprickor med samma diameter och med standardiserade orienteringar (dvs. inga realiseringar av Geo-DFN-modeller).

SKB antyder att kriteriet att skjuvhastigheten ska vara lägre än 1 m/s (SKB TR-11-01, säkerhetsfunktion R3c) är väldigt konservativt och är i praktiken uppfylld i alla verkliga historiska jordskalvfall (SKB TR-08-11, avsnitt 8.3; SKB TR-11-01, avsnitt 10.4.5).

3.2.4.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s metod att minimera konsekvenser av ett eventuellt jordskalv med hjälp av användning av särskilda acceptanskriterier för placering av deponeringshål är godtagbar för det innevarande steget i prövningsprocessen. Användning av dessa kriterier bör vara praktiskt möjlig och angreppssättet bör vara rimligt effektivt för att minimera konsekvenser av ett jordskalv. Enligt SSM:s bedömning är dock de nuvarande kriterierna vare sig helt tillförlitliga eller optimala för att identifiera kritiska positioner i berget, och därför kvarstår det ett behov av fortsatt utvecklingsarbete. SSM anser vidare att SKB:s metod att med hjälp av bergmekaniska modeller beräkna den kvarstående risken efter användning av acceptanskriterier för deponeringshål i några avseenden är allt för förenklad och därför behöver vidareutvecklas (se även avsnitt 4.13, 5.12 och 6.2 i denna rapport). SSM bedömer att betydande ytterligare insatser erfordras innan en eventuell provdrift av slutförvarsanläggningen kan bli aktuell.

SSM anser att följande frågeställningar har stor betydelse för bedömningen av SKB:s koncept för att minimera konsekvenser av ett eventuellt jordskalv:

- praktisk tillämpning av FPI/EFPC-kriteriet
- användning av koncepten kritiska sprickor och respektavstånd
- beräkning av antalet kritiska deponeringspositioner i slutförvaret
- representation av sprickor i SKB:s jordskalvmodeller.

SSM bedömer att det kommer vara möjligt att upptäcka de flesta genomskärande sprickorna i deponeringstunneln under de detaljerade undersökningarna för val av deponeringspositioner (SSM Technical Note 2014:07). Det finns dock en risk att några av dessa genomskärande sprickor i deponeringstunneln kan komma att förbises på grund av mänskliga fel, problem med tillgänglighet eller synlighet av bergväggarna, oregelbundna, diskontinuerliga, korsande eller förgrenade sprickor samt krosszoner eller andra omständigheter som försvårar tillämpningen av FPI/EFPC-kriteriet (SSM Technical Note 2014:22). Enligt SSM:s bedömning kan antalet sådana fel bli ett fåtal för hela slutförvaret och deras detektion med FPI/EFPC-kriteriet bör därför inte utgöra en betydande osäkerhet. Vissa svårigheter kan förekomma om flera intilliggande flacka sprickor som skär flera deponeringshål behöver kopplas samman för att identifiera en längre flack spricka som eventuellt behöver omfattas av EFPC-kriteriet.



SSM noterar att om en halverad skjuvrörelse på 25 mm antas skada kapseln (som i SKB TR-11-01, avsnitt 10.4.5, motsvarar ett eventuellt andra skalv) ökar antalet potentiella jordskalvsinducerade kritiska positioner med en faktor tio jämfört med fallet med en skjuvrörelse på 50 mm (motsvarande konstruktionsförutsättningen). Enligt SKB:s antagande är den kritiska diametern proportionell mot skjuvrörelsen, och en halvering av skjuvrörelsen skulle därför motsvara en halvering av den kritiska diametern till ett värde på ca 60 m. I praktiken kan detta konservativa antagande tillämpas på samma karteringsunderlag som går att få fram från FPI/EFPC-kriteriet, men antalet kritiska positioner skulle öka avsevärt (jmf. SKB TR-11-01, tabell 10-17, 10-18 och 10-19).

Beträffande användning av koncepten med kritiska sprickor och respektavstånd anser SSM att dessa koncept är användbara för att minimera konsekvenser av ett eventuellt jordskalv. Enligt SSM:s bedömning kan den, baserat på tillgänglig information, inte anses vara helt exkluderande i deterministisk mening (se nedan). Konceptet med kritiska sprickor bör därför endast användas i en första approximation som grund för tillämpningen av FPI/EFPC-kriteriet. Med tanke på att det i litteraturen inte finns tillgängliga välutvecklade metoder för att kvantifiera och hantera risken för kapselskada pga. ett jordskalv vid ett KBS-3-förvar bör dock SKB:s hantering anses vara acceptabel för det innevarande steget i prövningen. Emellertid bör SKB inför en eventuell uppförandefas med andra metoder bekräfta att sannolikheten för sekundära skjuvrörelser större än konstruktionsförutsättningen på 50 mm är tillräckligt begränsad.

SSM:s oberoende beräkningar av skjuvrörelser orsakade av pre- och post-glaciala jordskalv överensstämmer överlag med SKB:s resultat, men vissa skillnader kan ändå observeras (se även avsnitt 4.13, 5.12, 6.2 ; SSM Technical Note 2014:59):

- sambandet mellan sprickans skjuvrörelse och sprickans storlek verkar inte gälla i samtliga fall
- sekundära sprickor uppvisar ett bredare variationsintervall för skjuvrörelser än det som redovisas av SKB
- måttliga jordskalv (dvs. med momentmagnitud ca 4) på mindre deformationszoner inom deponeringsområdena kan i vissa fall inducera skjuvrörelser större än 50 mm i sekundära korta sprickor.

Dessa resultat antyder att SKB:s koncept med ”kritiska sprickor” och ”respektavstånd” inte är helt tillförlitliga och exkluderande i en deterministisk mening. SKB antar att för ett specifikt avstånd från den aktiva zonen finns det en bestämd kritisk sprickdiameter. För en kritisk spricka antar SKB att sannolikheten för en viss sekundär skjuvrörelse vid jordskalv är konstant för värden mellan 0 mm och konstruktionsförutsättningen på 50 mm. Det betyder att för sprickor mindre än den kritiska diametern är en skjuvning större än konstruktionsförutsättningen omöjlig, och har därför enligt SKB en sannolikhet lika med noll. SSM bedömer att detta kan vara en överförenklad tolkning av det komplexa geomekaniska fenomenet stora jordskalv.

SSM har genomfört egna utredningar kring den stokastiska fördelningen för sekundära skjuvrörelser i sprickor med liknande storlekar och med liknande avstånd från den aktiva zonen (SSM Technical Note 2014:59). Skjuvrörelser verkar ha en tydlig negativ exponentiell frekvensfördelning. Medianen istället för medelvärdet för skjuvrörelsen kan därför vara en lämplig parameter för att representera sannolikhetens avtagande med ökande värden. Eftersom medianen för sekundära skjuvrörelser oavsett sprickstorleken minskar med avståndet från den aktiva zonen kan sannolikheten för sekundära rörelser större än 50 mm också förväntas minska med det avståndet. Det bör påpekas att inte alla sekundära sprickor som genomgår en skjuvrörelse större än 50 mm träffar deponeringshålen och är därför inte kritiska.



Beträffande beräkning av antalet kritiska deponeringspositioner anser SSM att osäkerheterna i Geo-DFN-modellerna för närvarande är betydande, särskilt gällande den statistiska fördelningen av spricklängderna, vilket har en påverkan på SKB:s beräkning av antalet kritiska positioner. På grundval av resultaten från SSM:s oberoende beräkningar (se nedan) kan inte SSM utesluta att SKB har underskattat antalet kritiska positioner. Enligt SSM:s bedömning bör därför SKB vidareutveckla sina sprick- och strukturgeologiska modeller baserat på identifierade osäkerheter allt eftersom ny information blir tillgänglig under en eventuell uppförandefas.

SSM har låtit genomföra beräkningar av antalet kritiska positioner och kommit fram till värden mellan 0,1 och 5,6 (SSM Technical Note 2014:44). Detta kan jämföras med SKB:s beräkningar som visar att antalet kritiska positioner varierar mellan 0,0008 och 0,12 för två antagna förkastningsregimer, i blandade eller reversa förhållanden (SKB TR-11-01, Tabell 10-17 och 10-18). Förbehåll behöver göras för att SSM:s externa expert har använt ett förenklat ”slip-kriterium” för att ta hänsyn till den del av de kritiska sprickornas sprickplan som rör sig mindre än 50 mm under ett jordskalv. Detta innebär en viss överskattning av antalet kritiska positioner. SKB har efter sin användning av det förenklade kriteriet kommit fram till att det probabilistiska ”slip-kriteriet” undviker fyra gånger fler kritiska sprickor än fallet då den inte tillämpas. SSM:s resultat kan därför anses motsvara ett antal kritiska positioner i SKB:s mening mellan 0,025 och 1,4, vilket är 31 respektive 12 gånger större i jämförelse med SKB:s beräkningar. De förenklade antaganden som SSM:s externa expert har gjort avviker något från SKB:s angreppssätt, vilket kan sammanfattas i följande punkter:

- I hela slutförvaret gäller ett minimikapselavstånd på sex meter oavsett sprickdomän.
- Beräkningarna förutsätter att tunnarna enligt SKB:s layout D2 har antagits, vilket medför att tunnallengden i SSM:s beräkningar är kortare än i SKB:s beräkningar i rapporten SKB TR-10-21 och ger ca 25 % fler kritiska positioner.
- SSM:s expert har räknat fram antalet kritiska positioner i förhållande till alla deformationszonerna längre än 3 km på ett ”respektavstånd” på 100 m från deponeringsområdena (totalt sju zoner inkl. två branta zoner). SKB har räknat fram antalet kritiska positioner i förhållande till endast fem zoner. Detta bör inte påverka antalet kritiska positioner om zonerna hanteras var och en för sig.

Enligt SSM:s bedömning kan skillnader i antalet kritiska positioner mellan SKB:s och SSM:s beräkningar inte förklaras fullt ut av ovanstående punkter. Variabiliteten för antalet kritiska positioner som SSM har observerat verkar bero på den relativa andelen långa sprickor gentemot korta sprickor som SKB:s Geo-DFN-modeller genererar. SSM observerar att OSM+TFM-modellen har en högre relativ densitet av sprickor med diameter mellan 100-200 m än de andra två Geo-DFN-modellerna, vilket förklarar varför OSM+TFM-modellen ger det högsta antalet kritiska positioner: när man tar hänsyn till en enda zon blir det genomsnittliga antalet kritiska positioner så stort som 2,6.

Beträffande representation av deformationszoner i SKB:s geomekaniska modeller för jordskalvsimulering anser SSM att SKB bör utveckla simuleringsverktyg som på ett mer realistiskt sätt kan representera den komplicerade, icke-rätlinjiga deformationszonsmodell som SKB har tagit fram (SKB R-07-45). Den nuvarande stilerade modellen med en plan rektangulär deformationszon kan anses vara överförenklad. Överförenklingen gäller inte bara enstaka deformationszoners strykning, stupning eller ytform, men även deformationszonernas terminationer, skärningar och geometriska förhållande till varandra och till bergspänningstillståndet. SKB tar dessutom inte hänsyn till de lokala mindre deformationszonerna med en längd mellan en och tre kilometer. Dessa lokala deformationszoner bestämmer slutförvarets detaljerade layout och, förutom att kunna påverka effekten av ett jordskalv som inträffar på en annan längre deformationszon, kan



de också hysa mindre jordskalv som ligger närmare deponeringspositionerna i och med att de lokala deformationszonerna inte är försedda med ett ”respektavstånd”.

SSM anser också att SKB bör utveckla mer realistiska spricknätverk av sekundära sprickor för sina jordskalvssimuleringar. Som underlag för hittills genomförda simuleringar har SKB använt en tredimensionell representation med sekundära sprickor varav samtliga med diametrar på 300 m och standardiserade orienteringar. En begränsning med denna metod är att det inte är möjligt att belysa effekten av variationen hos sprickorienteringarna och sprickstorlekarna. En annan begränsning är, liksom för SKB:s modeller av deformationszoner, att effekten av spricknätverket med sprickornas skärningar med varandra och med deformationszonerna inte kan studeras i detalj.

SSM har dock förståelse för att SKB använt sig av dessa förenklingar i det innevarande prövningssteget. Förenklingar behöver under alla omständigheter göras för att kunna skilja mellan betydelsefulla betingelser i jordskalvmodelleringen och övriga mindre viktiga detaljer. Det finns för närvarande inte något tillgängligt praktiskt alternativ till användningen av plana och cirkulära sekundära sprickor i dagens numeriska modeller om antalet modellerade sekundära sprickor är stort. SSM noterar också att dessa modeller är konservativa i avseendet att plana sekundära sprickor bör maximera skjuvrörelserna eftersom ingen geometrisk råhetseffekt tillgodoses. SSM har även i sina egna modeller beskrivit sekundära sprickor som plana linjer eller plana cirkulära ytor genom användning av koderna UDEC, roxol och PFC2D (SSM Technical Note 2013:37; SSM Technical Note 2014:59; SSM Technical Note 2016:23). Det finns dock vissa möjligheter att idag kunna modellera sprickor som har ytråhet och vågig geometri vilket kan ge mer realistiska och förmodligen mindre konservativa resultat. Det bör därför vara möjligt att undersöka särskilda fenomen som beror på ytråhet och vågighet hos sprickorna och som kan påverka bedömningen av jordskalvens inverkan.

SSM har låtit bygga och analysera numeriska modeller av deformationszonerna som de ser ut i Forsmark med koderna med PFC2D i 2D och med Comsol Multiphysics i 3D som är lämpliga för dynamiska beräkningar (SSM Technical Note 2014:58; SSM Technical Note 2014:59). Mindre deterministiska layout-påverkande deformationszoner kortare än tre km har också inkluderats i modellerna. Modellerna visar att: i) deformationszonernas lokala orientering mot bergspänningsfältet påverkar deras känslighet för reaktivering; ii) deformationszonernas placering i förhållande till varandra påverkar deras beteende; och iii) effekten på slutförvaret av deformationszonernas placering varierar från zon till zon. SSM har därför i sina modeller beskrivit deformationszonerna som vågiga linjer eller ytor. I kompletteringen av ansökan gällande termiska jordskalv antyder SKB att modeller med mer trovärdiga deformationszonsgeometrier för Forsmark för närvarande är under utveckling, men vissa begränsningar hos de tidigare 3DEC-modellerna kommer dock att kvarstå (SKBdoc 1403906).

SSM har låtit utföra egna beräkningar med modeller som innehåller realiseringar av det statistiska spricknätverk som SKB har tagit fram (Geo-DFN) för tillämpning av FPI/EFPC-kriterierna. I studier av sekundära rörelser har SSM:s externa experter tagit hänsyn till linjära sprickor i storleksordningen mellan 125 och 1 100 m (SSM Technical Note 2013:37; SSM Technical Note 2014:59; SSM Technical Note 2016:23). SSM anser att analysen av stokastiska realisationer med Geo-DFN ger en mer mångfacetterad bild av tänkbara skjuvningsförlopp i Forsmark med avseende på: i) interaktion mellan sprickor och kluster; ii) storleksbetingade effekter på sekundära rörelser; och iii) effekter på sekundära rörelser beroende på avståndet från den seismiskt aktiva deformationszonen. Enligt SSM:s bedömning ger dessa simuleringar relevanta resultat trots att dessa spricknätverk är tvådimensionella och inte tredimensionella som SKB:s.



Man skulle kunna göra antagandet att skjuvhastigheten på sekundära sprickor är lägre än skjuvhastigheten på en deformationszon som hyser ett jordskalv men denna uppgift har inte kunnat bekräftas inom ramen för SSM:s externa experters uppdrag. SSM:s beräkningar visar endast att skjuvhastigheten på deformationszoner i SKB:s och SSM:s modeller stämmer bra överens med uppmätta skjuvhastigheter vid stora historiska jordskalv. SSM anser att behandlingen är acceptabel för tillståndsansökan, men bör undersökas vidare i kommande steg i etableringen av ett slutförvar.

SSM har i detta avsnitt endast kommenterat aspekter av SKB:s jordskalvsmodellering som avser bergets och förvarutrymmenas initiala tillstånd. Ytterligare granskningskommentarer kopplade till inverkan av stora jordskalv under förvarets långsiktiga utveckling återfinns i avsnitt 4.13, 5.12 och 6.2 i denna granskningsrapport.

3.2.5 Krav på deponeringshål kopplat till hydrogeologiska förhållanden

3.2.5.1 Underlag från SKB

SKB avser att utveckla en referensmetod och ett monitorings- och kontrollprogram för konstruktion av deponeringshålen som beaktar mätbara vatteninflöden (SKB TR-10-18 avsnitt 5.3). SKB har också återkopplat säkerhetsanalysens resultat till utvecklingen av konstruktionsförutsättningarna i fråga om val av deponeringshål baserat på inflöden under konstruktionsfasen och konstaterar att det kan påverka säkerhetsanalysresultaten (SKB TR-11-01, avsnitt 15.5.13).

SKB har i ett svar till en kompletteringsbegäran klargjort att konstruktionsförutsättningen att mindre än 150 m³ vatten får flöda in till en deponeringsposition under återmättnadstiden inte kommer att tillämpas (SKBdoc 1434717). Kriteriet syftade ursprungligen till att välja bort deponeringspositioner som kan leda till kanalbildningserosion som är så omfattande att buffertens säkerhetsfunktioner avsevärt skulle försämrats. Alternativa konstruktionsförutsättningar behöver därför beakta nödvändigheten att identifiera olämpliga positioner för val av deponeringshål.

SKB avser att istället tillämpa ett kriterium som innebär att deponeringspositioner som uppvisar ett inflöde på mer än 0,1 l/min ska förkastas (SKBdoc 1434717). Förmodligen kommer det även vara nödvändigt att tillämpa en säkerhetsfaktor på kriteriet för att tillgodose eventuella förändringar i flödesmönstret under uppförandefasen (SKBdoc 1434717). Med inflödeskriteriet 0,1 l/min kan det dock inte uteslutas att kanalbildningserosion förekommer i ett antal deponeringspositioner. Enligt SKB:s beräkningar som är baserade på inflödesdata (SKB R-13-21) handlar det dock om ett fåtal positioner som uppvisar buffertförlust på 100 kg eller mer och ungefär 40 positioner som kan ge en buffertförlust på 35 kg.

En annan konstruktionsförutsättning som berör deponeringshålens hydrogeologiska förhållanden är att sprickor som skär deponeringshålen ska ha tillräckligt låg konnektad transmissivitet (SKB TR-09-22). SKB anger i nuläget inget specifikt värde och att vidare undersökningar behöver genomföras. SKB konstaterar att en reviderad konstruktionsförutsättning samt inverkan av EFPC-kriteriet behöver beaktas när förvarutformningen uppdateras och undersökningsprogrammet utvecklas vidare (SKB TR-11-01, avsnitt 15.5.13).

SKB formulerar ytterligare en konstruktionsförutsättning som kopplar till skadezonen i deponeringshålet och innebär att den sammanhängande faktiska transmissiviteten integrerad utefter deponeringshålets hela vägg längd och beräknad som ett medelvärde runt hålet ska vara mindre än 10⁻¹⁰ m²/s (SKB TR 09-22). SKB bedömer att spjälkning i

deponeringshålen kan leda till att kriteriet inte uppfylls, men att detta inte har någon stor inverkan på långsiktig strålsäkerhet. Detta beror på att kapselbrott främst är förknippade med deponeringshål som uppnått advektiva förhållanden för vilka spjälkningseffekterna är av underordnad betydelse (SKB TR-11-01, avsnitt 15.5.13).

SKB anger att det finns möjlighet att optimera förvarsutformningen genom att utveckla acceptanskriterierna så att deponeringshål som kan förväntas ge relativt höga flöden under den mättade fasen kan väljas bort (SKB TR-11-01, avsnitt 14.3). SKB har därför genomfört beräkningar för att undersöka korrelationen mellan inflöden till deponeringshål och Darcy-hastigheterna under mättade förhållanden (SKB R-09-22, SKB R-13-21).

3.2.5.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer i likhet med SKB att kriteriet kopplat till ett ackumulerat flöde av 150 m³ vatten under återmättnadsfasen av praktiska skäl inte är lämpligt som en konstruktionsförutsättning. SSM ser därför positivt på att SKB har föreslagit att istället utgå från kriteriet att inte mer än 0,1 l/min får flöda in i ett deponeringshål under konstruktionsfasen samt att SKB har för avsikt att arbeta vidare med att ta fram ytterligare kriterier. SKB bedömer att tillämpning av kriteriet med 0,1 l/min inflöde kan leda till att vissa positioner kan utsättas för kanalbildningserosion. SSM har därför i sin granskning beaktat denna omständighet.

SSM bedömer att de konceptuella osäkerheterna i spricknätverkets geometri (avsnitt 3.3.5) kan förväntas ha en betydande påverkan på antalet deponeringspositioner som skärs av sprickor samt fördelningen av inflöden till dessa deponeringspositioner. Konsekvenserna kopplat till användningen av kriteriet 0,1 l/min kommer därför också att innefattas av dessa osäkerheter. SSM bedömer dock i likhet med SKB (SKBdoc 1434717) att det är osannolikt att de relativt få deponeringspositioner med buffertförlust på över 100 kg skulle påverka säkerhetsanalysens resultat på ett betydande sätt. Endast en kombination av olika ogynnsamma betingelser ger ofördelaktiga deponeringspositioner ur detta avseende. Inflödet ska vara lägre än kriteriet 0,1 l/min men högre än 10⁻⁵ l/min, återmättnadstiden behöver vara begränsad och en viss andel av det totala inflödet till hela deponeringstunneln behöver flöda in till det aktuella deponeringshålet ifråga. Dessa specifika omständigheter stämmer sannolikt inte heller överens med de förhållanden som ger betydande bufferterrosion och relativt stor kopparkorrosion. SSM instämmer därför med SKB:s bedömning att scenariot med initiala advektiva förhållanden i alla deponeringshål visar på att en förlust av 100 kg genom kanalbildningserosion inte bör vara avgörande för slutförvarets långsiktiga strålskydd och säkerhet (SKBdoc 1434717). Sammantaget bedömer SSM därför att konstruktionsförutsättningen att inte mer än 0,1 l/min får flöda in i ett deponeringshål under konstruktionsfasen är godtagbar. SSM noterar att SKB vid uppförandet av anläggningen kommer att få inflödesdata och bättre förutsättningar att parametrisera hydro-DFN-modellerna. SSM anser att det är av stor vikt att SKB vidareutvecklar robusta praktiska metoder som effektivt kan tillämpas för att avgöra om valda acceptanskriterier för deponeringshål uppfylls. SSM anser att SKB även bör vidareutveckla kriterier och mätmetoder kopplade till transmissiviteten i deponeringshålets väggar och transmissiviteten hos skärande konnekterade sprickor.

SSM anser att SKB:s analys av möjligheten att välja bort deponeringspositioner som kan riskera bufferterrosion under mättade förhållanden är lovvärd som ett led i att optimera slutförvarets utformning (SKB TR-11-01 avsnitt 14.3). SKB:s analys har baserats på de båda hydrogeologiska koderna DarcyTools (SKB R-09-19) och Connectflow (SKB R-13-21). Båda modellerna pekar på att deponeringspositioner med höga inflöden under uppförandefasen även ger höga Darcy-hastigheter under mättade förhållanden. Dessa resultat antyder att SKB bör sovra deponeringspositioner för att undvika bufferterrosion under mättade förhållanden. SSM bedömer dock att beräkningar avseende korrelation

mellan inflöden till ett öppet respektive ett återmättat förvar bör tas med viss försiktighet med tanke på de komplexa randvillkoren under förvarets uppförande- och driftfas. SSM noterar dessutom att buffererosion direkt kopplar till vattenhastigheten i sprickan som skär deponeringshålet. Vattenhastigheten beräknas ur Darcyflödet och sprickaperturen (SKBdoc 1396325). Kopparkorrosionshastigheten är däremot proportionell till Darcyflödet förutsatt att advektiva förhållanden har uppnåtts (SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.2).

3.2.6 Bergskadezon runt deponeringstunnlarna

3.2.6.1 Underlag från SKB

Bergskadezonen runt deponeringstunnlarna ("Excavation Damaged Zone", EDZ) definieras i en vidare mening som den del av berget närmast bergutrymmet som vid berguttag drabbas av irreversibel deformation där skjuvning av befintliga sprickor såväl som utbredning och utveckling av nya sprickor har ägt rum (SKB TR-11-01, bilaga B). Betydelsen av detta fenomen är att den skadade zonen kan utgöra en väg för radionuklidtransport i berget. I konstruktionsförutsättningarna anges att den störda zonen runt deponeringstunnlarna ska vara begränsad och inte ska ge upphov till en konnekterad effektiv transmissivitet över en signifikant del av tunneln som medelvärdesbildad över tunnelgolvet är högre än 10^{-8} m²/s (SKB TR-11-01, avsnitt 5.2.1; SKB TR-09-22). SKB anser sig ha tillräckliga belägg för att transmissiviteten i en eventuell EDZ som uppkommer vid berguttaget inte är sammanhängande och håller sig under det högsta tillåtna värdet enligt konstruktionsförutsättningen. SKB uttrycker ändå att det finns ett fortsatt behov av att utveckla teknik för att begränsa förekomsten av EDZ samt utveckla metoder för att karaktärisera bergväggarna och bestämma dess hydrauliska egenskaper (SKB TR-11-01, avsnitt 15.5.16).

Det finns tre delområden av betydelse vid bedömning av bergskadezonen:

- skonsamma metoder för bergsprängning
- verifiering av bergskadezon
- bergmekanisk analys av deponeringstunnlarna inklusive påverkan av tunnelriktning i förhållande till bergspänningar.

SKB har under årens lopp samlat in information om bergskadezon från Äspölaboratoriet samt andra platser (SKB R-04-73; SKB TR-08-08; Christiansson m.fl., 2009; SKB R-09-17; SKB R-09-45). Det är bland annat med utgångspunkt från dessa erfarenheter som det har varit möjligt att definiera konstruktionsförutsättningarna samt fastställa en målsättning för den högsta acceptabla transmissiviteten. SKB:s analytiska och numeriska analyser av skadezonen med hänsyn till EDZ samt spjälkning i deponeringstunnlarna verkar bekräfta att transmissivitetvärdet på 10^{-8} m²/s i deponeringstunneln är ett rimligt antagande (SKB TR-10-23; Christiansson m.fl., 2009).

Betydelsen av bergskadezonen är att den påverkar förutsättningarna för grundvattenflöde och radionuklidtransport i slutförvaret. SKB har beaktat inverkan av transmissivitet hos en bergskadezon som en del av hydrogeologisk modellering av Forsmarksplatsen (SKB R-09-20) samt som en del av radionuklidtransportberäkningar (SKB TR-10-50).

Hydrogeologiska beräkningar visar på måttliga skillnader i resultaten för fall utan EDZ i jämförelse med fall med EDZ enligt specifikationen. Även två fall med EDZ med avsevärt högre transmissivitet (10^{-7} m²/s och 10^{-6} m²/s) har inkluderats som ger en större påverkan på flödessituationen runt tunnlar. Radionuklidtransportberäkningar visar att transport genom den konnekterade transmissiviteten i deponeringstunnelsulans skadezon i vissa fall kan ha betydelse för beräknad dos (benämnd Q2 i SKB TR-10-50, avsnitt 6.3.4). Med EDZ med en transmissivitet enligt konstruktionsförutsättningen ger transportvägen Q2 dock endast ett litet bidrag till den totala radionuklidtransporten för kapselfallet med ett



växande pinnhål, men vid förhöjda transmissivitetvärden kan bidraget från Q2 bli den dominerande transportvägen. Det bör noteras att även om SKB tror att det går att undvika en sammanhängande störd zon i berget så förutsätts i beräkningar basfallet EDZ med en transmissivitet enligt konstruktionsförutsättningarna.

SKB har sammanfattat resultaten från mätningar av transmissiviteten och permeabiliteten hos bergskadезonen från relevanta referensfall i kristallint berg i Sverige och utomlands fram till och med 2008 (SKB TR-08-08). SKB:s referensmetod för bergschaktning försiktig sprängning jämförs med mekanisk schaktning, fullsektionsborrmaskin (TBM) och schaktborrmaskin (SBM). Resultaten antyder att mekaniskt berguttag vid måttliga in-situ-spänningar påverkar bergmassan marginellt med avseende på skador på bergmatrisen, nysprickbildning respektive rörelser i befintliga sprickor (Bäckblom och Martin, 1999; SKB TR-97-30; Marschall m.fl., 1999; Autio m.fl., 2005). SKB:s referensmetod skonsam sprängning leder dock till större påverkan på bergmatrisen, viss nysprickbildning samt rörelser i befintliga sprickor pga. skador orsakade av spränggaser och vattentryckbildning under detonationen. Den oregelbundna tunnelkonturen som fås vid sprängning ger dessutom ojämna lokala spänningskoncentrationer där lokal sprickbildning kan förekomma. Den hydrauliska konduktiviteten i skadезonen runtom en tunnel kan bli två till fyra storleksordningar större än den ostörda bergmassan och dess djup beror på tvärsnittarean för tunnelsektionen (Gray, 1993; Marschall m.fl. 1999).

SKB redovisar explicit risken för spjälkning vid initialtillståndet för deponeringstunnlarna (SKB R-05-71). Säkerhetsfaktorn för en deponeringstunnel orienterad 45° gentemot riktningen för den största ”mest sannolika” huvudspänningen ligger på ca 1,25 vid ca 500 m djup.

3.2.6.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB gjort grundliga studier kring förekomst och minimering av bergskadезon vilka är av acceptabel omfattning för detta prövningssteg. SSM anser dock att SKB i sin konstruktionsförutsättning inte bör utesluta förekomsten av en sammanhängande bergskadезon för de planerade deponeringstunnlarna i Forsmark i avvaktan på mer definitiv information. Förekomst av en sammanhängande EDZ stöds av Chandler m.fl. (2002) som också konstaterar att för att EDZ ska bli den dominerande hydrauliska transportvägen måste dess transmissivitet vara ca 10 gånger större än den hos återfyllnaden och ca 1 000 gånger större än den hos den orörda bergmassan. Det finns för närvarande resultat som visar att bergskadезonen kan begränsas med lämpliga metoder för berguttag, men inget tillförlitligt belägg för att en bergskadезon helt kan undvikas. Med tillgängliga mätmetoder verkar det inte kunna verifieras att en kontinuerlig bergskadезon helt kan undvikas.

SSM bedömer att kravet på skonsam sprängning är viktig att behålla för att så långt det är rimligt möjligt minimera förekomsten av sprängskadезonen i deponeringstunnlarna. Uppsättningar av platsspecifika sprängparametrar bör tas fram så att optimeringen mellan begränsade bergskador och logistik kan uppvisas. Optimeringen bör genomföras i förslutförvaret representativa demonstrationstunnlar på ett djup om ca 470 m i Forsmark i kommande steg. SKB bör använda ett flertal direkta och indirekta mätmetoder för att karaktärisera bergskadезonen i demonstrationstunnlarna. Dessa resultat kan sedan extrapoleras till resten av slutförvaret utan att lika omfattande mätningar behöver genomföras. Platsanpassade samband till indirekta mätvärden bör tas fram som sedan tillämpas systematiskt i resten av slutförvaret med smärre revideringar allteftersom mer data insamlas. Verifiering av bergtransmissivitet längs med demonstrationstunnlar bör även beakta eventuell spjälkning i deponeringstunnelns sula under den termiska fasen av slutförvaret.



SSM noterar att referenserna i litteraturen antyder att skonsam sprängning som leder till små avvikelser från den planerade tunnelkonturen också ger betydlig mindre bergskadezon (Bäckblom och Martin, 1999; SKB TR-97-30; Marschall m.fl., 1999; Autio m.fl., 2005). En indikator på skonsamhet skulle till exempel kunna vara andelen synliga borrhörpipor i tunnelväggarna eller tunnelsulan. En jämn tunnelsula förbättrar även förutsättningarna för installation av återfyllnaden. Enligt SSM:s bedömning kan stränga krav på sprängresultat i termer av precision i tunnelkonturen, särskilt i sulan, samt mätning av synliga tecken på skonsam sprängning, exempelvis en hög andel synliga borrhörpipor, förmodligen kunna betyda en begränsad sprängskadezon. Detta kan åstadkommas genom precisionsborrning av salvhålen, sprängning i torra salvhål, begränsning av laddningsdensiteten samt användning av en högsta partikelhastighet ("Peak Particle Velocity", Olsson and Ouchterlony, 2003). SSM noterar också att uppdelade sprängsektioner med hjässa och sula ger betydlig mindre bergskadezon under sulan.

SSM anser att SKB bör beakta påverkan från skrotning i tunnarna efter sprängning vid demonstration av skadezonen i deponeringstunnarna vid Forsmark. SKB redovisar (t.ex. SKB IPR-10-01) att skrotning i tunnarna kan öka tunnelkonturens ojämnheter vilket kan förvärra spänningskoncentrationerna i berget. Temperatur- samt fuktighetsvariationer i tunnlar kan också leda till berglossning vilket innebär att skrotning kan behövas även under driften av tunnarna. SSM noterar därför att sprängskadezonen kan utvecklas en längre tid efter sprängning som ett resultat av åtgärder som fordras för att upprätthålla driftsäkerheten.

SSM anser att SKB hittills inte har föreslagit något helt ändamålsenligt sätt att verifiera konstruktionsförutsättningen kopplat till bergskadezonen i deponeringstunnlar. Inga av SKB:s föreslagna metoder för direkt eller indirekt verifiering så som slitssågning, mätdammar, markradar, seismisk refraktion, ultraljudsmätning eller elektrisk konduktivitetmätning verkar kunna ge samstämmiga resultat över tunnelpartier så långa som 20-30 m när de används var för sig (SSM Technical Note 2014:07). Det finns också frågetecken kring hur systematiskt dessa metoder kan tillämpas i deponeringstunnarna. SSM anser dessutom att kriteriet kopplat till bergskadezonen för närvarande har flera begränsningar. Det anger exempelvis inte över vilka objekt medelvärdsbildningen ska tillämpas, om det gäller en deponeringstunnel, en deponeringspanel eller hela slutförvaret. En annan fråga är hur ofta partier med konnektad transmissivitet får förekomma i en deponeringstunnel, en deponeringspanel eller hela slutförvaret. Slutligen behöver SKB ta ställning till hur bergmassan längs med en deponeringstunnel med ursprunglig konnektad transmissivitet högre än 10^{-8} m²/s över partier på 20-30 m ska hanteras under slutförvarets konstruktionsfas.

SSM har granskat SKB:s analys av skadezonen runt deponeringstunnlar som innefattar skador på bergväggarna, sprickbildning i bergmatrisen samt aktivering av befintliga sprickor. SKB modellerar bergmassan som ett elastiskt kontinuum för att bedöma inducerade tangentiella spänningar och spjälkningspotential i deponeringshål, tunnel samt schakt på försvarsdjup (SKB TR-10-23; SKB R-08-116). SKB:s analys av skadezonen runt deponeringstunnarna visar att bergskadezonens utbredning påverkas primärt av valet av berguttagsmetod men även spjälkning är av stor betydelse för den axiella transmissiviteten längs med deponeringstunnarna (SKB TR-08-08). SSM noterar dock att SKB varken har bestämt spänningskoncentrationerna som uppstår i berget under schaktningen, eller dess inverkan på EDZ.

SSM har studerat om konfigurationer av EDZ i närområdet för ett slutförvar vid Forsmark inte har inkluderats i SKB:s modellering. SSM:s externa experter har genomfört oberoende beräkningar för att bedöma effekten på EDZ av hållfastheten hos det intakta



berget och bergmassan, av olika belastningsfall samt olika riktningar för deponeringstunnlarna i förhållande till riktningen för den ursprungliga maximala horisontella huvudspänningen (SSM Technical Note 2013:35). SSM:s beräkningar överensstämmer i stort med SKB:s med avseende på EDZ. Modelleringsresultaten antyder att en kontinuerlig EDZ inte förekommer om den maximala riktningsskillnaden mellan den ursprungliga maximala horisontella spänningen och deponeringstunnlarna är begränsad till mindre än $22,5^\circ$. En maximal riktningsskillnad på 45° kan emellertid vara tillräckligt stor för att orsaka en kontinuerlig EDZ i närområdet mellan deponeringspositionerna.

Andra studier som SSM:s externa experter har genomfört innefattar analyser av stabilitet hos sprickorna i spricknätverket som omger deponeringstunnlarna (SSM Technical Note 2013:37; SSM Technical Note 2014:59). Dessa visar att huvudspänningarna runt deponeringstunneln når måttliga värden på ca 60 MPa i hjässan och att sprickornas skjuvrörelser är begränsade till några 100 m. Sprickbildning samt sprickpropagering förväntas därför inte ske som ett resultat av spänningskoncentrationer vid konstruktion av en deponeringstunnelsektion. Detta gäller dock endast för mindre riktningsskillnader mellan den ursprungliga maximala horisontella spänningen och deponeringstunnelriktningen.

SSM noterar att det är av stor betydelse att deponeringstunnlarnas riktning väljs i förhållande till orienteringen för den största ursprungliga horisontella spänningen. Betydelsen av detta är förutom påverkan på spjälkningsrisken i deponeringshålen (avsnitt 3.2.7) att en avvikelse mellan tunnel- och bergspänningsfältets riktning på högst 30° förebygger spjälkning i hjässan och i sulan av deponeringstunneln. Även om deponeringstunnlarna initialt påverkas marginellt vid en riktningsskillnad på mindre än 30° behöver en maximal vinkelskillnad uppskattas som kan uppstå om spänningsfältet förändras under den termiska och glaciala fasen av slutförvaret (SSM Technical Note 2013:35; SSM Technical Note 2014:10). Vinkelbegränsningen kan också motiveras av rumsliga variationer och osäkerheter i bergspänningsmodellen. SSM anser att så länge vinkelbegränsningen uppfylls bör inte heller dragspänningar förekomma runt om deponeringstunneln vilka kan bidra till bildningen av en bergskadegång. Detta är också SKB:s slutsats (SKB TR-10-23, avsnitt 9.3.2). Om man förutsätter SKB:s "osannolik maximal" bergspänningsmodell med höga bergspänningar kan emellertid spänningskoncentrationer i närheten av deponeringshålen leda till lokal spjälkning i deponeringstunnelns sula och tak (SKB R-08-116). Observationer i tunnlar antyder att den hydrauliska konduktiviteten vid spjälkning ökar betydligt även jämfört med en omfattande sprängskadegång. SKB redovisar värden för hydraulisk konduktivitet upp till storleksordningen 10^{-6} m/s för processzonen vid spjälkning i schakt (SKB TR-08-08).

Gällande EDZ anser SSM sammanfattningsvis att irreversibla deformationer samt spjälkning av bergmatrisen kan förekomma lokalt eller kontinuerligt längs med sulan samt väggarna av deponeringstunneln. Därför anser SSM att SKB i konstruktionsförutsättningen inte bör utesluta en sammanhängande bergskadegång för de planerade deponeringstunnlarna i Forsmark.

SSM har även granskat påverkan av värmeutvecklingen från redan deponerade kapslar på det initiala bergspänningstillståndet innan nya deponeringstunnlar ska byggas i slutförvaret. Detta redovisas i avsnitt 4.4 i denna granskningsrapport om bergteknisk utveckling under de första 1 000 åren efter förslutning av slutförvaret. SKB föreslår att denna påverkan kan begränsas genom en administrativ översyn av ordningen i vilken deponeringstunnlarna byggs och kapslarna deponeras.

3.2.7 Spjälkning runt deponeringshål

3.2.7.1 Underlag från SKB

Enligt SKB:s redovisning har eventuell spjälkning runt deponeringshålen en betydelse för den långsiktiga strålsäkerheten så till vida att den kan påverka deponeringshålets volym samt transmissiviteten i bergväggarna vilken i sin tur påverkar grundvattenflöden och radionuklidtransport. Deponeringshålets volym behöver vara väl känd för att det ska gå att säkerställa att buffertdensiteten för en fullt mättad och homogeniserad buffert inte understiger $1\,950\text{ kg/m}^3$ (SKB TR-11-01, avsnitt 5.5.3). Konstruktionsförutsättningen som anger att ”innan kapslarna placeras ut måste den faktiska konnekterade transmissiviteten, integrerad utefter deponeringshållväggens hela längd och beräknad som medelvärde runt hålet, vara mindre än $10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$ ” (SKB TR-11-01, avsnitt 5.2.1) kan eventuellt inte uppfyllas för fall med omfattande spjälkning.

Spjälkning är ett brottfenomen i berget som förekommer när tangentiella spänningar som byggs upp i bergväggen parallellt med bergytan når ungefär hälften av den enaxliga tryckhållfastheten i berget (UCS, ”Uniaxial Compressive Strength”). Den tangentiella spänningen vid vilken spjälkningen förekommer benämns spjälkningshållfasthet (CIS, ”Crack Initiation Stress”). Metoder för bestämning av spjälkningshållfasthet CIS omfattar enaxliga trycktester, akustiska emissioner samt in-situ försök, varav SKB främst använt sig av enaxliga laborietester enligt metoden framtagen av Martin m.fl. (2001) (SKB R-07-31; SKB R-08-66). Testerna visar att CIS varierar både mellan olika bergarter och inom en och samma bergart, beroende på bl.a. bergdomän och sprickdomän. För den mest förekommande bergarten granit till granodiorit i RFM029 och FFM01 (SKB:s bergartskod 101057) är variationsspännet för CIS mellan 60 och 187 MPa, med en symmetrisk fördelning kring medelvärdet på 116 MPa (SKB R-07-31, figur 3-3). Laborietester på prover från Forsmark visar att medelvärdet för spjälkningshållfastheten ligger på ungefär 51 % till 55 % av UCS beroende på bergart, bergdomän och sprickdomän. SKB har antagit en in-situ spjälkningshållfasthet mellan 52 % och 62 % av UCS för de dominerande bergarterna i Forsmark (SKB TR-11-01; SKB TR-10-52). För den största bergdomänen RFM029 använder SKB ett värde på 53 % av det genomsnittliga UCS värdet för sina deterministiska analyser av spjälkning (SKB R-08-115; SKB R-08-116).

SKB har även empiriskt studerat mekanismen bakom spjälkning i ett fältförsök benämnt ”Åspö Pillar Stability Experiment” (SKB TR-07-01) på Åspölaboratoriet. Spjälkningshållfastheten CIS visade sig under in-situ förhållanden vara 56 % till 62 % av UCS. Detta kan jämföras med laborietester vilka indikerat lägre värden; enaxliga tester 42 - 48 % av UCS; akustisk emission 56 % av UCS; och uppskattning enligt Stacey (1981) 19 % av UCS. Även Posiva observerar i sitt POSE (”Posiva Olkiluoto Spalling Experiment”) att spänningen vid deponeringshållväggen klart överstiger den förväntade nivån för spjälkningshållfastheten utan att någon spjälkning kan observeras (Siren, 2011; Siren, 2012). De observerade spänningarna ligger mellan 65 och 100 MPa i jämförelse med förväntad spjälkningshållfasthet på ca 67 MPa. Indirekta mätningar verkar därför i regel underskatta spjälkningshållfastheten.

SKB har genomfört tredimensionella kontinuum-elastiska analyser för att studera hur omfattningen av spjälkning i deponeringshålen påverkas av bergspänningsmodellen samt av den relativa orienteringen mellan största horisontella spänningen och deponeringstunnelns riktning (SKB R-08-116). För SKB:s ”mest sannolika” bergspänningsmodell (SKB R-07-26) börjar spänningskoncentrationer vid toppen av deponeringshålen bli tydliga för skillnader i orientering på cirka 30° . SKB bedömer att den tangentiella spänningen vid deponeringshålets vägg inte kommer att överstiga det genomsnittliga CIS värdet på 116 MPa så länge skillnaden i orienteringen mellan den största horisontella spänningen och deponeringstunnelns riktning är mindre än 30° . SKB

förväntar sig samtidigt att spänningsfördelningen längs med borrhållslängden är ganska homogen. För SKB:s ”osannolika maximala” bergspänningsmodell (SKB R-07-26) får däremot ingen betydande orienteringsskillnad finnas innan spännings-koncentrationerna i berget överstiger CIS med spjälkning som resultat. SKB kommer fram till en säkerhetsfaktor (FOS, ”Factor Of Safety”) på ca 1,26 för bergdomän RFM029 vid jämförelse med det genomsnittliga CIS värdet med den tangentiellt största spänningen i deponeringshållsväggen (beräknad med Kirsch-ekvationer). Det finns därför nästan ingen marginal gentemot det värde på 1,25 som SKB har valt som undre acceptabel gräns. På grund av de små marginalerna avser SKB att hantera spjälkningsrisken med en probabilistisk analys för en större del av slutförvaret (SKB R-08-115, avsnitt 4.3).

SKB har utvecklat en probabilistisk metod för att uppskatta sannolikheten för spjälkning, givet förenklade variationer i CIS mellan olika prov, frekvensfördelningar för CIS och för de största och minsta horisontella in-situ spänningarna (SKB R-05-71; Martin och Christiansson, 2009). Med denna metod kan sannolikhetsfördelningen för säkerhetsfaktorn FOS samt spjälkningsdjupet beräknas. Bortfallet av deponeringshål i slutförvaret kan uppskattas då ett visst spjälkningsdjup används som tröskel vid vilken deponeringshålet får överges. SKB anger att denna tröskel ligger på ett spjälkningsdjup på 50 mm. Beräknat på bergspänningsmodellerna ”osannolik maximal” och ”mest sannolik” samt tunnelorienteringar på 0 respektive 30° i förhållande till den största horisontella spänningen uppskattar SKB att mellan 100 och 200 av 6 000 deponeringshål måste överges pga. för stor spjälkning någonstans i bergväggarna (SKB TR-10-18, figur 4-3).

SKB (SKB TR-11-01, avsnitt 10.2.2) uppger att spjälkning av deponeringshållsväggen innan kapseldeponering inte har någon påverkan på slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet eftersom alla bergflisor och skärvor kommer att tas bort genom skrotning och stora avvikelser i deponeringshållsväggen kommer att fyllas med buffertmaterial innan installation och deponering av kapseln. Enligt SKB ska ett deponeringshål väljas bort om skador på sidoberget inte kan repareras (SKB TR-11-01, avsnitt 10.2.2) och konstruktionsförutsättningarna i berglinjerapporten inte kan uppfyllas (SKB TR-10-18).

3.2.7.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB för detta prövningssteg har genomfört en godtagbar analys av spjälkningsrisken för deponeringshål med omfattande mätningar och storskaliga in-situ försök. Enligt SSM:s bedömning är också SKB:s bergmekaniska modellering för att utröna hur spjälkningsrisken påverkas under olika omständigheter acceptabel. SSM anser dock att inför kommande steg i SKB:s program behöver ytterligare insatser behövas inom följande områden:

- fullskaliga försök vid Forsmark
- insamling av platspecifik data
- verifiering av konnekterad transmissivitet i deponeringshållsvägg
- uppdaterad probabilistisk spjälkningsmodell.

SSM bedömer att platspecifika in-situ experiment behöver genomföras vid Forsmark inför kommande steg och att SKB därför bör inkludera spjälkningsförsök i demonstrationsförsök. Försök i en demonstrationstunnel bör styrka sambandet mellan den faktiska spjälkningshållfastheten på plats och den observerade förekomsten av spjälkning så att resultaten kan tillämpas med hög tilltro i andra delar av kärnbränsleförvaret. Även sambanden mellan spjälkningsdjupet och spänningsnivån i förhållande till spjälkningshållfastheten bör utredas under en demonstrationsfas. Sambandet mellan spjälkningshållfasthet och UCS som idag bestämts under laboratorieförsök bör relateras till den observerade förekomsten av spjälkning i full deponeringshållsskala med syfte att skapa tilltro till laboratorieresultaten.



SSM anser att SKB bör etablera ett program med laboratoriemätningar för insamling av platsspecifika materialparametrar. För de probabilistiska analyserna behöver en detaljerad statistisk fördelning av spjälkningshållfastheten tillämpas. SSM anser att platsspecifika data bör insamlas för att bekräfta att den preliminära bilden från platsundersökningarna fortfarande gäller (SSM Technical Note 2014:10). INSITE observerade att foliationen i bergarten som utsätts för spjälkning kan leda till anisotropiska effekter på hållfastheten (INSITE M-09-09). SSM anser att SKB i fortsatta arbete bör belysa huruvida dessa effekter är försumbara i förhållande till andra osäkerheter i spjälkningsanalysen. SSM bedömer att SKB behöver ta fram en mätmetod för att verifiera att den faktiska konnekterade transmissiviteten i deponeringshållsväggen på grund av t.ex. spjälkning, bergskadegzon och naturliga sprickor är mindre än 10^{-10} m²/s i syfte att verifiera kravet i konstruktionsförutsättningarna (SSM Technical Note 2014:23). Detta arbete bör först redovisas inför ansökan om uppförande av slutförvaret och därefter full ut implementeras genom demonstrationsförsök vid kommande steg av ansökan. Hänsyn bör även tas till spänningstillskotten pga. den termiska fasen i slutförvarets utveckling (avsnitt 4.4.2). SSM:s externa experter förutser även förekomst av nybildade dragsprickor i deponeringshållsväggarna, vilka också kan bidra till en högre konnekterad transmissivitet i berget (SSM Technical Note 2014:10).

SSM bedömer att SKB inför kommande steg av processen behöver förbättra sin probabilistiska metod för att uppskatta sannolikheten för spjälkning genom att inkludera spänningstillskotten pga. deponeringstunnelns orientering, rumsvariabiliteten samt osäkerheten för riktningen hos den största horisontella spänningen. Jämförelsen mellan de tangentiella spänningarna i bergväggarna och spjälkningshållfastheten, som ger indikationer avseende risken för spjälkning, ger olika resultat beroende på den antagna bergspänningsmagnituden. Bergspänningsmagnituden i kombination med deponeringstunnelns orientering kan vara mer eller mindre gynnsamma för utvecklingen av spjälkning. SKB:s probabilistiska metod för att uppskatta sannolikheten för spjälkning tar inte hänsyn till tillskottet av tangentiella spänningar i deponeringshållsväggen som beror på rumsvariabiliteten hos orienteringen för den största horisontella spänningen, vilket motsvarar ett antagande att bergspänningsriktningen är känd med säkerhet. I denna rapport granskas SKB:s bergspänningsmodell och där framgår att så inte är fallet för Forsmark (avsnitt 3.2.5). SKB uppskattar en osäkerhet på huvudspänningsriktningen vid Forsmark på 15° samtidigt som bergspänningsmätningar vid Äspö visar att den här typen av osäkerhet är svår att minska (SKB Fud-program 2013).

Omfattningen av spjälkning i slutförvaret hänger ihop med kontroll av spjälkningsdjupet, kontroll av deponeringshållsvolumen samt kontroll av den faktiska konnekterade transmissiviteten i deponeringshållsväggen. SSM bedömer att SKB:s uppskattning av antalet deponeringspositioner som väljs bort på grund av spjälkning kan vara underskattad. SKB kan komma att behöva genomföra analyser som redovisar den sammanlagda effekten av bortfall av deponeringspositioner på grund av krav på begränsad spjälkning samt bortfall av andra orsaker. I den befintliga spjälkningsanalysen nämns inte betydelsen av underordnade bergarter (SKB R-08-115), vilka utgör ytterligare en osäkerhet kring omfattningen av spjälkning i slutförvaret. I kommande ansökningar behöver SKB uppdatera redovisningen med mer detaljerade uppskattningar av antalet bortvalda deponeringspositioner som beror på variabiliteten samt osäkerheten för riktningen av den största horisontella spänningen, på förekomsten av underordnade bergarter samt variabiliteten hos spjälkningshållfastheten.



3.2.8 Grundvattenkemi under förvarets konstruktion och drift samt påverkan av tillförda konstruktionsmaterial

Detta avsnitt behandlar grundvattenkemifrågor kopplade till kemisk utveckling under byggnation och drift av ett slutförvar samt inverkan av tillförda konstruktionsmaterial.

3.2.8.1 Underlag från SKB

Uttag av tillträdesvägar till förvarsdjup och konstruktion av tunnlar för transport och deponering ger upphov till förändringar avseende den kemiska sammansättningen av närliggande grundvatten i jämförelse med det opåverkade berget. SKB redovisar översiktligt detta ämnesområde i SR-Site (SKB TR-11-01, avsnitt 10.2.5). Förändringarna avser främst tillförsel av syre som påverkar redoxbetingelser samt förändringar av grundvattenflödet som påverkar grundvattnets salthalt. Vid uppförande och drift av slutförvarsanläggningen behöver instabil bergmassa förstärkas och sprickor med stort vatteninflöde injekteras. Tillförsel av konstruktionsmaterial som cement och betong kommer att påverka grundvattnets pH. Dessutom går det inte att helt undvika att vissa främmande material, dvs. restmaterial från berguttag, fordonsolja och rester från underhåll blir kvarlämnade i olika delar av slutförvaret efter förslutning.

I samband med att dränerade tunnlar färdigställs kommer ett inflöde från omgivande grundvatten påbörjas som gradvis kan förändra grundvattnets salthalt. Både nedträngning av ytliga grundvatten och uppåtriktat flöde av djupa mycket salta grundvatten är möjliga. Hur omfattande inflödet blir påverkas bland annat av förvarets layout och hur effektivt tunnlar kan tätas. SKB har genomfört en omfattande analys av grundvattenflödessituationen i samband med konstruktion och drift av ett slutförvar (SKB R-09-19). SKB:s modelleringsresultat visar att en förändring av grundvattenkemiska förhållanden under förvarets driftsfas är en viss utspädning av grundvattnets salthalt i vissa av förvarets deponeringsområden på grund av nedträngningen av ytliga vatten.

Förekomst av syre har stor betydelse för grundvattnets redoxförhållanden under driftsfasen. SKB baserar sin analys av syrets inverkan kring att en viss volym blir instängd i en försluten deponeringstunnel och därefter kan påverka förvarets långsiktiga strålskydd och säkerhet genom ett bidrag till korrosion av kopparkapslarna. En del av syret kommer dock att förbrukas på annat sätt via mikrobiella processer involverande organiskt material och/eller mineralreaktioner i återfyllnadsmaterial, buffert eller berg. Försök vid det så kallade prototypförvaret vid Äspö bekräftar att syreförbrukning äger rum i en försluten tunnel (SKB IPR-08-01).

Efter att syret har förbrukats kan mikrobiella processer involverande organiskt material fortsätta under syrefria förhållanden. Denna fas i förvarets utveckling avser främst tiden då hela slutförvaret blivit förslutet, men reducerande förhållanden kan beroende på lokala kemiska betingelser uppstå i förslutna deponeringstunnlar även under förvarets driftsfas. Organiskt material kan tillföras vid driften av slutförvaret, men den övervägande delen anses härröra från buffert och återfyllnadsmaterial. SKB argumenterar dock för att organiskt material i buffert och återfyllnad är högmolekylärt och därför otillgängligt som kolkälla för mikrobiell sulfatreduktion.

SKB påpekar att vätgas som frigörs vid korrosion av komponenter i slutförvaret tillverkade av järn och stål som bergbultar också kan bidra till sulfidbildning. Sulfider kan även bildas från mikrobiell aktivitet med annat organiskt material som tillförs slutförvaret under driftsfasen (SKB TR-10-19). Sulfider finns också i varierande omfattning i mineralform som ursprunglig komponent i bentonitmaterial. SKB bedömer att samtliga dessa andra källor till sulfider är väsentligt mindre betydelsefulla än sulfider som möjligen kan bildas vid förbrukning av organiskt material i buffert och återfyllnad.

Den vanligaste formen av instabilitet av underjordsutrymmen av slutförvaret är endera strukturellt betingade blocknedfall och/eller spänningsinducerad spjälkning. Stabilitet av underjordsutrymmen av slutförvaret uppnås bl.a. genom att tillämpa traditionell bergförstärkning. Förstärkningsmängden bedöms vara låg som en följd av bergmassans förväntade mycket goda kvalitet. Mängder av olika material avsedda för förstärkning av bergmassan i olika delar av slutförvaret redovisas i tabell 6-6 i SKB R-08-116 samt i tabell 4-1 i SKB TR-10-18. SKB förväntar sig att tillförda cementmaterial som sprutbetong, injektering och cementkomponenter i slutförvaret påverkar pH-betingelserna i grundvattnet. För att undvika skadliga effekter av porvatten som diffunderar ut från cementmatrisen kommer cementsammansättningar med $\text{pH} \leq 11$ i porvattnet att användas i injekteringsmedel, sprutbetong och betong i närheten av deponeringstunnlar (SKB TR-11-01, avsnitt 10.2.6; SKB TR-10-18, avsnitt 5.2 och 5.3). Förhöjda pH-värden kan orsaka snabbare degradering av bentonitmaterial samt kommer i viss mån att förändra förutsättningarna för retardation av radionuklider.

Den högsta frekvensen av öppna/vattenförande sprickor kommer att påträffas i samband med berguttag av förvarets tillfarter från påslagen ned till cirka 150 m djup. Bergmassan på förvarsnivå förväntas vara relativt sprickfattig med få vattenförande sprickor med låg sprickdensitet (0,005/m). Grundvatteninflödet på förvarsdjup förväntas vara relativt litet. Sprickor i förvarstunnlar kommer att behöva tätas med injekteringsmedel för att begränsa grundvatteninflöde särskilt i samband med deformationszoner. Resultat från injekteringsanalyserna indikerar att konventionella injekteringstekniker i allmänhet kommer att vara tillräckliga för att möta inflödeskriterierna. Däremot kan tillämpning av annan injekteringsteknik behöva användas lokalt på förvarsnivån och då främst i sprickor med liten sprickvidd. Mängder av olika material avsedda som injekteringsmedel i olika delar av slutförvaret redovisas i tabell 7-4 i SKB R-08-116 samt i tabell 4-2 i SKB TR-10-18.

I deponeringshålen förväntas inga främmande material bli kvarlämnade även om spårämnen inte kan uteslutas. SKB:s bedömning är att dessa är obetydliga och inte nödvändiga att verifiera med beräkningar. De största mängderna av främmande material är enligt SKB stål och rost från vajernät, förstärkningsbultar, förankringsbultar för upphängning av ventilation, rör, kablar, rester från betongkonstruktioner och asfalt, tändkapslar och nitratsalter från sprängämnen (SKB P-09-07, tabell 4-1 och 4-2; SKB TR-10-18, tabell 4-3). Vidare omfattas även däckslitage, avgaser från dieselmotorer, avfettning- och tvättmedel, hydraul- och smörjoljor, dieselolja, batterisyra, metallspån och hårdmetall, spån från träbearbetning, korrosionsprodukter, övrigt organiskt avfall samt ventilationsluft (SKB R-09-07, kapitel 4). Mängderna av främmande material i slutförvarsanläggningen uppskattas baserat på tidigare erfarenheter av tunnelbyggen.

Behovet av konstruktionsmaterial, dvs. förstärkningar och injektering, uppskattas av SKB utifrån de förhållanden beskrivna i den platsbeskrivande modellen för Forsmark, särskilt baserat på bergspänningsnivån och frekvens av vattenförande sprickor i förvarsområdet (SKB R-08-116, kapitel 6 och 7).

3.2.8.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s uppskattningar av konstruktions- och främmande material som kommer att bli kvar i slutförvarsanläggningen efter förslutning är trovärdiga. Uppskattningarna har baserats på den platsbeskrivande modellen samt på tidigare erfarenheter från byggnation av tunnlar och underjordsutrymmen.

SSM anser att de konstruktionsmaterial och främmande material som har betydelse för slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet är järnbaserat metalliskt material, cement samt organiskt material i deponeringstunnlar och deponeringshåll. Vätgas kan utvecklas vid



korrosion av metaller. Sulfatreducerande bakterier kan använda vätgasen och organiska ämnen för att reducera sulfat till sulfider. Det framgår av SKB:s redovisning att sammanlagt cirka 350 ton metalliskt material kommer att lämnas kvar i slutförvaret efter förslutning i form av bergförstärkning (SKB TR-10-18, tabell 4-1 och 4-3). Mängderna av kvarlämnade metaller beaktar SSM i analysen av kapselkorrosion på liknande sätt som kvarvarande syre i deponeringstunnlarna (SKB TR-10-66, avsnitt 5.2.2). De organiska materialen som lämnas kvar i slutförvaret behöver också beaktas i analysen av kapselkorrosion.

En förväntad påverkan på den ostörda grundvattenkemiska situationen orsakas av tillförsel av cement i form av tätning av tunnlar och komponenter i slutförvaret som betongpluggar i ändan av deponeringshålstunnlar. Denna förändring yttrar sig främst som en lokal ökning av grundvattnets pH. SSM kommenterar i andra avsnitt inverkan av denna förändring avseende påverkan på bentonitlerans stabilitet samt påverkan på radionuklidtransport. SSM anser att SKB:s planerade användning av cement av låg pH-typ är en lämplig metod för att begränsa inverkan på omgivande grundvatten. SSM kan i övrigt konstatera att användning av optimala mängder av cement är en avvägning mellan att begränsa påverkan av grundvattnets pH och begränsa annan påverkan på den grundvattenkemiska situationen genom att åstadkomma tätning och begränsa inflödet av grundvatten i dränerade tunnlar i förvaret.

SSM anser att SKB:s redovisning kring utspädningsförlopp i samband med förvarets driftsfas är rimlig. SKB:s modellering antyder visserligen att betydande utspädningsförlopp kan ske i delar av förvarsområdet på grund av snabba transportvägar i berget (SSM2011-2426-194). Enligt SKB:s svar på SSM:s kompletteringsbegäran visar dock modelleringen att utspädningen under förvarets drifttid kan ge utspädning från ca 8 g/L till 3 g/L, men eftersom kemisk erosion förutsätter en mer omfattande utspädning ned till ca 0,3 g/L förväntas processen inte inträffa. SKB argumenterar vidare att kemisk erosion enbart skulle kunna inträffa i deponeringshål med hög vattenomsättning eftersom vattnet annars kommer tas upp av bentonitleran snarare än orsaka erosion. För platser i berget med stor vattenomsättning gäller dock att tomrum i deponeringstunnlar och deponeringshål blir vattenfyllda snabbt och leran i bufferten relativt snabbt blir återmättad, vilket innebär kort tillgänglig tid för betydelsefull kemisk erosion av bufferten. SSM bedömer därför liksom SKB att risk för förlust av buffertmaterial är inledningsvis snarare kopplad till kanalbildningserosion som är mindre beroende av grundvattenkemiska förändringar i jämförelse med kemisk erosion. SSM anser dock att grundvattnets salthaltsutveckling bör följas upp under en eventuell kommande konstruktions- och driftsfas som en del av ett kontrollprogram inriktat mot förståelse och analys av långsiktigt strålskydd och säkerhet.

SSM noterar att SKB som en del av kompletteringsförfarandet har föreslagit en ny metod för att begränsa mängden syre i deponeringstunnlarna genom att begränsa inläckage av syre genom deponeringshålspluggen från öppna transporttunnlar. SSM har också tagit upp frågan om syre kan läcka in genom sprickor i berget (SSM2011-2426-194). Dessa tänkbara transportvägar skulle kunna möjliggöra mer omfattande korrosionsangrepp på kopparkapslar i förhållande till SKB:s ursprungliga redovisning i SR-Site. Enligt SKB:s svar (SKBdoc 1437441) kan en betydande mängd syre endast läcka igenom pluggen om syre kan transporteras via diffusion i en gasfas. SKB har därför som en följd av SSM:s kompletteringsbegäran infört kravet att deponeringshålspluggen behöver vara gastät vilket innebär att ingen gasfas finns tillgänglig i den tätande sektionen av pluggen. Enligt SKB:s metod för att åstadkomma gastätethet krävs artificiell tillförsel av vatten till filterdelen så att den blir helt vattenmättad redan på ett tidigt stadium. SSM noterar att kraven på pluggens gastätethet innebär behov av arbetsmomentet att fortlöpande kontrollera vattennivån i filterdelen under hela förvarets drifttid och öppethållande för att säkerställa pluggens



säkerhetsfunktion. Behovet försvinner dock vid slutlig förslutning av förvaret när även transporttunnlarna har vattenfyllets. SSM kommenterar dessa frågor närmare i kapitel 4.

SSM konstaterar att SKB:s utredningar har visat att mikrobiell sulfatreduktion blir stimulerad av aktiviteter i samband med borrhålsuttag (SKB TR-10-39). SSM bedömer därför att det finns skäl att misstänka att sulfidhalterna skulle kunna bli högre under förvarets drifttid i jämförelse med ostörda förhållanden i berget. SKB har i ett svar på begäran om komplettering analyserat hur stor ökning av sulfidhalterna som skulle kunna förekomma och vilka konsekvenser detta skulle kunna medföra i termer av korrosionsangrepp på kopparkapslarna (SKBdoc 1437441). SSM kommenterar dessa frågor närmare i kapitel 4.

SSM anser att det finns ett behov av att kontrollera och minimera kväveföreningar i grundvatten eftersom dessa skulle kunna bidra till spänningskorrosion av koppar. Kväveföreningar väntas härröra från sprängningsarbeten i tunnlar.

SSM anser att det behövs ett program för karaktärisering och monitorering av förändringar hos grundvattenkemiska parametrar under en eventuell uppförande- och driftsfas. SKB bör också vidta åtgärder för att undvika och begränsa omfattande påverkan på den grundvattenkemiska situationen i anslutning till förvaret under uppförande- och driftperioderna. Detta innefattar en så effektiv tätning av tunnlar som bedöms vara nödvändigt, liksom begränsning av oönskade material och god kontroll av allt tillfört material.

3.2.9 Platsanpassning av slutförvaret

3.2.9.1 Underlag från SKB

Avgörande för SKB:s val av Forsmark som plats för ett slutförvar för använt kärnbränsle är Forsmarksplatsens fördelaktiga geologiska förutsättningar huvudsakligen gällande bergets värmeledningsförmåga och mängden vattenförande sprickor på förvarsdjup. Utifrån den platsbeskrivande modellen SDM ("Site Descriptive Model", SKB TR-08-05) gör SKB bedömningen att berggrunden vid Forsmark har egenskaper som är gynnsamma i perspektiv från säkerhetsanalysen SR-Site och tidigare säkerhetsanalyser. SKB har utvecklat slutförvarslayouten D2 baserat på nuvarande kunskap om bergförhållanden på djupet.

SKB framhåller att ytterligare kunskap om den valda bergvolymen kommer att inhämtas under de inledande faserna av uppförande då konstruktion av tillfartsvägar till förvaret ger direkt tillgång till djupare bergvolym. Vissa aspekter av slutförvarets utformning kan inte avgöras nu utan måste anpassas till de faktiska förhållanden som råder. Denna gradvisa platsanpassning kommer påverka förvarets utformning avseende placering, storlek och djup för deponeringsområden. Andra mer detaljerade aspekter som involverar gradvis platsanpassning är till exempel placering av deponeringstunnlar i ett deponeringsområde med avseende på sprickzoner och placering av deponeringshål med avseende på karterade sprickor och vatteninflöde.

SKB:s produktionsrapport för bergutrymmen (SKB TR-10-18) beskriver metoden som ska användas vid uppförande av berganläggningen medan SER-rapporten ("Site Engineering Report", SKB R-08-83) redogör för den logiska grunden för identifiering av lämpliga bergvolym samt djupintervall för slutförvaret. SER-rapporten är baserad på projekteringsstrategin som beskrivs i SKB:s slutförvarslayout D2 (SKB R-07-33). Mer detaljerade konstruktionsförutsättningar för den långsiktiga strålsäkerheten utvecklades i samband med säkerhetsanalysen SR-Can (SKB TR-09-22). Dessa



konstruktionsförutsättningar har använts som grund vid framtagning av säkerhetsanalysen SR-Site. Den övergripande strategin för att använda konstruktionsförutsättningarna beskrivs i Produktionsrapporten för KBS-3-förvaret (SKB TR-10-12, avsnitt 2). Här ingår uttryckligen ”platsanpassning” som en komponent i uppförandet av bergutrymmen. Berglinjerapporten (SKB TR-10-18, Tabell 2-1) definierar funktioner, egenskaper och konstruktionsförutsättningar för bergutrymmen.

SKB avser att driftsätta en dimensionering- samt projekteringsprocess med hjälp av Eurokod 7 och observationsmetoden (SS-EN 1997-1:2005). Observationsmetoden bygger på flera beslutssteg baserade på platsbeskrivande modeller som ständigt uppdateras när mer information blir tillgänglig. Observationsmetoden för projektering och uppförande kräver identifiering av de förväntade variationerna i bergmassans mekaniska beteende, identifiering av geotekniska och hydrogeologiska förhållanden som bör undvikas (så som bergutfall eller stora grundvatteninflöden) samt framtagning och tillämpning av motsvarande kontrollparametrar och kontrollprogram.

SKB redovisar i SER-rapporten en logisk grund för valet att uppföra slutförvaret i ett djupintervall mellan 450-500 m (SKB R-08-83). I detta djupintervall bedöms stora bergvolymerna uppfylla konstruktionsförutsättningarna för deponeringshål och deponeringstunnlar med hänsyn till faktorer som sprickbildning och spjälkning, bergets hydrogeologiska och hydrogeokemiska egenskaper, bergtemperatur, tillgängligt utrymme, kostnader samt miljöpåverkan i form av bergmassor som behövs schaktas ut. Utöver dessa faktorer ska valet av förvarsdjup även beakta faktorer kopplade till förvarets långsiktiga utveckling, så som potentiell frysning av buffert och återfyllnad, glacial erosion samt även risken för oavsiktliga mänskliga intrång (SKB TR 09-22, avsnitt 3.4.5). Baserat på analyser i SR-Can (SKB TR-06-09) fastställer SKB att konstruktionsförutsättningarna uppnås på ett förvarsdjup på minst 400 m. Magnituderna för de initiala bergspänningarna samt frekvensen av flacka vattenförande sprickor är berggrundsförhållanden som har stor betydelse för SKB:s beslut att placera KBS-3-förvaret på ett referensförvarsdjup på 457 m (takets för den högst belägna deponeringstunneln) och ett maximalt djup på 470 m (botten av den djupaste dräneringspumpgropen).

Beträffande placeringen av deponeringsområdena bestäms dessa i första hand av de kända deformationszonernas position i bergvolymen vid det valda deponeringdjupet. Osäkerheterna i deformationszonernas position på förvarsdjup är förknippade med upplösningen för de framtagna metoderna för deformationszonernas positionsbestämning samt observationernas täthet. SKB modellerar deformationszonerna genom att uppge den volym som innehåller en omvandlad och krossad kärna samt en övergångszon till det opåverkade berget utanför deformationszonen.

Deponeringsområden i slutförvarslayout D2 definieras som de bergvolymerna som ligger på ett större avstånd än ”respektavståndet” på 100 m från den yttre gränsen för deformationszoner med karterad längd större än tre kilometer (SKB TR-08-11). SKB har fastställt ”respektavståndet” empiriskt baserat på resultat från förenklade numeriska modelleringar av jordskalv där skjuvrörelser på sekundära sprickor som kan påverka de deponerade kapslarna beräknas. Inom respektavståndet kan skjuvrörelser större än 50 mm förekomma på relativt små sprickor, som är talrika, vilket leder till att områden undviks vid deponering. De genomförda modelleringarna har följande förenklingar: i) plana och rektangulära deformationszoner, ii) plana och cirkulära sekundära sprickor (”target fracture”) och iii) spricknätverk med regelbundna sprickor av samma diameter och standardiserade orienteringar. Genom denna typ av modelleringar har SKB beräknat rörelser på sekundära sprickor med diameter på 300 m och centrum placerad vid 200, 400 och 600 m från deformationszonens yttre gräns. Genom en extrapolering från dessa resultat argumenterar SKB för att t.ex. en spricka med diameter på 125 m som ligger med



centrum på 100 m avstånd från en flack deformationszon med längd större än fem kilometer inte kan hysa en rörelse större än 50 mm (avsnitt 4.13, 5.12, 6.2). SKB har beräknat skjuvrörelser för jordskalv med momentmagnituder mellan ca 5,5 till ca 7,5.

Tillförlitligheten för detektering av deformationszoner med reflektionsseismik och pilothål rapporteras vara hög för mer än 60 % av deformationszonerna som identifierats i den platsbeskrivande modellen (SKB R-07-45, sid. 158). SKB bedömer därför att detaljkaraktärisering relevant för tillämpningen av ”respektavstånd”, dvs. för deformationszoner längre än tre kilometer, kan utföras med användning av kända och tillgängliga undersökningstekniker tillämpade i transporttunnlarna och eventuellt i redan schaktade deponeringstunnlar (SKB R-11-14, sid. 72).

SKB:s val av deponeringstunnlarnas orientering beror på kunskapen om orienteringen för de lokala huvudspänningarna i deponeringsområdet eller i den delen där spänningarna kan antas vara homogena. SKB har tagit fram en bergspänningsmodell där orienteringen för den maximala horisontella spänningen, som också är huvudspänningen, ligger på 145° mot sydost med en uppskattad osäkerhet, inkluderande den lokala variationen, på ±15° (SKB TR-08-05).

SKB har, med hänsyn taget till ”respektavstånd” från deformationszoner och för ett c-c-avstånd mellan deponeringshålen på 6 m och 6,8 m i bergdomänen RFM029 respektive RFM045, dimensionerat ett slutförvar med plats för 7 818 kapslar enligt layout D2 (SKB R-08-116, avsnitt 4.5). När FPI/EFPC-kriteriet (SKB TR-10-21) tillämpas för att undvika sprickor som kan hysa en skjuvrörelse större än 50 mm i samband med jordskalv kommer SKB fram till att mellan 70 % och 90 % av den totala deponeringstunnelns längd är disponibel. Bortfallet orsakas av stora sprickor som observeras i tunneln och/eller i deponeringshålen. Variationsintervallet för nyttjandegraden för deponeringstunnlarna beror på osäkerheter i beskrivningen av spricknätverket som SKB använder med tre DFN-modeller som antas omfatta variabiliteten samt osäkerheten vid slutförvarsdjupet (r0-fix, TCM och OSM+TFM för sprickdomänen FFM01 respektive FFM06).

SKB uppskattar att nyttjandegraden maximalt kommer att kunna hamna på totalt runt 77 % och därmed ska slutförvaret kunna inrymma alla 6 000 kapslar (SKB R-08-116, avsnitt 4.5). En alternativ layout har även tagits fram som kan hysa 8 571 kapslar men denna gör visst intrång under området från det intilliggande Forsmarks Kraftgrupp AB:s kärnkraftverk (FKA).

SSM har efterfrågat ytterligare information från SKB angående valet av förvarsdjup vid Forsmark samt hur detta kommer att anpassas till de faktiska bergförhållandena på djupet (SSM2011-2426-83). SSM har även begärt kompletterande information till SKB inom området ”Kritiska faktorer för val av deponeringspositioner” (SSM2011-2426-84) och erhållit svar (SKBdoc 1372560, SSM2011-2426-112). Den begärda informationen avsåg kvantifiering av hur olika faktorer påverkar nyttjandegraden för deponeringstunnlarna. Dessa faktorer kan medföra att det kan finnas tunnelpartier där inga deponeringshål får placeras.

3.2.9.2 SSM:s bedömning

SSM:s granskning i detta avsnitt omfattar storskaliga faktorer som är förknippade med utformning och platsanpassning av slutförvaret för att uppnå det önskade initialtillståndet så som:

- val av deponeringsdjup
- placering av tillfartstunnlar samt schakt
- placering av centralområdet
- placering av deponeringsområden

- orientering av deponeringstunnlarna
- kapacitet för slutförvaret.

SSM redovisar småskaliga faktorer kopplade till förvarsutformningen så som inverkan av faktorer som styr val av deponeringshål på annan plats i denna rapport (avsnitt 3.1.4 och 3.1.6).

Beträffande val av förvarsdjup instämmer SSM med SKB:s resonemang kring valet av faktorer som inverkar på val av förvarsdjup så som: i) de tekniska barriärernas långsiktiga beständighet och isolering av avfallet från människor och miljö, ii) uppfyllelse av konstruktionsförutsättningar för berget genom anpassning till lokala bergegenskaper, iii) tillräckligt djup för att undvika permafrostförhållanden i slutförvaret och iv) minimera risk för oavsiktliga mänskliga intrång i slutförvaret (SSMFS 2008:37, AR till 4, 8 och 9 §§) (se komplettering SKBdoc 1372575).

SSM anser att ett flertal av faktorerna pekar på att ett ökat djup är fördelaktigt ur perspektivet långsiktig strålskydd och säkerhet, men att det slutliga valet behöver baseras på en kompromiss mellan faktorer som styr förvaret mot större respektive mindre djup. SSM anser att ytterligare tillgång till mer omfattande platsinformation under en eventuell konstruktionsfas kommer att ge bättre förutsättningar för att optimera förvarsdjupet. Förutom påverkan på slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet behöver också andra faktorer beaktas så som miljöpåverkan i samband med utschaktning av bergmassor, länshållning av tunnlarna i förvaret, driftsäkerhet och de totala kostnaderna.

SKB anför som svar på SSM:s begäran om komplettering avseende optimering av slutförvarsdjup att det valda djupet har åstadkommit genom att beakta en balans mellan faktorer så som den geotermiska gradienten, bergspänningsregimen, bergtekniska egenskaper, grundvattenflöden och geokemi. SKB hävdar att om förvarsdjupet skulle utökas med ytterligare 100 m innebär detta inte några dramatiska skillnader med avseende på beräknade grundvattenflöden och transportmotstånd för radionuklider (SKB TR-11-01, avsnitt 14.3.4 och 15.3.5). Enligt SKB skulle även en ökning av förvarsdjupet med flera hundra meter förmodligen leda till en risk som är jämförbar med den beräknade för det valda djupet på ca 500 m. Ett ökat förvarsdjup innebär därför enligt SKB endast ett marginellt bidrag till det långsiktiga strålskyddet och säkerheten efter förslutning. SKB framhåller även att förvaret på grund av de höga bergspänningarna vid Forsmark inte kan byggas på större djup än 500 m. SSM anser dock att bergspänningarna ännu inte är tillräckligt väl kända för att kunna slutligt optimera förvarsdjupet och att SKB:s bedömning möjligen har baserats på alltför pessimistiska antaganden i avseendet bergspänningar (avsnitt 3.1.3).

SSM anser att SKB:s befintliga argumentation beträffande val av förvarsdjup är ändamålsenligt i granskning av tillståndsansökan. Genomförandet av en mer ingående optimering försvåras av att vissa faktorer så som bergspänningsregimen för närvarande är osäker. SSM anser dock att SKB till stöd för ett slutligt val av förvarsdjup behöver genomföra någon form av kvantitativ optimeringsanalys med beaktande av faktorer så som: i) inverkan av syresatt och/eller utspätt grundvatten, ii) grundvattenflödet, iii) transportvägarnas längd och transportmotståndet, iv) lokala bergegenskaper och deras osäkerheter, v) inverkan av maximal permafrostdjup inklusive dess osäkerhet, vi) termisk dimensionering av slutförvaret, vii) risker kopplade till den operativa säkerheten, viii) risker för oavsiktliga mänskliga intrång, samt ix) kostnader.

Beträffande SKB:s metod för adaptivt projekteringsarbete instämmer SSM med SKB om att den föreslagna observationsmetoden enligt Eurokod 7 (SS-EN1997-1:2005) är lämplig för att anpassa slutförvarsutformningen till de varierande och delvis osäkra termiska-



hydrologiska-mekaniska-kemiska förhållanden under uppförandet av slutförvarsanläggningen. SSM noterar också att observationsmetoden med dess kontrollprogram adresserar endast risker kopplade till projekteringen och uppförande av slutförvarsanläggningen. I SKB:s fall behöver dock det kontrollprogram som är kopplat till observationsmetoden kompletteras, utöver de mätningar kopplade till uppförandet av slutförvarsanläggningen, även med andra mätningar och observationer som fastställer förhållandena för initialtillståndet hos tekniska barriärer med hänsyn till konstruktionsförutsättningar kopplade till långsiktig strålsäkerhet, och säkerhetsfunktioner för andra slutförvarskomponenter efter deras installation och fram till förslutning.

SSM bedömer att de svårigheter som kan kopplas till uppförande av ramp och schakt i målområdet ur ett bergtekniskt perspektiv kan betraktas som hanterbara. Bergarbeten under en eventuell uppförandefas behöver genomföras på ett sådant sätt så att vatteninflödet begränsas till konstruktionsförutsättningarnas krav samt att tillräckligt tidsutrymme ges för insamlingen av geofysisk, geokemisk och geomekanisk information (SKB R-07-33). SKB kommer att behöva reservera de bästa bergvolymerna till deponeringsområdena. Detta innebär att för sämre bergvolymmer som ligger utanför deponeringsområdena kan vanligt förekommande problem vid underjordsarbeten i berg inträffa i större utsträckning, så som passage av sprickzoner, vattenförande zoner samt blockstabilitet. Viss risk för stabilitetsproblem kopplade till höga bergspänningar kan heller inte uteslutas särskilt med tanke på att ramperna kommer att schaktas i alla riktningar gentemot de ostörda bergspänningarna samt att spänningskoncentrationer kan förekomma i närheten av deformationszonerna. Utformning samt placering av ramper och schakt behöver inte uppfylla särskilda krav i syfte att skydda anläggningen mot mänskligt intrång. Däremot ska dessa utrymmen förberedas så att förslutningen av slutförvaret uppfyller kraven för den långsiktiga strålsäkerheten.

Beträffande val av placering för centralområdet planerar SKB enligt layout D2 att placera det innanför ramperna (SKB R-07-33, Bilaga 1). SSM anser att SKB bör tillämpa ett visst säkerhetsavstånd mellan centralområdet och deponeringsområdena för att undvika eller minimera hydrauliska, kemiska och mekaniska störningar. Avståndet bör tillgodose behovet av att de geologiska samt tekniska barriärerna inte påverkas av läns hållning, ventilation, transporter liksom andra aktiviteter i centralområdet, i ramperna respektive i schakten.

Beträffande val av områden för placering av deponeringsområden har SSM låtit genomföra egna beräkningar avseende sekundära sprickors rörelser och kommit fram till att varken ett "respektavstånd" på 100 m från en seismisk aktiv deformationszon eller en sprickdiameter mindre än 125 m helt utesluter sekundära rörelser större än 50 mm (SSM Technical Note 2014:59; SSM Technical Note 2015:30). SSM:s beräkningar indikerar dock att SKB:s antagande om ett "respektavstånd" på 100 m är tillämpligt i ett genomsnittligt perspektiv och att sannolikheten för att "kritiska sprickradier" ska hysa sekundära rörelser större än 50 mm utanför respektavståndet är liten. Upp till ca 3 % av sprickorna i slutförvarsvolymen uppskattas ha en sekundär skjuvrörelse större än 50 mm oavsett radie och placering för ett jordskalv med magnitud på ca 5 (avsnitt 5.12.2). I förhållande till andra osäkerheter i jordskalvsberäkningarna så som mekaniska egenskaper, jordskalvmagnituder, bergspänningar, islaster, grundvattentryck samt spricknätverksegenskaper, är denna osäkerhet kring respektavståndets tillämpbarhet acceptabel. Det bör också påpekas att avsikten är att tillämpa respektavstånden i kombination med FPI/EFPC-kriteriet som undviker långa sprickor. SSM bedömer därför att principen med "respektavstånd" från deformationszonerna längre än tre kilometer kan accepteras.



SSM anser att huvuddelen av de lågmagnetiska anomalierna på markytan representerar deformationszoner. När SKB grävde diken längs med vissa lågmagnetiska lineament som är tydliga på markytan i Forsmark konstaterades att i fyra av fem undersökta fall sammanföll de magnetiska lineamenten med brantstående deformationszoner, men i ett av fem fall motsvarade lineamentet svärmar och vallar med äldre graniter och pegmatiter och inte en deformationszon (SKB TR-08-05, avsnitt 11.3.2). Osäkerheten beträffande brantstående deformationszoner gäller främst deras orientering på djupet. Resultatet från en övning som SKB genomförde med data från borrhål KFM08D pekar just på osäkerheten med att bestämma strykning och stupning för deformationszonerna när andelen tillgänglig information från markytan är liten (SKB R-08-64, tabell 4-7) (se även SSM Technical Note 2012:54).

Tre kilometer motsvarar ungefär det största avståndet till de stora regionala deformationszonerna Singö, Eckarfjärden och Forsmark i närheten av slutförvaret. SSM anser därför att även om de flesta terminationerna för olika deformationszoner med storlek mellan en och tre kilometer inte är kända kan en sammanlänkning av flera sub-parallella zoner inte leda till sammansatta längder mycket större än tre kilometer (INSITE M-09-09). Detta stöder enligt SSM:s bedömning SKB:s val att inte tillämpa ”respektavståndet” på fler zoner än de utpekade i layout D2.

I den lokala modellvolymen detekterades 12 flacka deformationszoner varav 2 med längd större än 3 kilometer, 3 med en längd mellan en och tre kilometer samt fyra deformationszoner som inte skär markytan. Flertalet av dessa upptäcktes med hjälp av reflektionsseismiska mätningar (SKB R-07-45, Bilaga 15). Vidare ligger deformationszoner huvudsakligen i den sydöstra delen av slutförvarsområdet. Frågan om förekomsten av flacka sprickzoner vid förvarsdjup är kritisk för att dessa skulle uppta stora areor inom deponeringsområden och resultera i bortval av flertaliga intilliggande deponeringspositioner vid tillämning av EFPC-kriteriet. SSM anser därför att det behövs en strategi för detektering av sådana strukturer i ett tidigt skede vid ett eventuellt uppförande av slutförvaret (SKB R-11-14, avsnitt 4.5.5) (se även SSM Technical Note 2012:54).

SSM:s externa experter föreslår ett utökat ”respektavstånd” från zoner längre än tre kilometer (SSM Technical Note 2014:07) för att ta höjd för osäkerheterna i den nuvarande deformationszonsmodellen för Forsmark (SKB TR-08-05). Osäkerheten i den rumsliga placeringen av deformationszonerna baserat på högupplösta mark- samt helikopterburna magnetiska mätningresultaten är ± 20 m (SKB R-07-45, avsnitt 3.9.2). Den kumulativa osäkerheten, inte bara för den exakta placeringen av deformationszonerna på djupet, men även för variationen av deras tjocklek och interna struktur bör beaktas. SKB konstaterar att tillförlitligheten för tjockleken hos de modellerade deformationszonerna beror helt på antalet skärningspunkter i borrhålen, antalet borrhål och deras rumsliga fördelning (SKB R-08-83, avsnitt 2.2.1). SSM anser därför att ”respektavståndet” bör ökas jämfört med 100 m om osäkerheterna för placering samt den interna strukturen hos deformationszonerna inte kan minskas genom detaljundersökningar som genomförs under en eventuell uppförandefas (se även SSM Technical Note 2014:07).

Beträffande val av orientering för deponeringstunnlar, förväntar sig SSM att betydande skillnader kan förekomma mellan olika mätningar i slutförvarsvolymen. Ett variations- samt osäkerhetsintervall för huvudspänningarna på endast $\pm 15^\circ$ kan därför bli problematiskt om upprepade mätningar i slutförvarsvolymen skulle visa på skillnader av den omfattning som detekterats vid mätningar i Äspölaboratoriet. I SKB:s Fud-program 2013 (figur 14-2) jämförde SKB resultaten från genomförda mätningar med metoderna OC (”Over Coring”) och LVDT (”Linear Variable Differential Transducer”) på 450 m nivån. Resultaten från mätningarna med LVDT-metoden skiljer sig med uppemot 30° i



orientering och 30 % i magnitud gentemot tidigare resultat från överborrningsmätningar. Liknande skillnader uppmärksammades av SSM:s externa experter som jämförde medelriktningarna för huvudspänningar i Forsmark erhållna med OC-metoden samt med hydrauliska metoder (SSM Technical Note 2014:58).

SSM:s oberoende beräkningar visar att om den tillåtna avvikelser mellan tunnelriktningen och orienteringen för den största horisontella bergspänningen är begränsad till låga värden, där $\pm 22,5^\circ$ skulle vara tillräckligt litet, är spänningsframkallade skador i berg osannolika (spjälkning samt EDZ, ”Excavation Damage Zone”). Samtidigt visar analysen att en avvikelse mellan tunnelorienteringen och största horisontalspänningen på $\pm 45^\circ$ skulle vara tillräckligt stor för att resultera i potentiella spänningsinducerade skador i berget (se SSM Technical Note 2013:35).

SKB:s konstruktionsförutsättning för layout D2 innebär en maximal avvikelse mellan tunnelriktningen och orienteringen för den största horisontella bergspänningen på 30° (SKB R-08-83, avsnitt 7.5; SKB R-08-116, avsnitt 3.6.2) med motivering att risken för spjälkning i deponeringstunneln på så sätt hålls mycket låg vilket också överensstämmer med SSM:s oberoende beräkningar. SSM anser dock att utöver osäkerheterna i bestämning av riktningen för den största horisontella huvudspänningen, finns även viss osäkerhet vid uppmätningen av riktningen för deponeringstunneln, vilken SKB inte har kvantifierat. Denna osäkerhet behöver också beaktas när man bestämmer riktningen för deponeringstunnlarna. SSM bedömer att en avvikelse mellan tunnelriktningen och riktningen för den största horisontella bergspänningen på $\pm 30^\circ$ kan vara alldeles för stor. Detta beror på att man samtidigt behöver ta hänsyn till flera faktorer som att osäkerheten i medelriktningen för den största horisontella spänningen kan vara uppemot 30° , så som mätningarna vid Äspö visar, att riktningarna för olika deponeringstunnlar inte är helt frikopplade från varandra (för att garantera att bergpelaren mellan dem ska vara minst 40 m bred, se SKB R-08-116, avsnitt 3.6.3), samt att bergspänningarna inte heller behöver vara homogena över hela deponeringsområdet.

SSM förväntar sig att SKB inför kommande steg i processen tar fram en kvantitativ analys av hur osäkerhet och variabilitet hos bergspänningsriktningen kombinerad med den möjliga variabiliteten och osäkerheten hos deponeringstunnelsriktningarna inverkar på risken för bergskador och deras omfattning. Denna analys bör även ta hänsyn till kravet på bredden för bergpelarna mellan deponeringstunnlarna samt behovet att undvika sprickor tillhörande det branta spricksetet som löper parallellt med den största horisontella bergspänningen. SKB bör även ta fram ett tillvägagångssätt för att bestämma från fall till fall om den erhållna geomekaniska informationen är tillräcklig för att bestämma riktningen för deponeringstunnlarna för den angivna platsen i slutförvaret.

Magnituder för bergspänningarna påverkar också spjälkning och bergskadepåverkan för en viss skillnad i riktning mellan deponeringstunnlarna och den största horisontella bergspänningen. SSM anser dock att SKB valt ett konservativt belastningsfall med relativt höga spänningar (SKB R-07-26) för att bedöma bergskador i deponeringstunnlarna (avsnitt 3.4.2.2). Enligt SSM:s externa experter har även de högsta bergspänningsnivåerna som SKB har antagit i sin modell inte så stor påverkan på spjälkning i deponeringstunnlarna när dessa är parallella med riktningen för största horisontella spänningen (SSM Technical Note 2014:10). SSM:s externa experter har dock påpekat att risken för kontinuerlig sprickbildning på grund av dragspänningar i deponeringstunnlarnas väggar inte har beaktats i SKB:s konstruktionsförutsättningar. Fenomenet förväntas kunna förekomma i samband med den termiska fasen av slutförvaret om SKB:s ”osannolikt höga” ostörda bergspänningsmodell förutsätts gälla. Enligt SSM:s bedömning är det trots att SKB kan ha överskattat bergspänningarna inkonsekvent av SKB att inte ha tagit



hänsyn till risk för dragspänningar i deponeringstunnlarna när konstruktionsförutsättningarna bestämdes (avsnitt 3.1.4).

Beträffande kapaciteten för slutförvaret har SKB uppskattat att mellan 100 och 200 genomförda deponeringshål av 6 000 måste förkastas före deponering p.g.a. att djupet för det spjälkade berget i hålväggarna redan efter borrarning överstiger fem centimeter (SKB R-08-116, avsnitt 8.3.3). SSM bedömer att denna omfattning är rimlig för slutförvarets driftsfas, och uppskattningen är även konsekvent med de bedömningar som gjorts av SSM:s externa experter avseende förekomst av spjälkning före slutförvarets termiska fas efter förslutning (SSM Technical Note 2014:10). SSM anser dock att SKB bör definiera spjälkningsdjupet som en konstruktionsförutsättning som ska användas som acceptanskriterium för borrade deponeringshål.

SSM har genomfört egna beräkningar av nyttjandegraden baserat på SKB:s sprickmodeller samt slutförvarslayout D2 (SSM Technical Note 2014:44). SSM:s externa expert har tillämpat FPI/EFPC-kriteriet på alla tre DFN-modellerna som beskriver spricknätverken i Forsmark och har i övrigt följt SKB:s antaganden så långt som möjligt. I denna studie beräknas nyttjandegraden bli mellan 85 % och 97 % när enbart kritiska sprickor beaktas. En utökad sprickdensitet med 25 % påverkar nyttjandegraden marginellt i ett intervall mellan 81 % och 94 % som konsekvens av justering av den rumsliga spridningen av sprickdensitet med en Gamma-fördelning (SKB R-07-46). SSM:s utredning kommer fram till en nyttjandegrad på ca 77 % för placering av deponeringshål då även bortfallet på grund av spjälkning har räknats in. SSM:s beräkningar har emellertid inte tagit hänsyn till att vissa deponeringstunnlar ligger i sprickdomän FFM06 i bergdomän RFM045 där kapselavstånden är större. Denna förenkling bör leda till att nyttjandegraden i slutförvaret minskar med ca 3 %, med beaktande av en antagen tunnallengd i FFM06 på ca 20 % av den totala tunnallengden i slutförvaret (samma proportion gäller mellan bergvolymen i RFM029 resp. RFM045; SKB R-08-116, Appendix C) samt att kapselavståndet ska vara i genomsnitt 13 % större. Ytterligare viss differens tillkommer på grund av skillnader mellan DFN-modellerna.

SKB tillstår att ytterligare ett antal faktorer påverkar nyttjandegraden så som dåligt berg, vattenförande zoner som kräver för-injektering, sprickvågighet, tjocklek hos sprickzoner, spräng- samt mekanisk skadezon i deponeringstunneln och potential för spricktillväxt. SKB har inte genomfört någon kvantitativ uppskattning av denna påverkan (SKBdoc 1372560, SSM2011-2426-112). SSM uppskattar däremot att påverkan kan vara:

- Cirka 3 % av deponeringstunnellängden kan inte nyttjas för deponering p.g.a. att bergkvaliteten, utöver deformationszonerna, är dålig (Q-index cirka ett eller mindre, SKB R-05-89).
- Cirka 10 % av deponeringstunnellängden kan inte nyttjas för deponering p.g.a. att deponeringshål inte kan placeras på deterministiska deformationszoner med längd mellan en och tre kilometer (det finns ett tjugotal sådana med bredd på ca 13 m och längd på ca 1 100 m på hela slutförvarsytan på ca tre kvadratkilometer), så kallade ”layoutbestämmande zoner” (se SKB R-07-45, Appendix 15 och 16).
- Cirka 3 % av deponeringstunnellängden kan inte nyttjas för deponering p.g.a. att i snitt två vattenförande sprickzoner måste injekteras i varje deponeringstunnel (SKB TR-10-18) och inga deponeringshål får förekomma inom 10 m från det injekterade området.

Nyttjandegraden för deponeringstunnlarna kan därför sjunka med ytterligare ca 16 %. Sannolikt kommer omständigheterna ovan inte att sammanfalla, så ett avdrag på 10 % leder till en nyttjandegrad på ca 67 % för SKB:s mest konservativa fall. I detta fall kommer endast ca 5 240 deponeringspositioner att få plats i layout D2 och ca 5 740



deponeringspositioner i den alternativa layouten jämfört med de planerade 6 000 positioner. Detta innebär att nyttjandegraden när FPI/EFPC-kriteriet har tillämpats i den faktiska anläggningen inte får understiga 87 % för att kunna rymma alla kapslar, vilket ligger inom det intervall för nyttjandegraden som SSM:s externa experter har kommit fram till. SSM bedömer att SKB:s uppskattning av slutförvarets kapacitet med avseende på långa sprickor, bergkvalitet samt deterministiska korta deformationszoner bör vara tillräckligt tillförlitlig.

Nyttjandegraden i deponeringstunnlarna påverkas även av förekomsten av bergarter med låg termisk värmeledningsförmåga som pegmatit och amfibolit, vilket SKB inte har redovisat. Pegmatitisk granit och pegmatit upptar ca 14 % av bergvolymen medan amfibolit upptar mellan 4 % och 7 % i de relevanta bergdomänerna i slutförvaret (SKB R-07-45). SSM bedömer att förekomsten av dessa bergarter i form av mindre ådror eller linser har ett begränsat inflytande på nyttjandegraden. Bortfallet av deponeringsplatser på grund av bergarter med låg termisk värmeledningsförmåga är dock inte tydliggjord i SKB:s redovisning eftersom det saknas konstruktionsförutsättningar för bergets termiska egenskaper (avsnitt 3.1.5).

Tillämpningen av EFPC-kriteriet för flacka sprickor under tunnelsulan efter borring av deponeringshål kan medföra att ca 10 % av deponeringshålen inte kan godkännas och därför behöver åtgärdas vid försegling av deponeringstunneln. SKB redovisar (SKB TR-10-16, avsnitt 5.4.4) översiktligt vilka åtgärder som vidtas för icke-godkända deponeringshål för att den långsiktiga strålsäkerheten och säkerhetsanalysens resultat inte ska påverkas negativt. Dessa anser SSM vara tillräckliga för det aktuella provningssteget.

3.2.10 Sammanfattande bedömning av bergutrymmen och deras närområde

SSM bedömer att konstruktionsförutsättningarna för bergutrymmen och deras närområde är av rimlig omfattning och detaljeringsgrad samt har tagits fram med utgångspunkt från insikter från analysen av den långsiktiga strålsäkerheten för slutförvaret i Forsmark. SSM anser att SKB inför kommande steg behöver uppdatera konstruktionsförutsättningarna för bergutrymmen och deras närområde baserat på resultaten i säkerhetsanalysen SR-Site och granskningen av denna. Därutöver bedömer SSM att SKB bör utveckla de mätmetoder som krävs så att de kan tillämpas fullt ut vid en eventuell uppförande- och driftsfas för slutförvarsanläggningen.

SSM anser att SKB genomfört ett omfattande och i huvudsak väl utfört utvecklingsarbete kring tekniker för berguttag i slutförvaret. Eftersom SKB i huvudsak planerar att använda etablerade och beprövade metoder för berguttag i deponeringstunnlarna och deponeringshål kan SKB:s metoder anses vara genomförbara. SSM bedömer att kravet på skonsam sprängning ska behållas för att så långt det är rimligt minimera förekomsten av sprängskadezonen i berget runt deponeringstunnlarna. På samma sätt kan vertikal fullortsborring anses vara en lämplig metod för att minimera skadezonen i berget runt deponeringshålen.

Av betydelse för den långsiktiga strålsäkerheten är att samtliga tillämpliga konstruktionsförutsättningar kan verifieras. SSM anser att det kan vara svårt att verifiera krav kopplade till begränsad vattengenomsläpplighet under deponeringstunnels sula och även till den konnekterade transmissiviteten integrerad utefter deponeringshålsväggen. Kontroll av skadezonen runt bergutrymmen erfordrar tillämpning av en kombination av kontroller av sprängning, lokal geologi, utrymmenas geometri samt den resulterande sprickbildningen i berget orsakad av berguttag samt bergspänningskoncentrationer.



Tillämpning, vidareutveckling och verifiering av dessa kontrollmetoder bör göras på förvarsdjup i Forsmark i kommande steg i processen.

SSM anser att SKB bör inkludera demonstrationstunnlar på förvarsdjup i layouten för slutförvaret. Dessa tunnlar bör användas för utveckling av metoder, etablering av empiriska samband samt bestämning av den optimala skalan för framtagning av de termiska egenskaperna hos berget i Forsmark. Dessa tunnlar bör även användas för experiment och fullskaledemonstrationer kopplade till verifikation av bergskadezon och spjälkningsfenomen respektive analys av acceptanskriterier för deponeringshål.

SSM bedömer överlag att SKB har en lämplig strategi för termisk analys och dimensionering av ett slutförvar för använt kärnbränsle med acceptabla metoder för temperaturberäkningar, bestämning av termiska egenskaper samt termisk dimensionering. Beträffande bergmassans termiska egenskaper och modeller för temperaturutveckling anser SSM att de resultat som presenteras i ansökan är tillräckliga för tillståndsgranskningen. SKB har presenterat godtagbara resultat som visar att den valda marginalen på 5°C är lämplig för att uppnå konstruktionsförutsättningen att bufferttemperaturen behöver vara lägre än 100°C.

SSM anser att SKB:s metod för att minimera konsekvenser av ett eventuellt jordskalv med hjälp av användning av särskilda acceptanskriterier för placering av deponeringshål är godtagbar för prövningen av tillståndsansökan. Användning av dessa kriterier bör vara praktiskt möjligt och bör vara ett rimligt effektivt angreppssätt för att minimera risken för kapselskada. Enligt SSM:s bedömning är dock de nuvarande kriterierna vare sig helt tillförlitliga eller optimala för att identifiera kritiska positioner i berget, varför det kvarstår ett behov av fortsatt utvecklingsarbete. SSM anser vidare att SKB:s metod att med hjälp av bergmekaniska modeller beräkna den kvarstående risken efter användning av acceptanskriterier för deponeringshål i några avseenden är allt för förenklad och därför behöver vidareutvecklas. SSM anser att SKB bör ta hänsyn till mer realistiska spricknätverk av sekundära sprickor för jordskalvssimuleringar samt utveckla simuleringsverktyg som på ett mer realistiskt sätt kan representera den komplicerade, icke-rätlinjiga deformationszonsmodell som SKB har tagit fram för platsen.

SSM anser att SKB gjort grundliga studier kring förekomst och minimering av bergskadezon. SSM anser dock att SKB i konstruktionsförutsättningarna inte bör utesluta förekomst av en sammanhängande bergskadezon för de planerade deponeringstunnlarna i Forsmark i avvaktan på mer information. Det finns för närvarande resultat som visar att bergskadezonen kan begränsas med lämpliga metoder för bergschaktning, men inget tillförlitligt belägg för att en bergskadezon helt kan undvikas.

SSM anser att SKB för tillståndsansökan genomfört en godtagbar analys av spjälkningsrisken för deponeringshål med omfattande mätningar och storskaliga in-situ försök. Enligt SSM:s bedömning är också SKB:s bergmekaniska modellering för att utröna hur spjälkningsrisken påverkas under olika omständigheter acceptabel. SSM anser dock att inför en eventuell fortsättning av SKB:s program kommer ytterligare insatser behövas så som fullskaliga försök vid Forsmark, insamling av platsspecifik data, verifiering av konnekterad transmissivitet i deponeringshållsväggar samt en uppdatering av den probabilistiska spjälkningsmodellen. Försök i en demonstrationstunnel bör styrka sambandet mellan den faktiska spjälkningshållfastheten på plats och den observerade förekomsten av spjälkning så att resultaten kan tillämpas med hög tilltro i andra delar av slutförvaret.

SSM konstaterar att det långa öppethållandet av transporttunnlar m.m. under förvarets driftsfas kan påverka grundvattnets salthalt, innehåll av syre, samt sulfid. Det faktum att

omättade förhållanden föreligger i delar av förvaret innebär risk för transport av sulfid via gasfasen, vilket sker snabbare än via vattenfasen. SSM anser att det behövs ett program för karaktärisering och monitorering av förändringar hos grundvattenkemiska parametrar under förvarets uppförande och drifttid. SKB bör också vidta åtgärder för att undvika och begränsa omfattande påverkan på den grundvattenkemiska situationen i anslutning till förvaret under uppförande- och driftperioderna. Detta innefattar så effektiv tätning som möjligt, liksom begränsning och god kontroll av allt tillfört material. För att minimera sulfidkorrosion orsakad av tillförd bentonitlera kan ytterligare acceptanskriterier behöva införas, antingen kopplat till svavelinnehåll eller innehåll av organiskt material.

SSM anser att SKB:s befintliga argumentation beträffande val av förvarsdjup är ändamålsenlig i detta skede av prövningen. Genomförandet av en mer ingående optimering försvåras av att vissa faktorer så som bergspänningsregimen för närvarande är osäker. SSM anser dock att SKB till stöd för ett slutligt val av förvarsdjup behöver genomföra någon form av kvantitativ optimeringsanalys. Beträffande SKB:s metod för adaptivt projekteringsarbete instämmer SSM med SKB om att den föreslagna observationsmetoden är lämplig för att anpassa slutförvarsutformningen till de förhållanden som konstateras under ett uppförande av slutförvarsanläggningen. I SKB:s fall behöver kontrollprogrammet kompletteras med mätningar och observationer som fastställer förhållandena för initialtillståndet hos tekniska barriärer med hänsyn till konstruktionsförutsättningar kopplade till långsiktig strålsäkerhet, och säkerhetsfunktioner för andra slutförvarskomponenter efter deras installation och fram till förslutning. SSM anser att det behövs en strategi för detektering av flacka sprickzoner i ett tidigt skede vid uppförande av slutförvaret. SSM förväntar sig att SKB inför kommande steg tar fram en kvantitativ analys av hur osäkerhet och variabilitet hos bergspänningsriktningen kombinerat med variabilitet och osäkerhet hos deponeringstunnelsriktningarna inverkar på risken för bergskador. Beträffande nyttjandegrad bedömer SSM att SKB:s uppskattning av slutförvarets kapacitetsinskränkning pga. långa sprickor, låg bergkvalitet samt deterministiska korta deformationszoner bör vara tillräckligt tillförlitlig.

3.3 Bränsle

SKB:s planerade inkapslingsanläggning och slutförvar har utvecklats för att ta om hand såväl det befintliga använda kärnbränslet som nu mellanlagras vid Centralt mellanlager för använt kärnbränsle (Clab), samt det som tillkommer från fortsatt drift av de nuvarande svenska kärnkraftverken. Av stor betydelse för utvärdering av slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet är kännedom om bränslets innehåll av radioaktiva ämnen, liksom dess egenskaper. En god kännedom om bränslets aktivitet i slutförvaret har betydelse för kvantifieringen av radionuklidernas frigörelse och spridning i grundvattnet. Den förväntade långsamma frigörelsen av radionuklider från bränslet utgör en form av barriärfunktion som har påverkan på slutförvarets långsiktiga strålskydd och säkerhet.

SKB har formulerat tekniska krav på kombinationen av bränsleelement som placeras i en kapsel för att undvika negativ påverkan på barriärfunktioner för de tekniska barriärerna kapsel och buffert, samt för att tillgodose behov av personstrålskydd under drift av anläggningarna. I detta avsnitt granskas bränslets initialtillstånd i kapseln samt tillhörande tekniska krav. Följande frågor ingår:

- tekniska krav på använt kärnbränsle i en kapsel
- typer och källor av använt kärnbränsle
- driftparametrar av använt kärnbränsle
- bränslerester och dess hantering
- beräkning av aktivitetsinventarium
- beräkning av resteffekt
- beräkning av stråldos

- optimering för inkapslingssimulering.

Frågor om kriticitet och andra driftrelaterade frågor redovisas även i granskningsrapport *Inkapslingsanläggning och Clab* (SSM2015-279-21) och frågor om kärnämneskontroll redovisas huvudsakligen i kapitel 6 i granskningsrapport *Uppförande och drift av slutförvarsanläggning* (SSM2011-1135-19).

SKB redogör sammanfattningsvis för initialtillståndet för bränsle i avsnitt 5.3 i SKB SR-Site huvudrapport och mer ingående i Bränslerapport (SKB TR-10-13) med tillhörande referenser.

På SSM:s begäran har SKB tagit fram kompletterande information om ett antal frågor kopplat till använt kärnbränsle. Följande svar från SKB har inkommit till SSM:

- Svar på SSM:s begäran om förtydligande information angående redovisning om bränslerester från Studsviksanläggningen (SKBdoc 1396040, 1395837 och 1395834).
- Svar på SSM:s begäran om förtydligande information angående redovisning om bränslets initialtillstånd med hänsyn till förlängda reaktordrifttider (SKBdoc 1440538).

3.3.1 Tekniska krav på inkapslat använt kärnbränsle

3.3.1.1 Underlag från SKB

SKB har formulerat följande krav för att tillgodose den långsiktiga strålsäkerheten för slutförvaret samt behov av personstrålskydd under slutförvarets drift:

- Den sammanlagda resteffekten från bränsle i en kapsel får inte överstiga 1 700 W. Detta för att säkerställa att temperaturen i bufferten inte överskrider 100° C, samt för att minimera omfördelning av bergspänningar genererad av värmen från det använda bränslet.
- Bränslets egenskaper och geometri i en kapsel ska utformas för att säkerställa att den effektiva multiplikationsfaktorn för neutronreaktioner aldrig överstiger 0,95, så att kriticitet kan undvikas även om vatten tränger in i kapseln.
- Dimensioner av bränsleelement, med eventuella förändringar efter utbränning, ska kunna rymmas i de specificerade hålen i BWR- respektive PWR-segjärnsinsatser. Bränslerester måste kunna packas i containrar som i sin tur kan rymmas in i hålen i antingen en BWR- eller en PWR-segjärnsinsats.
- Mängd av vatten kvar i en försluten kapsel får inte överstiga 600 g, samt atmosfären i en försluten kapsel ska utgöras av minst 90 % argon. Dessa krav motiveras med behovet av att minimera korrosion av kopparkapsel och segjärnsinsats.
- Stråldosrat på ytan av kapseln får inte överstiga 1 Gy/h, dels för att minska strålningens påverkan på kapselkorrosion, dels för att minimera personalens stråldos vid hantering av kapseln.

Till stöd för verifiering, kontroll och genomförande av de tekniska kraven på bränslet har SKB redovisat geometri och egenskaper hos andra material i bränsleelementen än själva bränslet i SKB TR-10-13, avsnitt 2.3 och 3.1.3, samt i bilagor 2 och 3. Beräkningar av aktivitetsinventarium och resteffekter (SKBdoc 1221579) samt stråldos (SKBdoc 1077122) har också redovisats. Redovisning av inkapslingssimulering för att uppfylla krav på att minimera antalet kapslar i slutförvarsanläggningen återfinns i SKBdoc 1221567.



3.3.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att de tekniska krav som ställts på bränsle i kapseln är vetenskapligt välgrundade och att kraven går att kontrollera och uppfylla. Flera av SKB:s tekniska krav kopplar till bränslets aktivitetsinventarium som kan beräknas med etablerade metoder.

SSM:s bedömningar baserar sig på följande observationer och motiveringar:

Resteffekt och ytdosrat avgörs av inventariet av radionuklider samt geometrin av inkapslade material i kapseln. Ytdosrat beror på materialens attenueringsförmåga för joniserande strålning. Utvecklingen av dessa egenskaper beror även på avklingningstiden för bränslet.

Det framgår i följande avsnitt att SKB har genomfört och redovisat beräkningar som underlag för att säkerställa uppfyllelse av de egna kraven (avsnitten 3.3.5, 3.3.6, 3.3.7). SSM anser att SKB:s redovisning och beräkningsresultat är ändamålsenliga och trovärdiga för att underbygga kontrollen av kravuppfyllelsen.

För geometrin av bränsleelement har SKB tagit fram den största längden hos vissa bränsleelement med inducerad längdökning, samt snittarean av transporttunnor som rymmer bränsleelement vid transport från kärnkraftverken till mellanlagret Clab. SSM anser att SKB redovisat ett tillräckligt underlag som visar hur krav på bränsleelementens dimensioner kan uppfyllas.

Granskning gällande initialtillstånd för bränslerester och optimering för inkapslingssimulering redovisas i avsnitt 3.3.4 respektive 3.3.8.

3.3.2 Typer och källor av använt kärnbränsle

3.3.2.1 Underlag från SKB

Merparten av kärnämnet och det radioaktiva avfallet som ska slutförvaras enligt SKB:s ansökan utgörs av använt kärnbränsle från lättvattenreaktorer i Sverige. I det använda kärnbränslet ingår såväl det befintliga använda kärnbränslet, samt det som tillkommer från den fortsatta driften i de nuvarande svenska kärnkraftverken (SKB Ansökan, 2011, avsnitt 1.3). Planen har varit att reaktorerna i Forsmark och Ringhals drivs i 50 år och reaktorerna i Oskarshamn i 60 år när ansökan lämnades in år 2011 (SKB Ansökan, 2011, avsnitt 1.2). Redovisning av mängd och egenskaper för bränslet återfinns i avsnitt 2.2.1 i SKB TR-10-13.

På senare tid har kärnkraftverken reviderat sin plan för drifttiderna så att för alla reaktorerna i Forsmark och Oskarshamn, liksom reaktorerna Ringhals 3 och 4 gäller en drifttid på 60 år, medan drifttiden för Ringhals 1 och 2 fortfarande planeras till 50 år (SKB Art 819 Fud-program, 2013, kapitel 23). SSM begärde kompletterande information med uppdatering av bränslets initialtillstånd med hänsyn till förlängda reaktordrifttider (SSM 2011-2426-141). SKB inkom med kompletteringen 2014-07-03 (SKBdoc 1440538). Det framgår av SKB:s svar att de i Fud-program 2013 redovisade förlängda reaktordrifttiderna endast avser tagna beslut gällande planeringsförutsättningar för investeringar. Några formella beslut om förändrade drifttider har inte fattats. Mängden av bränsle i det nya driftscenariot är dock något högre (12 564 ton) än i SKB:s ansökan (cirka 12 000 ton). Antalet kapslar kan också bli 6 200 istället för cirka 6 000 som uppskattades i ansökan. Det framtida bränslets utbränningsgrad kommer generellt sett att vara högre än idag, men utbränningsgraden kommer fortfarande hållas under det dimensionerade gränsvärdet i ansökan. Krav på kapselns resteffekt och ytdosrat kommer inte att påverkas av förändrade reaktordrifttider.

Förutom den ovan nämnda vanligaste typen av kärnbränsle, finns också andra typer av bränsle som bl.a. uppkommit under Sveriges tidiga kärnenergiprogram. I dessa typer ingår 222 bränsleelement från Ågesta (naturligt eller svagt anrikt uran), ”Swap MOX (eng. Mixed U/Pu OXide)” bränsle av BWR- och PWR-typ (184 respektive 33 bränsleelement), bränslerester från Studsvik, samt skadat bränsle från kärnkraftsreaktorerna. Mängder och egenskaper för dessa typer av bränsle redovisas i avsnitt 2.2.2 i SKB TR-10-13 samt i SKBdoc 1339613, 1396040 och 1395837.

3.3.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s specifikation av mängder och egenskaper för det befintliga använda kärnbränslet är tydlig och komplett, samt har gett ett bra underlag för hantering av bränslets initiala tillstånd i säkerhetsanalysen. Bedömningen baserar sig huvudsakligen på att SKB:s redovisning har gått igenom den historiska utvecklingen av det svenska kärnenergiprogrammet och därför är heltäckande. Dessutom har SSM konstaterat (SSM:s samlade strålsäkerhetsvärdering av Svensk Kärnbränslehantering AB 2009-2011, SSM2011-2957-5; SSM:s samlade strålsäkerhetsvärdering av Svensk Kärnbränslehantering AB 2011-2012, SSM2013-504-2) att det finns ett fungerande system för kärnämneskontroll på Clab med information av antal bränsleelement, typ, m.m.

SSM bedömer också att SKB:s prognos av typ och mängd av det använda kärnbränsle som tillkommer från den fortsatta driften av de nuvarande reaktorerna är baserad på drifterfarenheter och rimliga resonemang och är därför trovärdiga. Osäkerheter föreligger dock med tanke på att totala drifttider för reaktorerna med nödvändighet bygger på antaganden. SSM anser också att vissa andra osäkerheter i allmänhet föreligger kring prognosen för använt kärnbränsle, och i synnerhet kring prognosen för bränslerester (avsnitt 3.3.4).

SSM anser att SKB regelbundet behöver kontrollera och justera prognosen av typ och mängd av det använda kärnbränslet som ska slutförvaras. I samband med sådana justeringar behöver hela eller delar av säkerhetsanalysen uppdateras med beaktande av nytillkommen information.

SSM anser att kärnkraftverken genom SKB behöver anmäla ändringar av drifttid och driftförhållanden av de befintliga reaktorerna till SSM om sådana ändringar har stor påverkan på typ, mängd och andra egenskaper för använt bränsle som ska slutförvaras.

3.3.3 Driftparametrar av använt kärnbränsle

3.3.3.1 Underlag från SKB

SKB redovisar i avsnitt 2.1.1 i SKB TR-10-13 att den maximala anrikningen av bränsle som ska slutförvaras är satt till 5 % samt att genomsnittlig utbränningsgrad för ett bränsleelement är begränsad till 60 MWd/kg U för uranoxidbränsle (UOX) från PWR- och BWR-reaktorer, eller 50 MWd/kg HM (” Heavy Metal”) för blandat oxidbränsle (MOX) av BWR-typ.

Driftparametrar såsom materialegenskaper, initial anrikning och utbränningsgrad hos det använda kärnbränslet har sammanfattats i avsnitt 2.2.1 och 2.2.2 samt i bilagor A och B (SKB TR-10-13). Parametrar för bränslerester redovisas i SKBdoc 1395837.

Detaljerad informationen om bränslets driftparametrar förvaras vid kärnkraftverken samt vid Clab.



3.3.3.2 SSM:s bedömning

Driftparametrar för bränsle är viktiga utgångspunkter för beräkningar av exempelvis radionuklidinventarium, resteffekt samt strålningsstyrka i olika kapslar. Det är därför viktigt att relevant och korrekt information finns tillgänglig vid detaljerade simuleringar av inkapslingsprocesserna samt vid tillsyn av kärnämneskontrollen vid slutförvaret. Som en förberedelse för kärnämneskontroll i slutförvarsanläggningen har SSM genom ett uppdrag till en extern expert kartlagt vilken information som finns framtagen avseende det bränsle som ska placeras i slutförvaret (SSM Technical Note 2014:50). Parametrar som kontrollerades var bland annat:

- bränslets identitet
- bränslets typ, initiala vikt och anrikning
- bränslets geometri
- datum på sista uttag från reaktor
- utbränning
- driftdata (för varje cykel)
- stavbyte
- skada, läckage
- styrtavlar (PWR)
- transportdata (till Clab).

SSM:s slutsats med utgångspunkt från stickprovskontroller är att erforderliga data med bra kvalitet finns tillgängliga. All data för bränsle som togs ut ur reaktorerna innan 1980 finns dock inte elektroniskt tillgängliga.

SSM bedömer att SKB:s redovisning av driftparametrar av använt kärnbränsle med stöd av kärnkraftverkens och Clabs datasystem har gett ett tillräckligt bra underlag för beräkningar av exempelvis radionuklidinventarium, resteffekt samt strålningsstyrka i olika kapslar.

SSM anser dock att viktiga driftparametrar hos bränsleelementen, såsom utbränningsgrad och linjär effekttäthet behöver kunna verifieras och bekräftas experimentellt innan bränslet inkapslas i kopparkapslarna. Det är svårt att helt utesluta att driftsinformation på grund av den mänskliga faktorn registreras felaktigt. SKB behöver därför vidareutveckla tillgängliga verifieringsmetoder som ett komplement till databasinformation.

3.3.4 SKB:s hantering av bränslerester

3.3.4.1 Underlag från SKB

I referensscenariot redovisar SKB att bränslerester som kommer från undersökningarna vid Studsviksanläggningen inkapslas separat i sju kapslar (SKB TR-10-13, avsnitt 2.1.2 och 6.2.4). Vissa bränslerester innehåller organiskt material (epoxigjutet) som kan bilda gas när de bestrålas, vilket kan leda till tryckstegring inuti kapseln. SKB anser därför att bränsleresterna inte ska inkapslas tillsammans med andra bränsleelement som har relativt hög resteffekt (upp till 1650 W). De bör istället placeras i separata kapslar (SKB TR-10-13, avsnitt 4.4.1). Kapslarna som innehåller bränslerester har därför inte ingått i inkapslingssimuleringar med optimering av resteffekt och strålning (SKBdoc 1221567, avsnitt 5.1) utan hanterats separat (SKBdoc 1395834).

Den största delen av bränsleresterna förekommer som rester av vanliga UO₂-bränslestavar, med och utan inkapslingen kvar. Ungefär 0,04 % av detta bränsle antas ha föroxiderats genom luftkontakt vid Studsviks anläggningar. Denna typ av bränslerester benämns föroxiderat vanligt bränsle. Dessutom förekommer även pulver som bildades då

det metalliska bränslet från KTH-R1-reaktorn oxiderades (benämns oxidpulver av KTH-R1-bränsle) samt epoxiingjutna bränslefragment (benämns epoxiingjutet bränsle).

Inför transport packas bränsleresterna i cylindriska hylsor, vilka i sin tur packas i cylindriska tätsvetsade heliumfyllda primäremballage. Tolv primäremballage packas in i en transportbox, vilken har samma dimensioner som ett PWR-element. För varje primäremballage anges bl.a. mängd uran, mängd U-235, medelanrikning, anrikningsintervall, utbränning, aktivitet, resteffekt samt kemisk form (föroxiderat vanligt UO₂-bränsle; epoxiingjutet bränsle; oxidpulver av KTH-R1-bränsle) (SKBdoc 1395834, 1395837). I tabell 1 (SKBdoc 1395834) redovisas även hur bränsleresterna kommer att inkapslas i de sju särskilda kapslarna för bränslerester.

Enligt SKB:s planering kommer 33 primäremballage med det epoxiingjutna bränslet att kapslas in i en kapsel av PWR-typ. Det framgår av redovisningen att cirka 38 kg uran ingjutet i 81 kg epoxi förväntas behöva inkapslas.

I en annan kapsel kommer fyra primäremballage att fyllas med oxidpulvret av KTH-R1-bränsle tillsammans med det föroxiderade bränslet i ett av kapselns hål. Resten av hålen i kapseln fylls med det föroxiderade bränslet (SKBdoc 1395834). Oxidering av det metalliska bränslet från KTH-R1-reaktorn med partikelstorlekar på mindre än 1 mm har visats att vara så gott som komplett (endast 0,05 g finns kvar i metallisk form i en total mängd på cirka 43 kg pulver, SKBdoc 1200854).

På SSM:s begäran tog SKB fram en komplettering med en uppskattning av riskbidraget från de sju kapslar som innehåller bränslerester (SKBdoc 1395834). Det framgår av dokumentet att riskbidraget från bränsleresterna kan uppgå till några procentenheter av den totala risken från bränslet i hela slutförvaret. Riskbidraget uppskattas genom att anta ett omedelbart utsläpp av den föroxiderade delen av vanligt UO₂-bränsle, de epoxiingjutna bränslefragmenten, samt det oxidpulver av KTH-R1-bränsle, efter att primäremballagen har blivit penetrerade. Tiden mellan penetrering av primäremballagen och kapselbrott antas pessimistiskt vara ett tusen år. Övriga bränslerester antas ha samma upplösningshastighet som vanligt bränsle, dvs 10⁻⁷ andel per år. Dessutom har hänsyn tagits till förhållandet mellan aktivitetsinventariet i bränsleresterna och inventariet i det vanliga bränslet. Riskbidraget orsakas till allra största delen av bidraget från de epoxiingjutna bränslefragmenten. Föroxiderat vanligt UO₂-bränsle bidrar också till en viss andel av risken. Dessa resultat innefattar ett stort mått av pessimism då både andelen föroxiderat och andelen epoxiingjutet material antas lösas upp så gott som omedelbart i kontakt med vatten.

3.3.4.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har tagit fram en godtagbar plan för att kapsla in bränslerester separat. SSM instämmer med SKB att upplösningshastigheten i vatten av bränsleresterna med det föroxiderade vanliga UO₂-bränslet, det epoxiingjutna bränslet samt det pulverformiga oxiderade bränslet kan vara betydligt högre än för det vanliga använda kärnbränslet. SSM bedömer liksom SKB att det långsiktiga riskbidraget från bränslerester är mycket lågt i förhållande till riskbidraget från andra kapslar med vanligt kärnbränsle.

SSM bedömer att SKB:s redovisning kring säker hantering av oxidpulvret från KTH-R1-bränslet (SKBdoc 1200854) är trovärdig. Bedömningen är baserad på att oxideringen av det metalliska uranbränslet är i stort sett komplett och att nästan inget metalliskt uran finns kvar i bränslet. SSM anser dock att om ytterligare KTH-R1-bränsle förutom det som redovisas vid transport 20 kommer att slutförvaras, så behöver SKB bekräfta att bränslet är i det närmaste komplett oxiderat innan det hanteras i Clink-anläggningen. Pyrofor-självantändande uranhydrid kan produceras när metalliskt uran oxideras och vätgas som



utvecklas under oxidationen kan reagera med det kvarvarande metalliska uranet (Kitzes, 1950).

SSM instämmer med SKB att gasutveckling från degradering av epoxigjutet material endast ger upphov till en försumbar risk för kapselbrott med tanke på den begränsade mängden av epoximaterial i en kapsel. Bedömningen utgår från ett G-värde (strålningskemiska utbytet) för gasutveckling vid radiolys av organiskt material i den fasta fasen (Anderson m.fl., 2000, avsnitt 3.3.4). Även när hänsyn tas till andra mindre sannolika mekanismer för degradering av epoximaterialet är risken för kapselbrott p.g.a. gasutveckling fortfarande väldigt liten.

3.3.5 Beräkning av aktivitetsinventarium

3.3.5.1 Underlag från SKB

Beräkningar av aktivitetsinventarium redovisas i avsnitt 6.2 i SKB TR-10-13 samt i SKBdoc 1221579 och SKBdoc 1179234.

Utbränningsgrad är den bränsleparameter som har störst inverkan på aktivitetsinventariet för radioaktiva ämnen i använt kärnbränsle. Utbränningen avgör mängden av nukleära fissioner och neutronstrålning som har påverkat bränsleelementet i reaktorn och därmed innehållet av fissionsprodukter, aktiveringsprodukter samt transuraner. Andra parametrar hos bränslet som har betydelse för aktivitetsinventariet är såväl bestrålning, linjär effekttäthet och avklingningstid, som bränsletyp, t.ex. UOX (uranoxid) respektive MOX (blandade oxider) (SKB TR-10-13, avsnitt 6.2.1).

Aktivitetsinventarium för radionuklider i bränslematrisen beräknas med en utbränningsmodul Origen-S ("Oak Ridge Isotope GENERation") i datorprogram Scale 5.1 ("Standardised Computer Analyses for Licensing Evaluation") (SKBdoc 1179234 och 1221579). Scale är en omfattande modellerings- och simuleringssvit för kärnsäkerhetsanalys och design. Scale utvecklas och underhålls av Oak Ridge National Laboratory under kontrakt med US Nuclear Regulatory Commission, USA:s energidepartement, och National Nuclear Security Administration. Scale används för processimulering och design inom områden reaktorfysik, kriticitetssäkerhet, strålskydd och karakterisering av använt bränsle i kärntekniska anläggningar samt vid transport eller förvaring av använt kärnbränsle (ORNL, 2006).

Aktivitetsinventarium för aktiveringsprodukter i bränsleelementens konstruktionsmaterial samt i styrstavar beräknas med beräkningsprogrammet IndAct. IndAct har utvecklats av Studsvik ALARA Engineering för att övervinna vissa precisionssvårigheter hos Origen-S. I IndAct har neutronflödestätheter differentierats utifrån var komponenten ifråga är placerad i härden.

Aktivitetsinventarium för aktiverade korrosionsprodukter "crud" ("Chalk River Unidentified Deposit") beräknas med CrudAct, som också har utvecklats av Studsvik ALARA Engineering. Aktinidkontamination i bränslecrud beräknas utifrån riktvärden definierade i kärnkraftverkens bränsleskadestrategi (SKBdoc 1179234).

Både IndAct och CrudAct har tidigare använts av de svenska kärnkraftverken i olika moderniseringsprojekt (Lundgren, 2006a; 2006b; 2008a; 2008b).

I ansökan har SKB använt ovan nämnda beräkningsprogram för att fastställa aktivitetsinventarium för kapslar med åtta typiska kombinationer av olika bränsletyper. Dessa benämns BWR-låg, BWR-medel, BWR-hög, BWR-kombination a, BWR-



kombination b, BWR-MOX och BWR-inte fylld samt PWR-låg, PWR-medel, PWR-hög, PWR-kombination a, PWR-kombination b och PWR-MOX (SKBdoc 1221579, avsnitt 4.2). Resultaten av aktivitetsberäkningar redovisas i SKBdoc. 1221579 respektive SKBdoc 1179234 och sammanfattas i bilagor till SKB TR-10-13. Den totala radioaktiviteten i en kapsel faller oavsett kapseltyp inom en storleksordning med ett ungefärligt medelvärde på 1016 Bq så länge resteffekten från kapseln begränsas till mindre än 1 700 W.

Osäkerheter i aktivitetsberäkningar med beräkningskoderna Origen-S och CASMO-4 har tidigare visats vara ca 20 % för aktinider och ca 12 % för fissionsprodukter (SKB R-99-74).

Validering av SAS2/Origen-S med hänsyn till beräkning av isotophalter har gjorts av DeHart och Hermann (1996), Hermann och DeHart (1998), samt Hermann m.fl. (1995) genom jämförelse mellan beräkningsresultat och experimentellt uppmätta data. Beräkningarna underskattar halter av U och Pu med 1-2 %. För övriga aktinider underskattas halterna med 11 % för PWR-element medan de överskattas med 6 % för BWR-element. För fissionsprodukter görs en underskattning med 1 % för PWR och en överskattning med 7 % för BWR. Avvikelsen för enskilda nuklider kan emellertid vara mycket större, exempelvis för Sm-149 (en stabil isotop) i PWR-bränsle är avvikelsen 51 %, och för Eu-155 (sönderfaller till stabilt Gd-155 med en halveringstid på 4,8 år) i BWR-bränsle är avvikelsen 74 % (SKBdoc 1221579, avsnitt 4.6). Både Sm-149 och Gd-155 har relativt stora neutroninfångningstvärnsnitt.

Osäkerheten i beräkningar av neutroninducerad aktivitet i konstruktionsmaterial och bränslecrud, t.ex. Co-60, uppskattas till en faktor 2. SKB rekommenderar multiplikation med en faktor 2 för att erhålla en konservativ källterm för crud (SKBdoc 1179234, avsnitt 4.8).

3.3.5.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s beräkning av aktivitetsinventarium för aktinider och fissionsprodukter i bränslematrisen är ändamålsenlig och att beräkningsresultaten är trovärdiga. Beräkningarna har enligt SSM:s bedömning gett ett godtagbart underlag för hantering av resteffekt (avsnitt 3.3.6), för beräkning av ytdosrat (avsnitt 3.3.7), och för analysen av slutförvarets långsiktiga säkerhet.

SSM:s bedömning baserar sig på att de aktuella beräkningsprogrammen för aktinider och fissionsprodukter ingår i en svit av det i branschen standardiserade programmet (Scale) som utvecklats och underhållits av ett nationellt laboratorium i USA. Viktiga parametrar som behövs i beräkningarna såsom neutrontvärnsnitt, fissionsresonansspektrum och sönderfallskonstanter har blivit utvärderade och gradvis reviderade. Beräkningsresultat har validerats genom att jämföra teoretiska modelleringsresultat med experimentellt fastställda data. Osäkerheter i beräkningar varierar visserligen något, men är i de flesta fall och för tillämpningarna i dosberäkningar i den långsiktiga säkerhetsanalysen för slutförvaret fullt acceptabla.

SSM bedömer att SKB:s beräkning av inducerade radionuklider i bränsleelementens konstruktionsmaterial, samt aktiverade radionuklider i korrosionsprodukter från konstruktionsmaterial också är trovärdiga. SSM anser även att de beräkningsprogram som utvecklats i Sverige är en anpassning av Scale-programpaketet för att tillgodose SKB:s speciella användning snarare än en helt ny utveckling. Grundläggande principer behålls i anpassningen och parameterdata delas mellan de anpassade programmen och det ursprungliga programmet.



SSM är positiv till att SKB även har uppskattat osäkerheter i bränslets aktivitetsinventarium för aktinider och fissionsprodukter. SSM vill dock påpeka att uppskattningen ännu inte täcker alla bränsletyper i slutförvarsanläggningen (SSM Technical Note 2015:51). Det bör även påpekas att det intervall för driftparametrarna utbränning och anrikning, för de bränsleprov som användes i osäkerhetsuppskattningen, skiljer sig från det intervall som gäller bränsle i slutförvaret (t.ex. Hermann och DeHart, 1998, kapitel 1). SKB behöver vidare studera osäkerheter i beräkningar avseende bränslets aktivitetsinventarium så att uppskattningen av osäkerheter kan innefatta fler bränsletyper och bredare driftförhållanden.

SSM bedömer att osäkerheten i bestämningen av bränslets aktivitetsinventarium är acceptabel för beräkning av bränslets resteffekt och kapselns ytdosrat. Denna slutsats baseras på att resteffekt och ytdosrat är bestämd av den totala radioaktiviteten. En uppskattad osäkerhet på cirka 10 % i inventarieberäkningen leder till en lika stor osäkerhet för resteffekten och stråldosen. Detta är en acceptabel nivå både ur perspektivet driftsäkerhet och ur perspektivet långsiktig strålskydd och säkerhet.

SSM ser positivt på att SKB har redovisat exempel på aktivitetsinventarier för olika kombinationer av bränsletyper i en kapsel. Dessa beräkningar är viktiga för att ta ställning till genomförbarhet. SSM bedömer att förutsättningar finns för att inkapsling av allt använt kärnbränsle med totalt cirka 6 000 kapslar i slutförvarsanläggningen kan genomföras på ett godtagbart sätt för att uppfylla SKB:s egna krav kopplat till inkapslat använt kärnbränsle. För genomförbarhetsfrågor ur perspektivet inkapslingens tekniska processer hänvisas till SSM:s granskningsrapport *Inkapslingsanläggning och Clab*.

3.3.6 Beräkning av resteffekt

3.3.6.1 Underlag från SKB

Beräkningen av resteffekt redovisas i SKBdoc 1179234. SKB använder samma program för beräkningen av resteffekt som används i beräkningen av aktivitetsinventarium (Origen-S). Resteffekten är en konsekvens av sönderfallsenergi som frigörs från det deponerade bränslet till omgivande material, och är därför kopplad till bränslets innehåll av radioaktiva ämnen.

Resteffekten från aktinider ökar progressivt med utbränningsgrad för korta och medellånga avklingningstider. Resteffekten från fissionsprodukter ökar linjärt med utbränningsgrad för korta, medellånga och långa avklingningstider. Nukliden Cs-137 som sönderfaller till Ba-137m eller Ba-137 har en dominerande betydelse för resteffekten. Det dominerande bidraget till radioaktivitet samt resteffekt från crud är Co-60 som sönderfaller till Ni-60 (SKBdoc 1179234, avsnitt 4.1). Om avklingningstiden för bränslet är kortare än 10-20 år kan Fe-55 inledningsvis också bidra till en viss andel av resteffekten (SKBdoc 1078000, figur 6-1).

SKB har utvecklat två metoder för mätning av resteffekt; en kalorimetrisk metod och en metod baserad på gammascanning. I gammascanningen mäts gammastrålning från den dominerande dotternukliden till Cs-137, dvs. Ba-137m. SKB bedömer att den kalorimetriska metoden är tidskrävande och anser att gammascanningen är en effektivare metod som kan genomföras betydligt snabbare. I mellanlagringsanläggningen Clab har de båda metoderna utvärderats genom mätningar på flera tiotal bränsleelement av BWR- och PWR-typ. Resultaten antyder att båda metoderna ger tillfredställande resultat (SKB R-05-62). SKB har även samarbetat med Oak Ridge National Laboratory i USA och de erhållna mätresultaten har använts för att validera och vidareutveckla beräkningsprogrammen.



SKB planerar att fortsätta mäta resteffekt för att få ett bättre statistiskt underlag och för att omfatta nya bränsletyper. Målet är att en mätmetod för bestämning av resteffekt och andra relevanta bränsleparametrar ska vara färdigutvecklad när uppförandet av inkapslingsanläggningen inleds.

3.3.6.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s beräkning av resteffekt är trovärdig och att SKB har tagit fram ett bra underlag för analysen av slutförvarets termiska utveckling.

SSM:s bedömning utgår ifrån att beräkningen av resteffekt är starkt kopplad till beräkningar av aktivitetsinventariet och att inventarieberäkningarna har bedömts vara trovärdiga. Osäkerhetshantering kan behöva vidareutvecklas genom utförligare valideringar av resteffekt inför kommande steg i SKB:s program. För det innevarande steget i prövningsprocessen anser dock SSM att nuvarande osäkerheter är acceptabla (avsnitt 3.3.5).

SSM anser att SKB bör vidareutveckla den snabba mätmetoden med mätning av gammastrålning från Cs-137.

3.3.7 Beräkning av ytdosrat

3.3.7.1 Underlag från SKB

SKB redogör för beräkning av ytdosrat i SKBdoc 1077122. Dosraten beräknas med datorprogrammet MCNP 5.2 som utvecklats av Los Alamos National Laboratory i USA. MCNP är en Monte-Carlo-transportkod som kan hantera ett kontinuerligt spektrum av strålningsenergi, samt tidsberoende processer i allmän geometri med en kombination av neutron-, foton- och elektronstrålning. Programmet använder Monte-Carlo-metod för simulering av växelverkan mellan materia och neutroner, fotoner samt elektroner/positroner, inklusive de sekundära effekterna av växelverkan såsom röntgen av K-linjespektra, gammastrålning ur annihilation av elektron och positron, Auger-elektroner samt bromsstrålning (X-5 Monte Carlo Team, 2003).

Källstyrkor av strålningen kommer från aktivitetsberäkningar i SKBdoc 1179234. Detaljerade beräkningar av ytdosrat för ett antal geometrier som motsvarar olika kapselalternativ har genomförts. Flera av de kapseltyper som ingår i beräkning av ytdosrat har högre resteffekt än 1700 W, dvs. strålningsstyrkan antas vara högre än i en verklig inkapsling. Detta innebär enligt SKB att beräknade ytdosrater är konservativa (SKBdoc 1077122).

Dosrater har beräknats dels för kapselytan, dels för olika positioner i deponeringshålet. För PWR-kapseln har även dosrater beräknats för ett avstånd på 2 meter från kapselytan. Inducerad aktivitet från Co-60 i konstruktionsmaterial och crud har beaktats i beräkningarna (SKBdoc 1077122).

3.3.7.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s dosratberäkning är trovärdig. Noggrannheten för nuvarande beräkningar bedöms vara acceptabel, och dessa bör därför kunna ligga till grund för dimensionering av strålskärning under en eventuell drift av Clink och slutförvarsanläggningen.

SSM:s bedömning utgår ifrån att beräkningsprogrammet beaktar alla tänkbara processer av växelverkan mellan materia och olika typer av strålning, samt att det även inkluderar de sekundära effekterna av växelverkan.



SSM anser att SKB i kommande säkerhetsredovisningar behöver redovisa dosraten som absorptionsdos med enheten Gray per timme, istället för ekvivalentdos med enheten Sievert per timme. Denna synpunkt är särskilt relevant för fall i vilka bidraget från neutronstrålning är stort. Energispektrumet för neutronstrålningen behöver också redovisas. Anledningen till denna synpunkt är att avvägningsfaktorer av neutronstrålningen i ekvivalentdos är annorlunda i jämförelse med gamma- och betastrålning samt är energiberoende (ICRP publikation 103, avsnitt 4.3.3). I utvecklingsarbetet kopplad till strålskärning erfordras sådan information. SSM:s externa experter har framfört liknande synpunkter (SSM Technical Note 2015:51).

3.3.8 Optimering för inkapslingssimulering

3.3.8.1 Underlag från SKB

SKB redovisar en optimering av inkapslingsprocessen i SKB TR-10-13, avsnitt 4.4 och 4.5, samt i SKBdoc 1221567.

Syftet med optimeringen är att identifiera en lämplig strategi för fyllning av kapslar så att alla kapslar får den maximala tillåtna resteffekten (1 650 W) vid inkapslingstillfället. Alla kapslar bör så långt som möjligt fyllas fullt ut och antalet kapslar i slutförvaret blir därmed minimerat, samtidigt som hänsyn behöver tas till kraven på kriticitetssäkerhet och begränsning på ytdosrat.

Optimeringen görs genom att:

- generera bränsleinventarium för bränsle som ska kapslas in
- beräkna bränsleelementens resteffekt
- simulera fyllning av kapslarna.

Simuleringen genomförs i följande tre steg:

1. Bränsleelement med beräknade resteffekter kombineras ihop i en kapsel på sådant sätt att resteffekten i kapseln blir mindre än 1700 W (1650 W med marginal för osäkerheter). Kombinationen görs genom att blanda bränsleelement med hög resteffekt med bränsleelement med låg resteffekt i en och samma kapsel.
2. Kriticitetssäkerhet kontrolleras genom modellering. Om gränsen för den effektiva multiplikationsfaktorn överstiger 0,95 överges kombinationen av element och optimeringen går tillbaka till steg 1. Annars går optimeringen vidare till steg 3.
3. Strålningen utanför kapseln kontrolleras genom modellering eller mätning. Om dosraten på kapselytan understiger 1 Gy/timme accepteras kombinationen. Annars överges kombinationen och processen går tillbaka till steg 1.

SKB planerar att inkapslingen inleds år 2023 och avslutas år 2070. Olika scenarier för inkapslingen har rapporterats. SKB:s referensscenario är scenario 3 i SKBdoc 1221567. I scenario 3 kommer det vid det svenska kärnkraftsprogrammet slut att finnas 4 451 och 1 652 inkapslade BWR- respektive PWR-kapslar (totalt 6 103 kapslar). SKB:s simulering av inkapslingen visar att alla kapslar inte kan fyllas fullt med bränsle eftersom det finns krav på att begränsa resteffekten till mindre än 1 700 W i en kapsel samt krav på att säkerställa kriticitetssäkerhet. Anledningen till detta är att vissa bränsleelement kan samtidigt ha hög utbränning och kort avkylningstid. Av 4 451 BWR-kapslar är endast 2 796 helt fyllda med 12 bränsleelement i varje kapsel. För de 1 652 PWR-kapslarna är endast 1 095 helt fyllda med 4 stycken bränsleelement. Resten av kapslarna blir bara delvis fyllda. Skulle alla kapslar kunna fyllas fullt ut med bränsleelement skulle det kunna innebära 598 färre kapslar. Detta innebär att ungefär en tiondel av förvarets kapacitet inte skulle behöva användas om kapslarna kunde fyllas fullt ut (SKBdoc 1221567, avsnitt 7.4).



3.3.8.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning av inkapslingssimulering är acceptabel för den pågående granskningen av tillståndsansökan. SKB har identifierat en metod som innebär att säkerhetsrelaterade krav kan uppnås vilket är den högst prioriterade aspekten av inkapslingssimulering.

SSM anser dock att SKB:s nuvarande optimeringssimulering snarare är en optimering av successiv och lokal karaktär, än en systematisk och global optimering över alla bränsleelement. Den nuvarande optimeringen blandar fortfarande in ”trial-and-error”-teknik vilket gör det svårt att bedöma om simuleringen verkligen är en global optimering. SSM anser därför att SKB behöver söka efter en systematisk och global optimering.

3.3.9 SSM:s sammanfattande bedömning av använt bränsle

SKB betraktar inte använt kärnbränsle i slutförvaret som en barriär och därför har inga konstruktionsförutsättningar tagits fram för bränslet. Istället har tekniska krav formulerats för att tillgodose den långsiktiga strålsäkerheten för slutförvaret, samt behov av personstrålskydd och säker hantering av kapseln under drift av inkapslingsanläggningen och slutförvaret.

SSM bedömer att de tekniska krav som ställs på bränsle i kapseln är vetenskapligt välgrundade och att kraven går att kontrollera och uppfylla. Flera av SKB:s tekniska krav kopplar till bränslets aktivitetsinventarium som kan beräknas med etablerade metoder.

Kännedom om bränslets innehåll av radioaktiva ämnen är av stor betydelse för utvärdering av anläggningarnas driftsäkerhet och slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. För detta bedömer SSM att SKB:s redovisningar av typer och källor av det befintliga använda kärnbränslet är tydlig och komplett, och har gett ett bra underlag för hantering av bränslets initiala tillstånd i säkerhetsanalysen. Bedömningen baserar sig på att SKB:s redovisning har gått igenom den historiska utvecklingen av det svenska kärnenergiprogrammet, samt att det finns ett fungerande system för kärnämneskontroll på Clab med information av antal bränsleelement, typ, m.m. SSM bedömer också att SKB:s prognos av typ och mängd av det använda kärnbränslet som tillkommer från den fortsatta driften av de nuvarande reaktorerna är baserad på drifterfarenheter och rimliga resonemang och är därför trovärdiga. SSM anser dock att SKB regelbundet behöver kontrollera och justera prognosen samt anmäla stora ändringar av drifttid och driftförhållanden av de befintliga reaktorerna till SSM. SKB behöver även se till att den långsiktiga säkerhetsanalysen av slutförvaret uppdateras i fall avvikelser från prognosen eller förändringarna i drifttid och driftförhållanden är stora.

SSM bedömer att SKB:s beräkningar av bränslets aktivitetsinventarium, resteffekt och ytdosrat är ändamålsenliga och beräkningsresultaten trovärdiga. Dessa resultat kan ge ett bra underlag för analysen av slutförvarets långsiktiga säkerhet. SSM kan konstatera att de i branschen standardiserade programmen har använts i beräkningarna. Alla relevanta fysikaliska processer har tagits hänsyn till i programmen och programmets koder och indata har genomgått regelbundet underhåll och uppdateringar. Dessutom har beräkningsresultaten av aktivitetsinventarium, som är utgångspunkten för beräkningarna av resteffekt och ytdosrat, validerats och verifierats experimentellt. SSM anser dock att viktiga driftparametrar hos bränsleelement, såsom utbränningsgrad och linjär effekttäthet, som används vid beräkningen av aktivitetsinventarium, behöver verifieras och bekräftas experimentellt innan bränslet inkapslas i kopparkapslarna. Det är svårt att helt utesluta att driftsinformation registreras felaktigt på grund av den mänskliga faktorn. SSM anser dessutom att SKB behöver studera osäkerheter i beräkningar som avser bränslets

aktivitetsinventarium så att uppskattningen av osäkerheter kan täcka fler bränsletyper och bredare driftförhållanden.

Förutom de vanliga bränsleelementen kommer även en viss mängd av bränslerester att slutförvaras i slutförvarsanläggningen i det referensscenario som SKB redovisar. SSM bedömer att SKB har tagit fram en godtagbar plan för att kapsla in bränslerester separat. SSM instämmer med SKB att upplösningshastigheten i vatten av bränsleresterna kan vara betydligt högre än för det vanliga använda kärnbränslet och därför behövs inkapslas separat. SSM anser att SKB har genomfört en trovärdig uppskattning av bränsleresternas långsiktiga strålsäkerhet genom att anta en betydligt högre upplösningshastighet, att noggrant kontrollera komplett oxidering av KTH-R1-bränslepulver, samt att fördjupat analysera gasutveckling vid radiolys av organiskt material i epoxiinjutet bränsle.

SSM bedömer att SKB:s redovisning av inkapslingssimulering är acceptabel för den innevarande tillståndsprövningen. SKB har identifierat en metod som innebär att säkerhetsrelaterade krav kan uppnås vilket är den högst prioriterade aspekten av inkapslingsprocessen. SSM anser dock att SKB:s nuvarande optimeringssimulering snarare är en optimering av successiv och lokal karakter, än en systematisk och global optimering över alla bränsleelement. SKB behöver söka efter en systematisk och global optimering, möjligen med hjälp av lämpliga verktyg i matematisk optimeringslära.

3.4 Kapseln

Kopparkapseln är den tekniska barriär i KBS-3-konceptet som upprätthåller barriärfunktionen fullständig inneslutning av det använda kärnbränslet. Kopparkapseln består av ett kopparhölje som korrosionsbarriär och en segjärnsinsats som är lastbärande. För tillverkning av kopparhöljet krävs kopparrör, lock och botten samt en svetsmetod för sammanfogning av komponenterna. I segjärnsinsatsen finns en stålörskassetten med fack för bränsleelementen. SKB har utvecklat två varianter av stålörskassetten, en för BWR-bränsle med 12 fack och en för PWR-bränsle med 4 fack. I detta avsnitt redovisar SSM granskningen av initialtillståndet för kapseln, inklusive tillverkning av kapseldelar, förslutning av kapseln samt oförstörande provning. Initialtillståndet för kapseln definieras av SSM som tidpunkten då bränsle har tillförts, kapseln har slutmonterats och förslutits samt förslutningssvetsen har provats med oförstörande metoder.

Kopparkapselns långsiktiga barriärfunktion är att upprätthålla en inneslutning av det använda kärnbränslet under mycket långa tidsperioder. Detta uppnås genom kopparhöljets korrosionsmån samt den relativa korrosionsbeständigheten i slutförvarsmiljön. En annan förutsättning för kapselns långsiktiga integritet är förmågan att motstå mekaniska laster i slutförvarsmiljön så som höga isostatiska tryck orsakade av omgivande hydrostatiskt tryck på förvarsdjup och buffertens svälltryck, samt i viss utsträckning skjuvbelastningar orsakade av rörelser längs sprickplan i det omgivande berget. Så länge kapselns fullständiga täthet upprätthålls sker inga utsläpp av radioaktiva ämnen till det omgivande grundvattnet. En sekundär funktion är att kapseln under en begränsad tid förväntas förhindra utsläpp av radioaktiva ämnen även om det finns mindre genomgående defekter eller håligheter i kopparhöljet. Med tanke på att ett intakt kopparhölje förväntas ha en lång livslängd har denna sekundära säkerhetsfunktion endast egentligen betydelse för det fall då höljet i ett tidigt skede av förvarsutvecklingen av någon anledning skulle förlora sin integritet.

SKB redogör för kapselns utformning, initialtillstånd och tillverkning i SKB TR-10-14. Konstruktionsförutsättningar för kopparkapseln finns redovisad i SKB TR-09-22. Dessutom har utförligare information kring SKB:s erfarenheter kring tillverkning och oförstörande provning av kapseldelar hämtats från tekniska SKB-dokument som tagit fram



som en del av ansökan. I SR-Site huvudrapporten finns en sammanfattning av SKB:s arbete med initialtillståndet för kopparkapseln.

På SSM:s begäran har SKB tagit fram kompletterande och förtydligande information om ett antal frågor. Följande svar från SKB har inkommit till SSM:

- Svar på SSM:s begäran om klarläggande angående konstruktionsförutsättningar för kapsel (SKBdoc 1291379).
- Svar på SSM:s begäran om klarlägganden och kompletteringar avseende kapsel (SKBdoc 1339123).
- Svar på SSM:s begäran om förtydligande angående postulerade defekters position och orientering för skjuvlastfallet (SKBdoc 1339123).
- Plan för implementering av kvalitetsstyrning och kontroll av KBS-3-förvaret (SKBdoc 1365182)
- Svar på SSM:s begäran om komplettering angående kontroll och provning för fastställande av kapselns initialtillstånd (SKBdoc 1371850). Dokumentet har skickats till SSM i fyra versioner daterade 2013-04-01, 2013-06-26, 2014-02-28 samt 2014-09-30.
- Svar på SSM:s begäran om komplettering angående tillverkningsaspekter för ingående delar i kapseln (SKBdoc 1371851). Dokumentet har skickats till SSM i fyra versioner daterade 2013-06-26, 2013-12-20, 2014-02-05 samt 2014-09-30.
- Kvalitetsledningssystem för kapselproduktion (SKBdoc 1388095)
- Estimation of oxide growth on joint surfaces during FSW (SKBdoc 1402837)
- Attenuation dependent detectability at ultrasonic inspection of copper (SKBdoc 1411328)
- Kravbild för oförstörande provning av kopparkapselns rör, lock och botten (SKBdoc 1414374)
- Kvalificering av oförstörande provning (SKBdoc 1414464)
- Kravbild för oförstörande provning av segjärnsinsats (SKBdoc 1414760)
- Kravbild för oförstörande provning av kopparkapselns svetsar (SKBdoc 1415307)
- Non destructive testing of canister components and welds (SKBdoc 1434744)
- Svar på SSM:s begäran om komplettering rörande skadetålighetsanalys av stållock till gjutjärnsinsats (SKBdoc 1449528).
- Svar på SSM:s frågor i protokoll från kapselavstämningsmötet den 25 juni 2014 (SKBdoc 1452923).
- Statistisk analys av brottförlängning och brottseghet för BWR- och PPWR-insatser – Studie av inverkan av antal provstavar, gränsvärden och komponent-statistik (SKBdoc 1464317)
- Svar på SSM:s begäran av förtydligande angående kontroll och provning (SKBdoc 1471002).
- Samlad kravbild avseende kapseln (SKBdoc 1471286)
- Svar på SSM:s begäran om komplettering kring försprödningsmekanismer för kapseln (SKBdoc 1602500).
- Åldring, deformationsåldring blåsprödhet av segjärn (SKBdoc 1602640)

3.4.1 Konstruktionsförutsättningar, säkerhetsfunktioner och referensutformning för kopparkapseln

I detta avsnitt granskas först övergripande konstruktionsförutsättningar för kopparkapseln, därefter granskas tillverkning och provning av segjärnsinsats, tillverkning av delar till kopparhöljet, svetsning i koppar samt provning av kopparhöljet. Slutligen diskuteras kontrollordning och kvalificering, följt av en kort redogörelse för eventuell påverkan av



inkapsling, transport, hantering och deponering. Avsnittet avslutas med SSM:s sammanfattande bedömning kring SKB:s redovisning kring kopparkapselns initiala tillstånd.

3.4.1.1 Underlag från SKB

SKB beskriver konstruktionsförutsättningar för kopparkapseln i SKB TR-09-22. Konstruktionsförutsättningarna utgör en grund för referensutformningen av kopparkapseln. De innehåller förklaringar och detaljerade underlag som motiverar kapselns föreslagna utformning (SKB TR-09-22, tabell 3-1).

De nuvarande konstruktionsförutsättningarna har tagits fram med utgångspunkt från den tidigare säkerhetsanalysen SR-Can. SKB avser att ta fram nya uppdaterade konstruktionsförutsättningar med utgångspunkt från ytterligare information kring kapselns långsiktiga utveckling från säkerhetsanalysen SR-Site som är en del av ansökan. Vid definitionen av kapselns funktionskrav utgår SKB från kapselns tre huvudsakliga säkerhetsfunktioner i) att motstå isostatiska laster, ii) att motstå skjuvlaster samt iii) att motstå korrosionsangrepp. I SKB:s säkerhetsanalys SR-Site definieras säkerhetsfunktionerna på ett sådant sätt att uppfyllelse underlättar utvärdering av långsiktig strålsäkerhet, men att långsiktig strålsäkerhet kan uppnås även för fall som inkluderar vissa avvikelser. Förutom funktionskraven kopplade till de huvudsakliga säkerhetsfunktionerna finns krav kopplade till att kriticitet ska undvikas för en kapsel fylld med bränsle, respektive krav kopplade till riskminimering med avseende på ett antal tänkbara degraderingsmekanismer.

Funktionskravet kopplat till isostatiska laster formuleras på följande sätt:

- Kapseln ska motstå en isostatisk belastning på 45 MPa, vilket är summan av maximalt buffertsvälltryck och maximalt grundvattentryck.

Insatsen ska långsiktigt behålla sina lastbärande egenskaper med avseende på isostatisk last. Kravet på maximalt buffertsvälltryck innebär att den omgivande buffertens densitet måste begränsas till 2 050 kg/m³.

Funktionskravet kopplat till skjuvlaster formuleras på följande sätt:

- Kopperhöljet ska vara intakt efter en fem cm skjuvrörelse i berget med en hastighet på maximalt 1 m/s och med en buffert vars materialegenskaper motsvarar en Ca-bentonit med en densitet på 2 050 kg/m³. Detta förhållande ska gälla för alla positioner och alla tänkbara vinklar hos skjvsprickan i deponeringshålet och för temperaturer ner till 0°C. Insatsen ska samtidigt upprätthålla sin motståndskraft mot isostatiska laster.

Även i detta fall utgör buffertens begränsade densitet till 2 050 kg/m³ en förutsättning för funktionskravets tillämpbarhet. Dessutom bör större strukturer i berget undvikas med hjälp av EFPC-kriteriet ("Extended Full Perimeter intersection Criterion") för att minska risken för större skjuvrörelser i berget.

Funktionskravet kopplat till korrosionsangrepp formuleras på följande sätt:

- Kapseln ska ha en nominell koppartjocklek på 5 cm, vilket även ska omfatta svetsfogarna.

Vissa mindre osäkerheter kopplade till koppardelarnas tjocklek och svetsfogarnas koppartäckning kan dock tillåtas. Korrosionsmånen ska medge säkerhetsmarginaler för korrosion i ett deponeringshål med intakt buffert, liksom uppfyllelse av SSM:s riskkriterium även om betydande buffererosion inträffar. Buffertens densitet bör minst uppgå till 1 950 kg/m³.



Funktionskravet kopplat till kriticitet formuleras på följande sätt:

- Med beaktande av det använda bränslets egenskaper så ska kapselns invändiga geometri utformas för att förhindra kriticitet även om vatten skulle tränga in i en kapsel.

Lågutbränt PWR-bränsle är den bränslekategori för vilken uppfyllelse av funktionskravet kräver mer ingående analyser. Udda bränsletyper liksom skadat bränsle behöver också särskild uppmärksamhet vid utvärdering av detta funktionskrav. SKB redovisar dessutom ytterligare en specifikation kopplad till kravet att förhindra kriticitet:

- Materialsammansättningen för segjärnet ska vara: Fe > 90 %, C < 4,5 % och Si < 6 %.

Förutom konstruktionsförutsättningarna som kopplar till kapselns grundläggande säkerhetsfunktioner finns krav som kopplar till riskminimering i förhållande till tänkbara degraderingsprocesser som har identifierats och analyserats i samband med tidigare säkerhetsanalyser (SKB TR-10-14; SKB TR-09-22):

- Kopparinnehållet i segjärn bör vara mindre än 0,05 % för att undvika hårdning och försprödning då segjärnsinsatsen exponeras för gammastrålning.
- För kopparhöljet behöver följande krav vara uppfyllda; medelkornstorlek < 800 µm, fosforinnehållet 30–100 ppm, svavelinnehållet < 12 ppm. Dessa krav är kopplade till koppars materialegenskaper för att krypduktilitet ska anses tillräckligt gynnsamt. Det noteras också att kallbearbetning kan påverka krypegenskaper hos koppar.
- Koppars innehåll av väte < 0,6 ppm. Kravet motiveras med behovet av att undvika sprödhet vid tillverkning av koppardelar ingående i kapseln.
- Syreinnehållet i koppar behöver begränsas till maximalt några tiotal ppm. Material som använts för provtillverkning har haft det strängare kravet < 5 ppm, och innan en ändring kan göras måste ytterligare tester genomföras. Krav på koppars höga renhet motiveras med att risken för korngränsskorrosion behöver minimeras.
- Atmosfären i insatsen byts ut så att argonhalten blir > 90 %. Syftet är att undvika förekomst av kväve och syre för att minimera invändig korrosion. Förekomst av kväve kan bidra till bildning av salpetersyra.
- Den högsta tillåtna vattenmängden i insatsen är fastställd till 600 g. Vatten förväntas främst förekomma i skadat bränsle som är svårt att torka. Vatten kan bidra till invändig korrosion i kapseln.

SKB redovisar också konstruktionsförutsättningar för kopparkapseln som kommer från krav kopplade till provning och drift:

- För att möjliggöra oförstörande provning av kopparhöljet ska medelkornstorleken vara mindre än 360 µm.

Dessutom finns krav på att kapseln ska kunna hanteras på ett säkert sätt i samband med transporter och lyft, samt att kapseln ska erbjuda tillräcklig strålskärning för tiden fram till inplacering i deponeringshålet.

SKB har definierat referensutformning av kopparkapseln baserat på konstruktionsförutsättningarna. Referensutformningen av kapseln ska förutom att uppfylla konstruktionsförutsättningarna också vara tekniskt möjlig att producera med tillgängliga tillverkningsmetoder och hanterbar med metoder för provning, förslutning, transport och deponering. Referensutformningen finns beskriven i detalj (SKB TR-10-14, kapitel 3), liksom produktionsmetoderna och kontrollrutinerna (SKB TR-10-14, kapitel 5). SKB

sammanfattar också referensutförning respektive tillverkning av kapseln i SR-Site (SKB TR-11-01, avsnitt 5.4.2).

Referensutförningen beskrivs av en uppsättning av konstruktionsparametrar med givna nominella värden och tillåtna toleranser. Den nuvarande referensutförningen för kapseln består av en tät korrosionsbarriär av koppar och en lastbärande insats av segjärn. SKB beskriver den förslutna kapseln med följande dimensioner: total längd på 4 835 mm och diameter på 1 050 mm. För korrosionsmånen anges nominell tjocklek av de olika delarna av kopparkapseln med acceptabla toleranser (kopparrör: $49 \pm 0,3$ mm; svetsfogar: $48,5 \pm 0,7$ mm; lock: $50 \pm 0,6$ mm; botten: $50 \pm 1,0$ mm).

SKB beskriver hur initialtillståndet kommer att verifieras för att säkerställa överensstämmelse med referensutförningen genom att kombinera oförstörande provning (OFP), förstörande provning, materialanalyser och dimensionskontroller. SKB har tagit fram detaljerade beskrivningar av OFP (SKBdoc 1434744) liksom detaljerade beskrivningar av hur provningstillförlitligheten av kapselkomponenter och svetsar har utvärderats (SKBdoc 1180132, SKBdoc 1180131, SKBdoc 1175235 och SKBdoc 1175236).

SKB redogör också för överensstämmelsen mellan referensutförningen och konstruktionsförutsättningar samt resultaten från analyser av relevanta lastfall kopplade till kapselns långsiktiga integritet (SKB TR-10-14). För isostatiska laster har segjärnsinsatsen delats in i olika zoner och acceptabla defektstorlekar definieras för varje zon. Acceptabla defektstorlekar i segjärnsinsatsen anges även för tillämpliga skjuvlaster. Skadetålighetsanalyser i förhållande till relevanta lastfall används för att definiera acceptabla defektstorlekar (SKB TR-10-29).

SKB har som en del av kompletteringsförfarandet redan nu redovisat planer på en revision av konstruktionsförutsättningarna inför redovisning av PSAR (SKBdoc 1471283). SKB har för avsikt att genomföra ytterligare analyser av tillåtna defektstorlekar för både BWR- och PWR-insatsen. Syftet är att få en överblick av betydelsen av defekter i fler positioner över BWR- respektive PWR-tvärsnittet samt att motivera att provningsbegränsningar kan accepteras i områden med komplicerad geometri såsom bland annat bakom stagplåtar, i närheten av kanälrören samt i toppen på insatsen. SKB har även för avsikt att genomföra känslighetsanalyser med avseende på mycket stora initiala sprickor mellan kanälrören för insatserna för BWR och PWR med syfte att motivera provningsbegränsningar samt för att få ökad förståelse för kapselns mekaniska funktion vid dessa mycket pessimistiska defekter vid skjuvlastfallet. För kopparhöljet planerar SKB att utreda kravet på medelkornstorlek i kopparkomponenterna vidare vilket kan medföra att ett tilläggskrav rörande ljuddämpning kan behöva definieras för att ultraljudprovningens tillförlitlighet ska kunna säkerställas. SKB har också initierat ett arbete med att utvärdera behov av kompletterande teknik för provning av insatsens centrala volym, där geometrin tydligt påverkar provbarheten, samt undersöka möjligheten att vid behov använda röntgenprovning för denna volym.

3.4.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s nuvarande konstruktionsförutsättningar (SKB TR-09-22) för kopparkapseln är godtagbara och tillräckligt detaljerade för det nuvarande steget i prövningsprocessen. Säkerhetsanalysen SR-Can inklusive dess granskning har givit SKB en bra grund för att specificera de funktionskrav och tillverkningskrav som redovisas ovan. SSM anser dock att SKB behöver uppdatera och justera konstruktionsförutsättningarna för kopparkapseln baserat på den ytterligare information som framkommit under granskningen av tillståndsansökan. SKB har redan nu identifierat behov av justeringar så som ytterligare specifikation av maximala halter av vissa

föreningar (SKBdoc 1471283), och behov av andra förändringar behöver identifieras baserade på SSM:s granskningskommentarer som redogörs för i detta avsnitt.

SSM förutser förutom en nära förestående uppdatering av konstruktionsförutsättningarna att SKB även behöver vidareutveckla och förtydliga kravspecifikationer för kopparkapseln. Vidareutveckling av kravspecifikationer för kopparkapseln kan t.ex. komma att baseras på utveckling av analyser av kapselintegritet som genomförs inom ramen för säkerhetsanalyser, skadetålighetsanalyser, modifieringar eller förändringar av övriga komponenter i systemet, forskning kring degraderingsprocesser respektive mer information om faktiska förhållanden på förvarsdjup i samband med konstruktion av tillfartsvägar och förvarsutrymmen. Konstruktionsförutsättningarna behöver också beakta nya resultat och erfarenheter från fortsatt provtillverkning av kapseldelar, svetsning samt förstörande och oförstörande provning. Den nuvarande kapselutformningen bör därför enligt SSM:s mening inte betraktas som en slutligt preciserad utformning för användning under driftförhållanden. Behov av vissa justeringar i syfte att förbättra kapselutformningen samt att uppfylla krav på optimering och bästa möjliga teknik kan inte uteslutas.

SSM anser att det kan ifrågasättas om SKB:s funktionskrav för kapseln kopplat till skjувlast, dvs. att kopparhöljet under vissa givna förutsättningar med 100 % tillförlitlighet ska vara intakt efter 50 mm skjувrörelse, är ett ändamålsenligt krav eller ens möjligt att genomföra med tanke på att gjutning av insatser medför inhomogena materialegenskaper samt med beaktande av begränsningar hos provningsmetoder.

SSM anser att SKB bör ta fram beräkningsfall som belyser betydelsen av tänkbara avvikelser från SKB:s egna kvalitetskrav på materialegenskaper, tillverkningsmoment och oförstörande provning. Resultat från beräkningsfall kopplat till brister i samband med kapselns tillverkning och potentiella mänskliga misstag gör det möjligt att styra och anpassa kravnivån för framtida kvalitetssäkringsåtgärder.

Även om SKB i framtiden kommer att kunna visa att samtliga relevanta tillverknings- och kvalitetskrav kan uppnås kommer det även på lång sikt krävas fortlöpande utvecklingsarbete för att säkerställa effektivitet och tillförlitlighet vid kapseltillverkning. Ett sådant fortlöpande kvalitetshöjande arbete krävs även för att uppfylla krav på bästa möjliga teknik. I syfte att förbättra och rationalisera produktionen av kopparkapslar under det mycket långa tidsintervallet av flera årtionden kan det inte helt uteslutas att andra tekniker för tillverkning och provning av både insats och kopparhölje kan komma att tillämpas för delar av kapselproduktionen. Dessa måste i så fall visas medge att slutförvaring åstadkoms till en minst lika hög skyddsnivå som de ursprungliga teknikerna.

3.4.2 Tillverkning av segjärnsinsats

3.4.2.1 Underlag från SKB

SKB:s referensmetod för tillverkning av insatsen är gjutning (SKB TR-10-14). Provtillverkning har hittills genomförts med stålgjutgods och segjärn. SKB har även studerat ett alternativt utförande där insatsen utformas med ett självbärande stålrör i låglegerat stål med en invändig svetsad kassett med bränslekanaler. SKB:s val av gjutning som tillverkningsmetod för insatsen motiveras med att stora gjutgods är en väletablerad teknik med flera möjliga leverantörer. Till insatsen hör också ett stållock, en skruv för fastsättning av stållocket i insatsen, en ventil för att byta atmosfären i insatsen från luft till argon samt tätningsmaterial mellan stållocket och insatsen. SKB har tillverkat BWR-insatser under seriemässiga förhållanden och bedömer därför att BWR-insatser tillverkade med den valda referensmetoden kommer att kunna uppfylla krav kopplade till kapselns



referensutförning. Utveckling av referensmetod för PWR-insatser pågår för närvarande men tillverkning under seriemässiga förhållanden har ännu inte genomförts. SKB anger att fram till mitten av 2008 hade det tillverkats 47 gjutna insatser i segjärn i BWR-utförande samt 8 i PWR, 19 stållock till insatsen samt 15 monterade kompletta kapslar med både insats och hölje.

SKB har under flera år utvecklat processen för gjutning av insatser genom utprovning av olika gjutmetoder i samarbete med ett flertal leverantörer. Både sandformar och stålkokiller har använts. Formsättning och gjutsystem varierar från gjuteri till gjuteri. Fyllnaden av gjutformen kan ske endera genom att smältan hålls från toppen, så kallad fallande gjutning, eller genom stiggjutning då smältan leds ned genom en kanal till botten av formen och sedan stiger uppåt i formen. Hållrummen i segjärnsinsatsen erhålls genom att tillverka en stålplåtskonstruktion med rektangulära stålprofiler som bildar de avsedda hållrummen efter gjutning. De rektangulära stålprofilerna i BWR och PWR består av en 10 mm respektive 12 mm tjock stålplåt. Det är viktigt att stålplåtskassetten inte deformeras under gjutning, och därför svetsas stagplåtar mellan de kvadratiska stålplåtsprofilerna. För att förhindra kollaps av stålplåtskassetten under gjutförloppet fylls denna med sand innan gjutning. Efter gjutning tas sanden bort och stålplåtskassetten lämnas kvar i insatsen. Gjutningsprocessen har analyserats grundligt av SKB och särskilt viktiga processparametrar har kunnat fastställas. Viktiga parametrar i gjutningsprocessen är att smältan har rätt sammansättning, att magnesium, som möjliggör sfäroidisering av grafiten tillförs på rätt sätt, att slagging sker samt att gjutningen genomförs vid rätt temperatur.

SKB anger att för segjärnsinsatsen kommer gjutning, maskinbearbetning samt vissa kvalitetskontroller såsom materialanalyser och förstörande provning att genomföras av underleverantörerna medan maskinbearbetning till slutdimensioner, dimensionskontroller och OFP genomförs av SKB vid kapselfabriken. Innan gjutning startar hos en extern leverantör ska SKB godkänna det aktuella gjuteriets kvalitetsplan för att möjliggöra verifikation av att segjärnsinsatsen uppfyller de tekniska specifikationerna för insatsen. Den gjutna insatsen ska tillverkas av ett segjärn med ferrit-perlitisk mikrostruktur och brottförlängning. SKB ställer krav på segjärnets mekaniska egenskaper avseende sträckgräns, brottgräns och brottseghet men inte på brottförlängning. SKB redovisar krav på mekaniska egenskaper för segjärnet i insatsen i (SKB TR-10-14, tabell 3-2). Efter att SSM begärt en komplettering på de av SKB angivna materialkraven har dessa uppdaterats 2014-02 (SKBdoc 1371851) och kompletterats ytterligare 2014-04 med tillverkningskrav på mikrostrukturen (SKBdoc 1436245, ver. 0.1). Materialkraven sammanfattas i SKBdoc 1436245 ver. 0.1.

SKB beskriver att vid gjutning av insatser kan olika typer av defekter förekomma som kan delas upp i kaviteter, inneslutningar och mikrostrukturella förändringar. Segjärnets grafitformer utgörs av sfäriska noder, andra grafitformer kan uppträda och ge delvis andra materialegenskaper. Stor erfarenhet av gjutning av segjärn har visat att sannolikheten för förekomst av sprickor i segjärn är låg, vilket i synnerhet gäller segjärn med ferritisk grundmassa. I kända fall från andra tillämpningar i vilka sprickor har påvisats, har sprickor varit lokaliserade till hörn eller andra anvisningar och uppkommit i samband med dragspänningar under stelningen. Dessa fall har också varit förknippade med andra yttre mekaniska skador. SKB anser att förekomst av varm- eller kallsprickor är mycket ovanliga. SKB anger att i de tillverkade segjärnsinsatserna har inga sprickor hittills kunnat påvisas. SKB sammanfattar också samtliga defekttyper från gjuteriindustrins exempelsamling, men påpekar att dessa inte med säkerhet kan anses förekomma i SKB:s komponenter.

3.4.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har visat att gjutning är en lämplig referensmetod för tillverkningen av insatser. Detta har åstadkommits med hjälp av ett utvecklingsprogram baserat på provtillverkning av fullstora komponenter. Det är dock viktigt att konstatera att ytterligare arbetsinsatser återstår innan utvecklingen har nått den nivå som medför att serietillverkade insatser motsvarar de av SKB uppsatta materialspecifikationerna för hela insatsen. Detta gäller i synnerhet för PWR-varianten. SSM anser att SKB behöver ha med analyser som i högre utsträckning beaktar insatsens varierande materialegenskaper. SSM gör dock bedömningen att varierande materialegenskaper och defektförekomster vid behov kan beaktas med probabilistiska metoder. I det följande redovisas ett SSM:s synpunkter rörande segjärnsinsatsen.

SSM bedömer att SKB inte i tillräcklig omfattning beaktat att tillverkningstekniken för insatsen medför en spridning i materialegenskaper. Detta gör det svårt för SSM att bedöma om SKB kan komma att uppfylla de tillverkningskrav som SKB för närvarande tillämpar för mekaniska egenskaper i insatsernas samtliga positioner. SSM noterar att SKB överväger en justering av buffertens utformning för att förbättra barriärsystemets tålighet med avseende på skjuvlastfallet (SKBdoc 1471283, avsnitt 3.2.3). En sådan justering kan vara lämplig, men den behöver motiveras med utgångspunkt av en optimering som tar hänsyn till samtliga riskbidrag. Ett ökat inslag av probabilistiska metoder för att ta hänsyn till insatsens materialegenskaper skulle kunna vara ett sätt att mildra betydelsen av generella krav som måste vara uppfyllda för samtliga kapslar.

Behovet av ett justerat angreppssätt för att karaktärisera och beakta den gjutna insatsens materialegenskaper kan kopplas till följande punkter:

- Ingen information har framkommit beträffande annan industriell tillämpning av segjärns olinjära brottseghetsegenskaper för bedömning av defekttålighet. Det saknas redovisning som motiverar att SKB:s användning av medelvärdet på uppmätt brottseghet är ett konservativt parameterintervall.
- Ofullständig redovisning hur insatsernas materialegenskaper påverkas av mikrostrukturella parametrar som nodulstorlek, andel perlit, grafitmorfologi och grafitflotation.
- Ofullständig motivering av SKB:s strategi för att verifiera tillverkningskrav för insatsernas initialtillstånd genom att för ett litet antal prov i BWR- och PWR-insatsernas övre delar bedöma hela de gjutna insatsernas initialtillstånd. SSM anser även att SKB inte i tillräcklig omfattning visat att BWR- och PWR-insatserna har förutsättning att uppnå de förväntade materialegenskaperna var som helst i insatserna. Ofullständig redovisning av hur stelningstiden vid gjutning av PWR-insatsen påverkar uppfyllelse av tillverkningskrav för insatsen.
- Avsaknad av experimentell verifikation av om konstruktionsregler enligt ASME (2008) som gäller för tryckkärlsstål även kan användas för gjutet segjärn med komponentvikter upp till 16 ton.

SKB redovisar dels krav på referensutformningen, dels krav på materialet vid tillverkning. För bedömning av insatsens initialtillstånd är det framför allt viktigt att bedöma uppsatta tillverkningskrav. SKB krävställer för närvarande sträckgräns, brottgräns, brottförlängning, brottseghet och mikrostruktur. SSM noterar att den elastiska brottsegheten K_{IC} anges som krav i referensutformningen och inte som tillverkningskrav. Den har reducerats cirka 10 gånger i jämförelse med vad som anges i SKB TR-10-14. SKB motiverar avsaknaden av tillverkningskrav på K_{IC} genom att förekomst av dragspänningar vid isostatlastfallet är så små att bedömning av skadetålighet inte kan motiveras (SKBdoc 1288292). SSM håller med om denna analys.



Brottspänningen är härledd från (SKB TR-10-14, avsnitt 3.3.2) genom att ansätta brottförlängning på 7 % (SKB TR-10-28, figur 3-1) och läsa av motsvarande sanna spänning (400 MPa) och därefter räkna ut den teknologiska spänningen (373 MPa) som kravställs. Jämförs mekaniska data med uppmätta framgång att krav på mekaniska egenskaper kan uppfyllas (SKB TR-10-14, avsnitt 5.2.10).

SSM anser dock att ytterligare redovisning krävs för att visa att kravet på brottförlängning kan uppfyllas i samtliga positioner för de två typerna av insatser. SKB har ännu inte berört hur skillnader i stelning av segjärnet under gjutprocessen av BWR- och PWR-insatser inverkar på de kravsatta materialegenskaperna (SKB TR-10-14). SKB har under 2014 till SSM lämnat en rapport där gjutsimulering av de två typerna av insatser redovisas (SKBdoc 1414760). SSM noterar att stelningstider vid gjutning för de två insatserna är tre timmar för BWR-insatsen respektive 14,5 timmar för PWR-insatsen. Hur dessa skillnader i stelningstid påverkar initialtillståndets kravsatta materialegenskaper för de två typerna av insatser har ännu inte redovisats. SSM noterar att PWR-insatsens sist stelnade område befinner sig cirka 1/3 upp från insatsens botten (SKBdoc 1414760). Med utgångspunkt från detta resultat kan SKB:s provningsstrategi att ta ut prov från insatsens toppsektion för att verifiera initialtillståndet för samtliga tillverkningskrav ifrågasättas. SSM anser därför att SKB:s strategi för att verifiera tillverkningskrav för insatsernas initialtillstånd behöver vidareutvecklas.

Behovet av att vidareutveckla strategin för att verifiera tillverkningskrav styrks enligt SSM även av den statistiska analysen av insatsernas brottförlängning och brottseghet (SKBdoc 1464317). Nuvarande tillverkningsprocesser har inte kunnat uppfylla kraven. SSM konstaterar att analysen i SKBdoc 1464317 har baserats på mekaniska egenskaper för ett urval av insatser. SSM noterar att SKB inte har motiverat varför endast några få av undersökta insatserns mekaniska egenskaper har analyserats i SKBdoc 1464317. Resultat från uppmätta brottförlängningar från toppskivan i BWR-insatser gjutna mellan 2003-2008 och PWR-insatser gjutna 2005-2008 visar inte någon tydlig trend att förbättras (SKBdoc 1175208).

SSM anser att SKB:s motivering av insatsens brottseghet och användningen av segjärns olinjära brottegenskaper är ofullständig. En anledning till detta är att det saknas kända tillämpningar av användning av segjärns olinjära brottegenskaper från annan industriell verksamhet samt att krav på olinjär brottseghet efter en viss stabil spricktillväxt inte förekommer i standarder för segjärn (ex. EN-GJS 500). Däremot används vanligtvis krav på teknologiska värden för sträckgräns, brottgräns, brottförlängning och även krav på linjär brottseghet K_{Ic} . SKB:s användning av krav på insatsens olinjära brottseghet för insatsens initialtillstånd har enligt SSM:s bedömning inte motiverats vare sig i ansökansunderlaget eller i SKB:s inlämnade kompletteringar. SSM kan av denna anledning inte ta ställning till tillämpbarheten av detta krav för segjärn, men kan inte heller utesluta dess fortsatta användning. Det är känt att materialegenskaper för segjärn är starkt beroende av mikrostruktur med avseende på grafitmorfologi och perlitinhåll (Davis, 1996). SKB:s tillverkningskrav på perlitinhåll och grafitmorfologi (SKBdoc 1436245, ver. 0.1) behöver därför motiveras med hänsyn till inverkan på brottseghet. Egenskaper som nodulstorlek, andel perlit, grafitmorfologi och grafitflotation förväntas ha en inverkan. Utan en utförligare redovisning kring inverkan av dessa egenskaper och processer är det svårt för SSM att bedöma om SKB:s mikrostrukturella krav är tillräckliga för att upprätthålla de tillverkningskrav på brottseghet som SKB redovisar.

SKB har valt att använda sig av medelvärdets 90 % nedre konfidensintervall vid kravställning av materialets olinjära brottseghet. SKB:s slutsats är att spridningen i brottsegheten konservativt tas om hand genom detta förfarande (SKB TR-10-28, avsnitt



7.5.3). SSM anser att denna metod inte kan betraktas som en konservativ skattning av brottsegheten utan närmare motivering.

SKB har bedömt användning av brottseghet i förhållande till kriterier för maximalt tillåtna defekter (SKB TR-10-28, kapitel 8). Enligt SKB medför användning av säkerhetsfaktorer i enlighet med ASME för ferritiskt tryckkärlsstål att osäkerheter exempelvis med avseende på brottseghet tas om hand (SKB-TR-10-28, avsnitt 3.2.2). SSM anser att konstruktionsregler som gäller för tryckkärlsstål (ASME, 2008) inte kan användas för gjutet segjärn utan motivering. SSM anser vidare att SKB behöver vidareutveckla och förbättra kravställning av brottseghet då denna för närvarande har utgått från enstaka prov av gjutna insatser utan att argumentera för om dessa kan anses representativa för alla positioner i insatsen samt för hela den totala produktionen på cirka 6 000 kapslar.

SKB redovisar att sprickor i segjärnsinsatsen endast kan uppkomma vid plåtkassetten yttre hörn (SKBdoc 1434744). I andra SKB dokument framgår dock att sprickliknande defekter förekommer i ett flertal andra positioner (SKBdoc 1432361). Dessutom framgår inte av SKB:s analys av tillverkningsdefekter huruvida vällningsfel har beaktats (SKBdoc 1175208). SSM anser därför att SKB:s nuvarande defektbeskrivning för segjärnsinsatsen är ofullständig med avseende på förekomst av sprickor och eventuell förekomst av vällningsfel (SKBdoc 1414760). Det bör dock påpekas att SKB i ansökan har lämnat öppet för vilken gjutmetod som slutligen kommer att användas vid tillverkning av segjärnsinsatser. SSM bedömer att den valda metoden för gjutning av segjärnsinsatsen kommer att påverka vilka defekter som kan förekomma och som kan ha en påverkan på den långsiktiga strålsäkerheten. SSM förväntar sig därför att SKB i kommande redovisningar i den stegvisa processen kommer att uppdatera kravbilderna för oförstörande provning av insatsen (SKBdoc 1414760) och koppla defektbilderna tydligare till de slutligt valda tillverkningsmetoderna.

SSM anser att SKB utförligare bör redovisa kopplingen mellan uppkomst av sprickor och gjutningsmetod samt även inverkan av stelning- och svalningsförhållanden för de båda insatstyperna (BWR och PWR). Förekomst av sprickor i gjutna strukturer orsakas primärt av krympspänningar. Eftersom det finns stora skillnader mellan stelning- och svalningsförhållandena för de båda insatstyperna kan skillnader också föreligga avseende förekomst av sprickor.

SSM noterar behov av förbättringar avseende SKB:s redovisning beträffande stålplåtkassetten, stållock och ventil eftersom detaljerade redogörelser av tillverkningen för närvarande saknas (SKB TR-10-14). SSM bedömer emellertid att valsad stålplåt är ett betydligt mer homogent material jämfört med en gjuten struktur och därmed att tillverkningsprocessen bedöms vara mindre kvalitetskritisk. Dessa komponenter har heller inga långtgående funktionskrav och tillverkningskrav kopplade till den långsiktiga strålsäkerheten.

3.4.3 Provning av segjärnsinsats

SSM sammanfattar i detta avsnitt kortfattat SKB:s redovisning och utvecklingsarbete kopplad till provning av segjärnsinsatsen. SSM har även offentliggjort ett särskilt PM som innehåller en mer detaljerad och genomgående beskrivning av SKB:s redovisning kring kontroll och provning av kapseln (SSM2011-2306-34). Därför följer nedan enbart ett urval av SKB:s redovisning.

3.4.3.1 Underlag från SKB

I produktionsrapporten (SKB TR-10-14) beskriver SKB att ultraljud (UT) som huvudteknik för oförstörande provning (OFP) av segjärnsinsatsen och tre referensmetoder



har utvecklats för olika delar av segjärnsinsatsen. En dubbelkristall, longitudinell sökare (TRL) används för vinkelavsökning av insatsens ytterområde för att detektera volymetriska och sprickliknande defekter. Normalavsökning med "phase array" (PA) används för provning av området mellan insatsens ytteryta och kanälrör för att detektera volymetriska defekter samt för mätning av kantavståndet. Transmissionsprovning med PA används för provning av området mellan kanälrören för att detektera volymetriska defekter. Dessa referensmetoder har huvudsakligen utvecklats för BWR-insatsen. För PWR-insatsen görs normal- och vinkelavsökning på samma sätt som för BWR-insatsen, men för transmissionsprovning utvecklas för närvarande teknik som är anpassad till det större avståndet mellan kanälrören. På grund av teknikens begränsningar nära ytan utförs UT-provningen innan insatsen maskinbearbetas till slutlig dimension. Provning av ytan kommer att genomföras efter slutlig maskinbearbetning. Den metod som kommer att användas samt vilka acceptanskriterier som ställs tas fram innan tillverkningen av insatsen påbörjas. I SKBdoc 1434744 presenteras den senaste utvecklingen av provningstekniker. Denna utveckling har resulterat i tre olika provningstekniker. Normalavsökning med PA UT med tre olika fokusdjup från mantelytan ner till 200 mm djup har valts som huvudteknik för avsökning av segjärnsinsatsen. Vinkelavsökning med transversalvåg har valts för avsökning av volymen mellan mantelytan ner till 50 mm djup. För avsökning av volymen mellan kanälrören används två sökare placerade på motsatta sidor av insatsen och varje sökare fungerar både som en pulsekosökare och en transmissionsökare. För ytprovning har induktiv provning (ET) och magnetpulverprovning utvecklats.

SKB har studerat tillförlitligheten i referensmetoderna i samarbete med BAM i Berlin (Federal Institute for Materials Research and Testing). Referensmetoderna har analyserats för att bestämma detekteringsförmågan POD ("Probability of Detection") med hjälp av artificiella defekter av typ cylinderborrhål (SDH) och notchar. Ett värde av "a90/95" anses vara en rimligt hög nivå som mått på detekteringsförmågan. Detta innebär att 90 % av defekterna med storleken "a" kommer att detekteras inom ett konfidensintervall på 95 %, där intervallet anger osäkerheten vid bestämning av detekteringsförmågan. Utifrån dessa studier anger SKB att med vinkelavsökningen kan ytsprickliknande defekter med en storlek av 2-3 mm samt 4-9 mm på ett djup av 50 mm från ytan detekteras. För normalavsökningen anges att defekter i storleksordning 2-9 mm kan detekteras men att detekteringsförmågan minskar med djupet. SKB beskriver att med dessa resultat som utgångspunkt kan det antas att referensmetoderna kan detektera defekter större än eller lika med 5 mm ner till 50 mm djup och större än eller lika med 10 mm på djupare avstånd från ytan. Vidare kan det antas att antalet inte detekterade defekter med en storlek större än 10 mm borde vara mycket begränsat.

I SKBdoc 1432361 beskriver SKB att inga tekniker för OFP hittills har utvecklats för att prova hela insatsens homogena botten eller det inre området mellan kanälrören. Relevanta volymetriska eller sprickliknande gjutdefekter inom dessa områden har beskrivits med utgångspunkt från deras brottmekaniska karakteristik. I många fall är den brottmekaniska klassificeringen preliminär och kräver fortsatt utredning. De givna acceptanskriterierna har baserats på acceptabla defektstorlekar för postulerade defekter som har förenklats eller anpassats för att möjliggöra skadetålighetsberäkningar. Krav gällande volymetriska tillverkningsdefekter har enbart beräknats utifrån fallet med isostatisk last. SKB beskriver vidare att för ett flertal sprickliknande defekter har inga beräkningar utförts för defekter som är större än SKB:s preliminära angivelser. Detta innebär att större defekter kan komma att tillåtas efter ytterligare utredningsarbete. SKB har ännu inte genomfört några beräkningar för elliptiska slagginneslutningar för området mellan de fyra kanälrören i PWR-insatser. Acceptanskriterier för de relevanta defekterna har definierats utifrån defekternas brottmekaniska klassificering och de riskområden som har identifierats. Ur ett brottmekaniskt perspektiv har inre sugningar, sugningsporer, ytblåsor (gasblåsor) samt kärnstöldblåsor klassificerats som volymetriska defekter. Stelningsprickor



(varmsprickor), kallsprickor och slagginneslutningar (slaggar) har klassificerats som sprickliknande defekter. Dock har sandpartiklar klassificerats på samma sätt som slaggar i den senaste uppdateringen (SKBdoc 1434744 rev. 2).

I (SKBdoc 1175208 rev. 8) anges att exempel på defekter i segjärnsinsatsen är inre sugningar, sugningsporer, kärnstödblåsor, ytblåsor, sandkorn eller andra partiklar från kokillen som ligger inbäddade på ytan eller i godset, sprickliknande defekter som t.ex. kallsprickor, s.k. elefanthud, slagginneslutningar (s.k. dross), mikrosugningar och felaktig eller oönskad grafitstruktur. De tre sistnämnda kan detekteras med hjälp av metallografi. SKB anser att förekomst av varm- eller kallsprickor är mycket ovanligt.

SKB har som en del av kompletteringsförfarandet gradvis uppdaterat sin redovisning av OFP för segjärnsinsatsen (SKBdoc 1179633, SKBdoc 1434744).

3.4.3.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB har visat att ultraljud (UT) är lämplig som huvudsaklig metod för oförstörande provning (OFP) av segjärnsinsatsen. SSM noterar dock att det saknas defektbeskrivning och acceptanskriterier för andra delar av insatsen än den gjutna delen såsom kassetten, stagplåtar, stållock, skruv etc. Det finns heller ingen beskrivning av dessa delars betydelse för kapselns initialtillstånd. SSM anser vidare att SKB:s defektbeskrivning är ofullständig med avseende på förekomst av sprickor samt att välningsfel inte har beaktats (avsnitt 3.4.1). Av SKB:s redovisning framgår att tillverkningsteknikens utveckling har i huvudsak fokuserat på BWR-insatsen och att defekternas acceptanskriterier har definierats utifrån dess brottmekaniska klassificering och identifierade riskområden.

Acceptanskriterier styr vilken provning som behöver utföras samt vilka krav som behöver ställas på provningssystemet. SSM anser att SKB:s nuvarande redovisning är ofullständig eftersom det saknas en beskrivning av defekternas karakteristik utifrån ett OFP-perspektiv. SSM anser att för att kunna verifiera de olika inspektionsteknikerna behöver möjliga och postulerade defekter och deras placering, orientering, variationer i lutning och vridning, morfologi och täthet vara klarlagda. Utan dessa uppgifter har SSM ingen möjlighet att bedöma vilken inverkan egenskaperna och variationerna hos möjliga och postulerade defekter har på inspektionstekniken med OFP.

Med bakgrund av ovanstående behöver SKB förtydliga defekternas karakteristik utifrån ett OFP-perspektiv. I första hand behövs ytterligare kunskap om vilka defekter som behöver detekteras och storleksbestämmas samt deras karakteristik. I andra hand behövs testblock med verklighetstroga defekter som ger ett signalsvar som är representativt ur ett OFP-perspektiv för att kunna verifiera provningstekniken. SKB använder både för kvantifiering av provningstillförlitligheten genom s.k. POD-kurvor och för framtagande av testblock för verifiering av teknik och kvalificering, artificiella defekter av typ FBH, CBH och notchar. Erfarenheter både i Sverige och internationellt visar dock att dessa typer av defekter inte ger representativa signalsvar och därför inte kan ersätta verklighetstroga defekter. SSM anser därför att SKB ur ett OFP-perspektiv behöver ta fram verklighetstroga defekter. Dessa erfordras vid bedömning av provningssystemets förmåga att detektera, karaktärisera och storleksbestämma defekter samt för att kvantifiera kvalificeringen. Defekterna behöver vara placerade i volymen på positioner där OFP-systemet ska kunna detektera, karaktärisera och storleksbestämma defekter. Defektpositionerna i testblocken bör variera, men även innehålla ogynnsamma positioner s.k. ”worst case defects”.

Acceptanskriterier styr vilken provning som behöver utföras samt vilka krav som behöver ställas på provningssystemet. Det framgår av underlaget att inga OFP-tekniker har



utvecklats för att prova hela insatsens homogena botten eller det inre området mellan kanalrören. Det saknas för närvarande även OFP-teknik och kriterier för volymen nära kassetstrukturen och bakom stagplåtarna. Ingen OFP-teknik kopplad till defektkaraktistik är heller framtagen för att detektera eller storleksbestämma möjliga sprickliknade defekter på ett djup som är större än 50 mm från mantelytan. Det framgår inte heller av underlaget vilket tillvägagångssätt SKB kommer att tillämpa i det fall att volymetriska defekter som detekteras skymmer resterande volym bakom dessa vid provning av området mellan kanalrören.

Det saknas en beskrivning av hur SKB avser att karaktärisera defekter som plana eller som volymetriska. SSM anser att en sådan beskrivning är nödvändig ur ett OFP-perspektiv vid framtagande av teknik och kriterier för detektering och storleksbestämning. SKB anger att inga sprickliknande defekter har detekteras under provtillverkningen och att bara volymetriska defekter har observerats. Baserat på redovisat underlag har inte SSM möjlighet att bedöma om det finns förutsättningar för SKB att inför kommande steg i den flerstegsvisa provningen ta fram tillförlitliga OFP-tekniker för detektering, karakterisering och storleksbestämning för de inre delarna av insatsen så som volymen mellan kanalrören.

Sammanfattningsvis bedömer SSM att även om det finns otydligheter i SKB:s underlag kommer SKB sannolikt efter kommande utvecklingsarbete att:

- kunna ta fram nödvändiga defekt-specifikationerna med kompletta beskrivningar av möjliga och postulerade defekter samt deras karakteristik för segjärnsinsatsen
- ta fram defektsimuleringsteknik och testblock med verklighetstroga defekter för att verifiera teknik, bestämma provningens tillförlitlighet samt för kvalificeringen av tekniken för de yttre delarna av insatsen
- ta fram tillvägagångssätt för kvantifiering av provningstillförlitlighet samt kvalificering
- ta fram OFP-provningsteknik för detektering, karakterisering och höjdbestämmning för de yttre delarna av insatsen
- utveckla/ta fram en kontrollordning för tillverkning av kapseln
- utveckla/ta fram ett kvalitetsledningssystem för att säkerställa och ge tilltro till att de krav som ställs på det färdigbyggda KBS-3 förvarets kvalitet uppfylls.

Däremot bedömer SSM att utifrån dagens erfarenheter och kunskaper inom OFP att det sannolikt inte finns förutsättningar för SKB att i kommande steg av provningsprocessen ta fram OFP-teknik för detektering, karakterisering och höjdbestämmning av möjliga och postulerade defekter i de inre delarna av insatsen (volymen mellan kanalrören). Dessutom bedömer SSM att det sannolikt inte heller finns förutsättningar för SKB att i kommande steg ta fram defektsimuleringsteknik och testblock med verklighetstroga defekter för att verifiera tekniken, bestämma provningens tillförlitlighet samt för kvalificeringen av tekniken i dessa områden. SKB har som en del av kompletteringsförfarandet redovisat vissa tänkbara åtgärder (SKBdoc 1471283). SKB behöver ta fram kompletterande angreppssätt för att hantera defekter i dessa positioner.

3.4.4 Tillverkning av kopparhölje

3.4.4.1 Underlag från SKB

SKB har utvecklat en semikontinuerlig gjutning av ett kopparämne och göt med diametrar på 850 mm och vikter upp till 16 ton (SKB TR-10-14, avsnitt 5.3). Detta innebär att det gjutna ämnet tillverkas styckvis med en rörlig kokill. Efter gjutning komprimeras det gjutna kopparämnet för att öka dess diameter till ca 1,4 m, därefter pressas ett centralt hål



med en diameter på ca 1 m i ämnet ("blocker") för att göra den efterföljande extrusionen möjlig. Under hela denna process överstiger temperaturen för kopparämnet 600°C och processen sker i luft. Efter gjutning kapas götets ändrar bort. Vid halvkontinuerlig gjutning ökar risken för defekter i början och i slutet av gjutningen. SKB har även med kontinuerlig gjutning producerat mindre koppargöt med en diameter på 500 mm för tillverkning av lock och botten. Den kontinuerliga gjutningsprocessen som används medför att slagg eller andra defekter koncentreras vid ändarna av götet vilka kapas bort. Flera ämnen tillverkas samtidigt då göten kapas i flera delar med erforderlig längd. Det är lättare att gjuta göt med mindre diameter och dessa små kopparämnen saknar problematiken med ökad risk för defekter i start- och slutskede av gjutningen. På samma sätt som för gjutning av insatsen har utveckling av tillverkningsprocessen för koppargöt skett i samarbete med leverantören. Gjutningsprocessen har utvecklats under åren vilket har medfört minskad syrehalt, färre centrala sprickor, bättre kontroll av fosforhalten samt förbättrad ytkvalitet.

SKB har studerat olika metoder för tillverkning av kopparrör från ett gjutet kopparämne. Dessa är rullformning av varmvalsade kopparplåtar med längsgående svetsar (två rörhalvor med två längsgående svetsar), extrusion, dornpressning ("pierce and draw") samt smidning. Arbetet har i första hand fokuserat på tillverkning genom extrusion och dornpressning. SKB har utvecklat tillverkningstekniken för kopparrören tillsammans med leverantörer under årens lopp och detta arbete väntas fortsätta. SKB hade till och med halvårsskiftet 2008 tillverkat 27 kopparrör med extrusion, 11 med dornpressning, 9 med smidning och 13 med rullformning med längsgående svetsar. SKB har valt extrusion som referensmetod för tillverkning av kopparrör med utgångspunkt från metodens repeterbarhet. Extrusionsmetoden anses vara robust och kan automatiseras med få processparametrar. Dessutom anser SKB att metoden har hög kapacitet och medför en låg risk för uppkomst av defekter. SKB bedömer att defekter i koppargötet kommer att vara placerade i rörets centrala delar och de kan tas bort under håltagningsoperationen som inleder extrusionsprocessen. Efter extrusion kommer prov tas ut för att verifiera materialets brottförlängning (> 40 %). Dessutom kommer krav på materialets maximala medelkornstorlek (< 360 µm) verifieras med såväl metallografiskt prov som ultraljudprovning. Krav på krypförlängning till brott kommer inte att provas för varje rör, då detta anses vara för tidskrävande. Denna egenskap kommer enligt SKB att tillskrivas resultatet från den kemiska analysen med avseende på innehåll av fosfor (30-100 ppm) och svavel (< 12 ppm). Fosfor är i sammanhanget det legeringselement som enligt SKB ger kopparrör hög krypförlängning. Fosfor tillsätts genom trådmatning av en fosforlegering under gjutförloppet (SKB TR-10-14, avsnitt 5.3.2). Trådmatning av legeringselement är enligt SKB en för industrin vanlig metod för att tillsätta legeringselement. SKB bedömer sammanfattningsvis att kopparrör tillverkade med den valda referensmetoden kommer att kunna uppfylla de tillverkningskrav som har definierats för referenskapseln.

SKB har valt smidning som referensmetod för tillverkning av kopparlock och kopparbotten vilket ger ett homogent finkornigt material med hög duktilitet. För smidda lock och botten redovisar SKB samma krav som för det extruderade röret. Smidesprocessen utförs liksom för extrusion i luft utan skyddande atmosfär. Oxider som kommer från gjutningen och/eller vid smidesprocessen kan ge upphov till icke önskvärda defekter vilka ska kunna detekteras med oförstörande provning. Det smidda ämnet bearbetas därefter i kallt tillstånd till slutlig geometri. SKB planerar att utföra kontroll av mekaniska egenskaper, kemisk sammansättning och kornstorlek på samma sätt som för det extruderade röret. Krav på kemisk sammansättning och materialets mekaniska egenskaper är samma som för det extruderade röret. SKB bedömer sammanfattningsvis att även lock och botten tillverkade med den valda referensmetoden kommer att kunna uppfylla krav kopplade till referenskapseln. För kopparlock och botten anges att gjutning, maskinbearbetning samt kvalitetskontroll kommer att utföras av leverantörerna.

Inneslutningar och kaviteter kan även uppträda vid gjutning av koppar. I första hand har defekter noterats i form av krympsprickor och kaviteter som uppträtt i de stora koppargötena som är avsedda för rörtillverkning och företrädesvis i deras centrala delar. Defektförekomsten har varit mest uttalad i götens ändar. Andra tänkbara defekter i göten är oxidinneslutningar och inneslutningar av främmande partiklar. Vid extrusionen kan defekter från göten hamna i de formade kopparrören. Krympsprickor med icke-oxiderade ytor anses kunna läka samman vid extrusion och därmed försvinna medan ytdefekter med oxiderade ytor hos göten skulle kunna forma stråk av oxidpartiklar i det extruderade röret.

3.4.4.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att de av SKB utvecklade tillverkningsmetoderna för kapselns kopparhölje är godtagbara. Denna bedömning baseras på SKB:s utvecklingsarbete med fullstora kapselkomponenter under det senaste årtiondet. Det kvarstår emellertid behov av fortsatt utvecklingsarbete för att dels fastställa vissa materialkrav dels kunna säkerställa att samtliga kvalitetskrav kan uppnås.

SSM anser att SKB ännu inte tydligt visat att det extruderade kopparröret kan tillverkas så att en tillräckligt homogen fosforhalt kan uppnås. Denna fråga har betydelse för SKB:s krav på kopparrörets krypduktilitet. SSM bedömer dessutom att det behövs ytterligare underlag som visar huruvida oxidiska defekter kan förekomma i betydelsefull omfattning i kopparröret efter tillverkning. SKB hänvisar till att ultraljudsprovning har utförts utan att hitta några defekter i de extruderade kopparrören. SSM bedömer emellertid att den utförda provningen inte varit kvalificerad att hitta oxidiska defekter (SKB TR-10-14, avsnitt 5.3.3), och därigenom kan förekomst av defekter för närvarande inte uteslutas. Oxidiska defekter kan ha en negativ inverkan på korrosionsbarriären. Följande punkter nedan utgör exempel på områden där uppgifterna i ansökan samt i de kompletteringar som SSM har tagit del av bedöms vara ofullständiga:

- Inverkan av sammansättningsvariationer i koppar samt kravspecifikation av föroreningshalter i koppar är ofullständig.
- Kravspecifikation för maximal syrehalt i koppar respektive syrehaltens inverkan på koppars krypegenskaper behöver förtydligas.
- Kravbildningen för defekter i kapselns koppardelar är ofullständig.
- Ofullständig redovisning avseende säkerställande av krypduktilitet genom bestämning av fosforhalt.
- Ofullständig redovisning för att bedöma om SKB:s strategi att kvalitetssäkra fosforhalt uppnås genom kontroll av fosforhalt i koppargötets båda ändar.

SKB har kompletterat ansökan med en undersökning av variationen av legerings/föroreningselement i koppargöt (SKBdoc 1411243). SSM bedömer att sammansättningsvariationer i gjutna kopparmaterial är svåra att helt undvika. Även om SKB:s analys av resultaten att variationen i kemisk sammansättning är liten i götets radiella riktning föreligger variationer för kemisk sammansättning i götets axiella riktning. SKB:s redovisning visar att syrehalten i botten av ett göt i vissa fall kan överstiga den kravsatta syrehalten (< 5 ppm) för götets initialtillstånd (SKB TR-10-14, avsnitt 7.1.1). Variationer föreligger också mellan olika koppargöt. Undersökta koppargöt i (SKBdoc 1411243) har cirka 4 ggr högre syrehalt jämfört med det uppmätta medelvärdet för de 8 stycken göt som redovisas i SKB TR-10-14 (4,5 ppm jämfört med 1,1 ppm). SSM noterar vidare att halten tellur, zink och vismut i göten överstiger vad som specificeras i standarden för C10100 materialet och att även dessa föroreningshalter varierar i götets axiella led. SSM anser att ytterligare insatser krävs för att säkerställa att sammansättningsvariationer håller sig inom fastställda gränser. SSM noterar avsaknaden av specifikationer för föroreningshalter för tellur, zink, och vismut, (SKB TR-10-14) men denna information kan infogas i nästa utgåva av konstruktionsförutsättningarna för kopparkapseln.



Koppardelarnas innehåll av syre är betydelsefull eftersom relaterade materialegenskaper avser både korrosionsmotstånd och krypduktilitet, dvs. töjning till brott vid kryplast (SKBdoc 1371851). Krypprovt friktionssvetsat kopparmaterial har i vissa fall haft syrehalter i materialet på 23 ppm (SKBdoc 1391374). SKB:s redovisning visar också att oxider kan bildas vid tillverkning av kopparrör eftersom tillverkningsprocessen för kopparröret sker utan skyddsgas. SSM anser därför att kravet på kopparens innehåll av syre behöver förtydligas i förhållande till vad som anges i SKB:s ansökan ("oxygen content up to some tens of ppm") (SKB TR-10-14). SSM noterar att SKB som en del av kompletteringsfasen reviderat tillverkningskravet med avseende på syrehalt till < 5 ppm (SKBdoc 1471283). SSM anser vidare att SKB ytterligare behöver undersöka om syrehalten i koppar kan påverka kopparens krypegenskaper inom kravsatt intervall för syrehalt.

SKB anger att information om defekter i kopparrör och kopparlock/botten för närvarande är begränsad (SKB TR-10-14, avsnitt 7.1.5). Ett antal kopparrör och kopparlock/bottnar har blivit undersökta men med preliminära oförstörande provningsmetoder. SKB har redovisat en sammanställning av defekter som kan förväntas bildas vid tillverkning av kopparröret (SKBdoc 1175208). SSM anser emellertid att SKB:s redovisning av uppkomst av sprickliknande defekter är ofullständig. SKB behöver motivera varför inte inre radiella sprickor så kallade "chevron sprickor" kan bildas under extrusionsförloppet (Dieter m.fl., 2003).

SKB anser att kravet på fosfor i kopparmaterialet (30-100 ppm) har stor betydelse för att säkerställa tillräcklig krypduktilitet (> 15 %). Syrefri koppar utan fosfor (OF-koppar) kan i vissa fall ha krypförlängningar under 1 % vilket har visats genom experiment (SKB TR-09-32). Enligt SKB:s plan ska fosforinnehållet bestämmas genom provuttag i koppargötets topp och botten. SKB har i en komplettering redovisat att variationen i fosforhalt är liten i koppargöten (SKBdoc 1371851). SKB:s motivering av kravsättning av fosforinnehållet baseras på resultat som visar att ett kopparmaterial med 30-100 ppm fosfor har cirka 3 ggr högre krypduktilitet jämfört med ett kopparmaterial utan fosfor (SKB TR-09-32, avsnitt 5.2). Enligt SSM:s bedömning är dock en svaghet i detta resonemang att även kopparmaterial utan fosfor under de provningstekniska förutsättningar som gällde vid provningen hade tillräcklig krypduktilitet. Dessa gynnsamma förutsättningar kan dock inte förutsättas gälla under verkliga slutförvarsförhållanden. SSM anser att betydelsen av denna fråga är att det i realiteten endast är fosforinnehållet som kommer att kunna kvalitetsäkras för att påvisa tillräcklig krypduktilitet.

SSM anser att SKB:s metod för att kontrollera fosforhalt i koppargöten är otillräcklig och att ytterligare insatser kommer att krävas. Det kan inte uteslutas att störningar i trådtillförseln av fosfor vid gjutförloppet kan medföra variationer av fosforhalten längs det cirka 2,5 m långa koppargötet. SSM anser därför att det inte går att enbart säkerställa SKB:s kravsatta krypduktilitet via analys av fosforhalt i götets topp och botten. SSM anser att kompletterande mätningar erfordras liksom eventuellt behov av tillverkningsprov kan föreligga med avseende på krypduktilitet. SKB:s specifikation av fosforhalt i kopparmaterialet motsvaras inte av någon legering som idag används kommersiellt. De fosforlegerade kopparmaterialen som kommersiellt används idag (t.ex. C12200) innehåller högre halter (150-450 ppm). I dessa legeringar tillsätts fosfor för att ta bort syre från materialet. Beroende på att fosfor är en betydligt kraftfullare desoxidant än koppar kommer inte kopparoxider att kunna samexistera i en smälta med överskott på fosfor. Processtekniskt finns det vissa svårigheter med att tillsätta fosfor i en kopparsmälta beroende på att omröringen måste säkerställas för att erhålla en bra desoxidation av smältan.



SSM anser att ovanstående frågeställningar kopplade till tillverkningen av extruderade kopparrör även är relevanta för tillverkningen av kopparlock och kopparbottnar. Smidesprocessen medför att oxider eller slagg som finns på det gjutna ämnet innan smide kan tryckas in i materialet på liknande sätt som vid extrusion av kopparrör. SKB avser dock inte att prova varje ämne för sig eftersom gjutprocessen inte ger upphov till betydande kemiska variationer (SKBdoc 1371851). Enligt SSM:s bedömning krävs dock ytterligare kvalitetskontroll särskilt i syfte att säkerställa homogen halt av fosfor med tanke på dess betydelse för materialets krypduktilitet.

SKB redovisar att kallbearbetning vid tillverkningen av kopparlock och kopparbottnar reducerar materialets krypbrottsförlängning (SKB TR-09-32). För att belysa denna fråga kompletterade SKB ansökan genom att redovisa hårdhetsmätning av fem stycken smidda kopparlock (SKBdoc 1371851). SKB använde en omräkningsfaktor för att relatera uppmätta hårdheter till sträckgränsen (Rp0.2). Sträckgränser i locken varierade mellan 114-170 MPa i de aktuella mätpunkterna. Smidesprocessen kan därmed ge upphov till teknologiska töjningar på upp till 15-20 % (SKB R-09-14). SKB redovisar att de nu utvecklat en värmebehandlingsprocess för locken som enligt uppgift ger en jämnare låg hårdhet för lock/botten. SKB har dessutom fört in värmebehandling av samtliga lock/bottnar i referensmetoden. SSM anser att SKB med denna värmebehandling tillräckligt redovisat att initialtillståndet för lock/bottnar inte kommer innehålla kallbearbetade delar.

3.4.5 Friktionsomrörningssvetsning av koppar

3.4.5.1 Underlag från SKB

SKB planerar att utföra svetsning av koppardetaljer som rör, kopparlock, och kopparbotten genom friktionsomrörningssvetsning FSW ("Friction Stir Welding"). Denna metod för svetsning av koppardetaljer har utvecklats av SKB sedan 2002. SKB har genom åren utvecklat två olika svetsmetoder, FSW och elektronstrålesvetsning EBW ("Electron Beam Welding") men har valt FSW som referensmetod (SKBdoc 1175162). FSW innebär att ingen uppsmältning av materialet sker utan svetsning genomförs i fastfas och är närmast att betrakta som att koppardelarna "välls" ihop som vid varmsmide. Metoden bygger på att ett verktyg av ett värmebeständigt material (nimonic 105) roterar i kopparmaterialet och alstrar tillräckligt med värme för att delarna ska sammanfogas. Det roterande verktyget består av en konisk tapp och en cylindrisk skuldra som pressas in i svetsgodset. Tappens funktion är att genom friktion värma upp svetsgodset och genom sin form och rotation tvinga godset att flyta runt tappens och skapa en svets. Efter att ha utfört 69 lock- och botten svetsningar anser SKB att både svetsprocessen och svetsystemet är robust och stabilt. Svetsförsöken har visat att repeterbarhet och tillförlitlighet hos svetsprocessen är god, men SKB anser ändå att fortsatt optimering av svetsmetoden kommer att behövas. SKB anger att utvecklingsarbetet kommer att inriktas på att möjliggöra automatisk styrning av svetsproceduren för produktion.

Svetsprocessen kan beskrivas med följande processparametrar: spindelvarvtal, svetskraft (kN), verktygstemperatur (°C) och inträngning av skuldra (mm). SKB har, baserat på dessa parametrar, tagit fram ett processfönster som med en optimerad verktygsuppsättning anses kunna reducera förekomst av svetsdefekter som foglinjeböjning ("joint line hooking") till ett maximum av 1,5 mm i radiell riktning. SKB anger att foglinjeböjning är den enda återkommande defekten som har detekterats med OFP. Defekten uppstår då verktygstappens spets går för djupt och materialflödet flyttar den vertikala foglinjen ut mot ytan. Även inre håligheter så som s.k. maskhål har påvisats nära ytan med OFP. Denna defekt har dock endast uppstått om svetsparametrarna befunnit sig utanför processfönstret. I svetsgodset har också områden med små ytnära oxidpartiklar



observerats, men dessa tas normalt bort vid efterbearbetning av svetsen. Enstaka porer eller porstråk samt spår av verktygsmaterial i svetsgodset har observerats. Beroende på materialflödet vid svetsning kan även stråk av oxidpartiklar bildas djupare i svetsen vilka är svåra att observera med konventionell metallografi. SKB gör bedömningen att viss förekomst av oxid- och främmande partiklar inte påverkar korrosionsegenskaperna.

SKB har sammanställt utvecklingen av referenssvetsproceduren och detta material inkluderar även användning av en argongaskammare för svetsning med skyddsgas (SKBdoc 1435653). Argongaskammaren eftermonterades på svetsmaskinen för att studera svetsning i skyddsgas. Syftet med användning av skyddsgas är att minimera oxidpartiklarna i svetsen. Övrig viktig utveckling är bland annat användning av en kaskadregulator som automatiskt styr tapptemperaturen genom att justera verktygets rotationshastighet. Denna åtgärd förbättrar säkerhetsfaktorn hos verktygstappen mot brott genom att temperaturen på ett mer tillförlitligt sätt håller sig inom processfönstret 790-910°C. SKB anger vidare att kaviteter som maskhål förekommer vid tapptemperaturen lägre än 790°C. Maskhålen är inneslutna vid temperaturer mellan 750-790°C medan hålligheterna kan vara ytbrytande vid temperaturer lägre än 750°C. Regulatorn justerar temperaturen till ett börvärde på $845 \pm 5^\circ\text{C}$.

Foglinjeböjning, förflyttad skarv och bindfel (kvarvarande fog) är plana defekter. Foglinjeböjning uppstår när den vertikala skarven mellan lock och rör böjs utåt och följer den nedre svetskonturen. Förflyttad skarv sker när den vertikala skarven mellan lock och rör förflyttas uppåt och uppkommer på grund av ett materialflöde runt verktygstappens spets. Bindfel uppstår när verktygstappens spets inte penetrerar tillräckligt djupt. Mest oxidpartiklar har indikerats vid start- och överlappssekvensen på grund av högre temperatur och icke optimal gasskydd vid dessa sekvenser. SKB anger att efter att verktygstapparna har ytbelagts med kromnitrid (CrN) finns inga spår av tappmaterial eller beläggning i svetsgodset. Därmed är tappbrott det enda sättet att få tappmaterial i svetsgodset. Tappbrott noteras direkt i svetsdata då det medför ett stort fall i värmeförlusten från verktyget. Verktygstappen inspekteras också visuellt efter svetsning för att utesluta tappbrott. Alla tappbrott som hittills inträffat har inneburit att minst 25 mm tapp brutits av och lämnats kvar i svetsgodset. Tappbrott förekommer vid temperaturer högre än 910°C. SKB anger vidare att framtida undersökningar kommer att säkerställa behovet och användning av den regulator som kontrollerar svetsdjupet vid referenssvetsningsprocessen.

SKB beskriver att de tre svetsparametrar som kan ändras under svetsning och därmed påverkar defektbildning är svets hastighet längs foglinjen, verktygets rotationshastighet och den kraft som verktyget trycker med mot kapseln för att ha rätt djup (SKBdoc 1415307). Förutom dessa svetsparametrar som kan justeras under svetsning så finns det flera andra parametrar som påverkar svetsresultatet; t.ex. svetsverktygets geometri, eventuell vinkel mellan verktyget och kapselytan samt svetsriktning och verktygets rotationsriktning. SKB anger att defektbeskrivningen avser det fall när verktyget förflyttas och roterar medsols.

Sammanställningen av defekter som kan uppkomma vid FSW baseras på omfattande provsvetsningar och de därtill kopplade undersökningar som SKB har genomfört (SKBdoc 1415307, avsnitt 4). Indikationer påvisade från OFP och slumpmässigt utvalda prov har verifierats och undersökts genom metallografiska undersökningar och mikrofokusdatortomografi. Områden där svetsprocessen har varit utanför processfönstret har undersökts. I utvalda områden har delar kapats ut för vidare undersökning med framförallt röntgen och metallografi. Vidare har flera metallografiska undersökningar av oberoende laboratorier gett information om framförallt små defekter eller andra avvikelser som inte påvisas vid OFP. SKB beskriver att eftersom defektbildningen vid FSW i koppar

och aluminium i stort sett är likvärdig kan defektkarakterisering i standarden (SS-EN ISO 25239-5:2012) användas. Denna standard beskriver de defekter som kan uppstå vid FSW i aluminium och dess legeringar. SKB anger att de relevanta defekttyper från standarden som kan uppstå vid FSW av koppar är kavitet, foglinjeböjning och kvarvarande fog. Utöver defekterna angivna i standarden kan ytterligare två typer av defekter uppkomma vid svetsning av kopparkapslar, oxidpartiklar och tappmaterial i svetsgodset. SKB beskriver vidare att risken för att producera kaviteter är mycket liten vid normala svetsbetingelser. Den förflyttade skarven kan som mest förflyttas lika mycket som tappspetsens diameter (7 mm). I och med att området mellan den ursprungliga skarven och den förflyttade skarven svetsas reduceras inte korrosionsbarriären och därmed behöver denna defekt inte detekteras vid oförstörande provning av svetsen. Den enda metod som har påvisat oxidpartiklar är metallografiska undersökningar. SKB anger att förekomsten av oxidpartiklar kommer att minimeras genom processkontroll av atmosfären vid svetsning och därmed behöver denna defekt inte beaktas vid OFP av svetsen. Eventuella rester av tappmaterial i svetsgodset kommer att kontrolleras genom specifik kontroll av verktyget efter svetsning och därmed behöver denna defekt inte beaktas vid OFP av svetsen.

Beträffande defekternas acceptanskriterier anger SKB att ur en mekanisk integritetssynpunkt tillkommer inga krav avseende defekter (SKBdoc 1415307, avsnitt 5). Kraven vid OFP på detektering och storleksbestämning utgår från initialtillståndsbeskrivningen (SKB TR-10-14) där en maximal reduktion av koppartjockleken på 10 mm kan accepteras.

3.4.5.2 SSM:s bedömning

Enligt SSM:s bedömning har friktionsomrörningssvetsning (FSW) av koppar utvecklats så långt att den måste betraktas som den mest tillförlitliga och repeterbara metoden att försluta och sammanfoga kopparhöljets olika delar. Detta då SKB har kommit förhållandevis långt i utvecklingen av sin FSW-uppställning och utförande av svetsning i atmosfär med skyddsgas. Även om SKB dock vare sig i ansökan eller i inkomna kompletteringar har visat att sammanhängande oxidstråk helt kan undvikas i svetsfogen har SKB tillsammans med sin systerorganisation i Finland, Posiva, i nyligen publicerade studier (Posiva SKB Report 02) visat på syrehalter i svetsen som ligger under specifikationen för basmaterialet (5 vikts-ppm). Områden med sammanhängande oxider skulle kunna innebära att kopparhöljets effektiva tjocklek reduceras. Oxidinnehållet kan påverka svetsfogen genom reaktioner med koppars väteinnehåll samt väte som genereras via korrosionsreaktioner i syrefri miljö. Det går för närvarande inte att utesluta att kapselns krypegenskaper försämras vid förekomst av sammanhängande oxidpartiklar (SKBdoc 1371851). SSM anser därför att SKB behöver fortsätta sina studier kring möjligheterna att eliminera och detektera oxidstråk samt analysera deras möjliga betydelse för kapselns långsiktiga skyddsförmåga. Följande punkter utgör exempel på områden där uppgifterna i ansökan samt i de kompletteringar som SSM har tagit del av bedöms vara ofullständiga:

- skyddsgasens påverkan på svetsens innehåll av oxider samt processfönstrets tillämpbarhet vid svetsning i argon
- gasskyddets tillförlitlighet under drift och kravspecifikation av högsta acceptabel syrehalt i skyddsgasen under svetsning för att sammanhängande oxidstråk ska kunna uteslutas
- formulering av krav på renhet för ytor som omfattas av FSW-svetsning samt acceptansnivåer för verktygsrester i svetsgodset
- svetsparametrarnas påverkan på risk för sammanhängande områden med oxider
- svetsdefekternas påverkan på vissa degraderingsprocesser.



Svetsgodsets sammansättning kommer i all väsentlighet att motsvara sammansättningen av kopparrör och kopparlock/botten eftersom FSW-svetsning inte tillför något tillsatsmaterial. Den komponent i kopparn som kan påverkas är framför allt svetsgodsets innehåll av syre/oxider (SKB TR-10-14, avsnitt 5.5.7). SSM anser att det kan finnas två källor till att syrehalten ökar vid FSW-svetsning, dels om FSW utförs i luft, dels förekomst av oxider på fogytor. SKB har i samband med ansökan inte beaktat hur svetsparametrarna påverkar sammanhängande områden med oxider (SKB TR-10-14). I en komplettering till SSM har SKB dock redovisat att det förekommer sammanhängande områden av oxider med längden 22 mm (cirka 6-7 mm i radiell riktning) för FSW-svetsar utförda i luft (december 2013; SKBdoc 1371851).

SKB har meddelat SSM att FSW i kapselns referensutförning har justerats och att numera ska svetsning genomföras med skyddsgasen argon (september 2013; SSM2011-1137-45). SKB redovisar att skyddsgas kommer att anbringas på utsidan, men inte på rörets insida. SKB redovisar i en komplettering att FSW i skyddsgas medför betydligt mindre förekomst av sammanhängande oxider, men att problemet inte helt har eliminerats (SKBdoc 1371851). Syrehalten i kopparmaterialet ökar sannolikt i viss utsträckning även vid svetsning med skyddsgas och denna halt kan enligt SSM:s bedömning inte kontrolleras efter svetsning. SSM anser att SKB ännu inte har visat att förekomst av sammanhängande oxider helt kan undvikas genom användning av skyddsgas. SSM anser dock att metoden med hjälp av ytterligare utvecklingsarbete kan utgöra en lämplig åtgärd för att minimera problemet med sammanhängande oxidstråk.

SSM anser vidare att det finns specifika problem, kopplade till gasskyddets tillförlitlighet under drift, som kräver ytterligare utvecklingsarbete. Intermittenta ökning av syrgashalt har t.ex. observerats under de försök som hittills har genomförts (SKBdoc 1371851). SKB har inte heller visat hur gasskydd vid FSW-svetsens överlappsområde kan säkerställas, samt hur överlappsområdets innehåll av oxider påverkas när verktyget kör över skägget i slutet av svetsen. SSM noterar att SKB ännu inte har värderat om skyddsgas på kapselns insida kan reducera oxidförekomst vid svetsning.

Övergång till svetsning med skyddsgas innebär att det svetsfönster som SKB har redovisat inte avser aktuell referensmetod (SKB TR-10-14, avsnitt 5.5.7). Enligt SKB:s kompletterande information till SSM anges att processfönstret är identiskt vid svetsning i argon (SSM2011-1137-58). Enligt SSM:s bedömning har dock SKB:s arbete med att etablera ett optimalt processfönster endast beaktat att undvika att svetsverktygets inträngning är < 0,4 mm samt att tapptemperaturen är < 790°C, och inte att undvika sammanhängande oxidområden. SKB anger i en komplettering till SSM att de avser formulera krav på acceptabel syrehalt i skyddsgasen under svetsning (SKBdoc 137851). Enligt SSM:s bedömning bör detta följas upp med studier kring tillförlitlighet av att via processkontroll upprätthålla låg syrehalt i svetsgodset. Svårigheter avseende kravställning av syrehalt är som SKB själva påpekar kopplat till att oxidpartiklar kan samlas i stråk.

För att reducera inverkan av ytoxider planerar SKB att införa någon form av rengöring för fogytor innan svetsning. SKB redovisar att fogberedningsmetoder har använts på provbitar för att skapa rena ytor, men några studier av utfallet från verkliga svetsar har ännu inte rapporterats. SSM har noterat att det inte finns något konkret formulerat krav på renheten med avseende på oxid för de ytor som omfattas av FSW-svetsning i SKB:s komplettering (SKBdoc 1371851). Beträffande andra typer av tänkbara föroreningskällor som verktygsmaterialet bedömer SSM att SKB har visat att slitage av verktyget inte påverkar svetsgodset under normal drift. SSM anser att SKB bör formulera acceptansnivåer för verktygsrester i svetsgodset vid den efterföljande oförstörande provningen, liksom formulera krav på renheten med avseende på oxid för de ytor som omfattas av FSW-svetsning. SSM noterar att SKB som en del av kompletteringsförfarandet har angivit att

acceptanskriteriet med avseende på verktygsrester formuleras som ett högsta tillåtet slitage på svetsverktyget (SKBdoc 1471283).

Betydelsen av att minimera sammanhängande oxidområden i svetsen kan relateras till krav kopplade både till korrosionsbarriären och till krypegenskaper för svetsfogen. SKB anger att ingen signifikant negativ påverkan av oxidpartiklar har identifierats förutom i den defekt som SKB kallar förflyttad vertikal fog. Denna fogrest har även benämnts som oxidinneslutningar i vissa rapporter (Auerkari, 2009). SSM anser att såväl sammanhängande oxider ("förflyttad fogrest") som foglinjeböjning behöver studeras ytterligare för bedömning av en eventuell påverkan på kapselns mekaniska integritet. Dessutom bör det beaktas huruvida förekomst av svetsfogens oxidinnehåll kan påverka fogen genom reaktion med koppars väteinnehåll samt väte som genereras via korrosionsreaktioner i syrefri miljö eller av den vätgas som kan förekomma inuti kapseln beroende på korrosion av järn. Enligt SSM:s bedömning är behovet av studier kring defekternas betydelse för degraderingsmekanismer delvis avhängigt av i vilken omfattning som svetsfogens oxidinnehåll kan minimeras under FSW. SSM noterar att experimentellt underlag som indikerar att oxidiska inneslutningar kan påverka friktionssvetsat kopparmaterials krypegenskaper nyligen har publicerats (Rantala m.fl., 2015). SKB har inte redovisat en teknik eller sätt att detektera oxider efter svetsning. SSM bedömer att användning av standarder för FSW i aluminium inte är möjlig utan motivering.

SKB har kompletterat ansökan med sambandet mellan den radiella utbredningen av foglinjeböjning och variation av vissa svetsparametrar (SKBdoc 1371851). Enligt SKB går svetsverktygets inträngning (D) inte att variera i någon högre utsträckning, maximalt $\pm 0,5$ mm. Genom att hålla verktyget på utprovat djup undviks bildande av skägg. SSM anser att då FSW-processen är laststyrd går det inte att samtidigt styra djupet. Detta framgår även av SKB:s redovisning av 20 stycken locksvetsar där krav på D redovisas och mäts en gång per locksvets. SSM anser att SKB bör redovisa hur D påverkas när kraften och verktygstemperaturen intar minimum respektive maximumvärden inom svetsfönstret. SKB redovisar att en regulator håller på att utvecklas för att reducera kraften när svetsdjupet blir för stort. SSM anser att SKB fortsättningsvis bör undersöka hur fler parametrar kan påverka svetsresultatet som t.ex. tillverkningstoleranser för lock och rör, svetsverktygets axiella position i förhållande till skarv mellan lock och rör samt avståndet mellan rör och lock om det är större än noll.

3.4.6 Provning av kopparkomponenter och kopparsvets

SSM sammanfattar i detta avsnitt kortfattat SKB:s redovisning och utvecklingsarbete kopplad till provning av kopparkomponenter och kopparsvets. SSM har även offentliggjort ett särskilt PM som innehåller en mer detaljerad och genomgående beskrivning av SKB:s redovisning kring kontroll och provning av kapseln (SSM2011-2306-34). Nedan följer en förkortad version av SKB:s redovisning.

3.4.6.1 Underlag från SKB

I produktionsrapporten (SKB TR-10-14) beskriver SKB att ultraljud (UT) har valts ut som huvudteknik för oförstörande provning (OFP) av kopparröret. SKB anser att defekter som uppkommer under extrudering sannolikt har en laminär utbredning och därför har PA UT normalavsökning valts som en första referensmetod för provning. På grund av teknikens begränsningar nära ytan utförs UT-provningen innan kopparröret maskinbearbetas till slutlig dimension. Provning av ytan kommer att genomföras efter slutlig maskinbearbetning. SKB har ännu inte definierat vilken metod som kommer att användas för ytprovningen samt vilka acceptanskriterier som kommer att användas. Detta arbete behöver vara klart innan tillverkning av kopparrör kan påbörjas. SKB utvecklar för närvarande en teknik baserad på konventionell vinkelavsökning med transversalsökare för



att detektera ytrepor. Förutom eventuell förekomst av defekter kontrolleras även materialets ljuddämpning för att säkerställa att kraven på detekteringsförmågan uppfylls. Eventuellt kommer även OFP att användas för mätning av godstjocklek.

Under UT-provning av vissa kopparrör har områden med hög ljuddämpning identifierats. Det har visats att dessa områden har en större medelkornstorlek och betydligt större maximal kornstorlek som dock inte överstiger kravet på en medelkornstorlek mindre än 360 μm . Vid metallografisk undersökning har till exempel ett område med hög ljuddämpning uppmätts med medelkornstorleken 172 μm och en största kornstorlek på 1070 μm .

Provningstillförlitligheten har bestämts med hjälp av multiparameter POD baserat på indikationer från artificiella defekter av typ flatbottenhål (FBH). Multiparameter POD möjliggör implementering med hjälp av modellering av flera parametrar vid bestämning av detekteringsförmågan i form av POD-kurvor med ett begränsat urval av data. Detta tar hänsyn till påverkande parametrar såsom djup, vinkel, defektstorlek och materialdämpning. Ett värde av "a90/95" har ansetts vara en rimlig hög nivå som mått på detekteringsförmågan. Utifrån dessa studier på artificiella defekter anger SKB att normalavsökningen har en detekteringsförmåga inom ett intervall av 2-5 mm. Med detta resultat som utgångspunkt kan det antas att OFP kan detektera 5 mm stora defekter i kopparröret.

SKB har även valt UT som huvudteknik för OFP av kopparlock och kopparbottnar. På grund av teknikens begränsningar nära ytan utförs UT-provningen innan de smidda ämnena maskinbearbetas till slutlig dimension. Provning av ytan kommer att genomföras efter slutlig maskinbearbetning. SKB avser att ta fram metod och definiera relevanta acceptanskriterier för ytprovning innan produktion av kapslar kan påbörjas. Smidda ämnen för bottnar tillverkas på samma sätt som för locken där den enda skillnaden är de slutliga dimensionerna efter slutlig maskinbearbetning och därför beskrivs i det följande enbart provningen av locken. För UT-provningen delas locket i två delar, det inre tunnare området med liknande geometri som kopparröret och det yttre tjockare området. Referensmetoden är PA UT normal avsökning med immersionsteknik. Syftet är att detektera inneslutningar och smidesveck samt ge indikationer på variationer av kornstorleken. Förutom eventuell förekomst av defekter kontrolleras även materialets ljuddämpning.

Provningstillförlitligheten har bestämts med hjälp av multiparameter POD och volym POD baserat på indikationer från artificiella defekter av typ flatbottenhål (FBH). Volym POD anger den totala detekteringsförmågan från olika UT-provningskonfigurationer tillsammans. Även här har ett värde av "a90/95" ansetts vara en rimlig hög nivå som mått på detekteringsförmågan. Utifrån dessa studier på artificiella defekter anger SKB att tekniken har en detekteringsförmåga inom ett intervall av 2-5 mm. Med dessa resultat som utgångspunkt drar SKB slutsatsen att OFP kan detektera 5 mm stora defekter i kopparlocket.

OFP kommer också att omfatta bottenhets respektive locksvets utförd med FSW som generellt ger ett finkornigt och homogent material. Vid OFP av svetsarna gäller samma förutsättningar förutom att bottenhetsen görs i kapsel fabriken medan locksvetsen som försluter kopparkapseln görs i inkapslingsanläggningen. OFP referensmetoderna är PA UT från lockets ovansida för detektering av foglinjeböjning (en effekt av att den vertikala fogen mellan rör och lock böjs av verktygsrotationen) och maskhål samt digital radiografering (RT) för detektering av maskhål. Provning av ytan genomförs som ett komplement till den volymetriska provningen efter att slutlig maskinbearbetning har



genomföras. Vilken metod som kommer att användas för detta moment samt vilka acceptanskriterier som kommer tillämpas tas dock fram senare.

Provningsstillförlitligheten med avseende på detektering av maskhål och foglinjeböjning med OFP har studerats utifrån jämförelser mellan resultaten från UT och radiografering av FSW-svetsar, samt resultat från destruktiv provning av detekterade defekter. Samma värde på "a90/95" har ansetts vara en rimlig hög nivå som mått på detekteringsförmågan. Resultaten pekar på att UT-provning generellt kan detektera foglinjeböjning i storleksordning 4 mm men att även defekter med mindre radiell utbredning än 4 mm kan detekteras tack vare dessa defekters gynnsamma geometri för UT-provning. För maskhål kan 6 mm stora defekter detekteras med UT-tekniken medan radiografering kan detektera 4 mm stora defekter.

I SKBdoc 1434744 beskrivs den senaste utvecklingen av OFP-teknikerna. SKB anger att på grund av att acceptanskriterierna för koppargötet för tillverkning av kopparrör är definierade i senare skeden av utvecklingen, har begränsade insatser gjorts för att definiera inspektionstekniker för götet. SKB anger vidare att under teknikutvecklingen har det identifierats att ytdefekter är den typ av defekter som mest sannolikt kommer att kunna förekomma, medan inneslutna defekter bedöms vara sällsynta. Därför är detektering av okända defekter den huvudsakliga anledningen för att använda UT vid inspektion av kopparröret. Utifrån detta har normalavsökning med PA UT valts. Även tre stycken blocker har inspekterats med PA UT. För kopparlocket har tre olika inspektionstyper med normalavsökning utvecklats, en för den tunna inre delen av locket och två typer för lockets yttre del, där en typ utförs från den yttre delens ovansida och den andra från mantelytan. Två kompletterande avsökningar görs för att täcka områden nära ytan för den yttre delen av locket, en med ett $\pm 10^\circ$ vinklat ljudfält från yttre delens ovansida och en med ett $\pm 10^\circ$ vinklat ljudfält från mantelytan. PA ET-teknik för provning av lockets och botten yta kommer att utvecklas vidare. Även fluorescerande PT har använts för att inspektera lockets yta för det förmaskinbearbetade skedet. För provning av FSW-svetsen beskriver SKB att tre tekniker används. UT som huvudteknik för att inspektera rotdefekter och kaviteter, RT för kaviteter samt ET för kompletterande avsökning med aspekt på kaviteter nära ytan och ytbrytande. ET PA-teknik har utvecklats för provning av svetsens yta efter maskinbearbetning.

SKB har som en del av kompletteringsförfarandet uppdaterat sin redovisning av OFP för koppardelar och kopparsvets (SKBdoc 1434744, SKBdoc 1179633).

3.4.6.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB har visat att ultraljud (UT) är lämplig som huvudsaklig metod för oförstörande provning (OFP) av kopparhöljets olika delar. Liksom för segjärnsinsatsen konstaterar dock SSM att det ännu saknas en beskrivning av defekternas karakteristik hos kopparkomponenter och kopparsvets utifrån ett OFP-perspektiv. Utan dessa uppgifter har inte SSM möjlighet att bedöma vilken inverkan egenskaperna och variationerna hos möjliga och postulerade defekter har på inspektionstekniken med OFP. SSM bedömer vidare att SKB:s beskrivning av kopparrörets defekter är ofullständig med avseende på förekomst av sprickor, speciellt inre radiella s.k. "chevron" sprickor samt även avseende förekomst av oxidiska mikrodefekter. SSM saknar även acceptanskriterier för ytdefektstorlekar för kopparkomponenterna.

SSM konstaterar att ingen OFP-teknik ännu är framtagen för att detektera eller storleksbestämma möjliga plana (sprickliknande) defekter i kopparrör, lock och botten. Det saknas även en beskrivning av hur SKB avser att karaktärisera plana och volymetriska defekter vilken SSM anser är nödvändig för att från ett OFP-perspektiv ta fram teknik och kriterier för detektering och storleksbestämning. Av SKB:s redovisning framgår att för



kopparröret är ytdefekter från hanteringsskador den mest sannolika defekttypen som kan förekomma och att inre defekter är sällsynta. För smidda lock- och bottendelar finns ett fåtal relevanta observationer främst i form av smidesveck. SSM anser att SKB behöver utveckla defekternas karakteristik utifrån ett OFP-perspektiv. SKB behöver utveckla acceptanskriterier för ytdefektstorlekar för kopparkomponenterna liksom OFP-teknik för detektion och storleksbestämning av möjliga plana (sprickliknande) defekter. Det sistnämnda gäller förutsatt att SKB inte helt kan utesluta förekomst av sprickliknande defekter. SSM anser att för att kunna verifiera de olika inspektionsteknikerna behöver möjliga och postulerade defekter och dess placering, orientering, variationer i lutning och vridning, morfologi och täthet vara klarlagda.

SSM gör samma bedömning som för segjärnsinsatsen gällande nödvändigheten av tillgång till tillförlitliga OFP-metoder för att kunna detektera defekter. Ur ett OFP-perspektiv krävs användning av verklighetstroga defekter vid bedömning av provningssystemets förmåga att detektera, karaktärisera och storleksbestämma defekter samt för att kvantifiera kvalificeringen. I likhet med segjärnsinsatsen använder dock SKB artificiella defekter av typ FBH, CBH och notchar både för kvantifiering av provningstillförlitligheten genom s.k. POD-kurvor och för framtagande av testblock för verifiering av teknik och kvalificering. Utifrån behov av tillgång till verklighetstroga defekter vid verifiering av tekniken och provningstillförlitligheten bedömer SSM att SKB inte har visat att de framtagna OFP-teknikerna kan detektera, karaktärisera och storleksbestämma alla möjliga defekttypen i alla möjliga positioner i områden med hög ljuddämpning. Det har visats att trots att acceptanskriterier på medelkornstorleken uppfylls kan stora områden med hög ljuddämpning och stora korn förekomma i kopparröret (för lock och botten mindre områden på några få centimeter). Provningstillförlitligheten i dessa områden har studerats med hjälp av POD-kurvor med artificiella defekter av typ FBH. SSM anser att kravsättning av kornstorlekens medelvärde i detta sammanhang inte är det mest ändamålsenliga då variationen av kornstorlek runt medelvärdet kan vara av större betydelse. Istället bör ljuddämpningen vara styrande vid detektering, karakterisering och storleksbestämning men även hur stora områden som kan accepteras med en maximal angiven kornstorlek. Baserat på redovisat underlag har inte SSM möjlighet att bedöma om det finns förutsättningar för SKB att inför kommande steg i den stegvisa provningen ta fram tillförlitliga OFP-tekniker för detektering, karakterisering och storleksbestämning i områden med hög ljuddämpning.

Beträffande FSW-svetsen anser SSM att SKB:s ursprungliga redovisning är ofullständig eftersom det saknas acceptanskriterier för verktygsgreter i svetsgodset, krav på ytrenhet med avseende på oxider på svetsfogen samt acceptanskriterier för sammanhängande oxidområden i svetsgodset (mikrodefekter). SSM noterar dock att SKB som en del av kompletteringsförfarandet har angivit att acceptanskriteriet med avseende på verktygsrester formuleras som ett högsta tillåtet slitage på svetsverktyget (SKBdoc 1471283). SKB har inte redovisat en teknik eller metod för att detektera oxider efter svetsning. SSM anser att användning av standard för FSW i aluminium för att beskriva defekter är otydlig. SKB har verifierat provningstillförlitligheten med hjälp av POD-kurvor på två typer av indikerade defekter, kaviteter och foglinjeböjning. SSM saknar dock en fullständig beskrivning av defekternas karakteristik utifrån ett OFP-perspektiv vilket gör att SSM inte har möjlighet att bedöma vilken inverkan egenskaperna och variationerna hos möjliga och postulerade defekter har på OFP-inspektionstekniken. SSM saknar även en mer ingående motivering och teoretiskt resonemang om vilka defekter som är möjliga i FSW av koppar. Utifrån otydligheterna i SKB:s underlag om förekomst av defekter och deras karakteristik bedömer SSM att SKB inte har visat att de framtagna OFP-teknikerna kan detektera, karaktärisera och storleksbestämma alla möjliga defekttypen i alla möjliga positioner. De har inte heller visat att den verifiering av provningstillförlitligheten som genomförts är tillräcklig.



SSM saknar SSM en beskrivning och motivering till hur SKB avser att med en 90/95 tillförlitlighet (d.v.s. 90 % detekterings sannolikhet med 95 % konfidens) för OFP-teknikens detekteringsförmåga uppnå att 99,9 % av alla kopparkapslar bara innehar defekter som är mindre än 10 mm i radiell led och att bara en på tusen kopparkapslar har defekter mellan 10-20 mm samt hur denna provningstillförlitlighet kopplas till analysen av antalet kopparkapslar som kan gå sönder i säkerhetsanalysen. Dessutom saknas en beskrivning och motivering av med vilket konfidensintervall SKB avser att storleksbestämma detekterade defekter samt hur denna provningstillförlitlighet kopplas till beräkningarna inom säkerhetsanalysen.

Sammanfattningsvis bedömer SSM att även om det finns otydligheter i SKB:s underlag kommer SKB sannolikt under kommande utvecklingsarbete att:

- kunna ta fram nödvändiga defektspecifikationer med kompletta beskrivningar av möjliga och postulerade defekter samt deras karakteristik för alla ingående delar av kopparhöljet
- ta fram defektsimuleringsteknik och testblock med verklighetstroga defekter för att verifiera teknik, bestämma provningens tillförlitlighet samt för kvalificeringen av tekniken för koppardelarna och FSW-svets där normal dämpning finns
- ta fram tillvägagångssätt för kvantifiering av provningstillförlitlighet samt kvalificering
- ta fram OFP-provningsteknik för detektering, karakterisering och höjdbestämmning av koppardelarna och FSW-svets där normal dämpning finns
- utveckla/ta fram en kontrollordning för tillverkning av kapseln
- utveckla/ta fram ett kvalitetsledningssystem för att säkerställa och ge tilltro till att de krav som ställs på det färdigbyggda KBS-3-förvarets kvalitet uppfylls.

Däremot bedömer SSM att utifrån dagens erfarenheter och kunskaper inom OFP att det sannolikt inte finns förutsättningar för SKB att i kommande steg av provningsprocessen ta fram OFP-teknik för detektering, karakterisering och höjdbestämmning av möjliga och postulerade defekter i koppardelar med hög ljuddämpning. Dessutom bedömer SSM att det sannolikt inte heller finns förutsättningar för SKB att i kommande steg ta fram defektsimuleringsteknik och testblock med verklighetstroga defekter för att verifiera tekniken, bestämma provningens tillförlitlighet samt kvalificering av teknik i dessa områden. SKB har som en del av kompletteringsförfarandet redovisat vissa tänkbara åtgärder (SKBdoc 1471283). SKB behöver ta fram kompletterande angreppssätt för att hantera defekter i dessa positioner.

3.4.7 Kontrollordning och kvalificering

SSM sammanfattar i detta avsnitt kortfattat SKB:s redovisning och utvecklingsarbete kopplad till kontrollordning och kvalificering. SSM har även offentliggjort ett särskilt PM som innehåller en mer detaljerad och genomgående beskrivning av SKB:s redovisning kring kontroll och provning av kapseln (SSM2011-2306-34).

3.4.7.1 Underlag från SKB

SKB har genomfört en preliminär säkerhetsklassning för olika komponenter i ett KBS-3 förvar (SKB TR-10-12). Dessa är klassade med utgångspunkt från betydelser för att innesluta, förhindra och fördröja spridningen av radioaktiva ämnen. Två typer av säkerhetsklassningar anges; barriärfunktion (klass B) och påverkan barriär (klass PB). Mer omfattande åtgärder för att verifiera uppfyllelse av kvalitetskrav krävs för klass B. Kopparkapseln tillhör klass B liksom bufferten, lokalisering av deponeringshål,



återfyllning samt förslutning. Till säkerhetsklass PB hör slutförvarets layout, konstruktionen av utrymmen i slutförvaret förutom deponeringshålen, skadat berg, pluggar samt övriga komponenter.

SKB kommer att upprätta kvalitetsplaner för kapsel och andra komponenter i slutförvaret baserat på deras säkerhetsklassning. I dessa kvalitetsplaner ska ansvar och tidplaner för kvalitetssäkringsaktiviteter specificeras. Procedurer och nödvändiga dokument för SKB:s kontroll ska specificeras, liksom för den egenkontroll som åvilar externa leverantörer och tillverkare. De processer eller produkter som granskas eller övervakas av ett kontrollorgan ska specificeras. En övergripande beskrivning över ledningssystem och kvalitetssäkringsåtgärder vid drift av slutförvarsanläggning finns med i säkerhetsredovisningen (avsnitt 4; SKBdoc 1091959, ver. 3.0).

SKB har redovisat en plan för implementering av kvalitetsstyrning och kontroll av KBS-3-förvaret (SKBdoc 1365182). SKB ger en överblick över planerade aktiviteter för att upprätta och implementera ett kvalitetsledningssystem samt redovisar när aktiviteterna behöver genomföras i relation till kärnbränsleprogrammets milstolpar. Syftet med kvalitetsstyrning och kontroller är att säkerställa och ge tilltro till att de krav som ställs på det färdigbyggda KBS-3-förvarets kvalitet uppfylls. De planerade aktiviteterna omfattar fastställande av principer för säkerhets- och kvalitetsklassning, fastställande av den förvarsutformning som ska säkerhets- och kvalitetsklassas, verifiering av att utformningen uppfyller kvalitetskrav och överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna, fastställande respektive kvalificering av procedurer för tillverkning, installation och provning, samt slutligen fastställande av de styrande dokument som ska tillämpas i produktionen för att försäkra sig om att KBS-3-förvaret uppfyller alla relevanta kvalitetskrav.

SKB:s kvalitetsledningssystem behöver uppfylla kraven i SSMFS 2008:1, där det finns krav på att ett klassningssystem ska tillämpas för styrning av kraven på konstruktion, tillverkning, installation samt kvalitetssäkringsåtgärder. SKB avser att så långt som möjligt utnyttja erfarenheter och arbetsmetoder från kärnkraftindustrin samt följa ISO-standarder för ledningssystem. SKB avser också att beakta riktlinjer i en utredningsrapport om kontrollordning för kapseltillverkning som togs fram av den tidigare myndigheten SKI (SKI 2006/109). SKB använder idag ett ledningssystem utformat med utgångspunkt i kraven i ISO 9001:2008.

SKB:s ledningssystem kommer att tillämpas vid utveckling av de kvalitetshandböcker som krävs för produktion av de olika delsystemen inom ett KBS-3 förvar. En kvalitetshandbok ska innehålla all information som behövs för att producera ett delsystem så att det uppfyller kvalitetskraven, liksom den information som behövs för att genomföra den provning och de kontroller som ger tilltro till att de färdiga delsystemen överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna för långsiktig strålsäkerhet efter förslutning av förvaret. SKB avser att, i enlighet med SSM:s föreskrift SSMFS 2008:1, tillämpa ett klassningssystem för kraven på konstruktions- och kvalitetskontroll. Ett principdokument för kvalitetsstyrning och kontroll ska tas fram som redovisar hur myndighetens krav på klassningssystem och kvalitetssäkringsåtgärder ska tillämpas vid upprättande av kvalitetshandböcker för KBS-3-förvarets delsystem. Principdokumentet ska ange hur kvalitetsklassning ska användas för att avgöra hur kvalificeringar behöver genomföras. De tillverknings-, installations- och provningsmetoder som är betydelsefulla för kvaliteten kommer att kvalificeras innan de får börja tillämpas i produktionen. SKB avser att så långt som möjligt tillämpa beprövad teknik, tillgängliga standarder samt branschpraxis vid tillverkning, installation och provning.



SKB har presenterat grundläggande förutsättningar och strategier att kvalitetsäkra den framtida kapselproduktionen (SKBdoc 1388095). SKB:s system för egenkontroll ("Handbok för kapseltillverkning") tillämpas vid provtillverkning av kapslar och kapseldelar. SKB anser att denna handbok utgör en lämplig grund för kommande arbeten. SKB avser att i PSAR presentera de då genomförda utredningarna av kvalificeringsnivåer för produktions- och inspektionsprocesser för kapselkomponenterna, tredjepartsorganens uppgifter, aktuella kvalificeringsprocesser samt kravbild och process för myndighetsgodkännande av tredjepartsorgan. SKB kommer även presentera kvalitetsplaner för kapselkomponenterna baserade på tillverknings- och inspektionsprocesser samt motsvarande kvalificeringsomfattning. Dessa utredningar kommer även att omfatta riktlinjer för kvalificering av tillverknings-, svetsnings- och inspektionsprocesser.

3.4.7.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har redovisat frågor kring säkerhetsklassning, kvalitetsstyrning, ledningssystem och kontrollordning i tillräcklig omfattning. Inför en eventuell provdrift kommer SSM att precisera de krav som kommer att ställas på dessa aktiviteter och arbetsmoment. Dessa krav kommer att gälla kontroller som behöver genomföras vid olika tidpunkter, uppgifter som kan behöva utföras av tredjepartsorgan och tredjepartslaboratorium, ackrediterings- och certifieringsfrågor, krav på leverantörer och underleverantörer, samt kvalificering av svets-, tillverknings- och inspektionsprocesser.

Det finns idag ett etablerat och av SSM godkänt (SSMFS 2008:13) kvalificeringssystem inom kärnkraftindustrin för återkommande kontroll av mekaniska komponenter samt tillverkningskontroll där inga beprövade standarder finns att tillgå. Dessa kvalificeringar av provningssystem avseende teknik, utrustning och personal utförs av SSM godkända tredjepartsorgan. Kvalificeringarna följer principerna som anges i de europeiska tillsynsmyndigheternas konsensusdokument (EUR 16802) om kvalificeringar med tillämpningspreciseringar (ENIQ) framtagna och dokumenterade av det europeiska nätverket för provningskvalificering.

Det finns ett undantag för slutförvarskapseln i SSM:s föreskrifter (SSMFS 2008:13) om mekaniska anordningar bland annat eftersom återkommande kontroller inte är möjliga i slutförvarsmiljön. SSM anser dock att de principer som preciseras i föreskriften bör tillämpas så långt som möjligt även för kopparkapseln. Kraven på provning av kopparkapseln inklusive dess delar behöver anpassas till det faktum att det inte är möjligt att gå tillbaka efter deponering och göra förnyade provningar om det skulle finnas allvarliga fel eller brister i provningsförfarandet som inte upptäckts. Av detta skäl krävs långtgående bevisföring i form av kvalificeringar. Eftersom det inte finns möjlighet till återkommande provningstillfällen krävs särskilda åtgärder för att statistiskt säkerställa detekteringsförmågan.

SSM konstaterar att myndigheten och SKB har olika syn på det kvalificeringsförfarande som behöver tillämpas. SSM anser emellertid att i vissa avseenden behöver detta inte redas ut nu utan kan hanteras i senare steg av provningsprocessen. SSM:s utgångspunkt är att slutprodukten, dvs. kapseln med dess ingående delar, ska vara provad med ett eller flera provningssystem som är kvalificerade av ett godkänt tredjepartsorgan. Detta gäller oavsett i vilket tillverkningsstadium som provningen utförs. SSM anser också att kvalificeringar ska utgå från den process som tillämpas idag för kärnkraftkomponenter, men ytterligare moment kan tillkomma för att säkerställa tillgång till kvantitativ information om kapselns initialtillstånd för analys av slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. SSM kommer i senare steg av provningsprocessen att besluta om utgångspunkterna för kvalificeringsprocessen av kapseln och dess ingående delar. SKB



behöver i kommande steg av granskningsprocessen att statistiskt säkerställa kvantifieringen av kvalificeringen.

3.4.8 Inkapsling, transport, hantering och deponering

3.4.8.1 Underlag från SKB

SKB redovisar översiktligt momenten montering, inkapsling, transporter, hantering och deponering av kapslar (SKB TR-10-14 avsnitt 6). SKB redovisar också händelser under hanteringen i Clink samt händelser i samband med transport, hantering och deponering av kapslarna i slutförvarsanläggningen som skulle kunna leda till spridning av radioaktiva ämnen under driftperioden. Denna information återges dock inte här eftersom den rapporteras i granskningsrapport *Inkapslingsanläggning och Clab* och i granskningsrapport *Uppförande och drift av slutförvarsanläggning*. I detta avsnitt hanteras endast frågan huruvida arbetsmoment som inkapsling, transport, hantering och deponering kan medföra en påverkan på kapselns långsiktiga skyddsförmåga efter slutlig förslutning av ett slutförvar.

3.4.8.2 SSM:s bedömning

SSM anser att effekter av hanteringsskador och kallbearbetning av kapseln som kan uppkomma under montering, inkapsling, transporter, hantering och deponering av kapslarna behöver utredas vidare eftersom de kan påverka kapselns tillstånd och materialegenskaper efter förslutning. SSM instämmer med SKB att det behövs en vidareutveckling av metoder för hantering och torkning av skadat bränsle. Det behöver säkerställas att kraven på innehåll av vätskor och gas inuti kapseln kan uppnås.

3.4.9 Sammanfattande bedömning kapsel

SSM bedömer att SKB efter ett långt utvecklingsprogram med bl.a. provtillverkning av fullstora kapslar och kapselkomponenter har tagit fram lämpliga referensmetoder för tillverkning, förslutning och provning av kopparkapslar. Det kan konstateras att ytterligare arbetsinsatser återstår innan SKB fullt ut kan uppnå de högt ställda krav som krävs vid tillverkning och provning av insatser och kopparkapseln. Detta gäller i synnerhet för PWR-varianten. SKB behöver dels fastställa och motivera materialkrav, dels kunna säkerställa att samtliga kvalitetskrav kan uppnås. Exempel på viktiga områden som kräver ytterligare insatser är t.ex. karakterisering, beskrivning och minimering av tillverkningsdefekter, verifikation och kontroll av hållfasthetsgenskaper, uppfyllelse av haltintervall för föroreningar och tillsatsämnen samt verifikation av kapacitet och tillförlitlighet för oförstörande provning baserat på verklighetstroga defekter.

Beträffande SKB:s nuvarande konstruktionsförutsättningar för kopparkapseln (SKB TR-09-22) anser SSM att detaljeringsnivån är godtagbar för nuvarande steg i prövningsprocessen. Platsundersökningar och tidigare säkerhetsanalyser har givit SKB en rimligt bra grund för att specificera funktionskrav och tillverkningskrav för kapseln. SKB behöver dock uppdatera och justera konstruktionsförutsättningarna för kopparkapseln baserat på resultat från den föreliggande granskningen.

SSM bedömer att SKB inte i tillräcklig omfattning beaktat att tillverkningstekniken för segjärnsinsatsen medför en spridning i materialegenskaperna. För att åtgärda detta anser SSM att SKB behöver ta fram och redovisa ett justerat angreppssätt för att karaktärisera och beakta den gjutna insatsens materialegenskaper i analysen av insatsens tålighet. Spridning i materialegenskaper för insatsen har en betydelse framförallt för skjuvlastfallet.

Beträffande kopparkapseln kan SSM konstatera att SKB ännu inte visat att koppardelarna kan tillverkas så att en tillräckligt homogen fosforhalt kan uppnås. Denna fråga har



betydelse för SKB:s krav på kopparhöljets krypduktilitet. SSM bedömer dessutom att det behövs ytterligare underlag som visar huruvida oxidiska defekter kan förekomma i betydelsefull omfattning i koppardelarna efter tillverkning eller inte.

SSM anser att SKB inte visat att sammanhängande oxidstråk helt kan undvikas i svetsfogen som uppkommer vid friktionsomrörningssvetsning. Områden med sammanhängande oxider kan medföra att korrosionsbarriären reduceras liksom att kapselns krypegenskaper reduceras. Oxidinhållet kan påverka svetsfogen genom reaktioner med koppars väteinnehåll samt väte som genereras via korrosionsreaktioner i syrefri miljö. SSM anser därför att SKB behöver genomföra fördjupade studier kring möjligheterna att eliminera och detektera oxidstråk samt analysera deras möjliga betydelse för kapselns långsiktiga skyddsförmåga.

Beträffande oförstörande provningsmetoder för insats och kopparhölje anser SSM att SKB efter ytterligare utvecklingsarbete sannolikt kan ta fram lämpliga OFP-tekniker med tillräcklig tillförlitlighet och detekteringsförmåga. I SKB:s nuvarande redovisning saknas en beskrivning av defekternas karakteristik utifrån ett OFP-perspektiv. SSM anser att för att kunna verifiera de olika inspektionsteknikerna behöver möjliga och postulerade defekter och dess placering, orientering, variationer i lutning och vridning, morfologi och täthet vara klarlagda. Utan dessa uppgifter har SSM inte möjlighet att bedöma inverkan, egenskaperna eller variationerna hos möjliga och postulerade defekter på inspektionsteknik med OFP. Baserat på nuvarande metoder för oförstörande provning bedömer SSM att det sannolikt inte finns möjlighet att ta fram OFP-teknik för detektering, karakterisering och höjdbestämmning av möjliga och postulerade defekter i de inre delarna av insatsen och i koppardelar med hög ljuddämpning. SKB har som en del av kompletteringsförfarandet redovisat vissa tänkbara åtgärder. SKB behöver ta fram kompletterande angreppssätt för att hantera defekter i dessa positioner.

3.5 Buffert, återfyllnad och pluggar

I KBS-3-konceptet för slutförvaring av använt kärnbränsle används tekniska barriärer för att säkerställa förvarets långsiktiga säkerhet och strålskydd. I detta avsnitt granskas initialtillståndet för de tekniska barriärerna buffert, återfyllnad samt pluggar för deponeringstunnlarna. Buffertens roll i slutförvarssystemet är att genom högt svälltryck och låg hydraulisk konduktivitet bidra till att upprätthålla kopparkapselns långsiktiga integritet genom att begränsa transport i kapselns närområde. Bufferten bidrar också till att begränsa spridning av radioaktiva ämnen i fall kopparkapslar av någon anledning skulle förlora sin täthet. Återfyllnadens funktion är att täta de utsprängda deponeringstunnlarna efter förslutning och medverka till att bufferten upprätthåller densitet och högt svälltryck. Pluggarna har som främsta betydelse att säkerställa att återfyllnaden hålls på plats under förvarets driftfas och att syre inte läcker in i de återfyllda deponeringstunnlarna. SKB redogör för buffertens initialtillstånd och genomförbarhet av buffertinstallation i SKB TR-10-15 samt i avsnitt 5.5 i SKB SR-Site huvudrapport. Initialtillstånd och genomförbarhet för återfyllnadens installation och pluggar till deponeringstunnlar har redovisats i SKB TR-10-16 och sammanfattats i avsnitt 5.6 respektive 5.7.2 i SKB SR-Site (Huvudrapport).

På SSM:s begäran har SKB tagit fram kompletterande information om ett antal frågor kopplade till buffert, återfyllnad och pluggar. Följande svar från SKB har inkommit till SSM:

- Komplettering rörande buffert och återfyllnad under drift av slutförvarsanläggningen (SKBdoc 1371890).
- Geometri för den avfasade överkanten av deponeringshål (SKBdoc 1393791 och 1394657).



- Kanalbildningserosion (eng. piping/erosion) (SKBdoc 1371890).
- Tillverkning och installation av buffertringar och buffertblock (SKBdoc 1378827).
- Plan för implementering av kvalitetsstyrning och kontroll av KBS-3-förvaret (SKBdoc 1365182).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering rörande planer för demonstrationsdeponering (SKBdoc 1392898).
- Det initiala vatteninnehållet i bentonit, motiv för konstruktionsförutsättningar avseende återfyllnadens täthet och svälltryck, återfyllnadens sammansättning, bottenplattan i deponeringshålet samt pluggens täthet (SKBdoc 1395038).

3.5.1 Buffertens säkerhetsfunktioner och konstruktionsförutsättningar

3.5.1.1 Underlag från SKB

Konstruktionsförutsättningar för bufferten har tagits fram av SKB med utgångspunkt från deras långsiktiga säkerhetsfunktioner för ett förslutet slutförvar.

Buffertens säkerhetsfunktioner presenteras i SKB TR-10-15 (avsnitt 2.2.1). Det framgår att bufferten ska:

- förhindra vattenflöde (advektion) i deponeringshål
- ha förmåga att begränsa mikrobiell aktivitet
- förhindra transport av kolloidpartiklar
- hålla kapseln i sin centrerade position i deponeringshålet så länge som krävs med hänsyn till slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet
- inte väsentligt försämra andra barriärers säkerhetsfunktioner
- behålla sina barriärfunktioner och vara långsiktigt hållbar i den miljö som förväntas i slutförvaret
- göra det möjligt för kapseln att deponeras utan att orsaka skador som avsevärt inskränker barriärfunktionerna för både kapsel och buffert.

Även andra krav på bufferten definieras ur perspektivet installation och uppförande av slutförvarsanläggningen:

- metoder för tillverkning, installation, provning och besiktning av bufferten ska baseras på välbeprövad och testad teknik
- buffert med specificerade egenskaper ska kunna tillverkas och installeras med hög tillförlitlighet
- egenskaperna hos bufferten ska kunna kontrolleras enligt specificerade acceptanskriterier
- utformning av bufferten och metoder för tillverkning, installation, provning och kontroll ska vara kostnadseffektiva
- det ska vara möjligt att producera, inspektera och installera bufferten i bestämd takt.

Buffertens konstruktionsförutsättningar delas in i tre olika grupper (SKB TR-10-15, kap 4). Konstruktionsförutsättningar som ska tillgodose behovet av slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet är att:

- halten av montmorillonit ligger i ett lämpligt intervall och innehållet av organiskt kol, sulfid och den totala mängden av svavel är lägre än angivna gränsvärden
- den ursprungligen installerade buffertmassan har en vattenmättad densitet på mellan 1 950 kg/m³ och 2 050 kg/m³



- måtten av kompakterade buffertblock och buffertringar är desamma som angavs i SR-Can
- geometrin och vattenhalten ska inte resultera i bufferttemperaturer som överstiger 100°C
- svälltrycket hos vattenmättad buffert ska vara minst 2 MPa och den hydrauliska konduktiviteten ska inte överstiga 10^{-12} m/s oberoende av dominerande katjon i bufferten och för kloridkoncentrationer upp till 1 M
- buffertens skjuvhållfasthet efter svällning inte ska överstiga den styrka som används i den verifierande analysen av kapselns motstånd mot skjuvlast.

Konstruktionsförutsättningar avseende kapselns installation är att:

- hålet som bildas av de installerade buffertringarna behöver vara tillräckligt stort för att kapseln ska kunna installeras.

Konstruktionsförutsättningar avseende tillverkning och installation av buffertmaterial är att:

- det ska vara möjligt att kompaktera materialet till önskad densitet
- block och pellets ska vara utformade så att de kan tillverkas, hanteras och installeras med hög tillförlitlighet.

Konstruktionsförutsättningarna för bufferten enligt referensutformningen av ett KBS-3-förvar verifieras genom att bestämma materialets sammansättning, densitet, deponeringshålets geometri samt total massa för installerad buffert.

3.5.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att konstruktionsförutsättningarna för bufferten är vetenskapligt och tekniskt välgrundade samt har tagits fram med utgångspunkt från den långsiktiga strålsäkerheten för slutförvaret. Referensutformningen har definierats från tekniska parametrar som kan kontrolleras och verifieras vid uppförande av slutförvarsanläggningen, såsom mineralsammansättning, samt bulkdensitet av och vattenkvot för installerade buffertblock, buffertringar och pellets.

SSM:s bedömning är baserad på följande resonemang:

Efter beaktande av SKB:s studier av brytning av bentonit i olika länder (SKB TR-06-30) bedömer SSM att det går att säkerställa tillgång till material som kan uppfylla krav på kemisk sammansättning i tillräcklig omfattning. Dessa krav som specificeras i konstruktionsförutsättningarna för bufferten avser halter av montmorillonit, organiskt kol, sulfider samt totalt svavel. Dessutom kan krav på buffertmaterialets sammansättning kopplas till att ett svälltryck på minst 2 MPa behöver uppnås efter att bufferten blivit fullständigt vattenmättad, samt till att de accessoriska mineralerna i bufferten inte ska orsaka oacceptabel korrosion av kopparkapseln.

Det finns en enkel relation mellan den vattenmättade densiteten och den initiala bulkdensiteten vid en viss vattenkvot. Enligt SSM:s bedömning kan därför konstruktionsförutsättning som avser densiteten för en helt vattenmättad buffert verifieras genom att kontrollera buffertkomponenternas initiala bulkdensitet och vattenkvot.

Den nedre gränsen för densitetsintervallet (på 1 950 kg/m³) har inkluderats för att säkerställa att svälltrycket blir högre än 2 MPa och den hydrauliska konduktiviteten lägre än 10^{-12} m/s. Dessa båda kriterier erfordras för att uppfylla buffertens säkerhetsfunktioner som anges i inledningen till kapitlet. Den övre gränsen för densiteten (på 2 050 kg/m³) erfordras för att specificerade skjuvlaster inte ska orsaka kapselskada vid ett rörelsebelopp på 50 mm och en skjuvhastighet på 1 m/s även om den dominerande katjonen i

buffertbentoniten är kalcium. SSM bedömer utifrån dessa överväganden att SKB:s specifikation av buffertens densitetsintervall är vetenskapligt och tekniskt välgrundad ur perspektiv av förvarets långsiktiga strålsäkerhet. Det bör dock noteras att det är ett förhållandevis snävt intervall som behöver uppnås, vilket medför långtgående kvalitetskrav vid tillverkning och installation av buffertkomponenter.

SSM vill påpeka att måtten för buffertblock och bufferttringar verkar ha ändrats sedan SR-Can, exempelvis har antalet bufferttringar runt en kapsel blivit färre medan blocken är tjockare jämfört med konceptet i SR-Can (se tabell 5-2 i SKB TR-06-21 och tabell 3-4 i SKB TR-10-15). Detta innebär en avvikelse från SKB:s konstruktionsförutsättning ”måtten är samma som de som angavs i SR-Can” som återges ovan.

3.5.2 Buffertens mineralogiska sammansättning

Enligt SKB definieras buffertens initialtillstånd som tillståndet då hjälputrustning som har använts under deponeringen är borttagen och samtliga buffertkomponenter är installerade i deponeringshålet. Viktiga frågor avseende buffertens initialtillstånd är sammansättningen på buffertmaterialet, storleken och densiteten på de installerade buffertkomponenterna samt på deponeringshålets geometri.

3.5.2.1 Underlag från SKB

Mineralet montmorillonit i bentonit ger upphov till högt svälltryck och buffertens tätande förmåga. Kommersiell bentonit av hög kvalitet har ofta en montmorillonithalt över 80 %. Vid den densitet som specificeras i konstruktionsförutsättningarna förväntas bentonit med montmorillonithalter på högre än 75 %, oavsett bentonittyp, ge liknande egenskaper så som svälltryck, hydraulisk konduktivitet och till viss del styvhet. SKB har studerat femton olika bentonitmaterial från olika länder (Tjeckien, Danmark, Tyskland, Grekland, Indien och USA) och resultaten har bekräftat sambandet mellan halten montmorillonit och bentonitens egenskaper (SKB TR-06-30, SKB TR-10-60).

Halten av montmorillonit specificeras som en designparameter i konstruktionsförutsättningarna för bufferten eftersom det är den materialegenskap som har störst betydelse för buffertens svälltryck och hydrauliska konduktivitet. Vid normal utformning ska halten enligt specifikationen vara 80-85 viktprocent, men en acceptabel variationsbredd är mellan 75 till 90 viktprocent (SKB TR-10-15, tabell 3-1).

Svällningsegenskaper och styvhet hos bufferten är också beroende av flakladdningen hos montmorillonit, samt typ av katjoner i jonbytespositioner. I slutförvaret kan de ursprungliga katjonerna bytas ut på lång sikt. Bentoniten kan dock med den specificerade montmorillonithalten och densiteten fortfarande ge upphov till svälltryck, hydraulisk konduktivitet och styvhet som överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna efter jonbytet.

De typiska accessoariska mineralen hos bentonit är andra typer av lermineral, fältspater, kvarts, kristobalit, gips, kalcit och pyrit. Bentonit brukar också innehålla en viss mängd organiskt kol (SKB TR-10-15, avsnitt 3.1.1).

För att minimera negativ inverkan på andra tekniska barriärers säkerhetsfunktioner, t.ex. korrosion av kopparkapsel, begränsas mängden av vissa komponenter i bentoniten. Begränsningarna formuleras i konstruktionsförutsättningarna för bufferten som en specifikation av de högsta tillåtna halterna. Det framgår av produktionsrapporten för bufferten (SKB TR-10-15, tabell 2-1) att innehållet av organiskt kol ska vara under 1 vikt-%, att innehållet av sulfider ska vara mindre än 0,5 vikt-% samt att innehållet av den totala mängden av svavel ska vara mindre än 1 vikt-%.

3.5.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s specifikationer av haltintervall av de viktiga mineralerna i konstruktionsförutsättningarna för bufferten är vetenskapligt väl underbyggda samt rimliga att uppnå med tanke på sammansättningen hos vanliga bentonittyper. Specifikationerna kan medverka till att buffertens initialtillstånd kan uppnås. De erforderliga haltintervallen går att verifiera i ett provnings- och kontrollprogram. SSM bedömer att försörjning av bentonit med beaktande av SKB:s kravspecifikationer kan tillgodoses på den internationella marknaden.

SSM:s bedömning baseras på resultat av SKB:s (SKB TR-06-30; TR-10-60) samt SKB:s finländska motsvarighet Posiva:s (Carlson, 2004; Kumpulainen och Kiviranta, 2010) studier av bentonitmaterial från olika länder. Resultaten visar att så länge innehållet av montmorillonit är tillräckligt högt så kan kravet på ett högt svälltryck också tillgodoses. Vid den specificerade densiteten vid full vattenmättnad på ca 2 000 kg/m³ är svälltrycket alltid högre än 2 MPa i slutförvarsmiljön med förväntade salthalter hos omgivande grundvatten. Detta gäller så länge som innehållet av montmorillonit är högre än 75 vikt-% oavsett om montmorillonit är av natrium- eller kalciumtyp (se figur 5-3 i SKB TR-10-60). Sambandet gäller möjligen även när smektitmineralet är beidellit istället för montmorillonit, vilket har visats vara fallet för de indiska Kutch-proverna (SKB TR-06-30, kapitel 6, Carlson, 2004, avsnitt 7.3). SSM anser att sambandet mellan innehåll av montmorillonit och svälltryck finns etablerat för ett stort antal bentonitmaterial som har bildats från vulkaniska material av olika ursprung (basalt till ryolit) och som har bildats under olika geologiska perioder (kvartär till krita).

SSM anser även att det finns ett tydligt samband mellan halten av montmorillonit i bentonit och bentonitens hydrauliska konduktivitet, dvs. ju högre halt av montmorillonit desto lägre hydraulisk konduktivitet. Hydraulisk konduktivitet är oftast lägre än 10⁻¹² m/s vid en torrdensitet runt 1 500 kg/m³ (motsvarar en vattenmättad densitet runt 1 950 kg/m³), om innehållet av montmorillonit är högre än 75 vikt-% (SKB TR-06-30 figur 4-15 till 4-20).

SKB:s studier har visat att inget av de studerade bentonitproverna har höga halter av organiskt kol eller svavel (SKB TR-06-30 tabell 3-6 och 3-7). Specificerade maximala halter för dessa komponenter bör därför gå att uppfylla.

Posiva:s studier har visat att det finns lämpliga metoder för att bestämma följande halter i bentonit; montmorillonit (röntgendiffraktion), organiskt kol (förbränning och infrarödsspektrometri), totalt svavel (röntgenfluorescensspektrometri och jonkromatografi) samt sulfider (Mössbauerspektroskopi) (Carlson, 2004; Kumpulainen och Kiviranta, 2010; SKB TR-06-30).

SSM anser att SKB i kommande steg behöver ta fram väldokumenterade rutiner för bestämningen av materialsammansättning med specificerade analysmetoder för montmorillonit, organiskt kol, totalt svavel och sulfider. SKB behöver dessutom ta fram ett detaljerat kontroll- och provningsprogram för att säkerställa en godtagbar materialsammansättning för använd bentonit.

3.5.3 Buffertens densitet i deponeringshålen

3.5.3.1 Underlag från SKB

SKB planerar att säkerställa nödvändigt densitetsintervall för en installerad buffert genom att mäta geometrin av deponeringshålet samt kontrollera mängden bentonit som installeras i deponeringshålet (SKB TR-10-15, avsnitt 2.4.1, 3.1.3 samt 4.2). Geometrin av



deponeringshålet med toleransintervall ges i SKB TR-10-15, tabell 2-3. Parameterspecifikationer så som mått och bulkdensitet för buffertblock, bufferttringar samt pellets som installeras i ett deponeringshål visas i SKB TR-10-15, tabell 3-4.

I avsnitt 4.2 i SKB TR-10-15 redovisar SKB beräkningsresultat avseende densitet för den installerade bufferten med hänsyn tagen till parameterspecifikationer inklusive toleransintervall för deponeringshål, samt för buffertblock, bufferttringar och pellets. I beräkningarna antogs att vattenkvoten i buffertblock, bufferttringar och i pellets är 17 %.

Beräkningsresultaten visar att snittdensitet i deponeringshålet alltid är inom det specificerade intervallet, dvs. mellan 1 950 kg/m³ och 2 050 kg/m³ efter att bufferten har blivit vattenmättad. I något extremt ogynnsamt fall kan densiteten lokalt i deponeringshålet i viss utsträckning under- respektive överskrida det tillåtna intervallet med mindre än 0,5 %.

3.5.3.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att det specificerade densitetsintervallet för buffertmaterial efter att full vattenmättad har uppnåtts kan uppfyllas. SKB har visat att det finns metoder att med hög precision mäta geometrin för deponeringshålet samt mängd av buffertmaterial som ska placeras i deponeringshålet.

SSM instämmer med SKB att lokala densitetsavvikelser i deponeringshål inte har stor påverkan på buffertens långsiktiga funktion. Den beräknade variationsbredden anses vara acceptabel och en utjämning kan förväntas inträffa under buffertens återmättnadsförlopp.

SSM anser att beräkning av densitet för den slutligt installerade bufferten i viss mån kan påverkas av lerpartiklarnas korndensitet. Densiteten bör enligt SKB vara i intervallet 2 750 – 2 780 kg/m³ (se SKB TR-10-15, avsnitt 3.1.3). SKB bör därför utreda densitetskänsligheten mot variationer och osäkerheter orsakade av lermaterialets korndensitet för den installerade bufferten (SKB TR-06-30, avsnitt 4.2).

SSM ser ett behov av att SKB tar fram väldokumenterade rutiner för buffertinstallation i deponeringshål där spjälkning av bergväggen har ägt rum. Sådana rutiner behövs för att kunna säkerställa den slutligt installerade densiteten i dessa deponeringshål. För ytterligare diskussion kring spjälkning av deponeringshål se även avsnitt 3.3.4.

3.5.4 Tillverkning av buffertblock, bufferttringar samt pellets

3.5.4.1 Underlag från SKB

SKB redovisar tillverkningsmetoder för buffertblock, bufferttringar och pellets i avsnitt 5.3 i SKB TR-10-15. En kortare sammanfattning finns i avsnitt 5.5.2 i SKB SR-Site huvudrapporten.

Bentonit bryts oftast i dagbrott. Råvaror av bentonit med olika montmorillonitnehåll och andra egenskaper sorteras till olika upplag efter kvalitetsinspektioner. Den slutliga sammansättningen uppnås genom att blanda material från olika upplag för att uppnå de egenskaper som specificeras av kunden.

Leverantörerna genomför inspektioner av sina produkter. SKB förutsätter att ett system för kvalitetskontroll tillämpas av den aktuella leverantören. Ett leveransprotokoll ska följa med varje transport av bentonit och protokollet ska beskriva den slutliga sammansättningen av den levererade bentoniten. SKB planerar dessutom egna kontroller för att slutligt avgöra om leveransen kan accepteras eller inte. Rutiner för egen inspektion bör innefatta bl.a. materialsammansättning, kornstorleksfördelning och vattenkvot.

SKB:s metod för att bekräfta önskat mineralinnehåll i bentonit är röntgendiffraktion. Metoden förväntas kunna bestämma innehållet av svällande mineral med en precision på $\pm 5\%$ (SKB TR-06-30, avsnitt 5.1.1). Vid analys av en bentonit av Wyoming-typ befanns montmorillonit-innehållet vara 83,5 vikt-% med en standardavvikelse på 1,7 vikt-% (SKB TR-10-15, avsnitt 5.2.4).

SKB:s metod för att bestämma innehållet av organiskt kol, sulfider samt totalt svavel är att upphetta prover vid olika temperaturer och sedan detektera förbränningsgaserna med infrarödspektrometri (SKB TR-06-30, avsnitt 3.5.2). Osäkerheten vid bestämning av organiskt kol för ett specifikt prov med 0,24 vikt-% motsvarande en standardavvikelse på 0,04 vikt-%. För bestämning av sulfider motsvarade osäkerheten för ett specifikt prov med 0,13 vikt-% en standardavvikelse på 0,05 vikt-% (SKB TR-10-15, avsnitt 5.2.4).

SKB:s referensmetod för kompaktering av buffertblock och buffertringar är enaxlig pressning. För tillverkning av pellets är referensmetoden att pressa det konditionerade materialet till pellets (SKB TR-10-15, avsnitt 5.1.3 och 5.3.4). Innan kompaktering kan bentonitmaterialet behöva torkas, malas, eller vätas beroende på materialets ursprungliga vattenkvot och kornstorlek (SKB TR-10-15, avsnitt 5.3.1). Vid kompaktering behöver formen smörjas med mineralolja (SKB IPR-02-19, avsnitt 2.3). Efter kompaktering behöver ett visst maskinarbete genomföras dels för att ta bort oljekontaminerade delar på blockens ytor, dels för att uppnå de specificerade måtten på blocken.

Metoden för enaxlig kompaktering har tidigt använts för tillverkning av buffertblock och buffertringar. SKB:s erfarenheter kring kompakteringen har uppnåtts främst vid genomförande av laborieförsök (SKB TR-95-19; R-99-12; R-99-66) samt från prototypförvarsprojektet vid Äspölaboratoriet (SKB IPR-02-19). Sammanlagt har 62 stycken fullstora buffertringar samt 26 stycken buffertblock tillverkats under prototypförvarsprojektet (SKB IPR-02-19, tabell 2-3). Utförda tester har visat att det är möjligt att tillverka block och ringar i full skala med god kvalitet. Bäst resultat erhöles med granulerad bentonit med en vattenkvot på ca 17 %. Kompakteringen bör ske med smord form och i flera laststeg med vakuumsugning av bentoniten för att undvika att sprickor uppstår i blocken och i ringarna (SKB R-99-12).

Vid inspektion av buffertblock och -ringar ingår bestämning av vikt och mått för att kunna beräkna bulkdensitet (med hjälp av den tidigare bestämda vattenkvoten inför kompaktering). Förekomst av eventuella sprickor eller andra typer av skador på block eller ringar kontrolleras visuellt (SKB TR-10-15, avsnitt 5.3.2).

SKB har även pressat 20 ton pellets av god kvalitet i samband med prototypförvarsförsöket (SKB IPR-02-19, avsnitt 2.5).

3.5.4.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s hittills genomförda studier avseende produktion av buffertblock, buffertringar och pellets är omfattande. Produktionsmetoderna är väl utvecklade, har utvärderats fortlöpande och bedöms vara tillförlitliga.

SSM instämmer med SKB att metoder finns tillgängliga för analys av montmorillonit, organiskt kol, sulfider och totalt svavel i bentonit med tillräcklig precision.

SSM anser att SKB uppnått tillräckliga erfarenheter i samband med tillverkning av buffertblock, buffertringar och pellets. Det framgår av SKB:s redovisning att systematiska försök har genomförts och att kvalitetsstyrande produktionsparametrar vid tillverkningen av buffertdelar har optimerats. SKB har visat att block och ringar kan tillverkas med

tillräckligt jämn bulkdensitet (SKB TR-95-19, tabell 6-1; SKB R-99-66, tabell 6-1), samt med vikt och dimensioner som håller sig inom tillverkningstoleranserna. Ett relativt stort antal fullskaliga block och ringar har producerats.

SSM anser att SKB:s val av enaxlig pressningsteknik som referensmetod istället för isostatisk pressningsteknik är välgrundad. Den isostatiska pressningstekniken har två stora nackdelar, den stora tidsåtgången vid tillverkning samt att de tillverkade blocken eller ringarna kan ha betydande avvikelser från de specificerade geometriska formerna (SKB TR-95-19). Detta anses vara övertygande skäl för varför enaxlig pressning är att föredra framför isostatisk pressning.

I SKB:s nuvarande referensutformning är längden av buffertringarna 800 mm, vilket är ett större mått än i de fullskaliga ringar som SKB hittills har testat. Dessutom har block både under botten och över toppen på kapseln mer komplicerade dimensioner än de som tillverkades i samband med prototypförvarsförsöket (se figur 3-2 i SKB TR-10-15). SSM anser därför att fullstora ringar och block enligt SKB:s nuvarande referensutformning behöver provtillverkas. SKB behöver visa att erforderlig kvalitet hos dessa modifierade komponenter kan uppnås.

3.5.5 Installation av buffert

3.5.5.1 Underlag från SKB

SKB redovisar processer för installation av buffertblock, buffertringar och pellets i deponeringshålen i avsnitt 5.4 i SKB TR-10-15, samt i en kortare version i SKB SR-Site huvudrapport (avsnitt 5.5.2).

Arbetsmoment för buffert- och kapselinstallation beskrivs i SKB R-08-137 (avsnitt 1.2). Efter att deponeringshålet har inspekterats gjuts en betongbädd på botten av hålet mellan två kopparrplattor. Ett rör för vattensugning placeras längs väggen av hålet samt ett buffertskydd monteras. Sedan installeras buffertblock och ringar med en bockkran med tillhörande vakuumpyftverktyg, samt kapseln med fordon för kapselinstallation. Slutligen avlägsnas röret för vattensugning, andra övervakningsutrustningar inklusive kablar samt buffertskyddet. Slutligen fylls spalten mellan bufferten och deponeringshålets vägg med pellets.

Den installerade bufferten består av ett bottenblock, sex ringar runt kapseln och tre block ovanför kapseln (SR-Site huvudrapport, avsnitt 5.5.2). Spalten mellan buffertringarnas inre sida och kapselns yttre sida är 10 mm, medan spalten mellan buffertens yttre sida och väggen till deponeringshål är 50 mm. Måtten och bulkdensiteten av blocken, ringarna och pelletarna redovisas i tabell 5-11 i SKB SR-Site huvudrapport.

Deponeringshålets vertikala raket samt en begränsad variation av hålets diameter längs den vertikala axeln är avgörande för homogeniteten hos det installerade buffertmaterialets densitet. Erfarenheter från prototypförvarsförsöket visar att toleranser för deponeringshålets geometri som specificeras i referensutformningen är acceptabla (SKB TR-10-18, avsnitt 5.3.2).

I SKB:s referensutformning för bufferten ska buffertblock, buffertringar och kapsel kunna installeras upp till tre månader innan den yttre spalten mellan bufferten och väggen till deponeringshål fylls med pellets och deponeringstunneln återfylls (SKB R-08-137, avsnitt 2.2). För att förhindra att bufferten tar upp vatten från fukt i luften samt från eventuella sprickor som skär deponeringshålet, eller att bufferten torkar ut om deponeringshålet är helt torrt, placeras ett buffertskydd i deponeringshålet innan blocken och ringarna

installeras. Den detaljerade utformningen av buffertskyddet, bottenplattan, systemet för dränering av vatten mellan buffertskyddet och väggen till deponeringshålet och ett tillhörande alarmsystem finns beskriven i SKB R-08-137. Det framgår av rapporten att det nuvarande konceptet är lämpligt, men att viss vidareutveckling erfordras.

Pellets blåses ner i spalten mellan bufferten och väggen till deponeringshålet (SKB IPR-01-17, avsnitt 6.6). Dammsugare används för att suga upp stoft som kan förekomma under fyllningsprocessen med syftet att hålla luften i tunneln så ren som möjligt (SKB IPR-04-13, avsnitt 4.2.14).

3.5.5.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s redovisning av buffertinstallation är ändamålsenlig. De framtagna procedurerna bedöms vara genomförbara och installationen av buffertblock och buffertringar bör efter ytterligare utvecklingsarbete kunna ske i enlighet med konstruktionsförutsättningarna. SSM:s bedömning baseras delvis på erfarenheterna från Prototypförvarsförsöket vid Äspölaboratoriet.

Enligt SSM:s uppfattning är dock SKB:s erfarenheter kring buffertinstallation fortfarande relativt begränsade. I samband med Prototypförvarsförsöket vid Äspölaboratoriet installerades block och ringar med hjälp av fyra remmar (SKB IPR-02-23, avsnitt 4.2.4; SKB IPR-04-13, avsnitt 4.2.4), vilket inte längre är en metod som kommer att tillämpas. Den nuvarande referensmetoden med lyft via vakuumsugning har provats i bentonitlaboratoriet under ett begränsat antal försök med mindre block och ringar av betong istället för bentonit (SKB R-08-137, avsnitt 8.7). Ytterligare försök med denna metod kommer att behövas för att visa att den fungerar i fullskala med bentonitblock och med bentonitringar. Ett fungerande buffertskydd är viktigt för att förhindra negativ påverkan från fukt och vatten vid installationsprocessen. Utvecklingsbehov föreligger kring praktiska metoder att installera och avlägsna buffertskyddet liksom kring installationen av bottenplattan.

SSM anser att det finns brister i SKB:s förståelse av underliggande mekanismer av kanalbildningserosion ("piping/erosion") och risk för kanalbildningserosion i samband med installation av bufferten kan inte uteslutas helt. Den praktiska betydelsen av fenomenet beror delvis på hur pass effektivt deponeringshål med relativt höga vatteninflöden kan identifieras och förkastas under slutförvarets drift- och konstruktionsfas. SSM anser baserat på det nuvarande kunskapsläget att det är den process som i störst utsträckning kan, om otillräckliga insatser vidtas för att undvika och begränsa kanalbildningserosionen, leda till att den installerade densiteten blir lägre än vad som krävs enligt referensutformningen. SSM anser att den förväntade låga frekvensen av vattenförande sprickor vid Forsmarksplatsen är en gynnsam omständighet i perspektiv av kanalbildningserosion. Enligt SSM:s bedömning kommer ytterligare forskning, utveckling och demonstration kring denna process att behövas. SSM:s granskning av kanalbildningserosionsprocessen återfinns i avsnitt 4.9 i denna rapport.

3.5.6 Återfyllnadens säkerhetsfunktioner och konstruktionsförutsättningar

3.5.6.1 Underlag från SKB

Övergripande säkerhetsfunktioner för återfyllnaden presenteras i SKB TR-10-16 (avsnitt 2.2.1). Det framgår att återfyllnaden ska:

- begränsa vattenflödet i deponeringstunnlarna
- begränsa buffertens svällning/expansion uppåt
- inte väsentligt försämra andra barriärers säkerhetsfunktioner



- vara långsiktigt stabil och behålla sina barriärfunktioner i den förväntade slutförvarsmiljön.

Följande konstruktionsförutsättningar har etablerats med perspektiv på installation och uppförande av anläggningen (SKB TR-10-16, avsnitt 2.2.3):

- koncept och metoder för tillverkning, installation, provning och besiktning ska baseras på välbeprövad och testad teknik
- återfyllnad med specificerade egenskaper ska vara möjlig att tillverka och installera med hög tillförlitlighet
- egenskaper hos återfyllnaden ska kunna testas och inspekteras för att påvisa kravuppfyllelse i förhållande till specificerade acceptanskriterier
- utformning av återfyllnad och metoder för tillverkning, installation, provning och kontroll ska vara kostnadseffektiva
- det ska vara möjligt att producera, inspektera och installera återfyllnad i bestämd takt.

Följande konstruktionsförutsättningar är relaterade till den långsiktiga strålsäkerheten (SKB TR-10-16; SKB TR-09-22, avsnitt 3.4.1 och 3.4.2):

- Advektiv transport i deponeringstunnlarna ska begränsas, vilket uppnås om den hydrauliska konduktiviteten är $< 10^{-10}$ m/s och svälltrycket $> 0,1$ MPa
- Uppåtriktad svällning/expansion av bufferten ska begränsas, vilket uppnås om återfyllnadens kompaktering och densitet är tillräckligt höga. Detta ska säkerställa en kompressibilitet hos återfyllnaden som i sin tur kan tillgodose att den lägsta densiteten för den vattenmättade bufferten runt kapseln är $1\ 950\ \text{kg/m}^3$, med tillräcklig marginal för förlust av återfyllnadsmaterial och andra osäkerheter
- Återfyllnadsmaterialet ska inte innehålla ämnen som kan orsaka skadlig nedbrytning av bufferten eller kapselkorrosion
- Densitet och materialsammansättning ska möjliggöra att återfyllnadens barriärfunktioner kan upprätthållas under lång tid.

SKB:s referensmaterial för återfyllnaden är bentonit med ett nominellt innehåll av montmorillonit på 50-60 vikt-%, men variationer mellan 45-90 vikt-% kan accepteras (SKB TR-10-16, tabell 3-1). Ingen begränsning erfordras med avseende på innehåll av sulfider, totalt svavel eller organiskt kol i återfyllnadsmaterialet baserat på långsiktig säkerhetsanalys. Innehållet av dessa komponenter är ändå mycket lågt i tänkbara återfyllnadsmaterial exempelvis bentonitmaterialen Asha från Indien, Milos från Grekland samt MX-80 från USA (SKB TR-10-16, tabell 3-2).

Referensutformningen för återfyllnaden innefattar krav på en installerad torrdensitet på $1450\ \text{kg/m}^3$ (SKB TR-10-16, avsnitt 4.1). SKB:s experimentella studier (SKB TR-06-30, SKB R-06-73) visar att för flera tänkbara återfyllnadsmaterial, såsom Asha, Milos samt MX-80 (SKB TR-10-16, figur 4-1 och 4-2) är denna referensdensitet tillräckligt hög för att säkerställa krav på det specificerade svälltrycket och den specificerade hydrauliska konduktiviteten. Dessa krav ska uppfyllas i förvarsmiljön med en maximal salinitet på grundvatten som motsvarar 1M klorid (5,6 vikt-% för 50/50 molarprocent NaCl/CaCl₂, eller 3,5 vikt-% Cl) (SKB R-06-73). Även materialen Dnesice-Plzensko Jih (DPJ) från Tjeckien och Friedlandera från Tyskland har visats uppfylla kraven (SKB R-06-73, tabell 8-1).

SKB har analyserat en uppåtriktad svällning/expansion av bufferten in i återfyllnaden genom en kraftbalans mellan svällning/kompression av buffert och återfyllnad samt friktion av bufferten mot väggen i dess deponeringshål. Denna effekt uppstår eftersom buffertens svälltryck är högre än återfyllnadens. Bufferten antas i SKB:s analys vara

vattenmättad, men återfyllnaden antas förekomma både i mättat (SKB R-06-73) och omättat (SKB R-08-131) tillstånd. I båda fallen antas att kraftbalansen leder till en fördelning av svälltryck i den övre delen av buffertmaterialet längs deponeringshålets vertikala axel (SKBF/KBS Stripa Project 82-08, kapitel 4). Med hjälp av det framtagna förhållandet mellan svälltryck och portal ("void ratio") av bufferten (t.ex. SKB TR-10-31, ekvation 2-3) kan den vattenmättade densiteten och därför den vertikala expansionen av den övre delen av bufferten bestämmas. I båda fallen antas också att det i återfyllnaden ovanpå bufferten bildas en vertikal spänning av Boussinesqs typ när den svällande bufferten trycker på återfyllnaden (t.ex. Das, 2008, ekvation 3.74). För en vattenmättad återfyllnad kan denna spänning relateras till materialets portal (SKB R-06-73, ekvation 7-1), som i sin tur kan användas till att bestämma den vertikala kompressionen av återfyllnaden. För omättad återfyllnad med pellets, bestäms den vertikala kompressionen med ett elastiskt förhållande mellan vertikal spänning och vertikal töjning, med hjälp av Youngs modul och Poissons tal (tvärkontraktionstal) för återfyllnadsmaterialet. Två alternativa antaganden används, antingen att återfyllnaden är ett kontinuum (SKB R-08-131, avsnitt 6.1), eller att återfyllnaden är staplade pelare av återfyllnadsblock (SKB R-08-131, avsnitt 6.2). Det svälltryck på gränssnittet mellan buffert och återfyllnad som ger lika mycket expansion av buffert som kompression av återfyllnad är det sökta svälltrycket. Expansionen vid detta svälltryck ger den sökta kompressionen.

Förutom de ovan nämnda enklare metoderna används även det numeriska programmet Abaqus baserat på den tredimensionella finita elementmetoden för beräkning av återfyllnadens kompression (SKB R-09-42). I modelleringen ingår de allmänna elastiska och hydrauliska processerna (för modelleringen av dränering av porvatten), samt en porös-elastisk modell för lermaterialet (SKB R-09-42, avsnitt 4.2). Den plastiska sträckgränsen (eng. yield criterion) modelleras med Drucker-Prager plasticitet (SKB R-09-42, avsnitt 4.2.1).

SKB:s analyser visar att resultaten är starkt beroende av friktionsvinkeln för buffertmaterial, styvheten för återfyllnadsmaterial, samt svälltrycket av återfyllnaden, men mindre beroende av styvheten för pellets (SKB R-09-42, avsnitt 6.2). I alla undersökta fall förekommer den största inträngningen av bufferten vid gränsen mellan bufferten och återfyllnaden, medan den minsta upphöjningen sker i bufferten direkt ovanpå toppen av kapseln. Buffertens densitet direkt ovanpå kapseln är alltid högre än $1\,950\text{ kg/m}^3$ och uppfyller därför kraven (SKB R-09-42).

3.5.6.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att konstruktionsförutsättningarna för återfyllnaden är vetenskapligt och tekniskt välgrundade och framtagna med den långsiktiga strålsäkerheten som utgångspunkt. För att tillgodose konstruktionsförutsättningen att begränsa uppåtriktad svällning/expansion av bufferten, ser SSM ett behov av att referensutformningen vidareutvecklas och baseras på kontrollerbara parametrar. Med de i ansökan redovisade parametrarna är det visserligen möjligt att kontrollera om konstruktionsförutsättningen uppfylls eller inte, men detta kräver ett omfattande modelleringsarbete tillsammans med installation av återfyllnaden vilket bedöms vara praktiskt olämpligt.

Beträffande säkerhetsfunktionen att begränsa vattenflödet i deponeringstunnlarna anser SSM att SKB:s krav kopplat till referensutformningen är ändamålsenliga. Krav på nominellt innehåll av montmorillonit i materialet samt krav på den installerade torrdensiteten är mätbara parametrar relaterade till uppfyllelse av konstruktionsförutsättningarna. SSM:s bedömning baserar sig på att hydraulisk konduktivitet är beroende av materialets portal, som i sin tur är beroende av materialets torrdensitet. Ett liknande resonemang gäller för svälltryck som huvudsakligen är beroende av innehållet av mineralet montmorillonit i bentonitleran.

Beträffande säkerhetsfunktionen att begränsa buffertens uppåtriktade expansion för att säkerställa tillräcklig buffertdensitet enligt konstruktionsförutsättningen ser SSM att ytterligare utvecklingsarbete kommer att behövas. SKB:s referensutformning med krav på det nominella innehållet av montmorillonit i materialet samt den installerade torrdensiteten är inte tillräckligt väl motiverad. SKB:s egen modellering har visat att återfyllnadskompression är en komplicerad process som inte bara beror på innehåll av montmorillonit och torrdensitet, utan även involverar materialets elastiska egenskaper (jämför figur 7-2 i SKB R-06-73 och figur 4-2 i SKB R-09-42). SSM anser därför att SKB kan komma att behöva etablera någon relation, antingen teoretisk eller empirisk, mellan intervallet av de elastiska parametrarna hos återfyllnadsmaterialet och den accepterbara uppåtriktade expansionen av bufferten, och ta fram elastiska egenskaper i återfyllnadsmaterialet, såsom Youngs modul och Poissons tal, som kontrollbara parametrar i referensutformningen. En liknande parameter, kompressibilitetsmodul, med krav på högre värde än 10 MPa har tidigare föreslagits i säkerhetsanalysen Interim SR-Can (SKB TR-04-11, avsnitt 6.3.3). Underlåtenhet att beakta dessa parametrar kan möjligen leda till en underskattning av risken för en oacceptabelt stor uppåtriktad buffertexpansion.

3.5.7 Återfyllnadens utformning och mineralogiska sammansättning

3.5.7.1 Underlag från SKB

SKB:s val av återfyllnadsmaterial och metoder för återfyllning av tunnlar har genomgått förändringar och anpassningar till slutförvarsmiljön. I bl.a. BALCO-projektet ("Backfilling and Closure of the Deep Repository") har SKB successivt utvecklat återfyllnadsmaterial och koncept för återfyllning. Tidigare vid Återfyllningsförsöket (t.ex. SKB TR-12-03, avsnitt 4.5) samt vid Prototypförvarsförsöket (t.ex. SKB TR-14-17, avsnitt 4.2) i Äspölaboratoriet var återfyllnadsmaterialet en 30/70 blandning av bentonit och krossat berg som kompakterades in situ. Denna blandning har förutsättningar att uppfylla kraven i konstruktionsförutsättningarna vid kontakt med vanligt förekommande grundvatten med en salinitet på cirka 1,2 % (SKB R-04-53, avsnitt 3.2.1). Fördjupad forskning, säkerhetsanalyser och ytterligare försök senare inom bl.a. BALCO-projektet visade emellertid att det inte är säkert att blandningen av bentonit och krossat berg kan uppfylla krav på låg hydraulisk konduktivitet när grundvattens salinitet stiger och blir högre än 1M under vissa faser av förvarets förväntade utveckling (motsvarande 5,6 % av en 50/50-blandning av NaCl/CaCl₂ (SKB TR-10-16, avsnitt 4.1; SKB R-04-53, avsnitt 3.2.2; SKB R-06-71, kap 1).

I början av BALCO-projektet har flera koncept av återfyllnadsmaterial analyserats (SKB R-04-53),

- blandning av bentonit och krossat berg
- svällande lermaterial kompakterat in situ i tunneln
- icke-svällande lermaterial kompakterat in situ i tunneln samt bentonitblock vid tunneltaket
- placering av förkompakterade block av bentonit, svällande lermaterial, eller blandningar av bentonit och krossat berg, i hela tunneln
- kombination av två typer av sektioner; i) Krossat berg som packas in situ, och ii) bentonitblock. Bentonitblockarna placeras regelbundet över deponeringshålen
- kombination av två typer av sektioner; i) Krossat berg som packas in situ, och ii) bentonitblock. Bentonitblockarnas placering anpassas till de lokala geologiska och hydrogeologiska betingelserna.



SKB bedömde efter systematiska analyser och jämförelser av de olika koncepten att koncepten med in situ kompaktering rent teoretiskt kan åstadkomma det initialtillstånd som krävs, men att stora osäkerheter föreligger kring möjligheten att i praktiken uppnå krav på installerad torrdensitet (SKB R-06-71, avsnitt 6.2). Överväganden som gjorts innefattar dels möjligheten att uppfylla krav i konstruktionsförutsättningarna, dels möjligheten att övervinna de praktiska svårigheterna vid genomförandet (SKB R-04-53; R-06-71; R-08-59). Baserat på de erhållna kunskaperna och erfarenheterna från BALCO-projektet (SKB R-08-59, summary) har SKB valt ett nytt koncept som utgör SKB:s nuvarande referensutformning av återfyllnaden. Merparten av volymen i en deponeringstunnel återfylls med staplade återfyllnadsblock som är förkompakterade med svällande lermaterial (högre än 60 % eller med ett genomsnittligt värde på 74 %, se SKB TR-10-16, tabell 6-1), och resten av volymen fylls med bentonitpellets.

SKB har genomfört mineralkarakterisering av två bentonitsorter från Milos i Grekland (Milos BF 04 och BF 08), och två bentonitsorter från Kutch i Indien (Kutch BF 04 och BF 08) (SKB R-09-53). Milos-bentoniten bildades av tuffer av andesitisk till ryolitisk sammansättning. Kutch-bentoniten bildades genom hydrotermisk omvandling av vulkanisk aska i saltvatten (SKB R-09-53, kap 2).

Bulkprover från ovanstående material visar att smektitinnehållet är mellan 60 och 80 %, och katjonutbyteskapaciteten (CEC) mellan 70 och 100 milliekvivalenter per 100 gram. De dominerande katjonerna varierar i olika material. Milos BF 04 har magnesium och Milos BF 08 har kalcium som dominerande katjon, medan de båda Kutch-materialen (Kutch BF 04 och BF 08) har natrium som dominerande katjon.

Den isomorfa substitutionen som leder till negativ laddning på mineralflaksytan sker till mer än 50 % på oktaedersskiktet för Milos BF 04 och BF 08, samt för Kutch BF 04. Smektiten klassificeras för dessa material som en montmorillonit. För Kutch 08 sker substitutionen däremot huvudsakligen på det tetraedersskikt vilket gör att smektit i detta material klassificeras som en beidellit (SKB R-09-53, abstract).

Den geokemiska sammansättningen av de olika lermaterialen varierar stort. Milos BF 04 har låg andel svavelförande mineraler såsom sulfater och sulfider (cirka 0,06 %) medan den innehåller en hög andel av karbonat i form av dolomit och kalcit (över 25 %). De viktigaste accessoriska mineralen är kalciumfältspat och plagioklas. Milos BF 08 innehåller däremot mycket låg andel karbonat men en relativt hög svavelhalt (1 %), varav merparten av svavlet förekommer som pyrit. Både Kutch BF 04 och BF 08 innehåller en liten andel svavelförande mineraler samt karbonater men har däremot en hög andel av titan- och järnrika mineraler i form av accessoriska mineraler såsom anatas, magnetit, hematit och goethit (SKB R-09-53, abstrakt och avsnitt 4.5).

I den andel av proverna med en kornstorlek som är mindre än 0,1 μm , har de två Milos-materialen mycket höga kaliumhalter som tyder på en relativt hög halt av illit i materialen. Däremot har de två Kutch-materialen låga kaliumhalter (SKB R-09-53, sid. 3 och avsnitt 4.5).

Halterna av sulfider och totalt svavel är relativt låga (< 1 vikt-%) i alla ovanstående lermaterial som har studerats av SKB (SKB R-09-53, tabell 4-5; SKB TR-10-16, tabell 3-2). Även halten av totalt organiskt kol är låg (< 1 vikt-%) (SKB TR-10-16, tabell 3-2).

3.5.7.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s successiva urval av material och koncept för återfyllnad är vetenskapligt välgrundad. Det framtagna referensmaterialet med förkompakterade block av svällande lermaterial samt pellets av bentonit har visats vara anpassad för



slutförvarsmiljön särskilt med hänsyn till att motstå höga salthalter i omgivande grundvatten. Materialvalet ger förutsättningar för att kunna uppfylla återfyllnadens säkerhetsfunktioner.

SSM bedömer att SKB:s redovisning av mineralkaraktisering av återfyllnadsmaterial är ändamålsenlig. SSM förväntar sig dock att ett mer systematiskt angreppssätt kommer att användas för att hantera det faktum att mineralinnehållet varierar mycket även för bentonit från en och samma plats, t.ex. Milos.

SKB verkar sakna ett konsekvent benämningssystem för olika bentonitprover. Enligt SSM:s bedömning försvårar detta jämförelsen av egenskaper från olika studier, t.ex. i SKB R-06-73 benämndes proven från Milos som Milos BF medan i SKB R-09-53 har proverna fått beteckningar som Milos BF 04 och BF 08.

SSM anser att SKB behöver ta fram en systematisk mineralogisk kategorisering av olika bentoniter till återfyllnadsblock och pellets. I varje kategori bör intervall för mineralogisk sammansättning undersökas med tillhörande geokemiska och mekaniska egenskaper. Dokumentationen bör även inkludera annan relevant information såsom geologiskt ursprung, leveransplats, och mängd av material som kan användas i slutförvarsprojektet. Kategoriseringen bör underlätta möjligheterna att säkra en tillräckligt stor mängd av material från olika leverantörer som har egenskaper som motsvarar kraven i konstruktionsförutsättningarna.

SSM:s ställningstagande baserar sig på att de geokemiska och mekaniska egenskaperna hos återfyllnadsblocksmaterialen varierar från olika platser samt även från en och samma plats. Buffertmaterialet är relativt homogent med mer likformiga egenskaper så länge det dominerande lermineralet i bentoniten är montmorillonit, men det inte är fallet för återfyllnadsmaterialet som inte har mycket hög montmorillonithalt. Kategoriseringen av återfyllnadsmaterialet bör kunna underlätta SKB:s kvalitetssäkring av återfyllnadsmaterialet och installation av återfyllnad i deponeringstunnlarna, t.ex. fastställande av andelen tunnelvolym som måste återfyllas med block.

SSM anser att det är en brist att SKB inte har karakteriserat molekyllära former av organiskt kol i återfyllnadsmaterial. Förekomstformerna bedöms av SSM ha betydelse för omfattning av möjlig mikrobiell aktivitet i en installerad återfyllnad. SKB behöver mer ingående genomföra karakterisering. SSM instämmer visserligen med SKB att merparten av det organiska materialet ska vara högmolekylärt och därmed svårtillgängligt för mikrober. SSM anser ändå att en detaljerad karakterisering av formerna av organiskt kol kommer att ge ett förbättrat underlag för att bedöma risken för och omfattning av mikrobiell sulfatreduktion i återfyllnaden. Tillförsel av sulfid från återfyllnaden kan ha viss betydelse för kopparkapselns långsiktiga beständighet, även om riskerna är mindre än för motsvarande process i bufferten på grund av diffusionsmotståndet som ges av de 1,5-meter tjocka buffertblocken ovanpå kapseln. Osäkerheter föreligger dock i och med att innan bufferten blivit tillräckligt vattenmättad kan sulfid transporteras i gasfas till kapselytan.

3.5.8 Framställning av återfyllnadsblock och återfyllnadspellet

3.5.8.1 Underlag från SKB

SKB:s referensmetod för tillverkning av återfyllnadsblock är enaxlig pressning och för tillverkning av återfyllnadspellet användes valskompaktering (SKB TR-10-16, avsnitt 5.3.2 och 5.3.3). För att uppnå den erforderliga tillverkningskapaciteten ska två pressar användas parallellt med ett automatiserat kontrollsystem. I kontrollsystemet ingår fyllning av återfyllnadsmaterialet till pressarna samt hantering av block och pellets. Systemet ska även kunna inhämta och förvara data från tillverknings- och inspektionsprocesserna (SKB TR-10-16, avsnitt 5.3.2).

Innan pressningen behövs en konditionering av lermaterialet. Vid konditioneringen ska materialet först torkas till avsedd vattenkvot, för att sedan malas till en lämplig kornstorleksfördelning inför pressningen. Innan pressningen kommer vatten att tillföras igen om det behövs för att öka vattenkvoten till en för pressningen lämplig nivå.

Mer än 10 000 återfyllnadsblock har tillverkats vid olika typer av försök i laboratorieskala (SKB TR-10-16, avsnitt 5.3.7; SKB R-06-71, avsnitt 5.1.1; SKB R-06-73, kapitel 6; SKB R-10-44, kapitel 4). Lermaterial från olika platser har utvärderats; leran som benämns Milos I samt IBECO-RWC-BF från Milos i Grekland, Asha 230 från Asha i Indien, Friedland från Friedland i Tyskland, och DPJ från Dnešice i Czech. De tillverkade blocken är dock av betydligt mindre storlek, t.ex. 300x300x150 mm, än SKB:s referens mått (700x667x510 samt 700x600x250 mm, se SKB TR-10-16, tabell 3-4).

SKB har redovisat test- och inspektionsmetoder för kvalitetssäkring av återfyllnadsblock och återfyllnadspellet, både för återfyllnadsmaterialet innan pressning och för tillverkade block- och pelletprodukter (SKB TR-10-16, avsnitt 5.2 och 5.3). Egenskaperna, parametrarna och metoderna som ingår i inspektionen har sammanställts i tabell 5-2 i SKB TR-10-16. Ett produktion-inspektionsschema för utgrävning, leverans av lermaterial samt tillverkning av block och pellets presenteras i figur 5-2 i SKB TR-10-16.

3.5.8.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s program för tillverkning av återfyllnadsblock och pellets är ändamålsenligt. SSM instämmer med SKB om att återfyllnadsblock och pellets bör kunna tillverkas med de specifikationer som anges i referensutformningen. SKB har genomfört ett omfattande arbete med tillverkning av ett stort antal återfyllnadsblock och pellets, vilket har visat funktionaliteten hos de hittills framtagna tillverkningsprocesserna.

SSM anser dock att SKB:s erfarenheter kring att praktiskt åstadkomma en fullt ut realistisk tillverkningsprocess fortfarande behöver vidareutvecklas. SSM:s bedömning baseras på att inget återfyllnadsblock med de specificerade måtten hittills har tillverkats. Praktiska svårigheter förväntas öka med ökade blockmått. SSM anser att SKB behöver ta fram teknik för framställning av återfyllnadsblock med de dimensioner som anges i referensutformningen.

SSM konstaterar att de inspektionsmetoder som SKB föreslagit i kvalitetssäkringsprogrammet är konventionella kemiska analyser. Vissa svårigheter kan ändå förväntas uppstå vid kvalitetssäkring i samband med tillverkningsprocessen för återfyllnadsblock och pellets. De flesta metoderna är tidsödande och kostsamma, och stora mängder av återfyllnadsmaterial måste kunna hanteras med varierande egenskaper eftersom materialet förmodligen kommer att komma från olika platser. SSM anser därför att SKB behöver ta fram en plan för kvalitetssäkring av block och pellets som beaktar den arbetstakt som krävs för återfyllnaden av deponeringstunnlarna.



3.5.9 Installation av återfyllnad

3.5.9.1 Underlag från SKB

SKB har redovisat hanteringen och installationen av återfyllnad i deponeringstunnlarna i avsnitt 5.4 i SKB TR-10-16.

Innan återfyllningsprocessen kan inledas måste flera arbetsmoment vara avslutade så som inspektion och karakterisering av tunnelväggar, karakterisering av vattenflöden samt installation av tillfällig ventilation, elförsörjning, belysning m.m. Återfyllningsprocessen innefattar följande moment:

- Installation av återfyllnad i de bortvalda deponeringshålen.
- Installation av återfyllnad i den övre delen, inklusive den avfasade överkanten av de vanliga deponeringshålen, dvs. hålen som innehåller kapslar.
- Installation av pellets på tunnelbotten.
- Installation av återfyllnadsblock i deponeringstunneln.
- Installation av pellets i deponeringstunneln.

För återfyllning av de deponeringshål som eventuellt behöver väljas bort kan antingen buffertmaterial eller återfyllnadsmaterial väljas.

Tunnelbotten kommer att installeras med återfyllnadspelletts genom användning av en skruvmatare. Installerat material vägs och tunnelvolym skannas innan och efter installationen och med hjälp av denna information bestäms den installerade densiteten på tunnelbotten.

Huvuddelen av deponeringstunneln återfylls med hjälp av den så kallade ”blockmetoden”, som innebär individuell hantering och placering av blocken (SKB R-08-59, avsnitt 2.3). Utrymmena mellan blocken, samt mellan blocken och tunnelväggen, fylls med pellets. Referensmetoden för detta arbetsmoment är torrsprutning. Fyllnadsgraden inspekteras med en kamera som monteras vid den främre mynningen av sprutmunstycket. Den installerade densiteten bestäms genom att kontrollera den installerade mängden av återfyllnadsmaterial i en bestämd volym.

Demonstrationer av olika moment i återfyllningsprocessen med vald referensutformning har genomförts i SKB:s bentonitlaboratorium vid Äspö. Återfyllnadspelletts av bentonit av Milos-typ, som innehåller mer än 80 % montmorillonit, har testats som bäddmaterial för tunnelbotten (benämns Cebogel pellets) (SKB R-08-59, avsnitt 4.2.1).

Staplingen av återfyllnadsblock har demonstrerats i en konstgjord tunnel vid bentonitlaboratoriet. Syftet med demonstrationen har varit att utvärdera precision och kapacitet vid blockinstallation. Fram tills nu har betongblock används istället för bentonitblock eftersom det inte har varit möjligt att tillverka hundratals bentonitblock med den erforderliga storleken (SKB R-08-59, avsnitt 4.3). Betongblocken har dock samma dimensioner som blocken i referensutformningen. En ny metod för lyft och placering av block baserad på vakuumteknik har utvecklats. Olika sensorer, såsom laser och kamera, används i fordonet för att underlätta blockinstallationen (SKB R-08-59, bilaga 1).

Fyllning av pellets mellan återfyllnadsblocken, samt mellan blocken och tunnelväggen har demonstrerats i bentonitlaboratoriet tillsammans med den ovan nämnda staplingen av återfyllnadsblock. Den teknik och den utrustning som har använts överensstämmer med referensutformningen (SKB R-08-59, avsnitt 4.4 och bilaga 1).

Demonstrationsresultaten visar att om deponeringstunneln är tillräckligt torr kan krav kopplade till initialtillståndet uppfyllas med de metoder och den teknik som specificerats i

nuvarande referensutförning för installation av återfyllnaden. Även material och metoder för pelletsinstallation förväntas fungera så som avsett. Arbetstakten som krävs för att återfylla erforderliga 6 m tunnel per dygn verkar baserad på hittillsvarande erfarenheter möjlig att uppnå även om marginalen för närvarande är liten (SKB R-08-59).

3.5.9.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att återfyllning av deponeringstunnlar enligt specifikationerna i referensutförningen är genomförbar. Denna bedömning baseras på att SKB preliminärt har demonstrerat att återfyllningen i praktiken kan genomföras i en relativt torr deponeringstunnel (SKB R-08-59). Inverkan av vatteninflödet på installation av återfyllnaden, samt potentiell kanalbildningserosion och bortspolning av återfyllnadsmaterial, har studerats av SKB vid flera andra försök i mindre skala (avsnitt 4.9 i denna rapport). SSM anser att kanalbildningserosion kan vara den process som är mest svårhanterlig vid installation av återfyllnaden. Problemet omfattning beror delvis på möjligheterna att under eventuell uppförandefas begränsa vatteninflödet i utsprängda deponeringstunnlar. SSM ser positivt på att SKB har redovisat ett utförligt underlag för förståelse av processens påverkan på installationen. Ytterligare forskning, utveckling och demonstration kring denna process behövs dock innan en eventuell provdrift av slutförvarsanläggningen. Den förväntade omfattningen på insatserna kan i viss mån anpassas beroende på erfarenheterna från uppförandefasen. SSM:s externa experter har liknande syn (SSM Technical Note 2015:06).

SSM anser att SKB:s hittillsvarande demonstrationer av återfyllningsprocessen uppfyller vissa delmål, men de demonstrerar inte fullt ut konceptets genomförbarhet. Demonstrationer har hittills endast gjorts med attrappblock tillverkade av betong. Dessutom har försöken gjorts i en konstgjord tunnel ovanför mark i bentonitlaboratoriet snarare än i en representativ slutförvarsmiljö. SSM anser därför att ytterligare demonstrationer behöver genomföras i underjordstunnlar med liknande hydrogeologiska och grundvattenkemiska betingelser som förväntas på förvarsplatsen. Detta arbete behöver genomföras i god tid innan en eventuell provdrift av slutförvarsanläggningen.

3.5.10 Säkerhetsfunktioner och konstruktionsförutsättningar för plugg i deponeringstunneln

3.5.10.1 Underlag från SKB

Pluggarna utgör en del i barriärkonstruktionerna för förslutning av deponeringstunnlarna. Andra pluggar utgör en del av ett förslutningssystem för stamtunnlar samt toppförslutning för ramp och schakt. SKB anser att utförning av pluggen bör anpassas till de lokala förhållandena och därför kommer olika konstruktioner att studeras som är anpassade till varierande omfattning av vatteninflöden.

Referensutförningen för den generiska pluggen består av en pluggsektion, en tätningsssektion samt en filtersektion. Pluggsektionen är en kupolformad platsgjuten betongkonstruktion för mekaniskt och hydrauliskt mothåll. För att minimera inverkan av basiskt pH på bentoniten planeras betongkonstruktionen att gutas i låg-pH-betong enligt ett av SKB:s betongkoncept (SKB TR-10-47, avsnitt 4.4.7). Tätningsssektionen planeras bestå av bentonittätning i form av block och pellets. Filtersektionen är under utredning och kan komma att bestå av lecabalkar och/eller makadam. Systemkonstruktionen för pluggen bör fastställas före byggstart för det första deponeringsområdet.

Säkerhetsfunktioner för pluggarna i deponeringstunnlarna (SKB TR-10-16, avsnitt 2.2.2 och 2.2.3) är att de ska:

- motstå summan av det hydrostatiska trycket på förvarsdjup och svälltrycket i återfyllnaden tills stamtunneln har blivit återfylld
- begränsa vattenflödet förbi pluggen tills intilliggande stamtunnel är återfylld och vattenmättad
- vara hållbar och upprätthålla säkerhetsfunktioner i den miljö som förväntas råda i slutförvaret tills stamtunneln hunnit bli vattenmättad.

Kraven avseende praktiskt genomförande motsvarar de krav som ställs på buffertens och återfyllnadens installation (SKB TR-10-16, avsnitt 2.2.3).

Konstruktionsförutsättningarna för pluggen redovisas i tabell 2-5 i SKB TR-10-16. Pluggen ska motstå det hydrostatiska trycket samt svälltrycket från återfyllnaden vilket totalt specificeras till 5 MPa. Pluggens förväntade livslängd efter uppförandet är 100 år. Någon närmare specifikation av vilken mängd vatten som tillåts passera pluggen uppges för närvarande inte av SKB, men denna uppgift kommer att tas fram längre fram.

SKB redovisar konstruktionsparametrar för olika delar av pluggen i tabell 7-1 och 7-2 i SKB TR-10-16. Geometriska mått för olika delar av pluggen beskrivs i figur 7-2 i SKB TR-10-16. SKB påpekar att specifikationen bör betraktas som preliminär. SKB anser att det inte är möjligt eller meningsfullt att fastställa pluggens utformning i dagsläget med tanke på den planerade tekniska utvecklingen av pluggen i nära framtid (SKB TR-10-16, avsnitt 7.2). SKB har dock genomfört en preliminär modellering av de mekaniska och hydrauliska egenskaperna hos den föreslagna referensutformningen (SKB TR-09-34).

SKB redovisar i sin komplettering till ansökan (SKBdoc 1395038) även ett fullskaligt test som genomförs i Äspölaboratoriet på 450 meters djup av det kompletta pluggsystemet som kallas "Domplu" ("Dome Plug") och som ingår i EU-samarbetsprojektet Dopas ("Full scale Demonstration of Plugs and Seals"). Experimentet fokuserar på: i) rationell och kostnadseffektiv produktion, ii) påverkan av långtidslaster på oarmerade låg-pH-betongkonstruktioner, iii) långtidsbeständighet, egenskaper samt underhållsbehov på temporära oarmerade låg-pH-betongkonstruktioner.

3.5.10.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att den tekniska utvecklingen av pluggen till deponeringstunneln fortfarande är i en tidig utvecklingsfas och fortsatt utvecklingsarbete behövs. SSM anser dock att det finns förutsättningar för att pluggen kommer att uppfylla erforderliga funktionskrav.

SSM anser att konstruktionsförutsättningen att pluggen ska behålla sina säkerhetsfunktioner i 100 år behöver en bättre motivering. SKB:s preliminära modellering av förvarets vattenmättnadsprocess visar att vissa delar av stamtunneln fortfarande kan ha en lägre vattenmättnadsgrad än deponeringstunnlarna även för tider efter 100 år, och att en hydraulisk gradient genom pluggen kan bli bestående under lång tid (SKB R-09-19, figur C-7).

SSM anser att konstruktionsförutsättningen för pluggen att motstå ett tryck på 5 MPa fram till tiden då det hydrostatiska trycket i slutförvaret har återuppbyggt är vetenskapligt och tekniskt väl underbyggt. Bedömningen baserar sig på att uppskattning av det totala hydrostatiska trycket på förvarsdjup (470 m) plus några hundra kilo Pascals svälltryck från återfyllnaden är rimlig för den tempererade fasen av slutförvarets långsiktiga utveckling.

SKB har hittills inte tagit fram kvantitativa krav på konstruktionsförutsättningen för mängd av vatten som är tillåtet att passera pluggen. SKB har däremot redovisat att, med

den siktade torrdensiteten av bentonit i det vattenmättade bentonitfiltret, att den hydrauliska konduktiviteten hos bentoniten kan bli så låg som 10^{-11} m/s när filtret blivit fullständigt vattenmättat (SKB TR-10-16, avsnitt 8.2.2). SSM bedömer att det är tillräckligt tätt, men anser dock samtidigt SSM att SKB behöver kvantitativt verifiera att kravet på pluggens begränsade genomsläpplighet kan uppfyllas.

SKB tillstår att det var ett förbiseende i konstruktionsförutsättningarna att det inte finns ett krav på pluggens gastäthet för att motverka förhållandena för atmosfärisk kopparkorrosion efter att deponeringstunneln förslutits men innan bufferten har blivit vattenmättad (SKBdoc 1395038). Gastätheten är ett krav eftersom inläckage av syre in i deponeringstunnlarna måste förhindras, men kravet behövs också för att förhindra att vattenånga tränger ut från deponeringstunneln. Enligt SSM:s bedömning bör pluggens gastäthet kunna säkerställas så länge filterdelen kan hållas helt vattenmättad på det sätt som SKB föreslår. Den mängd syre som kan läcka in efter att fullständig vattenmättnad har uppnåtts beroende på diffusion av syre i vattenfas bör vara helt försumbar. SSM anser dock att kravet på att uppnå och sedan säkerställa fullständig vattenmättnad i hela filterdelen är en funktion kopplad till förvarets långsiktiga strålsäkerhet som behöver kontrolleras regelbundet under hela förvarets tilltänkta drifttid.

Trots att vissa av konstruktionsförutsättningarna i dagsläget inte är kompletta och inte i alla avseenden väl underbyggda anser SSM att SKB:s tekniska utveckling har visat att säkerhetsfunktionerna hos pluggen principiellt kan uppnås med referensutformningen i SKB TR-10-16, kapitel 7. SKB:s preliminära experimentella försök och teoretiska modelleringar med denna referensutformning, med låg-pH betong och utan armering, bekräftar att de mekaniska och hydrauliska kraven kan uppfyllas med god marginal (SKB R-09-07; SKB R-09-34).

3.5.11 Initialtillstånd för plugg i deponeringstunnlarna

3.5.11.1 Underlag från SKB

SKB redovisar översiktligt i avsnitt 9.3 i SKB TR-10-16 hur pluggens olika delar delvis tillverkas av olika leverantörer, delvis tillverkas av SKB själva, samt installeras på plats. Pluggens initialtillstånd redovisas i kapitel 10 i SKB TR-10-16.

Pluggen kommer att bestå av följande delar enligt referensutformningen (SKB TR-10-16, avsnitt 7-1):

- betongplugg
- vattentätt bentonitfilter
- filter av sandpartiklar och stengrus
- betongbalkar
- dräneringsrör
- injekteringsrör.

SKB planerar att följa upp procedurerna för uppförande av pluggen. För tillverkning och installation av det vattentäta bentonitfiltret kommer samma metoder som tagits fram för återfyllnaden att användas. För installation av sandfiltret, tillverkning och installation av betongbalkar, samt installation av betongplugg kommer SKB att använda konventionella och allmänt tillämpade metoder både för uppförandet och vid kvalitetskontrollen. För arbeten med betong behöver metoderna anpassas till låg-pH-betong (SKB TR-10-16, avsnitt 9.1.3; SKB R-09-07).

Enligt den nuvarande planen kommer betongbalkarna att prefabriceras. Stommen, balkstöd och armeringskorgar kommer att byggas och olika rörsystem kommer att

monteras innan de transporteras ner till förvarsdjup. Bentonitblock och pellets med samma mått och egenskaper som för återfyllnaden kommer att användas för det vattentäta bentonitfiltret. De kommer att tillverkas och kontrolleras med samma rutiner som har utvecklats för återfyllnaden. Materialet i filtret kommer att blandas till önskad kornstorleksfördelning och transporteras ner till aktuellt förvarsdjup. De torra ingredienserna i betongen blandas på marknivå innan transport ner till förvarsnivå (SKB TR-10-16, avsnitt 9.2.1).

Procedurer för installation av pluggens olika konstruktionsdelar förutom betongpluggsdelen finns beskrivna i SKB TR-10-16 (avsnitt 9.4) medan de detaljerade procedurerna för installation av betongpluggen finns beskrivna i SKB TR-10-16 (avsnitt 9.5). Initialtillståndet för pluggen redovisas i tabeller 10-1 och 10-2 i SKB TR-10-16.

SKB:s tekniska utveckling görs genom försök i Äspölaboratoriet. En oarmerad konstruktion med en kupolformad betongplugg i låg-pH-betong utan armering har gjutits i mars 2013 (SKB TR-14-17, avsnitt 4.11; SKB R-11-04; SKB P-13-37; SKB P-13-38).

SSM har begärt kompletterande information som avser bestämning av mängden inläckande syre genom deponeringspluggen och som kan påverka korrosion av kopparkapseln (SSM2011-2426-140). SKB svarade på denna begäran (SKBdoc 1437441) att referensutformningen av pluggen kräver att pluggen ska vara gastät, dvs. att pluggen måste förhindra transport i gasfas mellan en försluten deponeringstunnel och stamtunneln fram till den tidpunkt då stamtunneln vattenfylls. Kravet uppfylls genom att vid driftsättning successivt vattenmätta bentonittätningen på konstgjord väg, vilket medför att pluggen kommer att förhindra transport av gas och vattenånga.

SKB använder en modell för beräkningar kring kopplade kemiska reaktioner och transport för att simulera den kemiska nedbrytningen av låg-pH-betong i pluggen (SKB TR-10-62). Den kemiska delen av beräkningarna baseras på en modell med fasta lösningar, SiO₂ och portlandit som ingående komponenter (SKB TR-10-62, avsnitt 2.2.1). Upplösningskinetik från Sugiyuma och Fujita (2006) används för simuleringar av kemisk utveckling i låg-pH-betong. För de första hundratals åren visar modelleringsresultaten att nedbrytningen av cement sker genom upplösning av portlandit och till en mindre del även av SiO₂ vilket leder till en minskad snarare än ökad porositet. Anledningen till detta är att upplösning av gips i återfyllnaden tillför sulfat till området där betongpluggen finns. Sulfaten reagerar med upplöst kalcium från cementen, vilket tillsammans med aluminium i grundvattnet bildar mineralet ettringit. Bildning av ettringit som har en hög mol-volymp förväntas fylla porerna i betong och kompensera för volymminskningen som orsakas av cementupplösning. SKB anser därför att betongpluggens gas- och vattentäthet liksom dess mekaniska stabilitet inte avsevärt förändras med tiden (SKB TR-10-62, kapitel 5).

3.5.11.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning av uppförande och initialtillstånd för pluggen i deponeringstunneln är ändamålsenlig. SSM ser positivt på att SKB avser att använda välutvecklade konventionella metoder för att uppföra pluggen. Det är även positivt att fullskaliga försök har påbörjats vid Äspölaboratoriet för att utveckla tekniken för betongplugg med låg-pH betong och utan armering.

SSM anser dock att erfarenheterna med att bygga med låg-pH-betong fortfarande är knapphändiga. Mycket utvecklingsarbete kvarstår med hänsyn till att vissa konstruktionsförutsättningar fortfarande behöver fastställas (se SSM:s bedömning i avsnitt 3.5.10 "Säkerhetsfunktioner och konstruktionsförutsättningar för plugg i deponeringstunneln" i denna granskningsrapport).

SSM bedömer att SKB:s redovisning om att pluggen kan uppnå gastäthet under driftsättningen är trovärdig. Tidigare erfarenheter har visat att konstgjord vattentillförsel av bentonit fungerar om inte kanalbildningserosion förekommer. SSM anser att risken för kanalbildningserosion är mycket låg vid vattentillförsel till bentonitfiltret i pluggen eftersom bentoniten är instängd mellan betongbalkarna.

SSM bedömer att SKB:s modellering av degradering av betong i pluggen är vetenskapligt väl underbyggd och att resultat är trovärdiga. SSM anser dock att inverkan av nedbrytning av cement i låg pH-betong behöver studeras vidare. Även osäkerheter i samband med eventuell bildning av ettringit behöver utredas vidare.

SKB planerar studier av långtidsbeständighet hos låg-pH-betong för att utreda dess mekaniska mothållfunktion. Det är ändå inte tydligt för vilket tidsintervall efter förslutning denna funktion behöver upprätthållas. Samma bedömning kan göras beträffande det hydrauliska mothållet för pluggen tills tätningssektionen har nått full återmättad. Beroende på längden av detta tidsintervall blir beständigheten för kontaktingekteringen mellan berg och betong en viktig fråga.

3.5.12 SSM:s sammanfattande bedömning av buffert, återfyllnad och pluggar

I KBS-3-konceptet för slutförvaring av använt kärnbränsle används tekniska barriärer såsom buffert, återfyllnad och pluggar för att säkerställa strålskydd vid drift av anläggningen samt förvarets långsiktiga strålsäkerhet.

SSM bedömer att konstruktionsförutsättningarna för bufferten är vetenskapligt och tekniskt välgrundade samt har tagits fram med utgångspunkt från den långsiktiga strålsäkerheten för slutförvaret. Det lägsta svälltrycket, den högsta hydrauliska konduktiviteten samt de högsta nivåer av halter för organiskt kol, totalt svavel och sulfider formuleras som krav för att skydda kapselns integritet, samt förhindra och fördröja utsläpp av radionuklider i fall kapseln går sönder. Inom det specificerade haltintervallet för montmorillonit finns tydliga relationer mellan vattenmättad densitet, svälltryck och hydraulisk konduktivitet, oavsett om bentonitmaterialet har bildats från vulkaniska material av olika ursprung (basalt till ryolit) eller under olika geologiska perioder (kvartär till krita). Inom det specificerade intervallet för halt för montmorillonit och vattenmättad densitet har SKB visat att kraven på svälltryck och hydraulisk konduktivitet alltid kan uppfyllas.

SSM bedömer att buffertens referensutförning har definierats från tekniska parametrar som kan kontrolleras och verifieras vid uppförande av slutförvarsanläggningen. Den vattenmättade densiteten kan enkelt relatera till torrdensiteten och vattenkvoten för bentonitmaterialet vid installation av bufferten. Både torrdensiteten och vattenkvoten är kontrollerbara parametrar. Halter för olika mineral kan kontrolleras genom kemiska analyser.

SSM bedömer att SKB:s hittills genomförda studier avseende tillverkning av buffertblock, bufferttringar och pellets är omfattande. Produktionsmetoderna är väl utvecklade, har utvärderats fortlöpande och bedöms vara tillförlitliga. SKB har uppnått tillräckliga erfarenheter i samband med tillverkning vid genomförande av laboratorieförsök samt från prototypförvarsprojektet vid Äspölaboratoriet. Ett tillräckligt stort antal block och ringar har kompakterats och förväntad kvalitet har uppnåtts. En relativt stor mängd pellets har också tillverkats.



SSM anser att SKB:s redovisning av buffertinstallation är ändamålsenlig. De framtagna procedurerna bedöms vara genomförbara och installationen av buffertblock och buffertringar bör efter ytterligare utvecklingsarbete kunna ske i enlighet med konstruktionsförutsättningarna. SSM:s bedömning baseras delvis på erfarenheterna från prototypförvarsförsöket vid Äspölaboratoriet i vilket tillverkning, hantering och inplacering av buffertblock har genomförts.

SSM anser att SKB behöver ta fram väldokumenterade rutiner samt ett detaljerat kontroll- och provningsprogram för bestämningen av materialsammansättning för buffert med specificerade analysmetoder för montmorillonit, organiskt kol, totalt svavel och sulfider.

Fullstora ringar och block behöver enligt SKB:s nuvarande referensutförning provtillverkas. SKB behöver visa att erforderlig kvalitet hos dessa modifierade komponenter kan uppnås. Ytterligare försök kommer att behövas för att visa att den nuvarande referensmetoden för buffertinstallation fungerar i fullskala med buffertblock och med buffertringar.

SSM anser att det finns brister i SKB:s förståelse av underliggande mekanismer för kanalbildningserosion ("piping/erosion") och risk för kanalbildningserosion i samband med installation av bufferten kan inte uteslutas helt. SSM bedömer baserat på det nuvarande kunskapsläget att det är den process som i störst utsträckning kan leda till att den installerade densiteten blir längre än vad som krävs enligt referensutförningen. Den förväntade låga frekvensen av vattenförande sprickor vid Forsmarksplatsen är dock en gynnsam omständighet i perspektiv av kanalbildningserosion. SSM anser att processen bör vara hanterbar genom en lämplig placering av deponeringshål. Ytterligare forskning, utveckling och demonstration kring denna process kommer att behövas.

SSM bedömer att konstruktionsförutsättningarna för återfyllnaden är vetenskapligt och tekniskt välgrundade och har blivit framtagna med den långsiktiga strålsäkerheten som utgångspunkt. För att tillgodose konstruktionsförutsättningen att begränsa uppåtriktad svällning/expansion av bufferten, bedömer SSM att referensutförningen behöver vidareutvecklas och baseras på kontrollerbara parametrar. Med de i ansökan redovisade parametrarna är det visserligen möjligt att kontrollera om konstruktionsförutsättningen uppfylls eller inte, men det krävs ett omfattande modelleringsarbete i samband med installation av återfyllnaden vilket bedöms vara praktiskt olämpligt.

SSM kan konstatera att hydraulisk konduktivitet är beroende av materialets porositet, som i sin tur är beroende av materialets torrdensitet. Ett liknande resonemang gäller för svälltryck som huvudsakligen är beroende av innehållet av mineralet montmorillonit i bentonitleran. Genom att kontrollera torrdensiteten vid installation kan kraven på hydraulisk konduktivitet och svälltryck för återfyllnaden uppfyllas. Beträffande säkerhetsfunktionen att begränsa buffertens uppåtriktade expansion för att säkerställa tillräcklig buffertdensitet enligt konstruktionsförutsättningen anser SSM att ytterligare utvecklingsarbete kommer att behövas. SKB:s studier visar att den uppåtriktade expansionen inte bara är beroende på materialets torrdensitet utan också på materialets elastiska egenskaper. SSM anser därför att SKB behöver etablera en teoretisk eller empirisk relation mellan intervallet för de elastiska parametrarna för återfyllnadsmaterialet och den acceptabla uppåtriktade expansionen av bufferten. De elastiska egenskaperna i återfyllnadsmaterialet, såsom Youngs modul och Poissons tal, bör användas som kontrollerbara parametrar i referensutförningen.

SSM anser att det är en brist att SKB inte har karakteriserat molekyllära former av organiskt kol i återfyllnadsmaterialet. Förekomstformerna bedöms av SSM ha stor betydelse för mikrobiell aktivitet. SKB behöver genomföra en mer ingående



karaktisering. SSM instämmer visserligen med SKB att merparten av det organiska materialet bör vara högmolekylärt och därmed svårtillgängligt för mikrober. SSM anser dock att en detaljerad karaktisering av formerna av organiskt kol kommer att ge ett förbättrat underlag för att bedöma risken för och omfattning av mikrobiell sulfatreduktion i återfyllnaden.

SSM bedömer att SKB:s program för tillverkning av återfyllnadsblock och pellets är ändamålsenligt. SSM instämmer med SKB om att återfyllnadsblock och pellets bör kunna tillverkas med de specifikationer som anges i referensutformningen. SKB har genomfört ett omfattande arbete med tillverkning av ett stort antal återfyllnadsblock och pellets, vilket har demonstrerat funktionaliteten hos de hittills framtagna tillverkningsprocesserna. SSM anser dock att SKB:s erfarenheter kring att praktiskt åstadkomma en fullt ut realistisk tillverkningsprocess fortfarande behöver vidareutvecklas. SSM:s bedömning baseras på att inget återfyllnadsblock med de specificerade måtten hittills har tillverkats.

SSM bedömer att återfyllning av deponeringstunnlar enligt specifikationerna i referensutformningen är genomförbar. Denna bedömning baseras på att SKB preliminärt har demonstrerat att återfyllning i praktiken kan genomföras i en relativt torr deponeringstunnel. SSM anser dock att kanalbildningserosion kan vara den process som är mest svårhanterlig vid installation av återfyllnaden. SSM ser positivt på att SKB har redovisat ett utförligt underlag för förståelse av processens påverkan på installationen. Ytterligare forskning, utveckling och demonstration kring denna process behövs.

SSM kan konstatera att demonstrationer av återfyllningsprocessen endast hittills har gjorts med attrappblock tillverkade av betong. Dessutom har försöken gjorts i en konstgjord tunnel ovanför mark i bentonitlaboratoriet snarare än i en representativ slutförvarsmiljö.

SKB behöver ta fram teknik för framställning av återfyllnadsblock med de dimensioner som anges i referensutformningen, samt ta fram en plan för kvalitetssäkring av block och pellets som beaktar den arbetstakt som krävs för återfyllning av deponeringstunnlarna. Ytterligare demonstrationer behöver genomföras i underjordstunnlar med liknande hydrogeologiska och grundvattenkemiska betingelser som förväntas på förvarsplatsen.

Den tekniska utvecklingen av pluggen till deponeringstunneln är fortfarande i en tidig utvecklingsfas och fortsatt utvecklingsarbete behövs innan eventuell provdrift av slutförvarsanläggningen kan påbörjas. Konstruktionsförutsättningen att pluggen ska behålla säkerhetsfunktioner i 100 år behöver motiveras bättre. SSM anser dock att det finns förutsättningar för att pluggen kommer att uppfylla de erforderliga funktionskraven.

SSM anser att konstruktionsförutsättningen för pluggen att motstå ett tryck på 5 MPa fram till tiden då det hydrostatiska trycket i slutförvaret har återuppbyggt är vetenskapligt och tekniskt väl underbyggt. SKB har inte hittills tagit fram kvantitativa krav på konstruktionsförutsättningen för mängd av vatten som är tillåtet att passera pluggen. SKB har däremot redovisat att bentonitfiltret kommer att ha en bra täthet. SSM bedömer att bentonitfiltret är tillräckligt tät, samtidigt anser dock SSM att SKB behöver kvantitativt verifiera att kravet på pluggens begränsade genomsläpplighet kan uppfyllas.

Kravet på att uppnå och sedan säkerställa fullständig vattenmättnad i hela filterdelen av pluggen är en funktion kopplad till förvarets långsiktiga strålsäkerhet som behöver kontrolleras regelbundet under hela förvarets tilltänkta drifttid.

SSM bedömer att SKB:s redovisning av uppförande och initialtillstånd för pluggen i deponeringstunneln är ändamålsenlig. SSM ser även positivt på att SKB avser att använda välutvecklade konventionella metoder för att uppföra pluggen.

SKB har påbörjat fullskaliga försök vid Äspölaboratoriet för att utveckla tekniken för betongplugg med låg-pH-betong och utan armering. SSM anser dock att erfarenheterna med att bygga med låg-pH-betong fortfarande är knapphändiga. Mycket utvecklingsarbete kvarstår med hänsyn till att vissa konstruktionsförutsättningar för låg-pH-betong fortfarande behöver fastställas. SSM anser att nedbrytning av cement i låg-pH-betong och dess förlopp behöver studeras vidare med hänsyn till pluggens mekaniska mothållfunktion. Även osäkerheter i samband med eventuell bildning av ettringit behöver utredas.

SSM bedömer att SKB:s redovisning av pluggens gastäthet under eventuell driftsättning är trovärdig. SSM anser att risken för kanalbildningserosion är mycket låg vid vattentillförsel till bentonitfiltret i pluggen eftersom bentoniten är instängd mellan betongbalkarna. Beroende på tidsperioden för återmätning av tätningssektionen blir beständigheten för kontaktinjekteringen mellan berg och betong en viktig fråga.

3.6 Förslutning av slutförvaret

De huvudsakliga funktionerna för förslutning av slutförvaret är att förhindra oavsiktligt mänskligt intrång samt säkerställa att ramp och schakt inte utgör en särskild transportväg för radionuklider till markytan. Förslutningen projekteras baserat på de påfrestningar som kan uppstå i samband med framtida glaciationer.

Förslutning av slutförvaret innefattar insatser för att försegla alla delar i slutförvaret utöver deponeringstunnlarna, d.v.s. återfyllning av stamtunnlar, transporttunnlar, centralområdet samt toppförslutning av ramp och schakt. Förslutning förutsätter användning av konstruktionsmaterial såsom mekaniska pluggar, återfyllning med bentonitblock och pellets, makadam, stenblock, injekteringsbruk samt borrhålsförslutning.

Enligt SKB visas i säkerhetsanalysen SR-Site att egenskaperna hos förslutningen av ramp och schakt har en liten påverkan på den långsiktiga strålsäkerheten. Samma slutsats gäller för förslutning av undersökningsborrhål.

3.6.1 Barriärfunktioner och konstruktionsförutsättningar

3.6.1.1 Underlag från SKB

SKB har identifierat två barriärfunktioner som förslutningen behöver upprätthålla: i) att avsevärt försvåra oavsiktliga fysiska intrång från markytan till slutförvaret och ii) att förebygga förekomst av hydrauliska flödesvägar som länkar slutförvaret med markytan. Dessutom ska förslutningen inte mer än marginellt påverka andra barriärer i slutförvaret.

Den första barriärfunktionen åstadkommes genom en s.k. toppförslutning som avsevärt försvårar oavsiktliga intrång ner till förvarsdjup.

Den andra barriärfunktionen åstadkommes genom att återfyllda tunnlar uppfyller krav på tillräcklig täthet. I SKB:s konstruktionsförutsättningar anges att för återfyllda tunnlar, ramp och schakt under toppförslutningen ska den integrerade och konnekterade effektiva hydrauliska konduktiviteten understiga 10^{-8} m/s med hänsyn taget till skadezonen runt om bergutrymmena (SKB TR-09-22, avsnitt 3.5.1; SKB TR-10-17, tabell 2- 1). Motsvarande konstruktionsförutsättning gäller även för undersökningsborrhål från markytan till förvarsdjup. Längs med dessa borrhål, men under borrhålens toppförslutning ska den hydrauliska konduktiviten understiga 10^{-8} m/s. Enligt SKB kan detta krav uppnås om borrhålens förslutning kan utveckla ett svälltryck större än 0,1 MPa (SKB TR-09-22, avsnitt 3.5.3; SKB TR-10-17, tabell 2- 1). Krav på högsta hydrauliska konduktivitet för

återfyllnad och borrhål behöver inte gälla för tunnel- och borrhålsektionerna som genomskärs av zoner i berget med hög vattengenomsläpplighet.

Förslutningen har också säkerhetsfunktioner som syftar till att minimera påverkan på andra barriärer i slutförvaret så som att: i) inte försämra barriärfunktionen hos berget, ii) upprätthålla densiteten i återfyllnaden i deponeringstunnlar och andra tunnlar respektive ramp och schakt (dvs. återfyllnaden ska hållas på plats), iii) inte avsevärt påverka den kemiska miljön hos tekniska barriärer samt i berget. Säkerhetsfunktionen i punkt i) uppfylls enligt SKB om förslutningen förebygger hydrauliska flödesvägar till markytan genom begränsning av effektiv hydraulisk konduktivitet. Säkerhetsfunktionen i punkt ii) åstadkommes genom att uppfylla krav på återfyllnadens torrdensitet och montmorillonit-innehåll. Säkerhetsfunktionen i punkt iii) innebär att material som används till förslutningen ska väljas så att kemiska betingelser i buffert och återfyllnad inte försämras. Detta innebär t.ex. att all betong och bergkross som används i förslutningen ska ha ett pH på högst 11 (SKB TR-10-17, tabell 2-1), samt att mineralsammansättningen i bergkross inte avsevärt får skilja sig från bergarterna i slutförvarsvolymen (SKB TR-10-17, avsnitt 3.2.1). Enligt SKB:s plan ska utvalda schaktade massor från slutförvaret återanvändas i slutförvaret.

Toppförslutningen ska bestå av material som på bästa möjliga sätt försvårar oavsiktliga mänskliga intrång i slutförvaret och motverkar mekaniska erosionseffekter under framtida istider. I SKB:s nuvarande referensutförning ska toppförslutningen installeras från markytan till ett djup på 200 m (SKB TR-10-17, avsnitt 3.3.1). Detta djup kan komma att justeras och optimeras i framtiden genom utvärderingar inom säkerhetsanalysen. Ett större djup än 100 m ovanför deponeringsdjupet kan dock aldrig bli aktuellt (SKB TR-10-17, tabell 2-1). För undersökningsborrhål som når ett djup större än 200 m ska de översta 100 m rustas med toppförslutning (SKB TR-10-17, avsnitt 3.5.1). Enligt SKB behöver toppförslutningen av ramp, schakt och undersökningsborrhål inte uppfylla några hydrauliska krav (SKB TR-10-17, tabell 2-1).

Pluggarna i tunnlar och borrhål, som är en del i förslutningen, har inga långsiktiga barriärfunktioner i KBS-3-konceptet men de har funktionskrav kopplade till behov av att skydda de tekniska barriärerna och berget (SKB TR-10-17, avsnitt 2.5 samt 3.5). Pluggarna ska motverka mekaniska samt hydrauliska krafter under förslutning av slutförvaret så att barriärfunktionen i återfyllanden behålls. Pluggarna ska dessutom behålla sin ungefärliga ursprungliga volym även under den tid då dess mekaniska och hydrauliska funktionskrav inte längre behövs.

Detaljerade beskrivningar av referensutförning för återfyllning samt pluggar redogörs i rapporterna SKB TR-10-12, SKB TR-10-16 och SKB TR-10-47. I SR-Site redovisas även återkoppling till de antagna konstruktionsförutsättningarna baserat på utfallet av analysen av den långsiktiga strålsäkerheten (SKB TR-11-01, avsnitt 15.5.19).

3.6.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s underlag för beskrivning av förslutning av slutförvaret är godtagbar och kan anses vara tillräcklig för prövningen av ansökan. SSM anser att det finns förutsättningar för SKB att uppfylla de för förslutningen erforderliga barriärfunktionerna och funktionskraven vid en eventuell fortsatt detaljprojektering av slutförvaret. De flesta detaljer gällande förslutning är väl genomtänkta och grundar sig på etablerade eller beprövade metoder. Detta gäller t.ex. erfarenheter inom packning av bergkross i jorddammar, gjutning av massiva betongkonstruktioner och murverks-uppförande med bergblock. Vissa andra lösningar är idag inte etablerade, men har använts av SKB i prototyp tester eller i forskningssyfte. Detta gäller t.ex. tillverkning, transport och installation av bentonitblock samt pellets till återfyllnaden, användning av oarmerad låg-



pH-betong till pluggar, samt användning av bentonitpluggar i perforerade kopparrör för försegling av borrhål som når ett djup större än 200 m.

SSM vill påpeka att användning av etablerade eller beprövade metoder i sig inte är någon garanti för att dessa kommer att visa sig vara lämpliga för användning i slutförvaret. Bekräftelse på tillämpbarhet i sammanhanget långsiktig strålsäkerhet behöver etableras utifrån resultat från analyser av den långsiktiga strålsäkerheten. Enligt SSM:s bedömning har SKB åstadkommit detta för de delar som gäller referensutformningen av återfyllnaden med bentonitblock och pellets. Förutsättningarna bedöms vara likartade i jämförelse med återfyllnad av deponeringstunnlar. En utförligare diskussion om återfyllning av tunnlar med bentonitblock och pellets återfinns i avsnitt 3.5.

SKB:s val av samma konstruktionsförutsättningar för återfyllnaden i förslutningsdelen som för återfyllnad i deponeringstunnlarna bör enligt SSM:s bedömning innebära att kraven på begränsad skadezon och toleranser för bergutrymmenas geometri också bör gälla för andra typer av tunnlar utöver deponeringstunnlarna. Skadezonen i berget uppstår som ett resultat av sprängning samt mekaniska laster i berget. Ifall dessa krav inte anses tillämpbara för andra tunneltyper bör SKB ta fram ett underlag som visar att slopade krav inte leder till att den integrerade och konnekterade effektiva hydrauliska konduktiviteten för återfyllnaden i tunnlar, ramp och schakt överstiger 10^{-8} m/s.

SSM anser att den identifierade risken för kanalbildningserosion i återfyllnaden i deponeringstunnlarna även kan förekomma i återfyllnaden som används till förslutning av slutförvaret (avsnitt 4.8 i denna rapport). SKB behöver visa att utformning och kravspecifikation för återfyllda tunnlar inom förslutningsdelen inte leder till oacceptabel omfattning av kanalbildningserosion.

Betongen behöver behålla en viss styvhet en lång tid efter att återfyllnaden blivit fullständigt återmättad. För att upprätthålla densiteten i återfyllnaden krävs att pluggen behåller sin volym efter att dess mekaniska och hydrauliska funktioner inte längre behövs (SKB TR-10-17, tabell 2-3). SSM anser att SKB bör precisera hur lång tid som betongpluggarna behöver behålla sin ursprungliga volym eftersom detta inte framgår av SKB:s nuvarande underlag.

SSM bedömer att det saknas en konstruktionsförutsättning som specificerar nödvändiga egenskaper hos leran för högkompakterade lerpluggar i perforerade kopparrör för försegling av borrhål som når ett djup större än 200 m. Materialkrav så som att leran behöver ha en viss kemisk sammansättning (Na/Ca-kvot) för att kunna utveckla det önskade svälltrycket samt uppnå tillräckligt låg hydraulisk konduktivitet bör framgå av SKB:s underlag.

SKB:s fortsatta arbete behöver syfta till att optimera metoder, material och utformning av den slutliga förslutningen av slutförvaret. SKB bör undersöka möjligheten till platsanpassning av förslutningen genom användning av information som samlas in under en eventuell konstruktions- och driftsfas. Dessa ytterligare insatser bör ge SKB goda förutsättningar för att uppnå erforderliga funktionskrav när förslutningen kommer att behöva genomföras. Nya eller uppdaterade konstruktionsförutsättningar behöver då finnas tillgängliga.

3.6.2 Genomförande och initialtillstånd

3.6.2.1 Underlag från SKB

SKB specificerar nuvarande referensutförning för de komponenter som ingår i förslutningen av slutförvaret. Följande materialval görs av SKB:

- Återfyllnad av tunnlar, ramp och schakt under toppförslutningen: kompakterade block och pellets av bentonit av samma typ som för återfyllanden av deponeringstunnlarna (SKB TR-10-16, kapitel 4; se även avsnitt 3.5 i denna rapport).
- Återfyllnad av centralområdet: kompakterad bergkross (SKB TR-10-16, avsnitt 3.2). Funktionen för denna återfyllnad är att behålla stabiliteten i centralområdets bergutrymmen genom att motverka och begränsa sättningar, deformationer, konvergens samt bergutfall efter förslutning av slutförvaret.
- Pluggar i tunnlar, ramp och schakt: betongplugg konstruerad av låg-pH-cement med filter av sand resp. bentonit (SKB TR-10-16, avsnitt 7.1; se även avsnitt 3.5 i denna rapport).
- Toppförslutning av ramp och schakt (SKB TR-10-17, avsnitt 3.4): i) murverk i stenblock samt gjutning med cement för skiktet mellan markytan och ett djup på mindre än 50 m; ii) stora bergblock under murverket ner till ett djup av 50 m; iii) kompakterad bergkross för skiktet mellan 50 m och 200 m.
- Förslutning av borrhål som når ett djup större än 200 m (SKB TR-10-17, avsnitt 3.5, figur 3-5): högkompakterade lerpluggar i perforerade kopparrör som hissas ned i förstörade borrhål med vissa standardmått (typiskt 80 mm diameter).
- Förslutning av borrhål i vattenförande områden samt krossade bergpartier; hållfasta men vattengenomsläppliga betongpluggar (SKB TR-10-17, figur 3-6).
- Toppförslutning för borrhål som når ett djup större än 200 m (SKB TR-10-17, figur 3-5): de översta ca 100 m återfylls från ytan med: i) bergblock med fin geometrisk passning mot borrhålsväggen, ii) betongplugg förankrad i en slits i borrhålsväggen, iii) kompakterad finkornig sand.

SKB beskriver även översiktligt hur varje komponent i förslutningen installeras under avvecklingen av slutförvarsanläggningen. Referensutförningen och dess installation kommer att utvecklas av SKB under tiden fram till att avvecklingen ska påbörjas under förutsättning att en säkerhetsanalys demonstrerar dess lämplighet.

Redovisning av installation samt initialtillstånd för återfyllnad samt pluggar finns i SKB TR-10-12, SKB TR-10-16 och SKB TR-10-47.

3.6.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att förslutningen av slutförvaret som den presenteras i SKB:s ansökan har förutsättningar att kunna genomföras så att de erforderliga funktionskraven kan uppfyllas. Ytterligare insatser behövs för att demonstrera genomförbarhet för enskilda arbetsmoment samt deras samverkan. Den önskade tillförlitligheten kan enligt SSM:s bedömning endast uppnås genom utveckling av referensutförning, metod- och materialoptimering samt tillgodoräknande av praktiska erfarenheter innan förslutningen ska installeras. Utvecklingen förväntas bidra till förbättrade konstruktionsförutsättningar och ett system för kvalitetskontroll av de installerade förslutningskomponenterna så att det önskade initialtillståndet kan uppnås.

Installation av återfyllnaden förutsätter ett begränsat vatteninläckage i tunnarna. SKB föreslår ett krav på maximalt 10 liter per minut och per 100 meter tunnel för att möjliggöra installationen av återfyllning (SKB TR-10-17, avsnitt 2.4). SSM anser att detta krav bör



underbyggas bättre inför kommande provningssteg. SSM anser att kravet på begränsning av vatteninläckage i tunnarna är otillräckligt för att skapa gynnsamma förhållanden vid installation av återfyllnadsmaterialet. Ett system för läns hållning vid schaktningsarbeten behöver projekteras så att vattenläckage från andra delar av slutförvarsanläggningen inte kan störa installation av återfyllnad i ramp, schakt och tunnlar.

SSM rekommenderar att SKB undersöker kostnader för användning av murverk med stenblock för skydd mot oavsiktliga mänskliga intrång i slutförvaret samt utvärderar genomförbarhet för denna åtgärd.

SSM anser att SKB bör redovisa metoder för att säkerställa att deponeringshålen eller deponeringstunnlarna inte anläggs nära undersökningsborrhålen. SKB bör visa att projekteringen säkerställer erforderliga toleranser, så att ett minimiavstånd etableras mellan undersökningsborrhålen och deponeringshålen eller deponeringstunnlarna.

4. Slutförvarets skyddsförmåga upp till 1 000 år

SSM redovisar i detta kapitel granskningen av SKB:s redovisning angående slutförvarets utveckling under de första 1000 åren. SSM har i första hand utgått från beskrivningen av den så kallade referensutvecklingen i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB TR-11-01, kapitel 10). I viss utsträckning beaktas också SKB:s val av scenarier (SKB TR-11-01, kapitel 11-12) men endast ett fåtal av dessa så som skjuvlastfallet har en reell betydelse för slutförvarets naturliga utveckling under de första 1000 åren. De första 1000 åren utgör en del av den tidsperiod som SKB definierar som den initiala perioden av tempererade förhållanden efter förslutning av förvaret (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3). Av stor betydelse för SSM:s granskning av detta område är den detaljerade informationen kring specifika processer, egenskaper och händelser (FEP:s ”Features Events Processes”) som förväntas ha stor betydelse för förvarets initiala utveckling. SKB har redovisat dessa dels i FEP-databasen (SKB TR-10-45), dels i högre detaljeringsgrad i de så kallade processrapporterna för använt bränsle och kapsel (SKB TR-10-46), bufferten och återfyllnaden (SKB TR-10-47) samt för berget (SKB TR-10-48).

SSM har som en del av granskningsprocessen begärt in kompletterande information om olika aspekter av slutförvarets gradvisa utveckling efter förslutning. Dessa kompletteringar finns listade och kommenteras av SSM i de olika sakområdesgranskningarna inom detta kapitel. SSM har också anlitat externa oberoende experter för detaljerade sakgranskningar inom områden med anknytning till slutförvarets långsiktiga utveckling. Dessa granskningsresultat utgör till viss del en utgångspunkt för SSM:s bedömningar i detta kapitel, men för mera ingående redogörelser av de externa experternas bedömningar hänvisas till SSM:s ”Technical Note”-serie.

SKB redovisar att den primära säkerhetsfunktionen för KBS-3-konceptet är att helt innesluta det använda kärnbränslet i täta kopparkapslar under säkerhetsanalysens tidsperiod. För det fall då det primära inneslutningskravet inte längre kan upprätthållas definieras barriärernas effektivitet av deras förmåga att bidra med retardation eller fördröjning av utsläpp, vilken utgör den sekundära säkerhetsfunktionen för KBS-3-konceptet (SKB TR-11-01, figur 8-3). Samtliga tre huvudsakliga barriärer i slutförvarssystemet (kapsel, buffert och berg) bidrar på olika sätt till de båda säkerhetsfunktionerna inneslutning och fördröjning. För säkerhetsfunktionen fördröjning tillkommer själva bränslet i sig som en viktig komponent. För de första 1000 åren utgör säkerhetsfunktionen inneslutning det helt dominerande bidraget till slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. SSM:s granskning i detta kapitel har därför till största delen fokuserat på slutförvarets förmåga att helt isolera det använda kärnbränslet och att undvika utsläpp av radioaktiva ämnen. Ett fåtal begränsade frågeställningar med koppling till



säkerhetsfunktionen fördröjning kommenteras dock i detta kapitel så som kriticitetssäkerhet om en kapsel skulle vattenfyllas och initial bränsleupplösning vid kapselbrott. Huvuddelen av granskningsfrågor med koppling till säkerhetsfunktionen fördröjning redovisas i kapitel 7 i denna granskningsrapport om SKB:s konsekvensanalys. Frågor kring biosfärens utveckling har sin relevans i perspektivet av att utsläpp av radioaktiva ämnen från slutförvaret har kommit till stånd. Dessa frågor redovisas därför också i kapitel 7.

Den detaljerade specifikationen av funktionskrav för de mest betydelsefulla komponenterna i slutförvarssystemet utgör en grund för de bedömningar som SSM redovisar i detta kapitel. För att uppfylla inneslutningskravet har SKB definierat tre säkerhetsfunktioner för kapseln; (i) att vara en korrosionsbarriär, (ii) att motstå isostatisk last och (iii) att motstå skjuvlast (SKB TR-11-01, figur 1). Bufferten som omger kapslarna ska uppfylla ett antal säkerhetsfunktioner för att i största möjliga utsträckning skydda kapseln genom att minska/eliminera inverkan av skadliga effekter. SKB har redovisat att buffertens detaljerade säkerhetsfunktion är; (i) att begränsa advektiv transport, (ii) att reducera mikrobiell aktivitet, (iii) att dämpa inverkan av skjuvrörelser i berget, (iv) att motstå omvandlingar, (v) att förhindra att kapseln sjunker, samt (vi) att utöva ett begränsat tryck mot kapsel och berg. Kravet på återfyllnaden är, i sammanhanget av den primära säkerhetsfunktionen inneslutning, att förhindra att bufferten expanderar in i återfyllnaden i ogynnsam omfattning. Berget skall också i största möjliga omfattning skydda kapseln och bufferten genom att uppfylla följande säkerhetsfunktioner; (i) att upprätthålla gynnsamma kemiska betingelser, (ii) att upprätthålla gynnsamma hydrologiska transportförhållanden, (iii) att upprätthålla stabila mekaniska förhållanden samt (iv) att upprätthålla gynnsamma termiska förhållanden. Dessa säkerhetsfunktioner är i sin tur ytterligare specificerade genom att etablera gynnsamma intervall för de viktigaste parametrarna. SKB har definierat ett antal fasta numeriska kriterier som anger optimala förhållanden för säkerhetsfunktionen. För vissa säkerhetsfunktioner och parametrar finns dock bara generella trender specificerade.

För de första 1000 åren domineras slutförvarets utveckling av inre processer snarare än extern påverkan. En viktig sådan fråga är förbrukningen av kvarvarande syre som kommit ner på förvarsdjup till en följd av att transporttunnlar och deponeringstunnlar har hållits öppna under förvarets driftfas. De kemiska betingelserna i slutförvaret, som påverkar både de tekniska barriärernas utveckling samt de kemiska egenskaperna för eventuellt läckande radioaktiva ämnen, övergår gradvis från att vara oxiderande till kemiskt reducerande. En annan betydelsefull inre utveckling är återmättnad av lermaterial i buffert och återfyllnad som resulterar i uppbyggnad av ett svälltryck och att den gasfas som initialt finns kvar i förslutna tunnlar gradvis försvinner. Det använda bränslets egen påverkan på systemet har också sin allra största betydelse under denna tidsperiod. Denna påverkan medför förekomst av ett betydande gammastrålfält invid kapselytan under ungefär 300 års tid samt avsevärt förhöjda temperaturer på grund av bränslets resteffekt under de första 1000 åren. Däremot har frågorna kring extern påverkan på betingelserna i slutförvarsmiljön, så som påverkan från förändrad grundvattenkemi, höga grundvattenflöden samt höga hydrostatiska tryck, mindre betydelse för de första 1 000 åren i jämförelse med de efterföljande 100 000 åren. Detta beror på den större externa belastningen på slutförvarets integritet under inverkan av kommande glaciationscykler under den längre tidsskalan. Frågor kring extern påverkan redovisas därför i huvudsak i kapitel 5 om tiden mellan 1000 år och 100 000 år. Frågor som avser irreversibla effekter på tekniska barriärer eller berg under inverkan av mer än en glaciationscykel redovisas i kapitel 6 om tiden mellan 100 000 år och 1000 000 år.

Även om vissa typer av processer som kan påverka slutförvarets långsiktiga funktion har sin huvudsakliga betydelse endast i en viss tidsskala, så finns det för flertalet processer

ingen skarp gräns mellan olika tidsperioder. De är mer eller mindre aktiva under hela slutförvarets långsiktiga utveckling. SSM kommenterar därför i detta kapitel inte bara risken för att en säkerhetsfunktion eller för att en barriär fallerar under de första 1000 åren, utan även det bidrag till en långsiktig degradering som orsakas av slutförvarets utveckling under de första 1000 åren. SSM beskriver och kommenterar här de individuella processer som bedöms ha en väsentlig betydelse under de första 1000 åren. Om det är frågan om processer som redan förekommit under de första 1000 åren så upprepas inte dessa beskrivningar i kapitel 5 och 6 om efterföljande tidsperioder, utan där kommenteras enbart den ytterligare betydelse dessa processer kan ha med beaktande av de längre tidsskalorna.

SSM:s specifika föreskriftskrav som kopplar till slutförvarets utveckling under de första 1000 åren är kravet på att bedömning av slutförvarets skyddsförmåga skall baseras på kvantitativa analyser av effekterna på människors hälsa och miljön (§11 SSMFS 2008:37). I de tillhörande allmänna råden framgår att det inte enbart är processer, händelser och egenskaper som direkt kan leda till utsläpp av radioaktiva ämnen som avses utan att en utförlig redovisning även avser en sådan utveckling som indirekt påverkar slutförvarets långsiktiga skyddsförmåga så som transienta förhållanden, återmättnad och stabilisering av hydrogeologiska och geokemiska förhållanden. Föreskriftskrav som är relevanta men inte specifika för tidsperioden är t.ex. kravet på barriärsystemets tålighet (§5 SSMFS 2008:21) och kravet på att nödvändig säkerhet ska upprätthållas trots enstaka brist i en barriär (§7 SSMFS 2008:21). SSM:s granskning som redovisas i detta kapitel har betydelse för bedömningen av om det finns förutsättningar för SKB att uppfylla kravet på skydd av människors hälsa och den maximala årliga risken för en representativ individ i den kritiska gruppen (§5 SSMFS 2008:37). Eftersom en bedömning även behöver innefatta resultat från granskning av initialtillståndet, tidsperioden mellan 1000 år och 100 000 år samt granskning av SKB:s konsekvensanalys kommenteras inte förutsättningarna för att kunna uppfylla detta krav i detta kapitel.

SSM kommenterar ändamålsenligheten av SKB:s redovisning kring referensutveckling, huvudscenario, mindre sannolika scenarier samt utvalda beräkningsfall i kapitel 9. SSM kommenterar förutsättningarna för SKB att kunna demonstrera kravuppfyllelse i del 1 av denna granskningsrapport. De ämnesområdesvisa bedömningar som redovisas i detta kapitel ger underlag för bedömning av säkerhetsanalysens fullständighet samt förutsättningar att uppfylla föreskriftskraven. I det fall SSM bedömer att det finns svagheter i SKB:s redovisning som kan åtgärdas med rimliga insatser så behöver SKB redovisa ytterligare underlag inför kommande steg i sitt program. Resultat från ytterligare underlag som tas fram behöver omhändertas i kommande säkerhetsanalyser. Enligt SSM:s föreskriftskrav skall förnyade säkerhetsanalyser redovisas i samband med uppförande, provdrift, rutinmässig drift samt förslutning. Dessutom finns krav på redovisning av återkommande helhetsbedömningar av säkerheten under hela anläggningens driftperiod (SSMFS 2008:1, kapitel 4).

4.1 Utveckling av temperatur och strålfält i förvarets närhet

Använt kärnbränsle som har inkapslats och blivit inplacerat i slutförvaret innehåller stora mängder radioaktiva ämnen. Dessa ämnen avger olika typer av strålning som ett resultat av radioaktivt sönderfall. Strålningen bromsas upp i omkringliggande material vilket genererar värme vilket ger upphov till bränslets resteffekt. Temperaturen i omgivningen kommer under cirka tusen år vara förhöjd till följd av denna värmeutveckling.

Den största delen av strålningsenergin absorberas inom kapseln genom växelverkan med materialen och genererar värme, så som beskrivs ovan. En liten del, mindre än en procent (Jonsson, 2012), kan penetrera genom kapseln och avges som gamma- och neutronstrålning vid kapselns ytteryta. SKB ställer krav på att kapselns ytdosrat skall vara

mindre än 1 Gy/h (avsnitt 3.3.1 i denna granskningsrapport). Strålningen som penetrerat genom kapseln kan möjligen påverka de kemiska och mekaniska egenskaperna hos främst bufferten. I detta avsnitt granskas och bedöms SKB:s redovisning kring strålfältet i förvarets tekniska barriärer och dess inverkan på buffertens egenskaper.

Resteffekten i bränslet leder till ökad temperatur i kapseln och bufferten och värmen transporteras ut till det omgivande berget som ett resultat av temperaturgradienten. För att buffertens egenskaper och långsiktiga säkerhet inte ska bli negativt påverkade har SKB definierat kravet att temperaturen i bufferten ska vara lägre än 100° C (SKB TR-10-47, tabell 2-3). Den rådande medeltemperaturen i berget på slutförvarets plats i Forsmark på ett djup av cirka 500 m uppskattas till cirka 12° C (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 4.3.3). Begränsning av den högsta temperaturen i bufferten under förloppet av den termiska utvecklingen kommer att avgöra hur slutförvarsanläggningen dimensioneras. En termisk dimensionering har tagits fram av SKB med stöd av analysen av temperaturutvecklingen. SKB anser att avstånd mellan deponeringshål behöver vara större än 6 m och att avstånd mellan deponeringstunnlar behöver vara större än 40 m (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 5.2.2).

En av säkerhetsfunktionsindikatorerna för bufferten är att geometrin och vattenhalten i bufferten inte ska resultera i bufferttemperaturer som överstiger 100° C. För hög temperatur kan ge en negativ påverkan på buffertens säkerhetsfunktioner och skyddsförmåga. Detta redovisas i avsnitt 4.7 och 4.8 i denna granskningsrapport. Granskning och bedömning av SKB:s redovisning om termiska egenskaper hos berg samt termisk dimensionering av slutförvaret återfinns i avsnitt 3.2.3 och 4.4.1 i denna granskningsrapport. I föreliggande avsnitt fokuseras granskningen och bedömningen främst på bl.a. de termiska egenskaperna hos bufferten och återfyllnaden, termisk utveckling i kapseln, i bufferten och i återfyllnaden, samt osäkerheter av de bestämda högsta temperaturerna i bufferten vid olika beräkningsfall.

4.1.1 Strålfältet i slutförvarets närhet och dess påverkan på de tekniska barriärerna

4.1.1.1 Underlag från SKB

SKB redogör att den största mängden av strålningsenergi från det använda kärnbränslet i kapseln absorberas i segjärnsinsatsen och kapselhöljet. Den högsta dosraten av strålning på kapselns yttre yta vid deponering blir mindre än 500 mGy/h. SKB:s tekniska krav på bränsle i en kapsel är dock att ytdosraten ska vara lägre än 1Gy/h (SKB TR-10-13, avsnitt 3.1). Den nuklid som ger det dominerande bidraget till dosraten är Cs-137 som har en halveringstid på cirka 30 år (SKB TR-10-47, avsnitt 3.1.1). Av detta skäl avtar dosraten på kapselns ytteryta relativt snabbt under loppet av ett flertal århundraden.

SKB redovisar strålningsrelaterade processer i bufferten i SKB TR-10-47, avsnitt 3.1, 3.5.12 och 3.5.13. Beskrivning av SKB:s underlag kopplat till strålningsinverkan på segjärnsinsatsen och kopparhöljet för kapseln återfinns i avsnitt 4.12 i denna granskningsrapport.

SKB:s experimentella resultat har visat att smektitinnehållet i MX-80-bentonit förblir i stort sett opåverkat när det utsätts för en kombinerad effekt av värme med temperatur mellan 90 och 100° C och strålning med dosrat mellan 456 och 3972 Gy/h, vilket kan jämföras med den högsta tillåtna ytdosraten på kapselytan på 1Gy/h. Accessoriska mineraler, såsom kalcit, kvarts och fältspater, kan påverkas något av förhöjda temperaturer. SKB konstaterar vidare att den hydrauliska konduktiviteten inte ändras, men viss cementering av materialet ändå kan äga rum (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.12; SKB TR-93-03).

Om kapselns isolerande förmåga skulle brytas kan även alfa- och betastrålning påverka mineralstabiliteten av montmorillonit, vilket har visat sig bestå i en omvandling av den kristallina formen till en amorf form. SKB redovisar med stöd av experimentella resultat från Gu m.fl. (2001) att den totala ackumulerade dos som bufferten kan absorbera i slutförvarsmiljön ligger tre tiopotenser lägre än den lägsta dosen som kan leda till omvandling till den amorfa formen av montmorillonit (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.12). Vid beräkningen av kopparkorrosion orsakad av både luft- och vattenradiolys har dosraten som är lika med eller högre än 1 Gy/h använts (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.13; SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4). I beräkningen antas att luft- och vattenradiolys sker inom bufferten innan respektive efter att bufferten blir vattenmättad.

4.1.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning av strålfält i förvarets tekniska barriärer är ändamålsenlig och trovärdig. Bedömningen baseras på SSM:s granskning och bedömning som redovisas i avsnitt 3.3.5 ”Beräkning av aktivitetsinventarium” samt avsnitt 3.3.6 ”Beräkning av resteffekt” i denna granskningsrapport. SSM anser vidare att SKB:s bestämning av strålfältets skärmning och gradvisa utveckling baseras på väletablerade kunskaper och erfarenheter från drift av kärnkraftsreaktorerna. SSM anser dock att SKB i senare steg i sitt program behöver uppdatera och redovisa teoretisk förståelse av involverade processer, dvs. bestrålningseffekt på fasta faser i allmänhet och effekten på montmorillonit i synnerhet.

SSM bedömer att SKB:s resonemang att strålningen inte har en betydelsefull negativ påverkan på buffertens skyddsförmåga är vetenskapligt välgrundad. Bedömningen baseras på att SKB har redovisat tydliga experimentella resultat som visar att negativ påverkan fortfarande är mycket begränsad även när buffertprov utsätts för en betydligt högre ackumulerad dos än som förväntas i förvarets närhet (SKB TR-93-03). Samma slutsats har senare bekräftats av flera andra forskare (Gournis m.fl., 2000; Negron m. fl., 2002; Pushkareva m.fl., 2002; Plötze m.fl., 2002; Huang och Chen, 2004; Jonsson, 2012). SSM vill poängtera att flera forskare har visat att det strukturella järn som ersätter aluminium i oktaedersskiktet i montmorillonit kan reduceras från trevärt till tvåvärt när bentoniten är utsatt för gammabestrålning (Gournis m.fl., 2000; Plötze m.fl., 2003; Holmboe m.fl., 2012). Denna förändring kan ske vid en ackumulerad dos så låg som 1,62 kGy (Holmboe m.fl., 2012), vilket kan jämföras med den förväntade ackumulerade dosen i bentonit i ett slutförvar på mellan 40 till 200 kGy (Jonsson, 2012). En omfattande reduktion av trevärt järn kan leda till lägre flakladdning på montmorillonit men vilken betydelse detta har för egenskaperna hos montmorillonit har ännu inte tydligt belysts. SSM anser att SKB inför kommande steg i sitt program vidare behöver studera mekanismen och utreda hur stor omfattning reduktion av trevärt järn kan ha. Beträffande inverkan av gammalstrålning på bentonitens sorptionsförmåga och kolloidstabilitet är processerna komplexa och påverkan beror även på porvattnets kemiska sammansättning (Holmboe m.fl., 2009, 2011). SSM anser att SKB även behöver eftersträva en fördjupad kunskap kring detta. Det mest relevanta sammanhanget är bentonit utsatt för gammastrålning med en ackumulerad dos som motsvarar den i slutförvarsmiljön.

SSM vill påpeka att även när de detaljerade beräkningarna har visat att absorberad dos utanför kapseln alltid är lägre än 500 mGy/h (SKBdoc 1077122) så är kriteriet för högsta dosen ändå satt till 1 Gy/h (SKB TR-10-13, avsnitt 3.1.5). SKB bör undersöka om denna skillnad på en faktor 2 kan vara betydelsefull i något avseende inom säkerhetsanalysen.

4.1.2 Tekniska barriärernas utveckling under den termiska fasen

SKB redovisar beräkningen av resteffekt från använt kärnbränsle i SKB TR-10-13, avsnitt 4.4.1 samt i SKBdoc 1179234. SSM:s granskning och bedömning om detta återfinns i avsnitt 3.3.6 ”Beräkning av resteffekt” i denna rapport. SKB redovisar inverkan av temperatur på montmorillonits omvandling i SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.9. SSM:s granskning och bedömning av denna fråga återfinns i avsnitt 4.7 ”Kemisk och mekanisk utveckling för buffert och återfyllnad” i denna granskningsrapport. De termiska processerna i berget under de första tusen åren redovisas i SKB TR-10-48, avsnitt 2.1 och SSM:s granskning och bedömning av dessa processer återfinns i avsnitt 4.4.1 i föreliggande granskningsrapport. De termiska processerna i kapseln redovisas av SKB i SKB TR-10-46, avsnitt 3.2, i bufferten redovisas i SKB TR-10-47, avsnitt 3.2. Dessa redovisningar granskas och bedöms i detta avsnitt i föreliggande granskningsrapport.

4.1.2.1 Underlag från SKB

När använt kärnbränsle inkapslas och deponeras i ett slutförvar kommer det att långsiktigt avge värme till omgivningen på grund av den kvarvarande resteffekten (SKB TR-10-46, avsnitt 2.1.2). Resteffekten har sin mest betydelsefulla inverkan under de första 1 000 åren och efter flera 1 000-tals år är den termiska påverkan på omgivningen liten. För att buffertens egenskaper och deras inverkan på den långsiktiga säkerheten inte ska bli negativt påverkad av termiska processer på ett betydelsefullt sätt krävs att temperaturen i bufferten är lägre än 100° C (SKB TR-10-47, tabell 2-3). För kapseln finns vid temperaturer väsentligt över 100° C risk för vissa ogynnsamma korrosionsprocesser som termokemisk sulfatreduktion (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4), men i detta avseende finns stora säkerhetsmarginaler i förhållande till SKB:s temperaturkriterium.

SKB:s redovisning kring termisk utveckling kan huvudsakligen delas in i tre områden:

- termisk utveckling inom de tekniska barriärerna kapsel och buffert
- termisk utveckling i berggrunden
- strategi för termisk dimensionering av hela slutförvarsanläggningen.

SKB:s redovisning i SR-Site av den termiska utvecklingen i kapseln fokuserar på att bestämma temperaturen i segjärnsinsatsen, eftersom denna temperatur har betydelse för analysen av egenskaperna hos kapselmaterialet. I redovisningen försummas motståndet av värmeledning genom metalliskt material och endast motstånden av värmeledning och värmestrålning genom luftspalten mellan segjärnsinsatsen och kopparkapseln beaktas. Värmeöverföringen i kapseln antas vara i ett stationärt tillstånd och temperaturen på kopparkapseln antas vara känd. Segjärnsinsatsen kan utsättas för en maximal temperatur på 117° C om kopparhöljet har en temperatur på 102° C (SKB TR-10-46, avsnitt 3.2.1). SKB har redovisat bestämning av värmeledningsförmåga hos bentonitbaserade buffertmaterial (SKB TR-94-29). Värmeledningsförmågan hos MX-80-bentonit och IBECO Na-bentonit har uppmätts experimentellt med en sondmetod (probe method) (SKB TR-94-29, kapitel 3-6). Värmeledningsförmågan har även beräknats från experimentella data från fältskalan i Buffertmassaförsöket, i pilotförsök för sättning i Stripa, och i SKB/CEA:s test av en fransk lera vid Stripagruvan (SKB TR-94-29, kapitel 7). Uppmätning och beräkning har gjorts för bentonit med olika portal (”void ratio”) och återmåtningsgrader. De termiska egenskaperna av pellets bestämdes experimentellt för pellets tillverkad från den japanska Kunigel-bentoniten (Sugita m.fl., 2003). Vid experiment har pellets en typisk torrdensitet på 1 000 kg/m³, medan vattenkvoten i pellets varierar från närmare 0 till cirka 70 % (SKB R-09-04, figur 3-5).

SKB bestämmer den termiska utvecklingen i ett deponeringshål med seriellt kopplade värmeöverföringsprocesser som beaktar spalten mellan kapsel och buffertringar samt den pelletfyllda spalten mellan buffertblock/buffertringar och deponeringshålets vägg. Spalten mellan kapseln och buffertringarna är till en början fylld med luft. Värme transporteras i

spalten genom värmestrålning samt genom värmeledning i luften. Efter att spalten blivit fylld med material från svällande buffertringar, kan värmen även transporteras genom värmeledning i bentonitmaterial (SKB R-09-04, avsnitt 3.3.3). För referensutvecklingen försummar SKB konservativt den förväntade ökningen av värmeledningsförmåga hos bufferten när bufferten absorberar vatten. Värmeöverföring genom buffertblock, buffertringar samt genom bentonitpellets sker främst genom värmeledning. Värmeledningsförmågan varierar med avseende på olika återmåtnadsgrader av lermaterialet (SKB R-09-04, avsnitt 3.2.2).

Enligt SKB:s bedömning får kapslar och bufferten som deponeras i torra deponeringshål i lågkonduktivt berg i de centrala delarna av ett deponeringsområde de högsta maximala temperaturerna. Den dimensionerande parametern är därför buffertens maximala temperaturer i sådana deponeringshål. Beräkning av den maximala bufferttemperaturen i ett visst deponeringshål kan delas upp i två steg, (i) att beräkna bergväggtemperaturen med storskalig modellering, samt (ii) att beräkna temperaturskillnaden mellan bergvägg och den varmaste punkten i bufferten med hänsyn till de ovan angivna termiska processerna i ett deponeringshål (SKB R-09-04). Resultaten visar att i genomsnitt kommer mindre än 1 kapsel av 6 000 att få en maximal bufferttemperatur som överstiger 95° C, och 2 % av kapslarna kommer att ha en maximal bufferttemperatur som överstiger 90° C (se även avsnitt 3.4.4 i föreliggande granskningsrapport). SKB:s redovisning av beräkningen av bergväggtemperaturen granskas och bedöms även i avsnitt 4.4.1 i denna granskningsrapport.

SKB:s samtliga studier visar konsekvent att temperaturen vid randen mellan buffert och kapsel uppnår det högsta värdet efter cirka 5 – 15 år efter deponering. Till viss del beror dessa resultat dock på förvarets layout och variationer i bergets termiska egenskaper. Den högsta temperaturen i bergväggen uppnås efter 30 -50 år efter deponering (SKB TR-10-47, avsnitt 3.2.1). Med SKB:s nuvarande layout för slutförvarsanläggningen är högsta temperaturen i bufferten alltid lägre än 100° C och oftast ligger den mellan 90 och 92° C (SKB R-09-04, figur 1-2 och 5.14). Dessa resultat har beräknats med center till center (c-c) avstånd på 6 m mellan kapslarna och på 40 m mellan deponeringstunnlarna samt med representativa värdena för värmeledningsförmåga och värmekapacitet för buffert och berg.

Faktorer som kan påverka den termiska utvecklingen och som är förknippade med osäkerheter i modelleringsresultaten är (SKB R-09-04, avsnitt 3.4.3):

- termiskt inducerad fuktomfördelning, som kan ge en osäkerhet på mellan 0,1 till 0,2° C
- fördelning av värmealtrandet längs en kapsel ger en osäkerhet på 0,1 – 0,2° C
- berget med låg värmeledningsförmåga som systematiskt omger deponeringshålet från toppen till botten av hålet ger i extrema fall en osäkerhet på 0,5° C
- eventuell termisk inducerad spjälkning av deponeringshållsväggen medför en osäkerhet på 0,1° C.

4.1.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning av termisk utveckling i kapseln och bufferten är vetenskapligt välgrundad och att slutsatserna är trovärdiga. SSM bedömer dessutom att SKB:s strategi för termisk dimensionering av slutförvarsanläggningen är ändamålsenlig och målet med att begränsa buffertens temperatur under 100° C kan uppnås med den föreslagna layouten av anläggningen.

SSM:s bedömningar bygger på att SKB:s prediktion av värmeöverföring generellt sett är väletablerad eftersom noggranna och väl utvecklade mätmetoder kan utnyttjas samt att

den teoretiska förståelsen är mycket god. Experimentella metoder för att bestämma termiska egenskaper hos material som metaller, lera och berg är välutvecklade och används rutinmässigt inom olika likartade tillämpningar. Det framgår av SKB:s redovisning att den uppskattade högsta temperaturen i bufferten är konsekvent när olika metoder används för beräkningarna, såsom analytiska och numeriska metoder baserade på både den finita differensmetoden och med den finita elementmetoden (SKB R-09-04). Det har även visats att skillnaden mellan de teoretiska beräkningsresultaten för bergtemperaturer och de uppmätta temperaturerna i berget alltid faller inom ett intervall på 5 % (SKB IPR-07-01, avsnitt 4.4). SSM konstaterar att SKB:s analyser inkluderar flera konservativa antaganden för bestämning av den högsta temperaturen, t.ex. att bufferten antas innehålla endast den initiala vattenmängden innan återmätning med omgivande grundvatten och porvatten i berget.

I bestämning av temperaturen hos segjärnsinsatsen har förhållandet stationärt tillstånd använts. SSM noterar att under transientperioden innan ett stationärt tillstånd har uppnåtts går det inte att utesluta att segjärnsinsatsens temperatur kan ha underskattats, särskilt när bränslets initiala temperatur är mycket hög. SKB behöver i mer detalj analysera denna begränsning i sin beräkningsmetodik. Detta arbete kan dock göras i kommande steg av SKB:s program med syftet att undersöka om det föreligger eventuella begränsningar kopplade till hantering och transport av bränslet i torrt tillstånd. SSM bedömer däremot att temperaturutvecklingen under transientperioden inte kan ha stor betydelse för långsiktig säkerhet eftersom perioden uppskattas vara relativt kort med beaktande av mängden inkapslingsmaterial, värmekapacitet för metallerna järn och koppar, samt resteffekten från bränslet.

SSM ser positivt på att SKB har använt ett lägre värde för koppars emmisivitet för beräkning av värmestrålningen genom den 10 mm tjocka luftspalten mellan mittpunkten av kapseln och bufferten (SKB R-09-04, avsnitt 3.3.3). Det nuvarande värdet på 0,1 kan jämföras med de värden som SKB har använt i tidigare säkerhetsanalyser på 0,30 respektive 0,63 (TR-03-09, tabell 4-1). Temperaturskillnaden över luftspalten utgör en stor del av temperaturökningen från väggen av deponeringshål till bufferten (SKB R-09-04, figur 3-13) och detta bör därför innebära att resultaten från den uppdaterade beräkningen är konservativa.

SSM anser att SKB inför kommande steg i sitt program bör studera inverkan av torkning av den inre delen av bufferten med avseende på bestämning av den högsta temperaturen i bufferten. Den torkade delen kan ha en lägre värmeledningsförmåga än vad som förutsätts i referensfallet. SSM bedömer dock att inverkan bör vara begränsad, med beaktande av resultat från SKB:s fältförsök, exempelvis Temperature Buffer Test (TBT) (SKB TR-12-04, kap. 5).

Källan till den termiska utvecklingen är resteffekten från använt kärnbränsle i kapseln. Resteffekten i en enskild kapsel används som en kontrollparameter vid inkapsling av använt kärnbränsle. Som framgår av avsnitt 3.3.6 i denna rapport anser SSM att kvarstående osäkerheter i beräkning av resteffekt är acceptabla för det innevarande steget i SKB:s program. SSM noterar att resteffekten i en kapsel relativt enkelt kan verifieras genom mätning av gammastrålning från Cs-137. När resteffekten i en viss kapsel är väl bestämd under inkapslingsprocessen behöver endast en mycket liten osäkerhet propageras från källtermen till beskrivningen av den termiska utvecklingen i förvarsområdet. Den termiska utvecklingen i förvarsområdet i allmänhet, och den högsta temperaturen i bufferten i synnerhet, har betydelse för buffertens mineralogiska omvandling som i sin tur påverkar buffertens kemiska och mekaniska utveckling (se avsnitt 4.7 i denna rapport). SSM:s bedömning i detta avsnitt att osäkerheten vid bestämning av den högsta

temperaturen i bufferten är relativt liten, vilket utgör en utgångspunkt för bedömningen av buffertens kemiska och mekaniska utveckling.

4.2 Utveckling av bränsle och kapselns hålrum

Efter användning i en kärnkraftsreaktor innehåller använt kärnbränsle cirka 2-6% fissionsprodukter och 1% tunga aktinider (SKB TR-10-46, avsnitt 1.4.4). Detta initiala inventarium av radionuklider förändras med tiden genom sönderfalls- och disintegrationsreaktioner. Processerna i bränslet är direkt kopplade till de sönderfalls- eller disintegrationsreaktioner som fortgår i bränslet med tiden. SSM granskar här SKB:s redovisning av processer kopplade till bränslet och kapselhållrummets utveckling under de första tusen åren. Processerna är bildning av pulsutsläppsandelen i bränslet, radiolys av kvarvarande gas och vatten i kapselns hålrum, samt upplösning av bränslematrisen i grundvatten när bränslet är utsatt för gammastrålning. Bränslets utveckling under tiden från 1000 till 100 000 år efter slutförvarets förslutning redovisas i avsnitt 5.1 i denna granskningsrapport.

Växelverkan mellan strålningen från sönderfalls- och disintegrationsreaktionerna ger upphov till bränslets resteffekt som främst är mest betydelsefull under de första tusen åren. Resteffekten samt den termiska utvecklingen kommenteras i avsnitt 4.1 i denna granskningsrapport.

4.2.1 Pulsutsläppsandelen

4.2.1.1 Underlag från SKB

Efter ett eventuellt kapselbrott kan grundvatten komma i kontakt med bränslet. För några av de radioaktiva ämnena i bränslet förväntas en mycket snabb upplösning som följs av ett snabbt utsläpp av radionuklider som hamnat i spalten mellan bränslekutsarna och bränslestavröret, i porer eller vid korngränser i bränslematrisen. Detta utsläpp benämns vanligen pulsutsläppsandelen eller den omedelbart frigjorda fraktionen IRF ("Instant Release Fraction").

SKB redogör för bildning av pulsutsläppsandelen IRF under bränslets bestrålning i reaktorn. En fraktion av inventariet bestående av lättflyktiga grundämnen inklusive fissionsgaser, och vissa 4d-grundämnen som inte är kompatibla med bränslematrisens kristallografiska struktur och kemiska betingelser, segregerar antingen till gapet mellan bränslekutsarna och bränslestavkapslingen eller till de större korngränserna av partiklarna i bränslekutsarna. 4d-grundämnena diskuteras även i avsnitt 5.1 i denna granskningsrapport.

SKB uppskattar pulsutsläppsandelen för relevanta radionuklider, såsom I-129 och Se-79, med antagandet att utsläpp av dessa är korrelerade med utsläpp av fissionsgaser. Detta antagande baseras på att det experimentellt har visats att utsläpp av radionuklider av lättflyktiga grundämnen är starkt korrelerade med utsläpp av fissionsgaser (SKB TR-10-46, avsnitt 1.4.4). Utsläpp av fissionsgaser har ingen strålsäkerhetsbetydelse eftersom fissionsgaserna utgörs av stabila isotoper. SKB har tagit fram data för utsläpp av fissionsgaser från bränsle av lättvattensreaktorer (LWR) i litteraturen (SKB TR-97-18; SKB TR-04-19). SKB:s data har baserats på litteraturreferenser som Johnson och McGinnes (2002) och Johnson m.fl. (2004). I SR-Site har data för utsläpp av fissionsgaser uppdaterats för att kunna täcka hela spännvidden av variationer i utbränningsgrad och linjär effekttäthet (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.6; SKB TR-10-52, avsnitt 3.2.7) såväl för BWR-bränslet (SKB TR-09-25) som för PWR-bränslet (SKB TR-09-26). Uppdateringen

har baserats på numeriska beräkningar för modellering av bränslets utveckling under reaktordriften.

Förutom gap- och korngränsinventariet ingår även ett aktivitetsinventarium för aktiverade korrosionsprodukter kallad CRUD ("Chalk River Unidentified Deposit"). SKB antar att radionukliderna Ag-108m och Cd-113m i Ag-In-Cd-legeringen i styrostavarna släpps ut momentant vid kontakt av vatten på samma sätt som för radionukliderna i pulsutsläppsandelen (SKB TR-10-52). De radionuklider som härrör från bränslets konstruktionsmaterial såsom stålkapsling av styrostavar (exklusive Ag-In-Cd-legeringen), zirkaloy-inkapsling av bränslestavar samt andra metalliska material i bränsleelementen klassificeras däremot som korrosionsutsläppsandel CRF ("Corrosion Release Fraction"). I IRF ingår endast de radionuklider i CRUD som har ett inventarium som överstiger det från bränslematrisupplösningen över 10 år. På ett liknande sätt inkluderas radionukliderna i konstruktionsmaterial i CRF, fast det antas att konstruktionsmaterialet korroderar inom 100 år (SKB TR-10-52, avsnitt 3.2.3).

4.2.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s redovisning av mekanismer för bildning av radionuklider i pulsutsläppsandelen IRF är tydlig och teoretiskt välgrundad. SSM:s slutsats grundar sig på att angreppssättet för uppskattning av pulsutsläppsandelen i bränslet bedöms vara ändamålsenligt. SKB har visat genom eget arbete eller genom att ta hänsyn till den internationella forskningen inom området att det finns en relation mellan utsläpp av fissionsgaser och utsläpp av andra lättflyktiga radionuklider från bränslet. Det har i andra sammanhang framkommit att det är samma mekanism som ligger bakom segregering av fissionsgaser och segregering av vissa radionuklider inom IRF, nämligen diffusion i fastfasen av bränslepartiklar under högtemperaturförhållanden under reaktordriften (Johnson och Shoesmith, 1988, avsnitt 4.2). SSM anser att förtroendet för SKB:s redovisning har ökat i och med att SKB även har redovisat med mer omfattande resultat i ansökan som bättre täcker spännvidden av bränslets driftparametrar (SKB TR-09-25; SKB TR-09-26).

SSM anser att det finns få tillgängliga mätdata av radionuklider som ingår i pulsutsläppsandelen trots den goda kännedomen om korrelationen mellan utsläpp av fissionsgaser och andra lättflyktiga radionuklider från bränslet. SKB gör samma bedömning (SKB TR-04-19, avsnitt 2.1 och 2.3). Detta har hittills omöjliggjort en fullständig verifiering av relationerna mellan pulsutsläpp av gap- och korngränsinventariet och utsläpp av fissionsgaser men de förslagna värdena är godtagbara eftersom osäkerheter i värdena bedöms vara begränsade.

SSM ser positivt på att SKB även har inkluderat CRUD-inventariet i pulsutsläppsandelen (SKB TR-10-52, avsnitt 3.2). Detta anses vara konservativt eftersom att CRUD antas ha ett snabbare utsläppsförlopp.

SSM har noterat att det pågår forskning om pulsutsläpp särskilt inom EU-forskningsprojektet FIRST-Nuclides (Kienzler m.fl., 2014). SSM ser positivt på denna typ av internationella samarbeten och SKB behöver vid behov uppdatera sin redovisning med hänsyn till utfallet från detta projekt.

Betydelsen av pulsutsläpp och hur risken fördelas mellan framtida generationer bedöms i kapitel 7.4.6 i denna rapport.

SSM anser att SKB behöver sträva efter en förbättrad uppskattning av pulsutsläppsandelen av de mest betydelsefulla radionukliderna i gap- och korngränsinventariet, såsom I-129 och Se-79, och i "crud"-inventariet, såsom Nb-94, vilket visas av att de ingår bland de

radionuklider som är betydelsefulla i dosberäkningar (SKB TR-10-52, avsnitt 3.2.2). Mätningar kopplade till dessa nuklider behöver genomföras för såväl BWR- som PWR-bränsle med hög utbränning och hög linjär effekttäthet.

4.2.2 Radiolys av kvarvarande gas och vatten i kapselns hålrum

4.2.2.1 Underlag från SKB

I de tekniska krav som SKB ställer på det initiala tillståndet för kapseln ingår att hålrummet i en kapsel som mest ska innehålla 600 g vatten och gasen i hålrummet ska innehålla minst 90% argon (SKB TR-10-13, avsnitt 3.1.4). Kraven ställs pga. att salpetersyra och andra produkter från radiolys kan bildas efter att det kvarvarande vattnet och kvävet i luften har utsatts för strålning.

SKB har genomfört en modellering av radiolys av den fuktiga luften inuti kapseln inkluderande över 200 strålningskemiska reaktioner som antas vara involverade i processen. Reaktionerna initieras med joniseringen av kvävemolekyler följt av jon-jon- och jon-molekylreaktioner, och slutligen med reaktioner med fria radikaler som producerar salpetersyra (SKB TR-94-15, kapitel 2). Varje reaktion beskrivs med ett kinetiskt uttryck. För reaktioner med fria radikaler beror reaktionshastigheter på temperatur och tryck (SKB TR-94-15, kapitel 3). I denna rapport diskuteras även inverkan av inertgaser såsom argon och helium på salpetersyras produktion (SKB TR-94-15, kapitel 4 och 5), vilket beror på att 90 % av luften i hålrummet inuti kapseln kommer att ersättas av argon (SKB TR-10-13, avsnitt 3.1.4). Några illustrativa fall i modelleringsberäkningarna visar att mängden av salpetersyra som kan produceras är försumbar (SKB TR-94-15, kapitel 6).

SKB citerar Jones (1959) studier om reaktionerna i det homogena systemet av kväve/syre/vatten initierade av strålning och har kommit till slutsatsen att produktionen av salpetersyra är proportionell mot den absorberade dosen i systemet. SSM:s externa konsulter har påpekat att det använda G-värdet (utbytet av radiolysprodukter uttryckt i molekyler per eV) för radiolys på kvävgas inte är pessimistiskt valt eftersom Jones (1959) använt elektroder av guld istället för koppar (SSM Technical Note 2012:17). SKB anger att en fördjupad analys av utbytet vid radiolys av kvävgas kunde ha gjorts, men även ett 10 gånger större G-värde fortfarande skulle ge försumbara effekter jämfört med radiolys av vatten (SKBdoc 1398013). I SR-Site hanteras frågan på ett pessimistiskt sätt genom att anta att allt kväve som finns kvar i kapselhålrummet omvandlas till salpetersyra, och cirka 450 g av salpetersyra kan produceras med detta antagande. Denna mängd bedöms att ha försumbara konsekvenser för allmän korrosion av segjärnsinsatsen (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.2).

4.2.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s redovisning angående produktion av salpetersyra genom radiolys av fuktig luft är ändamålsenlig. SSM bedömer dessutom att den uppskattade mängden av salpetersyra som produceras genom massbalans är konservativ och godtagbar. SSM:s granskning och bedömning om konsekvenserna av salpetersyras inverkan på risk för spänningsskorrosion finns i avsnitt 4.10 i denna rapport.

4.2.3 Upplösning i grundvatten av bränslematrisen utsatt för gammastrålning

4.2.3.1 Underlag från SKB

Strålfältet runt det använda bränslet domineras till en början av gammastrålning. I händelse av ett kapselbrott inom de första 1000 åren efter förslutning av förvaret har detta



förhållande stor påverkan på bränsleupplösningsförloppet. Gammastrålning kan initialt penetrera kapselns kopparhölje och ge upphov till vattenradiolys samt producera oxidanter både före och efter ett eventuellt kapselbrott.

Enligt SKB:s redovisning förväntas grundvattnet på förvarsdjup bli kemiskt reducerande efter en kort (maximalt 100 år) oxiderande period då det kvarvarande syret förbrukats. Efter ett eventuellt kapselbrott kommer använt bränsle i kontakt med det reducerande grundvattnet och bränslematrisen påbörjar en långsam upplösningsprocess. Vattenradiolys kan dock producera oxidanter som möjligen kan ge upphov till oxiderande betingelser lokalt i anslutning till bränsleytor, vilket kan leda till en snabbare upplösning av bränslematrisen (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.5). Gammastrålningen från bränsle minskar relativt snabbt som funktion av tiden men förblir betydande under flera hundra år efter förslutning av slutförvaret (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.3).

SKB anser att radiolys av vatten har studerats ingående både experimentellt och genom modellering (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.3). Strålning med låg linjär energiöverföring (LET, Linear Energy Transfer) såsom gammastrålning producerar inga detekterbara mängder av de stabila molekylerna H_2 och H_2O_2 i rent avluftat vatten (Allen 1961, kapitel 7). De strålningskemiska processerna reagerar via $OH\cdot$ och $H\cdot$ radikaler i en kedjereaktion som resulterar i återbildning av H_2O . I vattnen som innehåller kolsyra oxideras praktiskt taget alla hydratiserade elektroner och $H\cdot$ radikaler som bildas av O_2 . De viktigaste produkterna från låg-LET vattenradiolys i ett system öppet till luften är en stationär konstant koncentration av H_2O_2 med konstanta utsläpp av H_2 och O_2 (Spinks och Woods 1990, kapitel 7).

SKB hänvisar till experimentella studier genomförda under senare tid som visar att en relativt liten mängd av väte i vattnet kan minska produktionen av oxidanter från gammastrålning (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.3). Det verkar finnas ett tröskelvärde för vätekoncentration över vilket det inte sker någon produktion av oxidanter (Pastina m.fl., 1999; Pastina och LaVerne, 2001). Inga mätbara radiolysoxidanter återfanns i gasfasen när bränsleupplösningsexperiment genomfördes i 5 M NaCl-lösning i närvarande av metalliskt järn (Loida m.fl., 1996; Grambow m.fl., 2000). Förekomst av korrosionsprodukter från järnet såsom magnetit och hydroxid av tvåvärt järn ("green rust") indikerar också en extremt låg koncentration av radiolysoxidanter. Avsaknad av gasformiga produkter från radiolys i experiment med gammastrålning och 5 M NaCl lösningar med 0,85 mM upplöst väte har också observerats (Kelm och Bohnert, 2004). Utvecklingen av radiolysgaser återkommer om lösningen innehåller bromidjoner (Kelm och Bohnert, 2005) och om experimenten är baserade på obestrålad urandioxid istället för använt kärnbränsle (Metz m. fl., 2007). Koncentrationer av uran i lösning minskar under experiment med använt kärnbränsle i lösningar med bromid och ett övertryck av väte (Loida m. fl., 2007; Cui m. fl., 2008).

4.2.3.2 SSM:s bedömning

SSM är positiv till att SKB har redovisat upplösning av bränslematrisen i samband med betydande gammastrålning, trots att gammastrålning har avtagit till nästintill försumbar nivå vid de av SKB förväntade tider för kapselbrott (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.3). SSM konstaterar att gammastrålningen avtar under de första hundratalen år till ett tusen år efter förslutning och att alfastrålningen blir dominerande för tiden efter detta (Poinssot m.fl., 2004, figur 9). För fullständighetens skull behövs en redovisning kring bränslematrisens upplösning i närvaro av gammalstrålning.

SSM anser att SKB:s redovisning för gammastrålningsinverkan av bränslematrisens upplösning är tydlig och slutsatserna är trovärdiga. Det är en väletablerad kunskap att vätgas motverkar förmågan av låg LET-strålning att producera oxidanter genom

vattenradiolys (Allen, 1961, kapitel 3; Spinks och Woods, 1990, kapitel 7). Det är också ett välkänt fenomen att tvåvärt järn kan reducera väteperoxid i vattenlösning (Spinks och Woods, 1990, kapitel 7; Nielsen och Jonsson, 2008).

SSM vill dock påpeka att inverkan av den resterande alfastrålningen på bränsleupplösning kvarstår som en viktig fråga (se avsnitt 5.1 ”Långsiktig utveckling av använt kärnbränsle och frigörelse av radionuklider vid kontakt med grundvatten” i denna granskningsrapport). SSM anser därför att försiktiga tolkningar av bränsleupplösning försök är nödvändiga. En låg koncentration av redoxkänsliga ämnen såsom uran i lösningen behöver inte nödvändigtvis innebära att bränslematrisens upplösning också är låg. Lokalt oxiderande betingelser kan på grund av resterande alfastrålning uppstå invid bränsleytan, trots att bulklösningen som helhet är reducerande. När redoxkänsliga ämnen lämnar det oxiderande närområdet kan de falla ut som sekundära faser. Detta fenomen har undersökts experimentellt av exempelvis Loida m.fl. (1996) genom att jämföra koncentrationer i vattenfasen för Sr-90 med koncentrationer för redoxkänsliga ämnen såsom uran. SSM anser att direkt uppmätta data för upplösning av använt kärnbränsle med förekomst av ett övertryck av vätgas och metalliskt järn ger en bra grund för uppskattningar av bränsleupplösningshastighet vid ett eventuellt tidigt kapselbrott. SSM anser att värdet bör ligga i storleksordningen mellan 10^{-7} till 10^{-6} andel per år för de första tusen åren enligt SKB:s redovisade mindre sannolika scenario angående potentiellt tidigt kapselbrott. Detta värde är konsekvent med data från litteraturen (t.ex. Loida m. fl., 1996; SKB TR-04-19, avsnitt 3.5). SSM anser att det är konceptuellt mer rättvisande att upplösligheten som anges används för tiden de första tusen åren eftersom bränslets upplösningshastighet är lite högre vid stark gamma/beta-strålning.

4.3 Kriticitet

I detta avsnitt redovisas och granskas kriticitetssäkerhet för ett slutförvar efter slutlig förslutning.

4.3.1 Underlag från SKB

SKB:s redovisning av kriticitetssäkerhet för såväl det initiala förloppet som för långtidsförloppet återfinns under ett flertal avsnitt i SR-Site (huvudrapport) samt övriga TR-rapporter. Avsnitten om kriticitet (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.3; SKB TR-10-46, avsnitt 2.1.3) utgör en samlad beskrivning av den säkerhetsmässiga betydelsen av kriticitet och en sammanfattning av SKB:s kriticitetsanalyser. Risken för kriticitet behöver analyseras på grund av dess potentiellt betydande påverkan på den fortsatta utvecklingen av en fallerad kapsel (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.3). Det bör noteras att SKB:s senaste kriticitetsanalys har genomförts efter säkerhetsanalysens färdigställande (SKBdoc 1422106). Nedan följer SSM:s sammanfattning av SKB:s redovisning för SR-Site. SKB redovisar att frågan om kriticitet är kopplad till förvarets säkerhetsfunktion ”fördröjning”. Två säkerhetsfunktionsindikatorer redovisas, en för bränslet (F3) ”undvika kriticitet” och en för kapseln (Can5) ”undvika bränslekriticitet”. För att F3 ska kunna visas vara uppfyllt tillämpar SKB kriteriet $keff < 0,95$ och för att Can5 ska visas vara uppfyllt gäller kriterierna (i) ”gynnsam geometri” och (ii) ”gynnsam materialsammansättning”. För säkerhetsfunktionen ”inneslutning” finns ingen säkerhetsfunktionsindikator formulerad med avseende på kriticitet eftersom kriticitet med god marginal kan uteslutas för intakta kapslar enligt SKB:s kriticitetsanalyser.

Säkerhetsfunktionsindikatorerna F3 och Can5 leder till krav på bränsle och kapsel. Följande krav finns redovisade och upprepas i ett flertal dokument i SKB:s redovisning:

- För att KBS-3-förvaret ska kunna upprätthålla multibarriärprincipen och ha flera barriärer, vilka individuellt och tillsammans bidrar till barriärfunktioner, ska kapseln förhindra kriticitet (SKB TR-10-14, avsnitt 2.2.1).
- Bränsleelement ska inkapslas med hänsyn tagen till anrikning, utbränning, geometrisk konfiguration samt materialsammansättning i kapseln så att kriticitet inte kan uppstå vid hantering och lagring även om kapseln skulle vattenfyllas. Keff ska vara mindre än 0,95, osäkerheter inkluderat. Vidare framgår att maximal anrikning är 5 % och maximalt tillåten medelutbränning per bränsleelement är 60MWd/kgU för UOX samt 50 MWd/kgU för MOX (SKB TR-10-14, avsnitt 5.3).
- Bränslets egenskaper och systemets geometri ska vara så utformat att kriticitet undviks även om kapseln skulle fyllas med vatten (SKB TR-11-01, avsnitt 5.4.1).
- Bränsleelement får inte under några omständigheter inkapslas om kriterier för underkriticitet inte är uppfyllda. Enligt en översiktlig rutin för bränsleinkapsling ingår att kontrollera att kriticitetskravet $keff < 0,95$ för varje enskilt system av bränsle och kapsel respekteras (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 5.3.4).
- Så kallade "loading curves" har beräknats i SKB:s kriticitetsanalys. En "loading curve" visar hur stor utbränning som funktion av anrikning som krävs för att systemet ska klara kravet på $keff < 0,95$ (SKB TR-10-13, avsnitt 4.4). Då redovisningen för bilaga SR-site skrevs var SKB:s plan att kreditera utbränning för både BWR- och PWR-bränsle. Av den nya kriticitetsanalysen (SKBdoc 1422106) framgår dock att utbränningskreditering endast kommer att tillämpas för PWR-bränsle. "Loading curves" för PWR-bränsle beräknas i den nya analysen. Beträffande BWR-bränsle krävställer SKB i stället minsta insats av brännbara absorbator (BA) som funktion av anrikning (SKBdoc 1422106).
- SKB anger att om acceptanskriteriet $keff < 0,95$ inte kan uppnås för vissa kapslar kan en eller flera kanaler lämnas tomma och om så krävs kan bränsleelement byggas om för att möta acceptanskriteriet $keff < 0,95$ (TR-10-13, avsnitt 4.4.1).
- Kravet på att förhindra kriticitet leder till konstruktionskrav på järninsatsen. En materialsammansättning $Fe > 90 \%$, $C < 6 \%$ och $Si < 4 \%$ behöver säkerställas (SKB TR-10-14, Errata 2011-12). Koncentrationen av C och Si behöver hållas under 6 respektive 4 % eftersom de har ett större tvärsnitt för neutronreflektion jämfört med Fe och kan därför öka systemets reaktivitet. Vidare behöver ett minsta centrum-centrum-avstånd mellan bränslepositioner i järninsatsen kunna säkerställas eftersom kriticitetsanalysen visar att högsta värdet på $keff$ uppnås då bränsleelementen inom varje kanal är förskjutna mot varandra, det vill säga mot kapselns centrum. SKB anger att det behöver beslutas om hur C-C avståndet ska verifieras (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 5.3.4).

I SR-Site sammanfattas resultat från SKB:s kriticitetsanalyser för slutförvaret (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.3). Den ursprungliga analysen för intakt bränsle i kapseln (SKBdoc 1193244) har gjorts om och ersatts, (SKBdoc 1422106) men det ändrar inte det kvalitativa resultatet. SKB visar på mycket stora säkerhetsmarginaler då $keff$ för initialtillståndet ligger under 0,3 (SKBdoc 1422106). Analysen visar att acceptanskriteriet $keff < 0,95$ uppfylls även om en kapsel brister och vattenfylls, förutsatt att systemets geometri i övrigt är oförändrat i förhållande till initialtillståndet samt att utbränning krediteras för PWR och brännbara absorbatorer krediteras för BWR. Ett med tiden förändrat nuklidinventarium påverkar reaktiviteten i systemet. I analysen tas detta i beaktande för tidsperioden upp till 100 000 år (SKBdoc 1422106). SSM:s detaljerade granskning och bedömning av kriticitetsanalysen (SKBdoc 1422106) redovisas i granskningsrapport *Inkapslingsanläggning och Clab*.

I de övriga kriticitetsanalyserna som gjorts redovisas bland annat effekter av bränsleupplösning, korrosion av järninsats samt diffusions- och transportprocesser som



skulle kunna omfördela fissilt material till nya konfigurationer (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.3). Av dessa har SSM granskat ett flertal dokument och rapporter (SKBdoc 1193244, SKB TR-96-07, KBS TR-108). SKB har även gjort en analys av total upplösning av bränsle och järninsats (SKBdoc 1193244). Resultaten visar på ett lägre keff jämfört med grundkonfigurationen med undantag av hålrum i järninsatsen vilket leder till ett något mer reaktivt system. SKB hanterar denna effekt konservativt i kriticitetsberäkningarna.

I en analys gjord för en tidigare variant av KBS-konceptet görs en genomgång av vilka förhållanden och processer som skulle kunna ge kriticitet på grund av ansamling av U-235 eller Pu-239 inne i kapseln eller utanför kapseln i deponeringshål, tunnlar och schakt (KBS TR-108). Analysen är uppbyggd kring resonemang om vilka konservativa antaganden om bland annat korrosion, vatten-bränsle-reaktioner, radiolys, löslighet av fissionsprodukter, buffertegenskaper, tidsskalor avseende kapselns integritet, sönderfallstider för Pu-239 samt tidsskalor för transport av fissilt material som krävs för att teoretiskt kunna ge upphov till en kritisk konfiguration. Det framgår ur rapporten att de antaganden som krävs är mycket osannolika och att sannolikheten för kriticitet sammanfattningsvis är försumbar. Trots de realistiska scenarier som beaktats görs en uppskattning av konsekvenserna av kriticitet i ett geologiskt slutförvar. Antagande för beräkningen är att uran motsvarande 227 ton transporteras från deponeringshål till en tunnel där det ackumuleras och deponeras i en kritisk konfiguration. Det noteras att ansamling av en kritisk massa av uran utanför kapslarna är en långsam process och att ett sådant system har starka negativa återkopplingskoefficienter vilket gör att explosioner till följd av kriticitet kan uteslutas. Konfigurationen som modelleras genererar energi mycket långsamt under en tidsperiod av cirka 100 000 år och det extra bidraget av radionuklider till grundvattnet som produceras motsvarar bidraget från en fallerad kapsel per 1 000 år. Analysen avseende konsekvenserna av en hypotetiskt postulerad kriticitet framgår enligt (KBS TR-108), men tas inte upp av SKB i huvudrapporten eftersom SKB utesluter kriticitet.

SKB har beskrivit den för två miljarder år sedan naturliga reaktorn vid Oklo i Gabon (SKB TR-96-07). Resultatet av en modellering av förhållanden för kriticitet vid den naturliga reaktorn redovisas och utifrån resultatet uppskattas hur stora mängder U-235 och/eller Pu-239 tillsammans med vatten som behöver ansamlas i en gynnsam konfiguration för att uppnå kriticitet i ett geologiskt förvar av använt kärnbränsle. Slutsatsen är att mängden uran som måste transporteras, ackumuleras och återdeponeras för att nå en kritisk konfiguration är utomordentligt stor i förhållande till vad som kan transporteras under förhållanden som rimligen kan uppstå. Det påvisas även att transport av uran respektive återdeponering ofta kräver motsatt kemiska karakteristika. Kriticitet på grund av ansamling av plutonium utesluts då det krävs en serie av processer där var och en har mycket liten sannolikhet att inträffa. SKB har även visat att de slutsatser som gjordes enligt den ursprungliga studien (KBS TR-108) även gäller för nuvarande kapseldesign enligt KBS-3 (SKB TR-96-07).

SKB har på SSM:s begäran om komplettering (SSM2011-2426-63) genomfört ytterligare en analys av konsekvenserna av kriticitet inne i en fallerad kapsel (SKBdoc 1417199). SKB anger att det är ett realistiskt "what if"-scenario som har analyserats och som kräver att slutsatser från kriticitetsanalysen för en vattenfylld kapsel åsidosätts (SKBdoc 1422106). Det "what if"-scenario som analyseras är att en kapsel fallerar, fylls med vatten och kriticitet uppnås. Ett "steady state"-fall har analyserats med resultatet att:

- Temperaturen i en kritisk kapsel begränsas till kokpunkten, 264 OC, för vatten under slutförvarsförhållanden med höga tryck.
- En kritisk kapsel levererar ca 14 kW effekt till omgivande berg.



- Bentonitbufferten i intilliggande deponeringhål påverkas inte av uppvärmningen av berget.
- Bränsleupplösningstakten är omkring en storleksordning högre i ett kritiskt ”steady state”-fall än för ett underkritiskt system.
- Den högre upplösningstakten för en kritisk kapsel gör att de radiologiska konsekvenserna ökar med en faktor 6 jämfört med en fallerad underkritisk kapsel.

SKB:s sammanvägda slutsats av samtliga kriticitetsanalyser är att sannolikheten för kriticitet efter förslutning i slutförvaret är försumbar (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.3).

På SSM:s begäran (SSM2011-2426-63) har SKB tagit fram kompletterande information om ett antal frågor rörande kriticitetssäkerhetsanalys. Följande svar från SKB har inkommit till SSM:

- Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kriticitet (SKBdoc 1417733).

4.3.1.1 SSM:s bedömning

SSM konstaterar att SKB i säkerhetsanalysen SR-Site har identifierat och redovisat konstruktionskrav på kapselns materialegenskaper- och geometriska egenskaper för att säkerställa uppfyllelse av kravet på underkriticitet. SSM anser att det framgår från SKB:s redovisning att kapselns utformning tillsammans med redovisade egenskaper för bränslet ger förutsättningar att förhindra kriticitet. SSM anser att SKB i tillräcklig omfattning har redovisat en metod för hur bränsle ska inkapslas i Clink för att säkerställa acceptanskriteriet $keff < 0.95$ dels för intakta kapslar, dels för kapslar som i analysen av förvarets långsiktiga strålsäkerhet antas falla och vattenfyllas (SKB TR-10-13). Metoden inbegriper PWR- och BWR-bränsle, MOX-bränsle, udda bränsletyper och skadade bränslen.

SSM har med hjälp av externa experter (SSM Technical Note 2015:39) granskat SKB:s metodikrapport, valideringsrapporter och kriticitetsanalys (SKBdoc 1422106) för vattenfyllda kapslar med intakt bränsle. En utförlig bedömning av dessa dokument redovisas i granskningsrapport *Inkapslingsanläggning och Clab*. Av granskningen framgår inga brister med avseende på metodik, validering eller analys med innebörden att SKB:s huvudsakliga resultat skulle vara felaktigt, det vill säga att kriticitet inte kan uppkomma i den konfiguration kärnämnet har från början.

SSM konstaterar att SKB som en del av kriticitetsanalysen för fallerade kapslar har analyserat ett antal geometriska förändringar av bränsle och insats som kan inträffa under förvarets långsiktiga utveckling (SKBdoc 1193244). Dock är dessa analyser redovisade utan närmare diskussion om uppskattad sannolikhet för att de kan inträffa eller en värdering om SKB förväntar sig att de befintliga analyserna kan utgöra paraplyfall för liknande typer av defekter och geometriförändringar. SKB har på SSM:s begäran om komplettering angivit att SKB i säkerhetsanalysen för PSAR kommer att analysera effekterna på reaktivitet av fysiskt rimliga geometriska förändringar inuti en skadad kapsel, till följd av exempelvis korrosion av insatsen (SKBdoc 1417733, SSM2011-2426-63). SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s redovisade kriticitetsanalys är tillräcklig för det aktuella steget i SKB:s program och att de utgör en rimlig ansats för att förfina och utveckla mer detaljerade analyser till kommande PSAR.

Avseende möjligheten till omfördelning av fissilt material till en kritisk konfiguration efter kapselbrott konstaterar SSM att det i teorin alltid går att postulera en sådan konfiguration. SSM:s bedömning av SKB:s analyser för dessa scenarier är att SKB visat att det krävs ett flertal mycket konservativa antaganden avseende kemiska förhållanden, transport- och diffusionsprocesser etc. för att sådana system/konfigurationer ska kunna



uppstå. Ett exempel på sådant konservativt antagande avseende sannolikheten för kriticitet efter omfördelning av fissilt material är att spridning och sedan ackumulation (återdeponering) ofta kräver skilda kemiska förhållanden. SSM har i granskningen inte funnit någonting som strider mot SKB:s slutsats att sannolikheten för kriticitet till följd av omfördelning av material är mycket liten.

SSM konstaterar att SKB analyserat konsekvenserna av kriticitet för olika ”what if”-scenarier. SSM bedömer att de scenarier som har analyserats av SKB är att betrakta som hypotetiska och SSM bedömer därför att det är rimligt att anta att de inte bidrar till slutförvarets långsiktiga risk. Vidare anser SSM att de beräknade konsekvenserna i form av extra dosbidrag vid dessa hypotetiska kriticitetsscenarier kan uppskattas från övriga postulerade hypotetiska scenarier (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.7).

SSM bedömer att kriticitet i slutförvaret, till följd av omfördelning av material och geometriförändringar, är en mycket osannolikt företeelse. Med tanke på de extrema förhållanden som krävs i kombination med en begränsad inverkan på radionuklidinventariet anser SSM att konsekvenserna för dessa hypotetiska fall har visats vara begränsade.

SSM har följande förbättringsförslag:

- Säkerhetsanalysen SR-Site (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.3) innehåller ingen utförlig argumentation kring risken för kriticitet till följd av geometriförändringar och omfördelning av fissilt material. SKB behöver i kommande steg redovisa en sammanfattning som beskriver hur SKB värderat och bedömt resultat av de analyser vilka SKB refererar till för att demonstrera att sannolikheten för kriticitet är försumbar.
- I och med att SKB inte krediterar utbränning för BWR-bränsle utan endast brännbara absorbtorer (BA) i kriticitetsanalysen för BWR-bränsle, behöver SKB i kommande steg ytterligare redovisa stabilitet i en postulerad närvaro av BA.

4.4 Bergmekanisk utveckling

Detta avsnitt fokuserar på termo-mekaniska processer i bergmassan som förutses förekomma de första 1 000 åren efter förslutning av ett slutförvar vid Forsmark. SKB:s utredningar har baserats på kunskap om dagens bergförhållanden vid Forsmark samt extrapolering av dagens trender under denna tidsperiod. I referensglaciationscykeln ingår den inledande 1 000 årsperioden i en 8000 år lång förlängning av den nuvarande interglacialen (Holocen) med tempererade klimat (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.2).

Temperaturutvecklingen på grund av det använda kärnbränslets resteffekt kommenteras i sin helhet i avsnittet 4.1.2 i denna rapport, men eftersom vissa bergmekaniska effekter är starkt kopplade till temperaturutvecklingen i berget behandlas även denna fråga till viss del i detta avsnitt. Den termiska fasen av slutförvaret kommer i viss utsträckning att pågå från tidpunkten för deponering av kapslarna till cirka 10 000 år efter deponeringen, men eftersom den mest betydande inverkan av termiska processer som påverkar den långsiktiga säkerheten sker under de första 1 000 åren efter förslutningen behandlas dessa frågor endast i detta avsnitt.

Påverkan av ett jordskalv i slutförvarets närhet under de första 1 000 åren redovisas i avsnitt 4.13 i denna rapport.

Förändringen av sprickegenskaper samt sprickbildning som kan påverka viktiga parametrar för den hydrogeologiska prestandan, även för jordskalvfallet, beskrivs i detta avsnitt.

SSM har för enkelhetens skull delat upp området bergmekanisk utveckling i slutförvaret i Forsmark under den termiska fasen på ett antal underliggande teman:

- Bergmekaniska och termiska modelleringar
- Den termiska utvecklingens påverkan på spjälkning
- Den termiska utvecklingens påverkan på sprickor runt slutförvaret
- Den termiska utvecklingens påverkan på deformationszoner nära slutförvaret
- Övriga bergmekaniska effekter under den termiska fasen

Relevanta säkerhetsfunktioner kopplade till bergmekaniska effekter och temperaturutveckling i berget (SKB TR-09-22) som skall så långt som möjligt uppfyllas för ett förslutet slutförvar är att:

- buffertens maxtemperatur ska hållas under 100° C
- sprickor som genomskär deponeringshål bör ha en tillräckligt låg transmissivitet
- den störda zonen runt deponeringstunnlarna ska vara begränsad och ska inte ge upphov till en konnektad effektiv medeltransmissivitet över tunnelgolvet som är högre än 10^{-8} m²/s
- skjuvrörelser i sprickor som skär kapselpositionerna ska inte överstiga 50 mm och skjuvningshastigheten ska inte överstiga 1 m/s.

4.4.1 Bergmekaniska och termiska modelleringar

4.4.1.1 Underlag från SKB

SKB redovisar att den termiska dimensioneringen av ett KBS-3-förvar kan begränsa den maximala bufferttemperaturen till under 100°C i alla deponeringshål. Bufferttemperaturen i ett deponeringshål påverkas inte bara av resteffekten i just det hålet utan också av resteffekten i de omgivande hålen. Avståndet mellan deponeringshålen samt avståndet mellan deponeringstunnlar, tillsammans med de termiska egenskaperna hos berget samt för den luftfyllda spalten mellan buffert och berg, avgör hur hög bufferttemperaturen kan bli (SKB R-09-04).

Från den platsbeskrivande modellen för Forsmark presenterar SKB bergets termiska egenskaper med hjälp av en rumslig statistisk modell för olika termiska bergklasser Thermal Rock Classes (TRC) och för olika bergdomäner (SKB R-07-47). För en mer detaljerad sammanfattning av SKB:s redovisning av bergets termiska egenskaper, se avsnitt 3.2.3 i denna granskningsrapport.

SKB har analyserat buffertens temperaturutveckling för de första 20 åren i en bergvolym som domineras av bergarter med låg termisk konduktivitet för att preliminärt dimensionera slutförvarets layout (SKB R-08-83, bilaga A). SKB bedömde dock att dessa analyser inte kunde uppskatta antalet deponeringshål där temperaturen i bufferten skulle kunna överstiga 100° C. SKB har av denna anledning genomfört kompletterande analyser för både torra och blöta deponeringshål med eller utan luftspalt mellan kapseln och buffertblocken (SKB TR-10-23). Resultaten visar att i genomsnitt kommer mindre än 1 kapsel av 6 000 att få en maximal bufferttemperatur som överstiger 95° C, och 2 % av kapslarna kommer att ha en maximal bufferttemperatur som överstiger 90° C. Dessa analyser har baserats på slutförvarets layout D2 med kapselavstånd på 6,0 m i bergdomän RFM029 respektive 6,8 m i bergdomän RFM045, avstånd mellan deponeringstunnlarna på minst 40 m (SKB R-08-83) samt på medelvärdet för de termiska egenskaperna hos berget (SKB TR-10-52). SKB anser att antagandena är konservativa i och med att: (i) användning av exempelvis EFPC-kriteriet leder till att avståndet mellan kapslarna i många fall kommer att vara större än det valda kapselavståndet, (ii) många kapselpositioner ligger nära deponeringstunnlarnas ändrar där den termiska effekten från närliggande kapslar är

mindre och (iii) inte alla deponeringshål kommer att vara torra. För blöta deponeringshål är den termiska utvecklingen fördelaktigare jämfört med torra deponeringshål (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.4, figur 10-16).

SKB har genomfört modelleringen av den storskaliga termiska utvecklingen i förvarsområdet både med analytiska och numeriska metoder. Med den analytiska metoden beräknas effekten för värmeförsel från kapslarna till bergmassan. Detta innebär en jämnt fördelad försel av värme i ett plan som genomsär slutförvaret. Bergväggstemperaturen för ett specifikt deponeringshål bestäms genom att beakta resultat från modeller med värmealstrandet från det avsedda deponeringshålet samt från de intilliggande hålen som punktvärmekällor eller linjevärmekällor (SKB R-09-04, avsnitt 4.2). De numeriska beräkningarna för bestämning av den termiska utvecklingen i slutförvaret har genomförts med koden 3DEC, som använder den explicita finita differensmetoden (FDM) i 3 dimensioner, samt med koden Code_Bright, som baseras på den finita elementmetoden (FEM) (SKB R-09-04, avsnitt 4.4). De analytiska beräkningarna används för preliminär beskrivning av förvarets termiska utveckling i alla skalor för i denna metod kan inte hänsyn tas till heterogeniteter i bergets termiska egenskaper (SKB R-09-04, avsnitt 4.9). Numeriska beräkningar kan tillämpas med olika detaljeringsgrad för en eller flera deponeringstunnlar med ett eller flertal kapslar i den centrala delen av slutförvaret. Den rumsliga variationen av de termiska bergegenskaperna beaktas indirekt genom att använda den sämsta bergvärmeledningsförmågan från stokastiska realisationer (SKB R-09-04, avsnitt 5.4.3). Resultat från analytiska och numeriska metoder stämmer bra överens med varandra (SKB R-09-04, figur 4-14).

SKB visar att maximal bufferttemperatur på ca 95° C uppnås mellan 5 och 15 år efter deponering av kapslarna, varav ca 50 % av temperaturtillskottet kommer från kapseln i det aktuella deponeringshålet och ca 50 % från närliggande kapslar. Variabiliteten hos bergets värmeledningsförmåga är således viktig för den enskilda kapseln och omgivande buffertens temperaturutveckling, och av detta skäl använder sig SKB av ett dimensionerande värde som anses representera ett ”värsta fall”. Bergets maximala temperatur på ca 65° C uppnås ca 50 år efter en simultan kapseldeponering, dvs. när alla kapslarna hypotetiskt antas vara utplacerade samtidigt (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.4, figur 10-16). Den initiala temperaturen i berget på slutförvarsdjup vid Forsmark är ca 11,2° C.

SKB visar att skillnaden mellan en hypotetisk simultan deponering och en systematisk deponering panel-för-panel är försumbar och medför endast en maximal bufferttemperaturskillnad för de två fallen på ca 0,2° C. SKB:s analyser visar också att en systematisk deponering panel-för-panel är gynnsammare än en utspridd deponering över hela slutförvarsytan där nydeponerade kapslar placeras nära kapslar deponerade flera år innan (SKB TR-10-23). Den utspridda deponeringen genererar mycket högre temperaturer och den bör därför undvikas genom administrativ översyn av deponeringssekvensen.

4.4.1.2 SSM:s bedömning

Enligt SSM:s bedömning redovisar SKB omfattande termiska, mekaniska och hydrauliska data från platsundersökningarna i Forsmark som är relevanta för projektering samt analys av långsiktig säkerhet för ett geologiskt slutförvar. Metoderna för datainsamling är robusta och följer gängse internationell praxis. SSM anser att SKB:s rapporter inom området håller hög kvalitet med avseende på termisk och mekanisk datainsamling och säkerhetsanalys. De är så långt det går att bedöma baserade på etablerad metodologi inom sina respektive områden. Slutsatser dragna i rapporterna hänger samman med enskilda varierande geologiska- och mekaniska processer, som ofta är presenterade oberoende av varandra i ett flertal bakgrundsrapporter (SKB TR-10-52 och underliggande referenser).



SSM anser att kvaliteten på rapporterna är hög med hänsyn till de många osäkerheter som förknippas med projektering av ett geologiskt slutförvar samt vidden av geologisk data och hanteringen inom säkerhetsanalys. Granskade rapporter visar tydligt att SKB är väl bekanta med modern bergmekanik och bergteknik.

Med anledning av att en utspridd deponering av kapslar genererar mycket högre maximala temperaturer i bufferten jämfört med en systematisk deponering panel-för-panel rekommenderar SSM att SKB utvecklar en administrativ översyn av deponeringssekvensen som tar hänsyn till slutförvarets värmeutveckling under driften pga. redan deponerade kapslar. SKB bör ta fram en redovisning av en sådan administrativ översyn av deponeringssekvensen inför kommande steg i sitt program.

4.4.2 Den termiska utvecklingens påverkan på spjälkningen

4.4.2.1 Underlag från SKB

Resultat från laborietester på prover från Forsmark visar värden mellan 60 MPa och 187 MPa beträffande spjälkningshållfastheten (SKB TR-08-05). De maximala tangentiella spänningarna i deponeringshålets väggar, som SKB uppskattar för den termiska fasen och 50 år efter deponering, varierar mellan 140 MPa och 200 MPa beroende på bergspänningsmodell, orienteringen mellan deponeringstunnelns riktning och riktningen för största horisontella spänningen samt bergets termiska konduktivitet (SKB TR-10-23, avsnitt 9.3.1 och 9.4.1).

SKB uppger att spjälkning av deponeringshållsväggen innan kapseldeponering inte påverkar säkerheten för slutförvaret (SKB TR-11-01, avsnitt 10.2.2). Ytterligare spjälkning av deponeringshållsväggen kommer dock sannolikt att inträffa under den termiska fasen efter kapseldeponering och förslutning av deponeringstunnlar. SKB:s analyser indikerar en ökad belastning vid deponeringshållsväggen som sannolikt kommer att överskrida bergets spjälkningshållfasthet i alla deponeringshål. SKB förmodar att närvaron av bentonitpellets i spalten mellan buffert och berget och/eller kommande buffertsvälltryck sannolikt kommer att minska risken för spjälkning i deponeringshålen (SKB-11-01, avsnitt 10.3.5). SKB:s spjälkningsanalyser baseras dock på en konservativ bedömning vilken exkluderar mottrycket från bufferten. Utifrån analysresultaten drar SKB slutsatsen att termiskt inducerad spjälkning i deponeringshålen under den termiska fasen måste beaktas vid bedömningen av transmissivitet och radionuklidtransport vid gränssnittet mellan berg och buffert (SKB-11-01, avsnitt 10.3.5). SKB:s konservativa antagande med avseende på spjälkning används både vid analysen av kopparkorrosion och av radionuklidtransport.

Som en åtgärd för att begränsa förekomsten av spjälkning i deponeringshålen efter deras uppförande får, enligt SKB:s så kallade ”mest sannolika” bergspänningsmodell, avvikelser mellan deponeringstunnelns orientering och riktningen för den största horisontella spänningen inte överstiga 30°. Som påpekats ovan förhindrar detta dock inte förekomsten av spjälkning i deponeringshålen under den termiska fasen (SKB TR-10-23, avsnitt 9.3.1). SKB uppskattar att spjälkningshållfastheten överskrids i alla deponeringshål längs med deras väggar där vinkeln mot riktningen för den största horisontella spänningen är ca 90°. Detta gäller även om bergets termiska konduktivitet ligger i nivå med medelvärdet för laborieresultat för prover från Forsmark.

SKB:s redovisning visar att det bara tar några månader för den tangentiella spänningen i deponeringshållsväggen att komma upp i nivå med spjälkningshållfastheten (SKB TR-10-23, Figur 9-7). Därför är det sannolika fallet att bufferten i deponeringshålet inte har

hunnit vattenmättats och utveckla sitt stabiliserande svälltryck mot deponeringshålens bergväggar.

Beträffande analysen av skadezonen runt deponeringstunnlar som även beskrivs i avsnitt 3.2. i denna rapport diskuterar SKB även förekomsten av spjälkning i nybyggda deponeringstunnlar. Spjälkning kan förekomma i nya eller redan byggda deponeringstunnlar pga. termiska laster från den uppvärmda delen av slutförvaret. SKB visar att spjälkningen i deponeringstunnlarnas tak kan förekomma om tunnelorienteringen skiljer sig mer än ca 22° från riktningen för den största horisontella spänningen för initiala bergspänningar som är högre än för den ”mest sannolika” bergspänningsmodellen (SKB TR-10-23, avsnitt 9.3.2 och 9.4.2). Den tangentiella spänningen i deponeringstunnlarnas tak kan nå drygt 160 MPa för de mest ogynnsamma belastningsfallen, vilket överstiger tunneltakets spjälkningshållfasthet.

4.4.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att begränsningen på 30° riktningssvikt mellan deponeringstunnlarna och den största horisontella spänningen bör utgöra en tillräcklig åtgärd för att minimera spjälkning runt deponeringstunnlarnas tak under den termiska fasen. Dock, visar SKB inte vad som gäller för deponeringstunnels sula mellan intilliggande deponeringshål. Enligt SSM kan kännedom om sådana förhållanden betraktas som mer relevant gällande uppskattningen av bergmassans transmissivitet längs med deponeringstunneln och dess konsekvenser för kanalbildning i buffert samt för radionuklidtransport (jämför med verifiering av bergtransmissivitet längs med deponeringstunneln i avsnitt 3.2.5 i denna rapport). Risken för spjälkning i deponeringstunnlar har även belysts av SSM:s oberoende modellering (SSM Technical Note 2014:10) som förutsätter SKB:s så kallade ”mest sannolika” bergspänningsmodell. Dessa resultat visar att spjälkning i deponeringstunnels tak och sula kan induceras för spjälkningshållfastheter som är lägre än det medelvärde som SKB antar för det intakta berget (i bergdomän RFM029 116 MPa). SSM bedömer att SKB behöver förbättra sin probabilistiska metod för att uppskatta, inte bara sannolikheten för spjälkning, utan även den förväntade statistiska fördelningen för spjälkningsdjupet enligt Martin och Christiansson (2009). Spänningstillskotten pga. den termiska belastningen bör inkluderas, utöver tillskotten pga. rumslig variabilitet och osäkerhet för magnitud samt riktning för den största horisontella spänningen. Inför kommande provningssteg behöver SKB inkomma med en mer detaljerad uppskattning av spjälkningsdjupet för alla deponeringshål vid en signifikant tidpunkt, t.ex. 50 år efter en simultan deponering (jämför med påverkan av bergspänningsmodell och deponeringstunnelsriktning i kapitel 3 i denna rapport). Analysen bör även inkludera förekomsten av spjälkning i deponeringstunnlarnas sula.

SKB behöver med anledning av diskussionen om termisk spjälkning ovan ta fram robusta och validerade mätmetoder för att verifiera att den faktiska konnekterade transmissiviteten i deponeringshålsväggen blir mindre än 10^{-10} m²/s. Skulle detta inte kunna åstadkommas behöver SKB istället ta fram en trovärdig och robust modell som kan visa att en faktisk konnekterad transmissivitet i deponeringshålsväggen som blir mindre än 10^{-10} m²/s kan infrias, med hänsyn tagen till den termiskt inducerade spjälkningen.

4.4.3 Den termiska utvecklingens påverkan på bergsskadezonen

4.4.3.1 Underlag från SKB

SKB har inte analyserat utvecklingen av bergsskadezonen runt deponeringstunnlar eller deponeringshål, utöver spjälkning, pga. spänningskoncentrationer inklusive effekten av grundvattentrycket som uppkommer under den termiska fasen av slutförvaret (SKB TR-10-23). Redovisningen innefattar emellertid analyser av bergmassans utveckling utan hänsyn till de initiala bergskadorna pga. bergschaktning.



4.4.3.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att vid de av SKB inrapporterade spänningsnivåerna runt om deponeringshålen kan spjälkning förväntas förekomma för de flesta deponeringshål under den termiska fasen. Omfattningen av bergskadezonens utveckling runt deponeringshålen bör däremot vara begränsad då de uppkomna spänningarna är i samma storleksordning som den exakta tryckhållfastheten för den spruckna bergmassan. Spänningarna förekommer dessutom i samband med stabiliserande avgränsande tryckspänningar (SSM Technical Note 2013:35). Dessa argument stödjer SKB:s antagande att bergskadezonen runt deponeringshålen inte bör förändras under den termiska fasen.

Enligt SSM:s bedömning bör de av SKB redovisade (SKB TR-10-23) tangentiella spänningarna inte ge upphov till vidareutveckling av skadezonen i deponeringstunneln, förutom genom en utökad risk för spjälkning i dess tak och sula (se avsnitt 4.4.2 i denna rapport). Detta bekräftas av SSM:s oberoende modellberäkningar som visar att när vinkeln mellan riktningen för deponeringstunnlarna och riktningen för största horisontella spänningen är 45° utvecklas det en påtaglig skadezon i deponeringstunnelns sula under den termiska fasen av slutförvaret (SSM Technical Note 2013:35). SSM anser att denna vinkel är tillräckligt mycket större än SKB:s konstruktionsförutsättning på 30° för att bergskadezonen inte ska kunna utvecklas under den termiska fasen.

SSM:s argumentation ovan förutsätter att en administrativ översyn av deponeringssekvensen följs av SKB. En sådan översyn har syftet att undvika en utspridd deponering av kapslar som genererar en mycket högre temperatur i berget jämfört med en systematisk deponering panel-för-panel som SKB förutsätter i SR-Site (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.4)(se även SSM:s bedömning i avsnitt 4.4.1 i denna rapport).

SSM:s bedömning om verifiering av bergets transmissivitet längs med deponeringstunneln återfinns i avsnitt 3.2.5. Trösklar för den uppmätta transmissiviteten längs med deponeringstunneln i demonstrationstunnlar behöver även ta hänsyn till eventuellt bidrag från spjälkning i deponeringstunnelns sula (enligt avsnitt 4.4.2 ovan, se även följande avsnitt 4.4.4 för det som avser variation av spricktransmissivitet under den termiska fasen).

4.4.4 Den termiska utvecklingens påverkan på sprickor runt slutförvaret

4.4.4.1 Underlag från SKB

SKB uppskattar att för flacka sprickor just utanför och på samma djup som slutförvaret ökar transmissiviteten som mest med en faktor två under hela den termiska fasen (SKB TR-10-23, kapitel 3). Sprickor i berggrundens övre 100 m som är parallella med den högsta initiala horisontella bergspänningen, kommer att erhålla en något högre transmissivitetsökning på högst en faktor 2,5, vilket beror på en minskad effektiv normalspänning (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.5). SKB drar därför slutsatsen att transmissivitetförändringarna under den termiska fasen är för små för att ha en betydande påverkan på storskaliga hydrogeologiska analyser (SKB TR-10-23).

SKB har genomfört beräkningar av kvoten mellan skjuvhållfasthet hos sprickor i närområdet och skjuvspänningen som agerar på dem, baserat på modellerade spänningar pga. uppvärmning av bergvolymen runt deponerade kapslar. Beräkningarna visar att sprickor med en lutning på mindre än 55° från horisontalplanet kan efter en uppvärmning av slutförvaret under ca 100 år bli instabila och hysa skjuvrörelser (SKB TR-10-23, avsnitt 8.4). De mest känsliga spricklokaliseringarna är belägna precis utanför deponeringsområdet, där temperaturgradienten är som störst. Baserat på skillnaden mellan skjuvspänning och skjuvhållfasthet hos sprickorna ("shear drop") har SKB även



uppskattat skjuvrörelsen hos sprickor med olika diametrar. Resultaten visar att en spricka med en diameter på 300 m vid slutförvarsdjupet samt precis i utkanten av det deponerade området kan röra sig upp till 27,8 mm (SKB TR-10-23, figur 6-27).

SKB:s analyser baseras på ett flertal konservativa antaganden bl.a. att:

- Sprickan med en diameter på 300 m på slutförvarsdjup är helt inbäddad i ett spänningsfält med konstant "shear drop". Detta är ett ganska osannolikt fall i och med att spänningstillståndet inom och utanför slutförvaret, pga. uppvärmningen, är gynnsammare för sprickorna än just vid randen precis utanför slutförvaret. Skulle en lång spricka fortsätta in i slutförvaret skulle den genast bli stabilare tack vare de mindre skjuvspänningar som råder där.
- Det finns ett samband mellan spricklängden och dess skjuvrörelse. Argumentet ovan visar att detta inte kan gälla generellt i och med att "shear drop" inte är konstant över sprickans längd och endast den skjuvbelastade delen av sprickan kan röra sig.
- ONO-strykande sprickor med flack lutning på mindre än 55° från horisontalplanet är relativt ovanligt förekommande i spricknätverken för bergdomänerna RFM029 och RFM045. Dessa sprickor kan bli instabila pga. skjuvning under uppvärmningen av slutförvaret.

Baserat på beräkningsmodeller har SKB dragit följande slutsatser: (i) att hävning och reducerade tryckspänningar förekommer vid markytan ovanför deponeringsområdet, (ii) att sprickorna i deponeringsområdet blir mer stabila tack vare de ökade tryckspänningarna, (iii) att flacklutande sprickor utanför deponeringsområdet kan genomgå skjuvning, samt (iv) att branta sprickor ovanför deponeringsområden kan få upp till 2,5 gånger ökad transmissivitet (SKB TR-10-23, avsnitt 6.9).

Avseende deponeringstunnlarnas närområde drar SKB slutsatsen att transmissivitetförändringarna orsakade av förvarets termiska fas är små och begränsade till en bergvolym på maximalt 1 m tjocklek runt om deponeringstunneln. SKB:s slutsats är att den termiska utvecklingen har marginellt inflytande på bergmassans transmissivitet i närheten av deponeringstunneln (SKB TR-10-23).

4.4.4.2 SSM:s bedömning

SSM instämmer huvudsakligen med de slutsatser som SKB drar avseende stabiliteten hos sprickorna i olika områden runt slutförvaret. SSM:s externa experter drar slutsatsen att instabila positioner för sprickorna ligger i utkanten av det deponerade området (SSM Technical Note 2015:30). SSM:s oberoende modellering av isolerade sprickor och spricknätverket i närområdet under uppvärmning visar också att rörelser blir som mest ca 3,5 mm respektive 1,2 mm i närheten av deponeringshålen (SSM Technical Note 2013:37). SSM bedömer dock att SKB inför kommande steg av sitt program behöver redovisa vilken påverkan sprickpropagering under den termiska fasen har på slutförvarets barriärfunktioner.

SSM har låtit genomföra storskaliga modelleringar av spricknätverket med fokus på sprickor större än 125 m. Modellanalyserna visar att skjuvrörelserna håller sig under 10 mm för alla sprickor oavsett längd och placering i förhållande till det uppvärmda slutförvaret (SSM Technical Note 2014:59). SSM har även utvärderat risken för propagering av sprickorna i slutförvarets närområde vid uppvärmning och drar slutsatsen att uppvärmningen har en oväsentlig betydelse för propagering av sprickor i detta område (SKI Report 2008:25). Skjuvspänningstillskottet pga. uppvärmning är störst för ett vertikalt plan som tangerar utkanten av slutförvaret och dess storleksordning är cirka 3,5 MPa (SSM Report 2009:08). Detta spänningstillskott kan anses vara marginellt i förhållande till bergspänningarna runt om slutförvaret. Å andra sidan visar en ny studie



om utveckling av spricknätverket att sprickpropagering kan förekomma vid de mest utsatta punkterna i slutförvaret för vertikala sprickor som löper parallellt med största huvudspänningsriktningen (SSM Technical Note 2015:30). Sprickpropageringen mildras när temperaturberoendet för sprickseghet tas med i beräkningen så att värdet för skjuvning (i Mode II) blir ca 12 % högre ($0,7 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) än vid rumstemperatur. Samma studie visar även att sprickpropageringen har en tendens att leta sig fram till borrade deponeringshål.

De skjuvrörelser som SSM:s externa experter har beräknat för sprickor i närheten av deponerade kapslar kan ge upphov till en transmissivitetsökning på upp till 4 storleksordningar för en initial sprickapertur på $10 \mu\text{m}$ (till att nå värden på ca $8,5 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) respektive 2 storleksordningar för en initial sprickapertur på $30 \mu\text{m}$ i direkt anslutning till en deponeringstunnelsvägg efter 100 år av uppvärmning. Transmissivitetsökningen är beroende på storleken på sprickaperturer vid initialtillståndet (SSM Technical Note 2013:37). I en sprickfattig bergvolym som i Forsmark, kan denna ökning av transmissivitet i närheten av deponeringstunnlarna och deponeringshål ha påverkan på kanalbildning i buffert, buffererosion samt radionuklidtransport.

Baserat på ovanstående argument bedömer SSM att SKB:s redovisning är ändamålsenlig för tillståndsprövningen men myndigheten uppmanar SKB att komplettera sin redovisning inför kommande steg i sitt program. Det erfordras enligt SSM:s bedömning ytterligare analyser baserade på realistiska spricknätverk i olika skalor som kan kvantifiera magnituderna för termiskt inducerade skalv samt kvantifiera risken för sprickpropagering i närheten av deponerade kapslar. SKB behöver även genomföra mer rigorösa uppskattningar av hur transmissiviteten ändras under uppvärmningen och bedöma om irreversibla tillskott förekommer, med hänsyn taget till sprickpropagering under skjuvning (Mode II). Konsekvenser av förändringar med avseende på transmissivitet som påverkar ett slutförvars långsiktiga säkerhet behöver analyseras ytterligare av SKB.

Analyser som SSM låtit genomföra (SSM Rapport 2009:08) visar i likhet med SKB:s redovisning (SKB TR-10-23, avsnitt 6.6) att ett dragspänningstillskott förekommer under uppvärmningen av bergmassan ovanför slutförvaret, vilket avtar från markytan ner till ca 200 m djup. Dessa överslagsberäkningar ger ett maximalt värde på dragspänningen om ca 2 MPa vid 200 m djup vid tiden 100 år efter deponeringen. Vid markytan kan dragspänningen bli ca 10 MPa 1 000 år efter deponeringen samtidigt som den avtar gradvist för att bli noll vid ca 125 m djup. SSM:s modellering ger ett något högre dragspänningstillskott jämfört med SKB:s redovisning där SKB:s analyser snarare pekar på ett dragspänningstillskott på ca 2 MPa vid 150 m djup efter ca 100 år respektive 5 MPa vid markytan 1000 år efter deponeringen. SKB:s modeller har mer realistiska former för deponerade områden, vilket kan förklara skillnaden i och med att effekten på markytan av flera deponerade paneler kan vara att de delvis neutraliserar varandra.

Dragspänningstillskottet under den termiska fasen påverkar de initiala bergspänningarna, vilket kan resultera i låga eller till och med negativa normalspänningar för branta sprickor, särskilt för sprickorna med NV-strykning vinkelrätt mot den minsta horisontella initiala spänningen i Forsmark. SSM anser dock att detta inte kan påverka bergmassans mekaniska stabilitet i och i anslutning till slutförvaret. Emellertid kan dragspänningstillskottet påverka spricktransmissiviteten ovanför ett djup på ca 200 m genom en ökning av sprickaperturen, med möjliga dragbrott i svaga sprickfyllningar samt sprickpropagering ovanför ca 200 m (avsnitt 4.5 i denna granskningsrapport).



4.4.5 Den termiska utvecklingens påverkan på deformationszoner nära slutförvaret

4.4.5.1 Underlag från SKB

SKB:s beräkningar visar att skjuvrörelser längs med långa sprickor under den termiska fasen är små (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.5). På slutförvarsdjup uppskattar SKB att flacka sprickor med 150 m radie, belägna precis utanför deponeringsområdet, kommer att röra sig mest med en maximal skjuvrörelse på mindre än 27,8 mm (SKB TR-10-23, Figur 6-27). Dessa rörelser tar inte hänsyn till ett tektoniskt eller termiskt inducerat skalv.

SKB har modellerat uppvärmningens påverkan på zon ZFMA2 och kommit fram till att zonen påverkas marginellt vid markytan där normalspänningen och skjuvspänningen minskar med ca 2 MPa 500 år efter deponeringen. Vid förvarsdjup visar SKB att tillskotten till zonens normalspänning och skjuvspänning är jämförbara, med en storleksordning mellan 2 till 3 MPa (SKB TR-10-23, avsnitt 6.8.1 och A2.2) vilka är måttliga.

SKB har i en komplettering till ansökan angående termiskt inducerade skalv redovisat frågan om vilka skjuvrörelser som ett tektoniskt skalv med magnitud ca 5,5 på deformationszonen ZFMA2 som kan inträffa samtidigt som bergvolymen värms upp av kapslarna med det använda kärnbränslet (SKBdoc 1372546, Bilaga 1). Kompletteringen redovisar vilka skjuvrörelser som förekommer på enstaka sprickor i samband med skalvet. För en spricka med radie 300 m som ligger inom deformationszonens liggvägg är den beräknade maximala skjuvrörelsen ca 20 mm, vilket innebär att den kritiska radien för ett avstånd på 200 m från deformationszonen är 325 m. SKB redovisar också att ett termiskt skalv inte skulle kunna generera stora rörelser över hela deformationszonen och därför inte heller medföra större magnituder.

4.4.5.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB inför kommande steg i sitt program behöver ta fram en redovisning som visar var i slutförvarsvolymen ett inducerat skalv kan uppstå på grund av den termiska påverkan från slutförvaret och vilken magnitud det skulle få. Vidare behöver SKB visa att dessa termiska skalv inte är kritiska för slutförvarets långsiktiga säkerhet. Detsamma gäller för risken för propagering av deformationszoner under den termiska fasen. Mer detaljerade modeller samt alternativa metoder till de som finns presenterade i SKB:s komplettering (SKBdoc 1372546, Bilaga 1) behöver tas fram så att de innehåller realistiska spricknätverk och kan uppskatta magnituden för realistiska termiskt inducerade skalv utan på förhand definierade antaganden om hypocentrum samt magnituden.

SKB har i ansökansunderlaget inte kommenterat att på djup större än slutförvarets, och ner till ca 700 m, ökar skjuvspänningstillskottet på zon ZFMA2 med upp till 3 MPa samtidigt som dess normalspänningstillskott minskar till att bli negativ. SKB behöver inför kommande steg i sitt program redovisa hur zonens stabilitet påverkas under den termiska fasen.

SSM:s oberoende modellering visar att skjuvkrafterna på zon ZFMA2 ökar lokalt med uppvärmningen och den mobiliserade friktionsvinkeln på zonen får ett tillskott på mellan 0,8° och 4,9°. Det skulle krävas en friktionsvinkel på mellan 36° och 45° lokalt i dessa delar av zonen för att garantera dess stabilitet, medan den initialt mobiliserade friktionsvinkeln på zonen låg mellan 28° till 36° (SSM Technical Note 2014:58). Detta innebär att zonens friktionshållfasthet, vilken är okänd men av SKB antagen att vara ca 33°, måste överstiga den mobiliserade friktionsvinkeln för att stabila förhållanden ska bibehållas. Den högsta mobiliserade friktionsvinkeln som förekommer enligt SSM:s oberoende modellering avser inte heller tiden efter 500 år, utan troligen redan efter ca 20



till 100 år deponering, när de borte delarna av zon ZFMA2 fortfarande är opåverkade av temperaturökningen.

Enligt SSM:s bedömning har SKB i kompletteringen av ansökan avseende termiskt inducerade skalv inte adresserat frågan om vilka skjuvrörelser samt skalvmagnituder som kan inträffa på sprickor eller zoner i slutförvaret pga. frigörelsen av spänningskoncentrationer orsakade av värmebidraget från kapslarna (SKBdoc 1372546, Bilaga 1). SKB behöver inför kommande steg i sitt program redovisa vilka inducerade skjuvrörelser och skalvmagnituder under den termiska fasen.

De oberoende analyser som SSM låtit genomföra angående skjuvrörelser samt magnituder hos termiskt inducerade skalv (SSM Technical Note 2014:58; SSM Technical Note 2014:59) visar överensstämmelse med SKB:s redovisning (SKB TR-10-23, Figur A.3) d.v.s. spänningskoncentrationerna pga. värmeutvecklingen når ett djup på ca 700 m. Sannolikt kan även flacka zoner som ZFMA8, ZFMA1 och ZFMA3 i nära anslutning till ZFMA2, påverkas av dessa spänningskoncentrationer. Emellertid visar SKB:s modellering att ett jordskalv med magnitud 5,5 i anslutning till ett uppvärmt slutförvar kan generera skjuvrörelser på maximalt ca 20 mm på sprickor med 300 m i diameter i liggväggen av zon ZFMA2 och 200 m ifrån zonen. Denna siffra kan jämföras med SKB:s kriterium för skjuvrörelse på 50 mm. Ett jordskalv med magnitud 5,5 är större än de möjliga termiskt inducerade skalven, men till skillnad från termiska skalv ligger dess epicenter med all sannolikhet inte inbäddad i slutförvaret.

Enligt SSM:s bedömning berör SKB:s argumentation i frågan om termiska skalv inte nedanstående punkter:

- Enligt SSM:s oberoende modelleringar föreligger det en potentiell risk att termiskt inducerade skjuvrörelser i slutförvaret inträffar pga. värmebidraget från kapslarna. Uppvärmningen är ett deterministiskt faktum och därmed har termiskt inducerade skjuvrörelser i slutförvaret en högre förekomstsannolikhet jämfört med övriga nutida tektoniska eller post-glaciala skalv.
- SKB kvantifierar inte magnituden för ett termiskt inducerat skalv i Forsmark. Enligt SSM:s oberoende modellering bör det handla om magnituder mycket mindre än en magnitud på 5,5 (SSM Technical Note 2014:59; SSM Technical Note 2016:23). Ett skalv med magnitud 5,5 på zon ZFMA2 kan ge upphov till skjuvrörelser större än 50 mm på ett avstånd längre än 100 m från epicentret enligt SSM:s oberoende modellering (SSM Technical Note 2014:59). Antalet sprickor som rör sig med mer än 50 mm minskar dock med avståndet från zonen. Detta diskuteras vidare i avsnitt 4.13 i denna rapport.

SSM:s oberoende modelleringar visar även att potentialen för propagering av zon ZFMA2 på grund av uppvärmningen är minimal (SSM Technical Note 2014:58) bland annat med anledning av att den redan terminerar mot andra befintliga deformationszoner såsom ZFMA8, ZFMA1 och ZFMA3 i den sydöstliga delen av Forsmarkslinsen.

4.4.6 Övriga bergmekaniska effekter under den termiska fasen

Övriga relevanta bergmekaniska effekter under den termiska fasen är slutförvaret som storskaligt svaghetsplan, hävning av markytan, krypning i bergmatrisen, spricktillväxt samt tidsrelaterade deformationer.

4.4.6.1 Underlag från SKB

SKB redovisar att den maximala hävningen av markytan förekommer 1 000 år efter kapseldeponeringen och blir ca 75 mm (SKB TR-10-23, avsnitt 6.7). Efter ca 10 000 år kommer hävningen att ligga runt 30 mm (SKB TR-10-23, avsnitt 6.9.2).



SKB har i omfattande analyser tagit hänsyn till fall då slutförvaret skulle uppträda som svaghetsplan. För de första 1000 åren efter förslutning gäller följande fall:

- Bergspänningarna runt om uppförda deponeringstunnlar och deponeringshål orsakar spänningstillskott men i vissa fall även avlastningar som resulterar i dragspänningar. Dragspänningar uppkommer dock endast lokalt runt om bergutrymmena och deras effekt avtar inom ett avstånd på högst en tunneldiameter från bergväggarna. Detta lämnar huvuddelen av bergpelaren på ca 40 m mellan deponeringstunnlarna opåverkad (SKB TR-10-36, avsnitt 1.2.1). Även bergvolymerna där spjälkning samt skadezonen förekommer är av försumbar utsträckning i jämförelse med storleken på bergpelaren mellan deponeringstunnlar.
- Uppvärmningen av slutförvaret orsakar spänningstillskott men även spänningsavlastning beroende på områdets placering i slutförvaret (SKB TR-10-23, figur 6-16). I inget fall understiger den vertikala spänningen vid slutförvarsdjup ca 8 MPa, vilket ger en effektiv spänning på minst 2 MPa. Denna information kan kombineras med SKB:s analys av en horisontell spricka placerad 3 m under deponeringstunnelns sula (SKB TR-10-23, figur 8-15). Under uppvärmningen och fram till den första glaciationscykeln överstiger den effektiva normalspänningen (dvs. vertikalspänningen) ca 5 MPa över hela sprickplanet och av detta skäl kan inte sprickpropagering i drag förekomma i stor skala inom slutförvaret.
- Uppvärmningen av slutförvaret orsakar ett skjuvspänningstillskott på ett sprickplan i bergmassan som beror på sprickans placering och orientering i förhållande till slutförvaret. Emellertid har horisontella sprickor inom deponeringsområdet mycket stabila förhållanden (SKB TR-10-23, figur 6-26). Mindre gynnsamma, men fortfarande stabila, förhållanden gäller för horisontella sprickor utanför deponeringsområdet (SKB TR-10-23, figur 6-25). Av dessa skäl kan inte sprickpropagering i skjuvning förekomma i stor skala inom slutförvaret (avsnitt 4.4.4 avseende ”shear drop” i denna rapport).
- Utveckling av svälltryck i bufferten och återfyllnaden leder till ett stabiliserande maximalt tryck på ca 14 MPa och 0,5 MPa i deponeringshålets respektive deponeringstunnelns väggar. Dessa maximala svälltryck understiger med marginal den minsta huvudspänningen som kommer att verka på deponeringstunneln och deponeringshålet. De bör därför ge upphov till en stabiliserande effekt även under uppvärmning (SKB TR-09-35) och i vissa fall medföra lokala dragspänningar runt deponeringstunneln som inte kan påverka slutförvaret som helhet (SKB TR-10-23).

SKB förutsätter att spricktillväxt samt tidsberoende effekter inte behöver beaktas vid analysen av bergmassans utveckling (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.5). Som motivering anges att det finns en tröskel för långsiktig hållfasthet i bergmatrisen på i storleksordning minst 40 % av den exakta tryckhållfastheten hos det intakta berget och som snabbt ökar med ökande avgränsande tryck (Damjanac och Fairhurst, 2010).

Kryp i bergmatrisen behandlas inte i SKB:s säkerhetsanalys.

4.4.6.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att storleksordningen för hävningen av markytan under den termiska fasen är rimlig och bör inte ha några konsekvenser för den långsiktiga säkerheten av slutförvaret (SSM Technical Note 2015:01).

SSM har med oberoende beräkningar analyserat resultaten från SKB:s redovisning kring frågeställningen med slutförvaret som svaghetsplan under den termiska fasen. SSM drar följande slutsatser:

- Bergspänningskoncentrationer runtom deponeringstunnlarna och deponeringshålerna har utvärderats genom: (i) kopplade termo-mekaniska analyser av deformationer för att studera bergskadезonen (SSM Technical Note 2013:35); (ii) analyser för att studera spjälkning (SSM Technical Note 2014:10); (iii) analyser för att studera spricknätverkets utveckling (SSM Rapport 2011:26; SSM Technical Note 2013:37; SSM Technical Note 2015:30). Resultaten från analyserna vilka avser flera uppsättningar av bergspänningstillstånd och materialegenskaper överensstämmer med SKB:s slutsats, nämligen att bergspänningskoncentrationerna i bergmassan är ett lokalt fenomen.
- Oberoende simuleringar av slutförvarets storskaliga uppvärmning (SSM Rapport 2009:08; SSM Technical Note 2014:58) visar god överensstämmelse med SKB:s resultat för olika uppsättningar av bergspänningstillstånd och materialegenskaper. Detta tyder på att förhållandena inte kan leda till uppkomst av en dragspricka genom hela slutförvaret under uppvärmningen.
- Oberoende simuleringar visar också att ett horisontellt sprickplan genom slutförvaret är stabilt även med hänsyn till skjuvbelastning och att skjuvspänningstillskott på sprickplanet är som mest ca 2 MPa (SSM Rapport 2009:08, SSM Technical Note 2014:58).
- Utveckling av svälltryck i deponeringshålerna har beräknats i SSM Rapport 2011:26. Under uppförande, drift samt termisk fas förväntas, i överensstämmelse med SKB:s redovisning, inga påtagliga ändringar i spricknätverket även vid fullt utvecklat buffertsvälltryck.

SSM instämmer med SKB, baserat på slutsatserna i ovanstående punktlista, att förvaret inte kan utgöra ett svaghetsplan under den termiska fasen.

Angående spricktillväxt och sammanlänkning av befintliga sprickor (SKB TR-10-23, avsnitt 3.2) hänvisar SKB till en undersökning av Damjanac och Fairhurst (2010) där författarna visar att avgränsande tryckspänningar förhindrar tidsberoende degradering av hållfasthet som kan leda till brott av bergmatrisen och tillväxt av befintliga sprickspetsar. Studien av Damjanac och Fairhurst (2010) gäller dragförhållanden (Mode I) men inte skjuvförhållanden (Mode II och III).

SSM:s oberoende experter menar att spricktillväxten av en redan existerande diskontinuitet (mikrospricka, spricka, spricknätverk) också kan ske under skjuvningsförhållanden (Mode II och III) som inte kräver en initiering med dragspänningar vid sprickspetsen (SSM Technical Note 2012:51; SSM Technical Note 2012:52). Teoretiska studier samt experimentella mekaniska testresultat (Backers, 2005) och akustisk emission testresultat (Zang, m.fl. 2000) visar att tillväxten av dragsprickor gynnas av lågt avgränsande tryck som vid spjälkning av intakt bergmatris. Samma studier visar att vid högt avgränsande tryck, som förväntas i deponeringshålens närområde under den termiska fasen samt under en glacial cykel, är skjuvning den dominerande mekanismen för spricktillväxt (SSM Rapport 2011:26).

Kryp i bergmatrisen är i allmänhet en tidsberoende deformation som kan kopplas till olika mekanismer som dislokationer och nybildning av korngränser i kristallstrukturen, migreringen av kristalldefekter och tidsberoende mikrospricktillväxt. Däremot är tidsberoende spricktillväxt, så kallad ”underkritisk” spricktillväxt, en långsam propagering av en makroskopisk spricka under konstanta belastningar. Denna hydro-kemiska process har visat sig förekomma i Mode I, II och III (Atkinson, 1984; Backers m.fl, 2006; Ko och Kemeny, 2011). Studien av Ko och Kemeny (2011) har visat att det finns en tidskonstant i

den så kallade ”Charles’ lag” som reglerar förhållandet mellan hastigheten för spricktillväxt och brottseghet hos ett material. Tidskonstanten är en inre materialparameter, oberoende av mekanismen för sprickbildning (Mode I, II eller III). Därför är tidsberoende av degradering av hållfasthet vid sprickspetsen, även kallad ”spänningskorrosion”, oberoende av belastningstypen.

SSM bedömer att kryp i bergmatrisen kan förväntas vara obetydlig för den mekaniska samt hydrauliska utvecklingen av slutförvaret trots de väldigt långa tidsförloppen. Det är endast under en relativt kort tidsperiod i slutförvarets utveckling som buffertens svälltryck inte stabiliserar deponeringshålen.

Beträffande tidsrelaterad utveckling av spricknätverket anser SSM att SKB behöver visa att realistiska spricknätverk i Forsmark med beaktande av slutförvarets förväntade lastutveckling inte utvecklas avsevärt med tiden. SSM bedömer att SKB inför kommande steg i sitt program behöver ta fram redovisning som visar att preliminära ovan redovisade slutsatser avseende tidsrelaterad utveckling av spricknätverk är korrekta och att denna fråga inte är kritisk för slutförvarets långsiktiga säkerhet.

4.5 Hydrogeologisk utveckling

I detta avsnitt behandlas SKB:s hydrogeologiska utredningar och modelleringar för slutförvarets uppförande-, drifts- och återmättnadsfas. Återmättnadstiderna är inte med säkerhet kända och varierar troligen starkt inom slutförvarsanläggningen. Vissa förvarsdelar kan förväntas vara återmättade innan 100 år efter förslutning medan andra delar kan förväntas vara återmättade först efter 1 000 år. I detta avsnitt behandlas endast flödesförhållanden under återmättnaden eftersom SSM bedömer att denna utveckling har störst betydelse för slutförvarets hydrogeologiska utveckling under de första 1 000 åren. För att få en fullständig bild av utvecklingen under denna tidsperiod behöver dock även de hydrogeologiska betingelserna under mättade förhållanden beaktas, vilket redovisas i avsnitt 5.4 i denna granskningsrapport.

De hydrogeologiska betingelserna och dess utveckling under uppförande-, drifts- och återmättnadsfasen kopplar både till driftstekniska frågor och till de tekniska barriärernas tidiga utveckling. Sammanhängande områden med omättade förhållanden möjliggör gasflöden vilket kan påverka kapselkorrosion (se avsnitt 4.10). Inflöden till deponeringshålen kan i vissa fall leda till kanalbildningserosion i bufferten. Den hydrogeologiska utvecklingen är också tätt kopplad till den hydrokemiska utvecklingen. Flödena är särskilt betydelsefulla för den rumsliga fördelningen av i huvudsak icke-reaktiva lösta ämnen som klorid- och natriumjoner. För låga eller för höga salthalter kan inverka negativt på bufferten och återfyllnadens förmåga att upprätthålla ett flertal säkerhetsfunktioner (SR-site huvudrapporten figur 8-2: Buff1, Buff2, Buff5, Bf1; figur 8-3: Buff1, Buff5, Buff7, BF2a, BF2b.). Flödet och F-värdena styr till viss del även den rumsliga fördelningen av i vattnet lösta reaktiva ämnen som påverkar säkerhetsfunktionen tillhandahålla kemiskt gynnsamma förhållanden (SKB TR-11-01; figur 8-2: R1a-f; figur 8-3: R1a-e). Denna säkerhetsfunktion är i sin tur kopplad till kapselns säkerhetsfunktion Can1 att utgöra en korrosionsbarriär. Så länge en tunnel inte är återmättad flödar vatten mot tunneln och uttransport av lösta ämnen från tunneln till biosfären är inte möjlig. Därför är säkerhetsfunktionerna R2 a) och b) av mindre betydelse för tiden innan mättade förhållanden har uppnåtts. R2 a) och b) anger att transportmotståndet, uttryckt som F-värdet, i sprickor ska vara högt och att den ekvivalenta flödes hastigheten Q_{eq} i gränssytan mellan buffert och berg ska vara lågt (SR-Site huvudrapport figur 8-2 och 8-3). Slutligen kopplar inflöden under driftsfasen till kriterier för val av deponeringshål.

4.5.1 Underlag från SKB

SKB:s redovisning av de hydrogeologiska betingelserna under uppförande-, drifts- och återmättnadsfasen behandlas kortfattat i SR-Site (SKB TR-11-01, avsnitt 10.2.3). Denna redovisning är till största delen en sammanfattning av SKB:s modelleringsarbete inom området (SKB R-09-19). Även i SKB R-09-22 ges en sammanfattning av R-09-19 och dessutom en redogörelse för hur modelleringarna under uppförande-, drifts- och återmättnadsfasen kopplar till modelleringar avseende tiden efter slutförvarets återmättnad. SKB redovisar även preliminära beräkningar av vatteninflöde till ett slutförvar (SKB R-06-102) och beräkningar avseende inflödet till ett öppet förvar (SKB R-10-18, SKB R-08-121). SKB har på SSM:s begäran tillfört ansökan flera förtydliganden och kompletteringar:

- klarlägganden avseende hydromodellering i SKB R-09-19 och SKB R-09-20, SKBdoc 1319608
- svar på ytterligare frågor avseende SKB R-09-19 och SKB R-09-20, SKBdoc 1372883
- svar till SSM på begäran om komplettering rörande konstruktionsförutsättning ”inflöde till deponeringshåll mindre än 150 kubikmeter” SKBdoc 1434717.

I SKBdoc 1434717 refereras till SKB R-13-21 som redovisar beräkningar av inflöden till slutförvaret med en upplösning ned till enskilda deponeringshåll.

SKB använder samma konceptuella hydrogeologiska modell som i den platsbeskrivande modellen (avsnitt 3.1.5 i denna rapport; SKB TR-08-05, avsnitt 8.1.1). För beräkningarna under uppförande- och driftsperioden har SKB valt att presentera denna modell baserad på konceptet ekvivalent kontinuum poröst medium ECPM (”Equivalent Continuum Porous Medium”, SKB R-09-19). Modellen utgår från hydro-DFN-data som skalats upp för att representera ett kontinuerligt poröst medium med hydrauliska egenskaper som ska vara ekvivalenta med de för hydro-DFN-modellen. För beräkningar av inflödeskriterier har även en vidareutvecklad modellversion tillämpats i vilken celler i modellen utan flöde tagits bort; den så kallade ekvivalenta diskontinuerliga modellen EDPM (”Equivalent Discontinuous Porous Medium”, SKB R-09-19 appendix E). Både dessa modeller har implementerats i beräkningsverktyget DarcyTools (SKB R-10-72).

SKB har även genomfört hydrogeologiska beräkningar för slutförvarets uppförande- och driftsfas med modelleringsverktyget MIKE-SHE (SKB R-08-121, SKB R-10-18). Dessa beräkningar syftar främst till att undersöka effekter på det ytnära systemet och kopplar till frågor om vattenverksamhet och miljökonsekvensbeskrivningen. Beräkningarna ger även siffror på inflöden till förvaret. SKB har slutligen genomfört beräkningar för ett öppet förvar med beräkningsverktyget Connectflow som tar hänsyn till flöden i enskilda deponeringshållspositioner och i ett högupplöst spricknätverk kring förvaret (SKB R-13-21).

Den matematiska modellen i DarcyTools har parametriserats med data från den platsbeskrivande modellen (avsnitt 3.1.5 i denna rapport) samt med information om slutförvarets geometri (SKB R-08-116). Rent tekniskt har data överförts från Connectflow-modellen för den tempererade fasen (avsnitt 5.4.1 i denna rapport). Utöver dessa data har de hydrauliska egenskaperna som redovisas i SKB R-09-19 (tabell 4-1) erhållits genom en kalibrering av modellen mot grundvattennivåerna i den ostörda modellen (SKB R-09-19, SKBdoc 1319608). De hydrauliska egenskaperna för jordlagren HSD (”Hydraulic Soil Domain”) har beskrivits i SKB R-09-19 (tabell 2-5). SKB har även beaktat olika nivåer för tunnelinjekteringens effektivitet. Hydrauliska egenskaper för återfyllnadsmaterial antas motsvara Friedlanderans. SKB:s modell baserad på Connectflow för det öppna förvaret tillämpar samma parametrisering som motsvarande



modell för den tempererade fasen (avsnitt 5.4.1 i denna rapport) bortsett från de delar av tunnlarna som är öppna.

För SKB:s modellering av uppförande- och driftsfasen med DarcyTools tillämpas fasta randvillkor för salthalt och tryck på modellens sidor. Värdena för dessa randvillkor härleds från en modellering som beaktar tiden 8000 f.Kr. till 2000 e.Kr. och som förutsätter att modellens sidor är täta med hänsyn till flöde och saltdiffusion. Definition av parametervärden för initialvillkoren vid 8000 f. Kr. har baserats på information i SKB R-08-95 (figur 2-11, tabell 2-3). Östersjöns strandlinje och salthalt antas variera under denna tid enligt SKB R-09-19 (figur 4-6). På modellens övre rand antas en given nettonederbörd på 130 mm/år för landområden. SKB förutsätter vidare en tät botten med en fastlagd salthalt på ca 3 eller 5 procent beroende på läge (SKB R-09-19). SKB beräknar med hjälp av DarcyTools inflöden till det öppna slutförvaret; avsänkningen av grundvattenytan, hydrokemisk utveckling kring slutförvaret, uppträngning av salta grundvatten till slutförvaret, flödesvägar och flödestider till förvaret. Alla dessa analyser har utförts för olika uppförandeskedan och för olika nivåer av injekteringens effektivitet. Därutöver undersöker SKB effekten av olika hydrauliska kriterier för val av deponeringshålspositioner. Slutligen beräknar SKB återmättnadstider för återfyllnaden (SKB R-09-19).

Med Connectflow beräknas inflöden till deponeringshål och deponeringstunnlar (SKB R-13-21). SKB har också genomfört beräkningar för att utvärdera graden av korrelation mellan inflöden till ett öppet förvar och Darcyflöden i ett förslutet förvar. SKB beräknar slutligen effekterna av olika hydrauliska kriterier för val av deponeringshål på olika hydrogeologiska prestandamått.

SKB har jämfört resultaten från inflödesberäkningarna med mätningar av inflöden i befintliga anläggningar (SKB R-10-14) och resultaten visar att resultat från inflödesberäkningar är i rimlig grad överensstämmande med mätningar. Resultaten av beräkningarna för uppförande och återmättnadsfasen används inom ett antal olika områden inom säkerhetsanalysen SR-Site (avsnitt 10.2.3), till exempel:

- Som underlag till kriterier för val av deponeringshål med avseende på kanalbildningserosion under omättade förhållanden (SKB TR-11-01, avsnitt 15.5.13; SKBdoc 1434717; SKB R-13-21; SKB TR-09-22; SKB TR-10-18, tabell 2-1, tabell 2-2).
- Som underlag för att bedöma effekten av inflödeskriterier till deponeringshål avseende buffererosion under mättade förhållanden (SKB TR-11-01, avsnitt 14.3; SKB R-09-19, avsnitt 7.1; SKB R-13-21, avsnitt 3.4). Syftet med detta är att så långt som möjligt undvika buffererosion och därmed att optimera slutförvaret.
- För projekteringen av slutförvaret och bedömning av effekten av injekteringsåtgärder.

Beräkningarna av förändringarna i hydrokemi under uppförande- och driftsfasen används för att:

- utvärdera risken för att uppträngning av mycket salt vatten från stora djup kan förväntas leda till salthalter som är problematiska för återfyllningens svällförmåga (SKB TR-11-01, avsnitt 10.2.5)
- bedöma förändringar i de hydrokemiska betingelserna på förvarsdjup under uppförandefasen och att underbygga slutsatsen att betingelserna efter en tid förväntas återgå till de som rådde innan slutförvaret uppförts.

Resultaten från återmättnadsberäkningarna används för att underbygga slutsatsen att återmättnadsfasen endast är en liten del av den tempererade fasen. SKB baserar därför modelleringen av den tempererade fasen i huvudsak på att mättade förhållanden råder

(SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.6; SKB R-09-19). Resultaten är även ett underlag till motivering av inflödeskriterier för att undvika kanalbildningserosion (SKBdoc 1434717). Resultaten för avsänkning av grundvattenytan används som utgångspunkt för olika analyser av påverkan på ekologin och miljön vid markytan, vilka utgör underlagsmaterial för SKB:s ansökan enligt miljöbalken. Dessa resultat har dock liten betydelse för SSM:s bedömning av slutförvarets långsiktiga säkerhet.

SKB har särskilt gått igenom viktiga antaganden, förenklingar och osäkerheter som kopplar till den hydrogeologiska modelleringen för uppförande- och driftsfasen (SKB R-09-22, avsnitt 4.5). Ett resultat av denna genomgång är att SKB argumenterar för att modellerade salthaltsförändringar sannolikt är överskattade. SKB anser därutöver att inflödesberäkningarna med ECPM-modellen troligtvis överskattar det totala inflödet. SKB anser vidare att tidsskalan för återmättnaden av buffert och återfyllnad som redovisas i SKB R-09-19 troligen är överskattad (SKB R-09-22, avsnitt 5.5).

4.5.1.1 SSM:s bedömning

SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s redovisning av den hydrogeologiska utvecklingen under uppförande-, drifts- och återmättnadsfasen bygger på väl utförda utredningar. SSM bedömer att redovisningen generellt sett är av ändamålsenlig kvalitet och att resultaten ger rimligt tillförlitliga underlag för analyser för efterföljande steg i säkerhetsanalysen. SSM anser dock att SKB inför kommande steg i sitt program ytterligare bör utreda risken för uppträngning av salta vatten från stora djup under uppförande- och driftsfasen. SSM bedömer även att SKB i mer detalj behöver utreda de höga inflödena som vissa stokastiska realiseringar av spricknätverksgeometrin pekar på. I den mån sådana flöden anses vara realistiska behöver det säkerställas att de kan hanteras under uppförande- och driftsfasen. SKB behöver även beakta huruvida mätnoggrannheten för PFL-metoden inverkar på bedömningen av kanalbildningserosion (avsnitt 3.1.5.2 i denna rapport).

SSM har förutom SKB:s arbeten beaktat resultat från SSM:s externa experter som har genomfört utredningar kring avgränsade hydrogeologiska frågor. Dessa rapporter lägger störst vikt på beräkningarna med Connectflow (SSM Technical Note 2012:37, SSM Technical Note 2012:41, SSM Technical Note 2012:67, SSM Technical Note 2014:05, SSM Technical Note 2015:40) som har tagits fram för den platsbeskrivande modelleringen (avsnitt 3.1.5.2) och den tempererade fasen. SSM:s utredningar innehåller expertbedömningar som ligger till grund för parametrering av modellerna för uppförande- och driftsfasen, men SSM har dock inte genomfört några externa granskningar som enbart fokuserar på modelleringen av ett öppet förvar. SSM bedömer att SKB har undersökt de viktigaste hydrogeologiska aspekterna under uppförande- och driftsfasen, dvs. inflöden till slutförvaret, återmättnadstider, avsänkningen av grundvattenytan, hydrogeologins påverkan på hydrokemin, inflödesområden, effekten av injekteringsåtgärder och hydrauliska urvalskriterier för deponeringshål. SKB:s redovisning bedöms hålla en god vetenskaplig standard och är av förväntad omfattning och detaljeringsgrad. SKB:s resultat har i viss utsträckning blivit publicerade i vetenskapliga tidskrifter (t.ex. Selroos och Follin, 2014). SSM har låtit en extern expert granska SKB:s kvalitetssäkring av den hydrogeologiska modelleringen inklusive SKB:s beräkningar för uppförande- och driftsfasen (SSM Technical Note 2014:46). SKB:s rutiner för kvalitetssäkring av den hydrogeologiska modelleringen bedömdes vara lämpliga för ändamålet. Den externa experten bedömer dock att även om SKB:s dokumenthanteringssystem medför en rimlig spårbarhet, så kan transparensen i SKB:s redovisning i underlaget för ansökan avsevärt förbättras, exempelvis genom att fortsättningsvis använda mer specifika referenser för att underlätta kommande granskningar. SSM delar denna syn och att anser att SKB behöver identifiera åtgärder för att underlätta för en extern läsare att hitta rätt i SKB:s omfattande redovisning (SKB:s



generella kvalitetssäkringssystem kommenteras i avsnitt 2.5; SKB:s hantering av data och modeller kommenteras i avsnitt 2.4).

Analys av återmättnadstider och inflöden till förvaret har utförts av två respektive tre olika grupper. SSM anser att de likartade resultaten från olika modelleringsgrupper pekar på att modellerna numeriskt är tillförlitliga och att betydande fel i beräkningsresultaten pga. den mänskliga faktorn vid hanteringen av modeller och data är mindre sannolika. SKB baserar modellernas konceptualisering och parametrisering på den platsbeskrivande modellen och de modeller som har använts för att beskriva den långsiktiga hydrogeologiska utvecklingen kring slutförvaret. Därmed påverkar de osäkerheter som SSM har bedömt vara betydelsefulla för den platsbeskrivande modellen även modellerna för uppförande- och driftfaserna. SSM bedömer att framförallt osäkerheter avseende spricknätverkets geometri kan påverka förutsägelser av inflöden till det öppna förvaret. Enligt SSM:s uppfattning behöver SKB ägna fortsatt uppmärksamhet åt fördelning av grundvattenflöden samt antal och rumslig fördelning av inflödespunkter. SSM bedömer vidare att frågorna kring PFL-metodens mätnoggrannhet och förutsägelser av små inflöden som kan leda till kanalbildningserosion i bufferten också behöver belysas ytterligare av SKB.

SKB har genomfört analysen av inflöden till slutförvarsanläggningen med tre separata modelleringsverktyg (SKB R-09-19, SKB R-08-121, SKB R-13-21). En godtagbar överensstämmelse mellan resultaten stärker enligt SSM:s bedömning resultatets tillförlitlighet, och angreppssättet att parallellt arbeta med fler än en modelleringsgrupp och/eller modelleringskod gör det lättare att upptäcka fel i utförandet. SSM noterar dock att alla modeller har baserats på samma spricknätverksgeometrier vilket betyder att osäkerheter kopplade till dessa geometrier påverkar samtliga modelleringar. SKB:s jämförelse av beräknade inflöden och inflödesdata från befintliga anläggningar (SKB R-10-14, avsnitt 5.2.3) talar dock för att SKB:s beräkningsresultat är rimliga.

Sammantaget bedömer SSM att modelleringen generellt sett kan anses tillförlitlig givet ooundvikliga begränsningar för den hydrogeologiska modelleringen. SSM noterar dock att några av de stokastiska realiseringarna (SKB R-13-21) ger ungefär 50 gånger större inflöden till slutförvarsanläggningen än de andra realiseringarna. Dessa realiseringar har vare sig skalats upp eller implementerats i beräkningar med DarcyTools eller MIKE-SHE. SKB har inte heller diskuterat hur realistiska resultaten från de avvikande realiseringarna bedöms vara. SSM anser att detta är en svaghet i redovisningen. SSM har svårt att bedöma om dessa höga inflöden är en modellartefakt som härrör från en osäker konceptuell spricknätverksmodell och en kalibrering mot få inflödespunkter i kärnborrhålen vid förvaringsdjup (se SSM:s bedömningar i avsnitt 3.1.5.2) eller om sådana inflöden kan förväntas uppstå i slutförvarsanläggningen. SSM noterar att SKB:s konsulter rekommenderar att hydrauliska tester i pilot- och sonderingshål bör vägas in i observationsmetodens procedurer (SKB R-13-21, avsnitt 6.4). SSM anser att SKB behöver följa denna rekommendation och att SKB behöver försäkra sig om att sådana eventuellt förekommande inflöden kan hanteras i anläggningsutförandet så att de inte negativt påverkar slutförvarets säkerhet under drift och på lång sikt.

När kapslar har deponerats kommer temperaturen i berget stiga på grund av det använda kärnbränslets resteffekt (se även avsnitt 4.1 i denna rapport). Förhöjd temperatur leder till att vattnets viskositet minskar, uppskattningsvis med upp till en faktor två (SKB R-06-98). Samtidigt uppstår spänningar i berget som kan påverka sprickgeometrier och därmed transmissiviteten (SKB TR-10-23; SSM Technical Note 2013:37). I SKB TR-10-23 förutsägs en ökning av transmissiviteten med ungefär två storleksordningar upp till 2 m från förvaret. SSM:s oberoende beräkningar ger liknande värden dock med ett större påverkansområde på ca 10 m (SSM Technical Note 2013:37). SSM:s experter är vidare av uppfattningen av skillnader i transmissivitet pga. bergets uppvärmning kommer att bestå även när uppvärmningen avtar. SSM bedömer dock att dessa transmissivitetökningar inte bör vara betydelsefulla för beräkningarna av det totala inflödet till anläggningen eller

flödet under tempererade fasen eftersom förändringarna endast kan förväntas uppstå lokalt. I vissa speciella fall, som exempelvis för en tät förhållandevis liten spricka som ansluter direkt till en betydligt mer transmissiv spricka, skulle dock det lokala inflödet kunna påverkas betydligt. Kanalbildningserosionen skulle då kunna påverkas i deponeringshål som skärs av en sådan spricka. I konventionella berganläggningar som inte är uppvärmda tenderar den motsatta effekten dominera, dvs. att inflödet minskar över tid (Gustafson, 2009). Sammantaget bedömer SSM att uppvärmningen kan leda till ökade inflöden lokalt, men att effekterna på säkerhetsanalysberäkningarna är relativt små. Denna slutsats överensstämmer med SKB:s bedömning (SKB TR-10-48, tabell 3-1).

En bergmekanisk effekt som kan kopplas till förhöjda temperatur i berget är uppkomst av dragspänningar i vissa riktningar ned till ca 200 m djup (avsnitt 4.4.2 i denna rapport; SSM Rapport 2009:08; SKB TR-10-23, avsnitt 6.6). De största spänningstillskotten kan förväntas direkt över mitten av slutförvarsanläggningen och de bör sedan avta i riktning mot projektionen av slutförvarets yttre ränder på markytan. För branta sprickor i vissa riktningar kan spänningstillskotten orsaka ökande aperturer och därmed ökande transmissivitet. SKB:s beräkningar pekar endast på relativt små förändringar i transmissiviteten (SKB TR-10-23, avsnitt 6.8.1). F-värdena i bergets översta 200 m kan samtidigt förväntas minska. SSM bedömer att en något ökad transmissivitet i sprickor i vissa riktningar i bergets översta 200 m direkt över förvaret inte bör ha någon stor betydelse för grundvattenflöden på förvarsdjup. Flödena på förvarsdjup begränsas av de relativt få sprickor som förekommer på dessa djup. F-värdena i översta delen av berget är även i nuvarande tillstånd relativt små och för vissa beräkningar bortser SKB från dem helt. SSM bedömer därför att bergets uppvärmning inte kan förväntas ha en stor påverkan på F-värden eller flödes hastigheter på förvarsdjup och effekten bör därför heller inte ha en stor betydelse för säkerhetsanalysberäkningarna.

SKB har låtit två grupper utföra beräkningar för att uppskatta återmättnadstider för slutförvaret (SKB R-09-19, SKB TR-10-11). Beräkningarna i SKB R-09-19 pekar på återmättnadstider på flera hundra år. Beräkningarna i SKB TR-10-11 däremot pekar på att återmättnadstiden för ett deponeringshål som inte skärs av sprickor kan vara upp till 2 000 år. I en komplettering till SSM har SKB även redovisat extrema fall med återmättnadstider på upp till 20 000 år eller mer för ett deponeringshål omgivet av berg med mycket låg hydraulisk konduktivitet i bergmatrisen (SKBdoc 1385067). SSM bedömer att det inte är uteslutet att vissa delar av slutförvaret fortfarande skulle kunna vara omättade efter de första 1 000 åren och för bufferten i extrema deponeringshålpositioner kanske även efter den inledande ca 10 000 år långa perioden av tempererade förhållanden. SSM konstaterar samtidigt att deponeringshålpositionerna som har störst betydelse i SKB:s säkerhetsanalys är de som skärs av vattenförande sprickor och som bör återmättnas förhållandevis snabbt. Ett i vissa delar av slutförvarsanläggningen mycket långsamt återmättnadsförlopp bör enligt SSM:s bedömning inte ha en väsentlig påverkan på det storskaliga flödet. Detta beror på att långsam återmättnad nödvändigtvis hänger ihop med sprickor som har mycket låg transmissivitet och därför ger mycket små inflöden till slutförvaret. SSM anser därför att SKB:s antagande om återmättnade förhållanden som grund för analysen av de hydrogeologiska förhållandena under den tempererade fasen är godtagbar. För den detaljerade analysen av buffert- och kapselutvecklingen kan dock deponeringshål med mycket långsam återmättnad ha särskilda betydelser. SSM:s bedömning av SKB:s modelleringar och argumentation kring konstruktionsförutsättningar för att undvika kanalbildningserosion och bufferterosion efter återmättnad av förvaret återges i avsnitt 3.2.5 i denna granskningsrapport.

Resultaten av SKB:s beräkningar av salthaltsutvecklingen (SKB R-09-19, figur 5-12) pekar på att det under förvarets drifttid inte kommer att tränga upp vatten som är så salt att det inverkar på de tekniska barriärernas tålighet. SSM noterar att salthalten på 5,3 procent vid modellområdets botten (SKB R-09-19, tabell 4-2; SKBdoc 1319608) är lägre

än den salthalt på 5,8 procent salthalt eller 1 M klorid som är satt som konstruktionsförutsättning (SKB TR-09-22, avsnitt 3.2). Därmed är det på förhand uteslutet att modellen skulle kunna ge salthalter på problematiska nivåer på förvarsdjup som 1,2 M NaCl eller 7 procent salthalt (SKB TR-09-22, avsnitt 3.2). SKB:s beräkningar visar på lägre salthalter kring slutförvaret inför förslutning än de som förekommer vid modelldomänens botten. Detta pekar på att inflödena till slutförvaret inte är så stora att vatten som kommer från ett djup som motsvarar modelldomänens når slutförvaret. Därför anser SSM att en djupare modelldomän med den givna parametreringen sannolikt inte skulle medföra någon betydande inverkan på resultaten.

SSM har låtit genomföra överslagsberäkningar med en förenklad modell för att undersöka frågan om uppträngning av mycket salta vatten till slutförvarsanläggningen (SSM Technical Note 2013:28). För en deformationszon som skär slutförvarsanläggningen och når ned till stora djup visar det sig att resultaten är känsliga för modellens parametrering inom de ramar som platsundersökningsdata pekar på. I rapporten presenteras bland annat modellerade fall som leder till uppträngning av mycket salta vatten till slutförvarsanläggningen under driftfasen, men även fall som inte leder till någon avsevärd förhöjning av salthalterna jämfört med dagens nivåer. Den modell som SSM har arbetat med har dock inte beaktat diffusivt utbyte av salt mellan sprickvattnet och bergmatrisen, vilket kan innebära att uppträngningen av salt har överskattats. SSM noterar att uppträngning av salta vatten i de sluttande deformationszonerna ansågs vara en av de resterande osäkerheterna i den platsbeskrivande modellen vid slutet av de inledande undersökningarna (SKB TR-08-05, avsnitt 8.2). SSM har dock inte funnit någon diskussion i den platsbeskrivande modellen om det utökade underlaget som tillkommit efter undersökningarnas initiala fas har förändrat SKB:s uppfattning i denna fråga. Frågan kring hur osäkerheter i de flacka zonernas parametrering har heller inte diskuterats av SKB i samband med salthaltsmodelleringen (SKB R-09-19).

SSM bedömer att SKB:s beräkningar som visar på en liten betydelse för frågan om uppträngning av mycket salta vatten till förvarsdjup under driftfasen sannolikt är en rimlig förutsägelse. SSM anser dock att SKB i kommande steg av sitt program antingen behöver försäkra sig ytterligare om att osäkerheter i deformationszonernas parametrering inte ändrar förutsägelserna om uppträngning av mycket salta vatten till slutförvaret, eller så behöver SKB försäkra sig om att mycket salta grundvatten kan hanteras med en lämplig anläggningsutformning. I samband med detta anser SSM att SKB behöver undersöka påverkan av antagandet av en djupberoende transmissivitet och antaganden om sprickaperturer i deformationszonerna.

4.6 Grundvattenkemisk utveckling

Området grundvattenkemi handlar om grundvattnets kemiska sammansättning samt kemiska processer som påverkar grundvattnets sammansättning. Generellt finns goda kunskaper inom området tack vare ett stort intresse för grundvattnets kvalitet men frågeställningar kopplade till slutförvarsproblematiken är speciella eftersom det är den kemiska sammansättningen av mycket djupa grundvatten som är mest betydelsefull för långsiktig säkerhet.

Två aspekter på grundvattenkemi som har bäring på den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar är dels grundvattenkemins påverkan på de tekniska barriärerna, dels grundvattenkemins påverkan på transport av radioaktiva ämnen när de tekniska barriärernas isolerande förmåga har brutits. I det första fallet är det grundvattnets utveckling på förvarsdjup, det vill säga ungefär 500 m djup, som har betydelse. Det andra fallet avser grundvattnets sammansättning längs hela strömbanan, dvs. från förvarsdjupet till markytan. Strömbanan inkluderar både förvarsnivån och ytligare djup men kan även i

vissa fall innefatta större djup under slutförvaret. För de första 1000 åren räknar dock inte SKB med några utsläpp av radioaktiva ämnen och detta avsnitt adresserar därför endast grundvattenkemiska förändringar kopplade till de tekniska barriärerna. SSM:s bedömning kring SKB:s redovisning av de tekniska barriärernas utveckling givet den förväntade grundvattenkemiska utvecklingen finns redovisad i andra delar av denna granskningsrapport (avsnitt 4.7.1 och 4.10.1). Förutom betydelsen för radionuklidtransport och betydelsen för tekniska barriärer ger kunskapen om koncentrationer av olika komponenter i grundvatten och grundvattenkemiska processer många ledtrådar som behövs för förståelsen kring den långsiktiga utvecklingen av grundvattenflöden och hur grundvattnet har blivit påverkat av tidigare glaciationscykler.

Den ytnära nivån som innefattar ytvatten, brunnsvatten samt grundvatten ner till några meters djup ingår i SKB:s redovisning i området biosfären och behandlas därför inte i detta avsnitt. Generellt finns betydande skillnader i geokemiska betingelser mellan ytvatten och ytnära grundvatten jämfört med djupare grundvatten så till vida att den senare typen av vatten så gott som alltid är kemisk reducerande vilket kännetecknas av en frånvaro av löst syre och ett innehåll av reducerande kemiska komponenter som sulfid eller järn(II). För kustnära förläggningar som Forsmarksplatsen tillkommer dessutom att grundvatten på stora djup har en förhållandevis hög jonstryka orsakad av tidigare episoder med nedträngning av havsvatten.

SSM sammanfattar under detta avsnitt SKB:s redovisning och SSM:s bedömningar kopplade till följande delområden:

- grundläggande förståelse av grundvattenkemisk karaktärisering och utveckling
- modellering och prediktion av utvecklingen av grundvattnets salthalt
- sulfidhalter i berggrunden
- sulfidhalter i anslutning till kopparkapslar.

4.6.1 Allmänt om grundvattenkemisk utveckling

4.6.1.1 Underlag från SKB

SKB:s platsundersökningsprogram har visat att den grundvattenkemiska situationen vid Forsmark generellt är ganska lik den vid andra platser i närheten av Östersjöns kust (SKB R-10-63). Det finns dock vissa skillnader som orsakas av berggrundens specifika karaktär. Grundvatten ner ett tiotal meter under markytan har meteoriskt ursprung och har blivit påverkat av vittringsprocesser och biologiska processer i jordlager och kvartära avlagringar. För att kunna förklara den kemiska sammansättningen av grundvatten på större djup har dock SKB tagit hänsyn till att vattnet består av en blandning av grundvattentyper med olika ursprung och ålder (SKB TR-10-58).

I den förhållandevis täta Forsmarkslinsen omgiven av berg med vattenförande sprickor och deformationszoner kan man förvänta sig betydande grundvattenkemisk variabilitet beroende på lokala transportförhållanden. Berggrunden vid Forsmark har en förhållandevis hög permeabilitet upp till ett djup av ungefär 200 m och i denna bergvolym finns en hög andel vatten med meteoriskt ursprung som trängt ner i berggrunden på senare tid. Resterande andelar består sannolikt till stor del av flera tusen år gammalt vatten av marint ursprung från den tid då Forsmarkplatsen låg under det då saltare Littorinahavet. På större djup än 200 m finns enligt SKB få vattenförande sprickor och utbytet med ytligare grundvatten är därför mycket mindre. Eftersom SKB har haft svårt att hitta lämpliga provpunkter för grundvattenprovtagning i denna del av berggrunden finns en ganska liten mängd data från dessa djup. SKB:s befintliga data visar dock att vattnet delvis består av en blandning av Littorina-vatten, omvandlat sentida meteoriskt vatten och vatten som trängt ner under avsmältningen av den sista inlandsisen s.k. glacialt smältvatten (SKB TR-08-

05). Andelen glacialt smältvatten är förmodligen mindre än för andra platser längs Östersjökusten pga. berggrundens låga sprickfrekvens (SKB TR-10-54). SKB har för att bättre förklara sina data från Forsmarkplatsen introducerat kategorin ”gammalt meteoriskt vatten” som sannolikt trängt ner i berggrunden innan den senaste istiden (SKB TR-08-05, avsnitt 9.3.2). På mycket stora djup finns få eller inga spår av glaciala, marina eller meteoriska vatten utan istället vatten med mycket hög salthalt och hög densitet. Eftersom SKB:s mätningar på Forsmarksplatsen som mest sträcker sig till ca 1000 m finns inga mätpunkter där denna typ av mycket salta vatten med icke-marint ursprung dominerar. Befintliga data från det största djupintervallet under ca 600 m indikerar att som mest ca 30 % av detta grundvatten har ett djupt ursprung som har trängt upp och blandats med vatten av annat ursprung. Data för grundvatten från mycket stora djup finns från andra platser t.ex. Laxemar i Oskarshamns kommun.

SKB:s säkerhetsfunktioner och s.k. funktionsindikatorer ger en vägledning om vilka grundvattenkemiska variabler som har störst betydelse för den långsiktiga säkerheten (SR-Site huvudrapport, avsnitt 8.3). Funktionsindikatorer för grundvattenkemiska variabler har dock med några få undantag inga fasta gränsvärden. Av stor betydelse för KBS-3-konceptets funktion är dock att grundvattnet är fritt från löst syre och har reducerande kemiska betingelser. Förekomst av löst sulfid och tvåvärt järn indikerar att grundvattnet är reducerande.

Av betydelse för barriärsystemets stabilitet är också att ämnen involverade i kapselkorrosionsprocesser (HS^- , H_2 , CH_4 , organiskt kol) ska finnas i begränsade mängder, samt att ämnen som kan vara involverade i degradering av montmorillonit i bufferten (K^+ , Fe) också finns i begränsade mängder (SR-Site huvudrapporten, avsnitt 8.3). För grundvattnets pH anges att $\text{pH} < 11$ vilket med god marginal är uppfyllt för naturliga grundvatten i Forsmark, men kriteriet relaterar till att utlakning från cement tillför hydroxidjoner som ger upphov till degradering av buffert och återfyllnad. pH bör inte heller vara lägre än 4 samtidigt som vattnets kloridhalt är högre än 2 M. Det sistnämnda kriteriet relaterar till kopparkorrosion och dessa förhållanden är normalt sett alltid uppfyllda för vad som kan betraktas som normala grundvattenförhållanden.

Under de första 1000 åren är följande tidsperioder relevanta för utvärderingen av slutförvarets långsiktiga säkerhet:

- förvarets uppförande- och driftfas
- den initiala tempererade fasen efter förvarets förslutning.

En sammanfattande bedömning av grundvattenkemi och formella avstämmningar av säkerhetsindikatorer relaterade till grundvattenkemi finns redovisad i SR-Site (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.2.7 och 10.3.16).

Efter uppförandet och driften av slutförvarsanläggningen kommer oxiderande betingelser kvarstå under en viss tid efter förslutningen som bl.a. medför en snabbare korrosion av kopparkapslar i jämförelse med efterföljande perioder med reducerande betingelser (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4). SKB anger att det föreligger betydande osäkerheter avseende grundvattnets salthalt eftersom de öppna förvarsförhållandena både kan medföra såväl inträngning av utspädda ytvatten som uppträngning (”upconing”) av mycket salta grundvatten från stora djup. SKB räknar dock att salthalten ändå håller sig i ett intervall som är gynnsamt för buffert och återfyllnad (SKB TR-10-58). Verksamheten under uppförande- och driftskedet kan innebära mera omfattande och snabbare geokemiska processer än för tiden efter förslutning beroende på den stora avvikelserna från betingelser i det opåverkade berget. Exempel på geokemiska processer som kan förekomma är utfällningsreaktioner, bildning av kolloider, mikrobiell omsättning av organiskt material och lakningsprocesser i cementmaterial. SKB har inte tagit fram en särskild modell för



den grundvattenkemiska utvecklingen i samband med drift av förvaret, men frågan diskuteras i allmänna ordalag i SKB:s redovisning (SKB TR-10-58, kapitel 5). SKB har inte heller gjort någon formell avstämning av uppfyllelse av säkerhetsfunktionsindikatorer relaterade till grundvattenkemi för denna fas i förvarets utveckling, men det är ändå uppenbart att vissa indikatorer inte kommer att vara helt uppfyllda så som kravet på reducerande betingelser. SKB har i sin analys i olika sammanhang gränssatt effekten och den förväntas inte medföra någon avgörande påverkan på den långsiktiga säkerheten med tanke på den begränsade tiden för öppethållande av deponeringstunnlar.

SKB har utvecklad en modell för att kvantifiera den gradvisa utvecklingen av olika komponenter i grundvatten under tusentals år med en metod som inkluderar grundvattenflöde, blandningsförhållanden mellan olika typvatten samt iterationer av en geokemisk jämviktsmodell som hanterar jämvikt med ett begränsat antal reaktiva mineraler i berggrunden (SKB TR-10-58). Baserat på modelleringsresultat räknar SKB med att reducerande betingelser uppstår en kort tid efter slutlig förslutning av förvaret och att redoxpotentialen Eh därefter fortsätter vara oförändrat under den första delen av den tempererade fasen. Ingen förändring förväntas förrän efter flera tusen år och då sker en mindre höjning av redoxpotentialen (SKB TR-10-58). Tätningen av sprickor i berget med cementmaterial bedöms medföra en höjning av pH-värdet till ca pH 9 för grundvatten i deformationszoner.

På begäran av SSM har SKB tagit fram kompletterande information enligt nedan:

- SKBdoc 1396703. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande långsiktig utveckling av grundvattenkemi på förvarsdjup.
- SKBdoc 1344208. Svar till SSM på begäran om förtydligande information avseende grundvattenkemi och termodynamiska data.
- SKBdoc 1437441. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande grundvattenkemi på kort och medellång sikt.
- SKBdoc 1476865. Svar till SSM på begäran om förtydligande avseende svar på tidigare begäran om komplettering rörande grundvattenkemi på kort och medellång sikt.

Dessa kompletteringar avser databas för termodynamiska beräkningar, jämförelse mellan modellerade och uppmätta grundvattenkemiska parametrar, osäkerheter kopplade till uteslutna processer och uteslutna komponenter i grundvattnet, osäkerhet kopplad till typvattensammansättningar, betydelsen av mikrobiell sulfatreduktion med organiskt upplöst material, syreinträngning via tunnelplugg och/eller bergväggar, samt påverkan från diffusion av gasformiga korroderande ämnen.

4.6.1.2 SSM:s bedömning

Enligt SSM:s bedömning har SKB genomfört en omfattande geokemisk karaktärisering av Forsmarksplatsen baserat både på grundvattenkemisk sammansättning och på mineralogisk karaktärisering som sammantaget ger ett godtagbart underlag för analysen av den långsiktiga geokemiska utvecklingen. Om det blir aktuellt med en konstruktionsfas behöver dock SKB fullt ut utnyttja möjligheten att verifiera kunskapen om grundvattenkemiska betingelser vid Forsmark med hjälp av ett omfattande nytt mätprogram. SKB behöver ta fram ett nytt underlag för att förfina beskrivningen av den långsiktiga grundvattenkemiska utvecklingen för ett slutförvar vid Forsmark.

SSM har tidigare främst genom den s.k. INSITE-gruppen granskat SKB:s platsundersökningsresultat som ligger till grund för samtliga utredningar med koppling till grundvattenkemi (SSM rapport 2010:30). En sammanhållen redovisning av SKB:s bedömningar kring nuvarande grundvattenkemiska betingelser finns i den platsbeskrivande modellen för Forsmark (SKB TR-08-05). SSM:s redan avrapporterade



granskningar med hjälp av externa experter har innefattat bedömningar av t.ex. identifiering av viktiga grundvattenkemiska parametrar, grundvattenkemisk provtagning och genomförande av kemiska analyser, samt tolkning av grundvattenkemiska data inom ramen för SKB:s platsbeskrivande modell för Forsmark (t.ex. SKI-INSITE TRD-06-01; SKI-INSITE TRD-07-03).

SSM har med hjälp av externa experter genomfört två breda granskningar av SKB:s program för grundvattenkemi med syftet att ta fram underlag för en övergripande bedömning av SKB:s ansökan samt att identifiera frågor som behöver granskas mera ingående (SSM Technical note 2012:32; SSM Technical note 2012:33). SSM har under huvudgranskningsfasen genomfört fördjupade granskningar av SKB:s arbete med att: erhålla en representativ fördelning av grundvattnets sulfidhalt (SSM Technical Note 2014:48); grundvattnets salthalt (SSM Technical Note 2014:47); risken för nedträngning av syresatta glaciala smältvatten (SSM Technical Note 2014:08). Dessa grundvattenkemiska variabler har särskilt stor betydelse i samband med utredning av buffererosion och kapselkorrosion. Dessutom har en granskning av mikrobiella aspekter kopplad till sulfidproduktion i slutförvarsmiljön genomförts (SSM technical note 2012:10).

SSM anser att SKB:s konceptuella beskrivning av Forsmarksplatsens fortsatta grundvattenkemiska utveckling är trovärdig och välmotiverad. Arbetet med att karaktärisera grundvattenkemiska betingelser har genomförts med god kvalitet och en godtagbar ambitionsnivå. Den konceptuella bilden över de processer som påverkat Forsmarksplatsen under kvartärperioden har i rimlig omfattning kunnat beläggas med observationer och mätningar. SSM anser det vara väletablerat att den kemiska sammansättningen av grundvatten vid Forsmark styrs av en kombination av blandning av grundvattentyper av olika ursprung och pågående kemiska processer med mineral i berggrunden, lösta gaser i grundvattnet s.k. geogaser, samt mikrober. Grundvattentyper av olika ursprung består av vatten som infiltrerat berggrunden under olika tidsepoker som vid tiden för avsmältning av den senaste inlandsisen, vid tiden då Forsmarksplatsen var täckt av Littorina-havet som infiltrerade berggrunden via deformationszoner och vattenförande sprickor, samt slutligen den pågående infiltrationen av meteoriska vatten som blivit påverkad av (bio)kemiska reaktioner i jordlager och lösa avlagringar.

SSM konstaterar att SKB:s resultat visar att grundvatten på förvaringsdjup för närvarande är kemiskt reducerande, har tillräcklig salthalt för att motverka buffererosion samt att sulfidhalterna överlag är låga. Detta innebär sammantaget att grundvattenkemin i kandidatområdet så långt som kan förväntas främjar de tekniska barriärernas beständighet.

En kommande konstruktionsfas kommer dock innebära en störning av grundvattensystemet främst beroende på tillförsel av syre från utsprängda tunnlar men även pga. tillförsel av konstruktionsmaterial, organiska material och föroreningar. Omblandning av grundvatten från olika delar av berggrunden under konstruktionsfasen kan också öka omfattningen av vissa kemiska processer som mikrobiell sulfatreduktion. SKB har hanterat dessa störningar främst genom att fastställa hur tillförda sulfider i buffert, återfyllning och organiskt material som kan medverka till sulfidproduktion i det mest ogynnsamma fallet kan påverka omfattning av kopparkorrosion. Enligt SSM:s bedömning behöver SKB inför kommande steg i sitt program ett mera omfattande kunskapsunderlag kring hur syre och tillfört organiskt material reagerar och förbrukas under en inledande period i förvarets utveckling. Relevanta frågeställningar ur perspektivet långsiktig strålsäkerhet är i vilken grad organiskt material i buffert och återfyllnad kan bidra till mikrobiell sulfatreduktion samt hur syre som blir kvar i slutförvaret kan förbrukas via såväl kopparkorrosion som på annat sätt, t.ex. reaktioner mellan syre och pyrit i återfyllnadsmaterial (avsnitt 4.7.1 och 4.10.1 i denna rapport).



Sådan kunskap erfordras för att precisera krav på vilka material som är optimala för konstruktion och förslutning av slutförvaret.

SSM anser att SKB har utvecklat en lämplig metod för modellering av långsiktig grundvattenkemisk utveckling, inklusive rumslig variabilitet, baserat på ett integrerat angreppssätt som involverar både kemiska processer och hydrogeologi (SKB TR-10-58). SSM:s detaljerade kommentarer kring denna modell återfinns i kapitel 5.5 om tiden mellan 1000 år och 100 000 år efter förslutning. Grundvattenkemisk utveckling förväntas ske långsamt och gradvis och efter att effekterna av konstruktionsfasen har klingat ut förväntas inga stora förändringar under tiden fram tills 1000 år. Därför har SKB:s modelleringsresultat större betydelse för SSM:s bedömning av grundvattenkemisk utveckling för tiden efter 1000 år.

Det är svårt att på objektiva grunder avgöra modellens prediktionsförmåga i avseendet långa tidsskalor. SKB:s modell har dock kunnat reproducera dagens uppmätta geokemiska situation relativt väl för de flesta av komponenterna i grundvattnet (SKBdoc 1416882, SKBdoc 1396705). Enligt SSM:s bedömning ger SKB:s nuvarande modelleringskapacitet en bra grund för utveckling och utvärdering av SKB:s konceptuella förståelse av grundvattenkemisk utveckling. Det behövs dock fortsatt utvecklingsarbete för att prediktioner snarare än konservativa antaganden ska kunna användas som grund för utvärdering av SKB:s säkerhetsfunktioner. Noterbara avvikelser mellan modell och verkliga mätningar existerar exempelvis för kalciumkoncentrationer och redoxpotentialer. SSM:s externa experter har vid utvärdering av modellen uppmärksammat att vissa geokemiska processer har uteslutits från modellen så som jonbytesprocesser och vittring av silikatmineral. Dessutom är en grundläggande osäkerhet för denna typ av modell definitionen av olika typvatten, vars på förhand definierade sammansättningar påverkar modelleringsresultaten. Enligt SSM:s bedömning utgör den största osäkerheten i detta sammanhang förmodligen sammansättning av de extremt djupa och salta grundvatten för vilka inga mätdata från Forsmark finns tillgängliga.

SSM anser att det finns vissa frågetecken kring hur väl SKB:s modell för långsiktig utveckling av grundvattenkemi kan reproducera och förutsäga grundvattnets redoxpotential. Grundvattnets nuvarande redoxstillstånd är experimentellt väl undersökt och SKB har ägnat frågan tillräcklig uppmärksamhet under platsundersökningsfasen vid Forsmark och Laxemar. SSM anser dock att antagandet avseende kemisk jämvikt med antingen järnoxidhydroxid eller järnsulfid möjligen är ett överförenklat angreppssätt även om det har visat sig vara ändamålsenligt inom modelleringssammanhang. Enligt SSM behöver förhållandet till faktiska observationer av identifierade mineral och lösta geogaser i berggrunden belysas ytterligare med hjälp av en utförligare analys och redovisning under kommande steg av SKB:s program. Av betydelse för redoxprocesser i grundvatten är sannolikt reaktioner som involverar löst organiskt material och reaktiva geogaser i berggrunden som metan och vätgas. Det finns för närvarande en begränsad mängd mätningar med avseende på lösta gaser i jämförelse med omfattningen av övrig grundvattenkemisk provtagning. Beträffande summaparametern löst organiskt material finns ett betydande antal mätningar men kännedomen om ingående förekomstformer är begränsad. SSM anser därför att det fortfarande finns osäkerheter kopplade till giltigheten för SKB:s modell för redox-påverkande mineral och geokemiska processer. Enligt SSM:s bedömning behöver SKB under kommande steg i sitt program ta fram en utförligare redovisning kring hur omfattningen av olika geokemiska och mikrobiella processer som involverar redox-påverkande element som svavel, järn, mangan, vätgas och olika former av organiskt kol påverkar grundvattnets redoxpotential. Redoxpotential påverkar redoxkänsliga radionuklidens rörlighet i grundvatten samt kopparkorrosion.

Enligt SSM:s bedömning har SKB på ett godtagbart sätt hanterat osäkerheter och frågeställningar som kopplar till grundvattenkemiska modeller genom säkerhetsanalysen (SR-Site huvudrapport) och genom svar på kompletteringsbegäran från SSM (SKBdoc 1417006). Osäkerheter kopplade till kemiska processer, sammansättningen av typvatten samt betydelse av uteslutna processer har dock hanterats i huvudsak med metoder baserade på analys av gränssättande fall. SKB har tillgång till jämförelsevis mera sofistikerade metoder för analys av osäkerheter och variabilitet inom området hydrogeologi. SKB har därför tagit fram en redovisning av osäkerheter som har fokuserats på processer som kan hanterats inom ett kvantitativt ramverk (SR-Site huvudrapport). Konceptuella osäkerheter kopplade till kemiska processer framstår som mindre uppenbara men kan ändå vara betydelsefulla. Enligt SSM:s bedömning kan en vidareutvecklad representation av kemiska processer inom modelleringen möjliggöra en mer systematisk och fullständig osäkerhetshantering, vilket dock inte nödvändigtvis behöver innebära en förändrad värdering av vilka faktorer som är betydelsefulla för den långsiktiga strålsäkerheten. Så som påpekas av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:48) behövs också om möjligt en utförligare representation av mikrobiella processer som har baserats på data från mikrobiell provtagning. SSM anser att SKB behöver genomföra ett fortsatt modelleringsarbete till stöd för och baserat på platskaraktärisering under en eventuell uppförandefas som inkluderar fortsatt grundvattenprovtagning och karaktärisering av reaktiva mineral, geogaser och mikrobiella processer i berggrunden.

4.6.2 Utveckling av grundvattnets salthalt

4.6.2.1 Underlag från SKB

SKB:s säkerhetsfunktioner och s.k. funktionsindikatorer ger vägledning kring vilket intervall för grundvattnets salthalt som är lämpligt för att barriärsystemet skall fungera så som det avses (SR-Site huvudrapport, avsnitt 8.3). Grundvattnets salthalt bör inte vara för högt eftersom det då kan uppstå problem vid svällningen av återfyllnaden (avsnitt 4.5.2 i denna granskningsrapport). Det i SKB:s säkerhetsanalys mest styrande och precist formulerade kriteriet är dock att grundvattnets jonstyrka för katjoner skall överstiga 4 mM för att säkerställa buffertens kemiska erosionsbeständighet. Om jonstyrkan för katjoner sjunker under denna nivå behöver förlust av buffertmassa beaktas och på sikt resulterar detta i en försämrad korrosionsbeständighet för kapseln. Sammanfattningsvis anger SKB:s kriterier att grundvattnets salthalt skall hålla sig inom visserligen ganska vida men ändå bestämda gränser för att barriärsystemet skall fungera på ett optimalt sätt. Enligt SKB varierar grundvattnets jonstyrka på förvarsdjup från förekomst av lösta alkalimetaller och alkaliska jordartsmetaller i jonform från ca 100 till 120 mM (SKB TR-10-58). Detta motsvarar ca 20 gånger högre koncentrationer än den nivå för vilken erosionsbenägenhet hos buffert och återfyllning har påvisats (SKB TR-09-34).

SKB har utrett och modellerat ett flertal processer och händelser av olika karaktär som kan påverka det rörliga grundvattnets jonstyrka på förvarsdjup. Ytligare beläget grundvatten av mer utspädd karaktär kan transporteras nedåt via grundvattenflöde vilket minskar jonstyrkan. Under vissa förutsättningar är grundvattenflödet uppåtriktat och djupare beläget saltare vatten kan då nå förvarsdjup nerifrån. Grundvatten på stora djup består enligt SKB av blandningar mellan vatten med olika ursprung. Proportioner av vatten med olika ursprung varierar och en ökad andel av infiltrerat havsvatten eller salint grundvatten från stora djup ökar jonstyrkan, medan en ökad andel av utspädda meteoriska vatten eller glaciala smältvatten minskar jonstyrkan. Vittringsprocesser involverande karbonat- eller silikatmineral tillför lösta ämnen vilket ökar jonstyrkan. Detta äger rum i berget när mineral i exponerade sprickplan kommer i kontakt med rörligt grundvatten. Det äger också rum redan i jordlager och kvartära avlagringar innan nederbörden har hunnit infiltrera berggrunden. I finfördelat ytligt material är exponerade mineralytor större och



vittringsreaktionerna påskyndas av biologiska processer. SKB har i vissa simuleringar beaktat detta genom att ansätta att grundvatten som infiltrerar berggrunden under tempererade förhållanden redan har uppnått en viss mineraliseringsgrad (SKBdoc id 1416908).

Utvecklingen av grundvattnets salthalt har inom tidsintervallet 1000 år analyserats för två olika tidsperioder

- Under förvarets konstruktions och driftsfas för vilken grundvattenflödet påverkas av öppna tunnlar ner till förvarsdjup.
- För den återstående perioden med tempererat klimat efter förslutning av förvaret upp till 1000 år.

SKB konstaterar baserat på analysen av grundvattenflödessituationen under konstruktions- och driftsfasen att det som mest är fråga om en halvering av jonstyrkan som ett resultat av inflöde i öppna dränerade tunnlar (SKB R-09-22). I ett svar på en kompletteringsbegäran från SSM konstaterar SKB vidare att grundvatten som normalt kommer i kontakt med en omättad buffert bidrar till mätnadsprocessen snarare än buffererosion (SKBdoc 1437441). För vissa deponeringshål skulle dock flödet kunna vara så stort att bufferten inte hinner absorbera vattnet och en erosionsprocess kan därmed påbörjas (avsnitt 4.9 i denna granskningsrapport). SKB anser dock att relativt höga flöden också medför att vartefter som deponeringstunnlarna vattenfylls som ett resultat av inflöden från olika riktningar kommer den lägre naturliga hydrauliska gradienten återställas och erosionen kommer till slut att upphöra.

För den återstående perioden med tempererat klimat upp till 1000 år har SKB använt två angreppssätt för modelleringen av vattnets jonstyrka, dels en hydrogeologiskt inriktad modell som fokuserar på grundvattenflöde och dessutom diffusivt utbyte mellan stationärt salthaltigt porvatten i bergmatrisen och rörligt grundvatten i bergsprickor (SKB R-09-20), dels en detaljerad grundvattenkemisk modell som fokuserar på blandningsförhållanden mellan olika typvatten samt iterationer mellan en förenklad representation av hydrogeologi och kemisk jämvikt (SKB TR-10-58). Den sistnämnda modellen inkluderar grundvattenflöde, blandningsförhållanden mellan olika typvatten samt iterationer av en geokemisk jämviktsmodell som hanterar jämvikt med ett begränsat antal reaktiva mineraler i berggrunden. Beräkningarna visar att utspädningen är måttlig under de första åren. Kravet kopplat till tillräcklig katjonstyrka mer än 4 mM förväntas vara uppfyllt för samtliga deponeringshål. Detta resultat från SKB:s grundvattenkemimodellering överensstämmer rimligt väl med den i huvudsak hydrogeologiska typen av simuleringar som inte beaktar kemiska processer (avsnitt 4.5 i denna granskningsrapport). Enligt resultaten från den hydrogeologiskt inriktade modellen skulle möjligen några enstaka deponeringshål kunna understiga jonstyrkan från katjoner på 4 mM redan under tiden innan 1000 år (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.6), vilket innebär att en påbörjad buffererosion inte helt kan uteslutas. SKB redovisar som ett resultat av en kompletteringsbegäran konservativa resultat som visar att ett något större antal deponeringshål kan påverkas (SKBdoc1448717). Detta är en säkerhetsindikator som möjligen inte är uppfyllt under den initiala tempererade fasen och de första 1000 åren efter förslutning av förvaret.

SKB har i analysen fäst stort avseende vid att det sker ett diffusivt utbyte av lösta ämnen mellan rörligt grundvatten i bergsprickor och stagnant vatten i bergmatrisens porer, s.k. matrisvatten. Om mycket utspätt grundvatten infiltrerar berggrunden kommer lösta ämnen i matrisvatten transporteras ut ur bergmatrisen via diffusion och på så vis motverka utspädningen. Om tvärtom det rörliga grundvattnet har hög jonstyrka kommer lösta ämnen tränga in i bergmatrisen vilket leder till att det rörliga grundvattnets jonstyrka minskas. Processen medför en tröghet för jonstyrkeförändringar för vatten i spricksystemet. Det



begränsade antalet vattenförande sprickor i berget medför att mängden matrisvatten är större än mängden grundvatten i spricksystemet. Som en del av platsundersökningsprogrammet har SKB genomfört en särskild karaktärisering av matrisvatten (SKB R-08-105).

4.6.2.2 SSM:s bedömning

SSM konstaterar att en stor utspädning av grundvattnets jonstyrka behövs för att aktualisera fallet med kemisk erosion av bufferten och en till slut påskyndad sulfidkorrosion av kopparkapslar i deponeringshål som blivit eroderade. Detta ger marginaler till gräns för påbörjad buffererosion under de första 1000 åren och ännu större marginaler för uppkomst av advektiva förhållanden. Eftersom SKB inte kan utesluta ett påbörjat buffererosionsförlopp för de mest utsatta deponeringshålen med höga grundvattenflöden behöver SKB i kommande steg i sitt program studera möjligheterna att minska erosionsrisken genom vidareutvecklingen av mätmetoder för berget i närheten av deponeringshålen och vidareutveckling av kriterier för val av deponeringshål (SR-Site huvudrapport, avsnitt 15.3.5). Storlek, uppkomst och karaktär av olika typer av sprickor som skär tänkbara deponeringshålspositioner behöver enligt SSM:s bedömning studeras vidare. Bergmekanisk påverkan från förvarets termiska fas behöver även beaktas (avsnitt 4.4.4 i denna granskningsrapport).

SSM anser liksom SKB att risken för en omfattande utspädning av grundvatten och buffererosion redan under den första konstruktions- och driftsperioden är mycket liten. SSM anser dock att SKB behöver följa upp denna frågeställning genom att grundvattensituationen monitoreras kontinuerligt under en eventuell kommande konstruktions- och driftsfas.

Beträffande den återstående perioden med tempererat klimat upp till 1000 år anser SSM liksom SSM:s externa expert (SSM Technical Note 2014:47) att en utspädning av grundvatten i anslutning till deponeringshål i förvaret ner till jonstyrkan för katjoner på 4 mM redan under de första 1000 åren av tempererat klimat är liten. Risken för att buffererosion påbörjas under denna period bedöms därmed också vara liten. Det bör beaktas att SKB:s hydrogeologiska modelleringsresultat är framtagna med ett konservativt angreppssätt som utesluter kemiska processer i berget och dess ytlager som tillför katjoner till grundvattnet. SSM anser dock att SKB behöver belägga i vilken omfattning infiltrerande grundvatten tillförs lösta joner genom sin passage av lösa avlagringar och ytligare berg om dessa processer förutsätts bidra till grundvattnets mineralisering.

Beträffande inverkan av silikatvittring och jonbytesprocesser som SKB valt att försumma inom modelleringssammanhang, anser SSM att SKB:s kompletterande information är av rimlig omfattning och resultaten tyder allt väsentligt på att de förenklingar som utnyttjats i SR-Site har begränsad betydelse. SKB:s komplettering visar att jonbytesprocesser inte påverkar grundvattnets salthalt men att en viss påverkan på pH har observerats. SKB argumenterar vidare för att vittring av silikatmineral och jonbytesprocesser inte har någon avgörande inverkan på grundvattnets salthalt även om fördelningen av koncentrationer för katjoner påverkas. Enligt preliminära beräkningar och tillgänglig fältdata har vittring av silikatmineral inte någon större inverkan på grundvatten på platser långt bort från kusten som domineras av infiltration av meteoriska vatten. SSM anser dock att SKB långsiktigt behöver vidareutveckla sin modelleringskapacitet för att vid behov kunna ta hänsyn till en bredare uppsättning kemiska processer som påverkar såväl salthalt som redoxpotential och svavelinnehållande lösta ämnen. SKB behöver också i kommande steg av sitt program genomföra en fortsatt karaktärisering av kemiska och fysikaliska processer som påverkar grundvattnets salthaltsutveckling. Av störst säkerhetsmässig betydelse är sannolikt kvantifiering av utbyte mellan matrisvatten och rörligt grundvatten, men vittringsprocesser och biologiska processer i lösa avlagringar kan i vissa fall ha en betydelse. Av de



bergartsbildande mineralen har biotit visats ha stor betydelse för bergets förmåga att förbruka löst syre men det bör även beaktas att processen bidrar till salthaltsutvecklingen genom tillförsel av lösta joner.

4.6.3 Utveckling av grundvattnets sulfidhalt

4.6.3.1 Underlag från SKB

Av relevans för de första 1000 åren är en särskild vetenskaplig studie som gjorts avseende representativa sulfidhalter i berggrunden (SKB TR-10-39). SKB antar att det bildas ett stationärt tillstånd baserat på aktiviteten av sulfatreducerande bakterier, grundvattenflöden och reaktion mellan bildad sulfid och järn(II) i grundvatten (SKB TR-10-58). Modelleringsresultat visar att järnhalterna ökar något under den tempererade fasen vilket sammanfaller med att sulfidhalterna minskar.

SKB har strax efter upptag av borrhävar gjort en fullständig kemisk karaktärisering av borrhålens grundvattensammansättning, s.k. CCC ("Complete Chemical Characterisation"), vilket har följts av särskilda monitoringsinsatser (SKB TR-10-39, avs. 3.1.1). Beträffande sulfidhalter är en generell observation att sulfidhalterna gradvis sjunker under en monitoringsperiod, men ändå inte når ner till de förhållandevis låga halter som detekterades i de ursprungliga grundvattenproverna i samband med upptag av undersökningsborrhålen (SKB TR-10-39). SKB:s slutsats är att de tidiga monitoringsvärdena inte är tillförlitliga och har därför valt att generellt utgå ifrån det sista värdet i varje mätserie tillsammans med haltbestämningar i de ursprungliga grundvattenproverna. Dessa värden bildar en diskret fördelning som har använts i beräkningarna av kapselkorrosion (SKB TR-10-66). SKB bedömer att grundvatten som blir stående i en sektion av ett borrhål inte representerar förhållanden i berget utan att en viss mängd vatten bör pumpas upp för att kemiska förhållanden i borrhålet skall på ett rimligt bra sätt representera förhållanden i berget.

SKB har som en del av kompletteringsförfarandet för ansökan adresserat frågan kring vilka faktorer som kan påverka den framtida kemiska utvecklingen vid Forsmarksplatsen av relevans för förutsättningarna för mikrobiell sulfatreduktion och därmed framtida sulfidhalter. Eftersom det finns tillgång till möjliga elektrondonatorer i berggrunden, t.ex. väte och metan, som inte har förbrukats kan en viss ökning av aktiviteten inte uteslutas. Enligt SKB är det mindre troligt att sulfatreduktion med metan förekommer i Forsmark eftersom det inte finns några spår från metanoxidation (SKBdoc 1396704). Av större betydelse vore emellertid om en betydande andel av löst organiskt material (DOC) skulle kunna utnyttjas för sulfatreduktion eftersom DOC är mera vanligt förekommande än löst metan och vätgas. SKB anför dels argumentet att löst organiskt material främst består av svårnedbrytbart material som via C-14 åldersbestämning har visats ha en uppehållstid i grundvattensystemet på 100-tals till 1000-tals år, dels argumentet att individuella koncentrationer av organiska ämnen som ingår i DOC är så låga att de svårigen skulle kunna utnyttjas av sulfatreducerande bakterier (SKBdoc 1396704).

4.6.3.2 SSM:s bedömning

Enligt SSM:s bedömning har SKB genomfört ett omfattande mätprogram för sulfidhalter som utgör en godtagbar grund för det intervall av sulfidhalter som SKB föreslår som representativ för Forsmarkplatsen, koncentrationer kring 0,1 – 10 µM med någon enstaka mätning runt 100 µM. SKB har enligt SSM:s bedömning tagit fram en utförlig och trovärdig analys av befintliga sulfiddata (SKB TR-10-39). SSM konstaterar dock att uppskattning av sulfidhalter är behäftade med vissa osäkerheter eftersom det inte är känt hur lång tid en mätserie måste pågå innan ett representativt värde har erhållits. Orsaken till de temporärt högre koncentrationer som uppmätts kan därför inte betraktas som fullständigt utredd och SSM anser därför att ytterligare studier under en eventuell



kommande konstruktionsfas är befogade. Sådana ytterligare studier skulle också kunna ge nya data inte bara för sulfidkoncentrationer utan även andra komponenter i grundvatten som påverkar tillgång på löst sulfid i grundvatten, t.ex. organiskt material och järn(II). Det behöver också vägas in att SKB trots det omfattande mätprogrammet än så länge endast har ett ganska litet antal grundvattenprover som uppfyller kvalitetskraven för att utgöra en lämplig grund för representativa sulfidhalter. Så som påpekas av SSM:s externa expert kan högre koncentrationer inte uteslutas, men det är osannolikt att det skulle vara frågan om väsentligt högre koncentrationer och ännu mera osannolikt att väsentligt högre koncentrationer skulle bli bestående under en längre tid (SSM Technical Note 2014:48).

SSM anser att SKB har bedrivit ett godtagbart forskningsprogram för att skapa förståelse för kemiska processer som påverkar sulfidhalter i grundvatten på förvarsdjup, särskilt inriktningen på mikrobiologi vid Äspölaboratoriet och MICROBE-projektet verkar ha en stor betydelse för förståelsen av denna fråga (SKB R-13-49). Sulfatreducerande bakterier har detekterats i Forsmarks grundvatten liksom vid andra undersökta platser i Sverige samt i olika bentonitmaterial. Faktorerna som styr dessa bakteriers aktivitet är viktig för analysen av kopparbarriärens beständighet. Processen förbrukar sulfat via respiration när anoxiska betingelser uppstår. Det behövs dock lämpliga miljöbetingelser, näringsämnen och ett lämpligt substrat som donerar elektroner för att överföra svavel från oxidationstalet +VI till -II.

Beträffande bildning av sulfid till följd av oxidation av lösta organiska ämnen så instämmer SSM med SKB att en betydande andel förmodligen är svårnedbrytbart med liten inverkan på mikrobiella processer i berggrunden. Ett skäl är att dessa ämnen främst härrör från biologisk aktivitet nära markytan och har blivit bestående ner till stora djup utan att förbrukas. SSM anser dock att det för att verifiera denna preliminära bedömning behövs ytterligare kunskap om sammansättning och reaktivitet för kemiska ämnen som ingår i DOC. Beträffande reaktiva geogaser bedömer SSM att dessa har något mindre betydelse då uppmätta metanhalter liksom halter av löst vätgas generellt sätt är låga. Eftersom det för närvarande dock endast finns ett fåtal mätningar kan kompletterande mätningar i senare steg i SKB:s program anses vara befogade.

Enligt SSM:s externa expert har det inte varit möjligt att direkt korrelera uppmätta populationer av sulfatreducerande bakterier med sulfidhalter (SSM Technical note 2014:48), men det förefaller som mest troligt att uppmätta sulfidhalter styrs av en varierande men generellt sätt låg hastighet av mikrobiell sulfatreduktion. Den låga hastigheten förklaras av den näringsfattiga miljön, med begränsad tillgång till lättillgängliga substrat och låg kapacitet för materieöverföring för att underhålla mikrobiell sulfatreduktion. Enligt SKB finns ingen stor reservoar av bundet sulfid i mineralform vid Forsmark. Mineralet pyrit (FeS_2) förekommer dock sparsamt i berggrunden. Fältdata visar att löst sulfid och sulfat kan samexistera i grundvattenprover. En oberoende analys visar att grundvattnets redox-nivå kan förklaras av geokemiska processer kopplade organiskt material och redox-paren $\text{SO}_4^{2-}/\text{HS}^-$ samt $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ (SKI rapport 2007:03). Förhållandevis höga halter av sulfat vilka till stor del härstammar från infiltrerat Littorinavatten har blivit bestående under lång tid i grundvattnet trots att det i grundvattnet finns viss tillgång på lämpliga substrat så som löst väte och metan. Det finns förmodligen därför andra faktorer som begränsar mikrobiell sulfatreduktion under in situ förhållanden.

SSM anser att ytterligare två omständigheter har viss betydelse för bedömning av framtida sulfidkoncentrationer vid Forsmark. Även om aktiviteten av sulfatreducerande bakterier av någon okänd anledning skulle bli väsentligt högre så skulle omfattande och storskalig mikrobiell sulfatreduktion i berggrunden i stort till slut utarma sulfat i grundvattnet. Höga halter av sulfat i den övre delen av berggrunden härrör troligen från infiltration av



Littorinavatten och ett återställande av höga halter skulle sannolikt vara förknippad med ny period med storskalig infiltration av havsvatten. En annan omständighet är att höga sulfidkoncentrationer kan motverkas genom utfällning av järnsulfid så länge grundvattnet innehåller betydande koncentrationer av järn(II). Eftersom enbart ett fåtal grundvattenprover från Forsmark ligger nära mättnadsgränsen för amorft järn(II)sulfid så har denna typ av utfällningsreaktion förmodligen för närvarande liten betydelse och förekommer endast på ett fåtal platser i berggrunden med den mest omfattande mikrobiella aktiviteten. Nära mättnadsgränsen kommer dock en ökad aktivitet inte ge någon effekt på koncentrationen så länge grundvattnet innehåller järn(II) eftersom processen då producerar sulfid bundet i mineralform snarare än sulfid tillgängligt i grundvattnet. SSM anser att SKB kan utforska denna fråga ytterligare genom att undersöka tillgänglighet och kinetik för grundvattenkemiska processer som ger upphov till löst järn(II) i berggrunden.

SSM konstaterar att SKB:s användning av diskreta mätvärden för sulfider som indata till riskberäkningar skiljer sig från de triangelfördelningar som används för de flesta andra indata till riskberäkningarna. En nackdel med att använda sig av diskreta mätvärden istället för att använda mätningar som ett underlag för bestämning av en fördelningsfunktion är att det inte går att ta höjd för eventuella osäkerheter som kopplas till den framtida utvecklingen eller väga in tidsberoenden som kan kopplas till en sådan utveckling. Enligt SSM:s bedömning har dock valet att använda en diskret parameterfördelning för uppmätta sulfidkoncentrationer istället för en kontinuerlig fördelning baserad på expertbedömning endast en liten betydelse för beräknad dos/risk.

4.6.4 Utveckling av sulfidhalt invid kapselytan

4.6.4.1 Underlag från SKB

SKB har i beräkningarna av kopparkorrosion i en mättad buffert förutsatt att korrosionshastigheten styrs av materieöverföringshastigheten via diffusion av sulfid genom bufferten, samt av tillförsel av sulfid till buffertranden via grundvattenflöde (SKB TR-10-66, avsnitt 4.2). Resultaten från dessa beräkningar har visat att val av grundvattenflödesmodell respektive beaktande av eventuell spjälkning av deponeringshållsväggen har stor påverkan på beräkningar av kapselkorrosion. Även om beräkningarna ger en konservativ uppskattning av korrosionshastighet blir sulfidhalten vid kapselytan definitionsmässigt noll så länge kinetiken för själva korrosionsprocessen inte beaktas. SKB har dock i andra sammanhang beaktat andra källor förutom sulfid i grundvatten som tillförsel av sulfid från bufferten och då funnit att koncentrationer av sulfider invid kapselytan kan vara av storleksordningen 5×10^{-5} M (SKB TR-13-27, avsnitt 2.3).

Av stor betydelse för SKB:s beräknade omfattning av sulfidkorrosion för fallet intakt mättad buffert är att mikrobiell sulfatreduktion inte äger rum inuti bufferten. SKB har genomfört omfattande experimentella undersökningar för att studera denna fråga (Masurat m.fl., 2010). Resultaten visar att även om sulfatreducerande bakterier kan existera och överleva i en mättad buffert är aktiviteten så pass begränsad att bidraget till korrosionsförloppet i form av producerad sulfid blir litet. Vid fullt utvecklat svälltryck och vid en buffertdensitet på 2000 kg m^{-3} är sulfidproduktionen försumbar. Enligt SKB:s undersökningar ökar den dock betydligt redan vid densiteten 1600 kg m^{-3} . Den exakta orsaken till begränsningen är inte helt känd men en låg vattenaktivitet, höga svälltryck och små porutrymmen vid höga svälltryck är hämmande faktorer.

Den mest betydelsefulla användningen av grundvattenkoncentrationer av sulfid i sammanhanget SKB:s säkerhetsanalys återfinns i analysen av korrosionshastigheter för

eroderad buffert (SKB TR-10-66, avsnitt 4.3). SKB antar för detta fall att sulfidkoncentrationerna i grundvattnet inte påverkas av närheten av kopparytan. Eventuell tillförsel av sulfid från mikrobiell sulfatreduktion anses redan vara indirekt beaktad eftersom denna typ av process sker i det naturliga grundvattnet. SKB har genomfört experimentella undersökningar av risken för att en biofilm bestående av sulfatreducerande bakterier kan bildas på kapselytan men det finns inga tydliga indikationer på att detta fall är troligt vare sig för koppar eller för titan (SKB R-11-22).

Förutom sulfid i grundvatten beaktar SKB den mängd sulfid som i det värsta fallet kan tillföras från pyrit i buffert och återfyllnad via diffusion (SKB TR-10-66, avsnitt 5.3). SKB beaktar även sulfid som kan bildas via mikrobiell sulfatreduktion baserat på den mängd organiskt kol som finns från början i buffert och återfyllnad. Mängden organiskt material är dock förhållandevis hög i återfyllnaden och det har därför varit nödvändigt att beakta begränsningen av diffusion i vattenfasen som behöver ske för att sulfid ska kunna tillföras kapselytan. SKB har även som en del av kompletteringsförfarandet beräknat korrosionsbidrag till följd av diffusion i gasfas för tiden innan fullständig återmättnad av bufferten (SKBdoc 1437441).

4.6.4.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har genomfört ett omfattande och långsiktigt forskningsprogram kopplat till karaktärisering av mikrobiell sulfatreduktion både i den opåverkade berggrunden och i en mättad buffert. Det finns dock flera frågeställningar som behöver belysas ytterligare i kommande steg av SKB:s program vilket främst kopplar till de långa återmättnadstiderna för Forsmarksplatsen. Det kan möjligtvis dröja 1000-tals år innan mättad buffert är uppfyllt för samtliga deponeringshål. En viktig fråga rör reaktivitet och löslighet för organiska material i buffert och återfyllnad och dess tillgänglighet som substrat för mikrobiell sulfatreduktion. En annan fråga som inte kan betraktas som fullt utredd är fallet med en biofilm på en exponerad kapselyta. Behovet av ytterligare studier av denna fråga motiveras av den väsentligt snabbare korrosion som skulle bli fallet vid en hypotetisk korrosionsbegränsning av sulfattillförsel (SSM Technical Note 2014:48). SSM noterar också att det inte finns någon utförlig sammanhängande analys av hur länge oxiderande förhållanden kan kvarstå invid kapselytorna utan prognoserna varierar inom ganska vida gränser (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4).

SSM anser att det är rimligt att i vissa fall använda sig av separata överslagsberäkningar för att storleksbestämma hypotetiska degraderingsprocesser för de tekniska barriärerna. Denna metod har dock begränsningar om flera parallella mekanismer inte kan uteslutas eftersom eventuell samverkan mellan mekanismerna inte beaktas. SSM anser därför att SKB inför kommande steg i sitt program behöver utveckla en integrerad modell för utvecklingen av den kemiska miljön i bufferten och invid kapselytorna. Enligt SSM:s bedömning visar exempelvis frågeställningen kring diffusion av sulfid i gasfas att det finns ett behov av fortsatta utredningar och experimentella studier av hur barriärernas beständighet påverkas av omättade betingelser i slutförvarsmiljön.

Beträffande påverkan av lösta komponenter i grundvatten konstaterar SSM att lokal sulfidbildning vid kapselytan skulle hypotetiskt underhållas av tillförsel av vätgas. Med maximala uppmätta koncentrationer kring 10 μM sker ingen betydande påverkan i förhållande till om enbart tillförsel av sulfid som redan finns i grundvattnet beaktas. Det beror förutom på de låga halterna på det ogynnsamma utbytet av processen där oxidationen av löst vätgas endast ger två elektroner medan åtta elektroner krävs för omvandlingen av sulfat till sulfid. Det lägre intervallet av korrosionshastigheter som etablerats av SKB skulle dock påverkas i viss utsträckning. SSM anser vidare att SKB:s undersökningar ger stöd för att utesluta pågående reduktion av sulfat via oxidation av metan med beaktande av låga $\delta^{13}\text{C}$ halter i kalcitprover (SKBdoc 1396704) och

konstaterar att processen i vilket fall skulle ha mindre betydelse med tanke på uppmätta metankoncentrationer i Forsmarks grundvatten kring 10 μM . Situationen är något mera svårbedömd vad gäller betydelsen av löst organiskt material. Halter i grundvatten är förvisso lägre än för sulfat (10 – 30 mg/L i jämförelse med ca 300 mg/L) men är mer betydande än för lösta reaktiva gaser. SKB anför dels argumentet att löst organiskt material främst består av svårnedbrytbart material som via C-14 åldersbestämning har visats ha en uppehållstid i grundvattensystemet på 100-tals till flera 1000 år, dels argumentet att individuella koncentrationer av organiska ämnen som ingår i DOC är så låga att de svårligen skulle kunna utnyttjas av sulfatreducerande bakterier tack vare reaktionsobenägenhet för högmolekylärt löst organiskt material. SSM gör dock bedömningen att vissa ytterligare korrosionsbidrag inte helt kan uteslutas med tanke på dels att otillgängligt organiskt material långsamt kan brytas ner till lågmolekylärt material, dels att en liten andel mer reaktivt organiskt material kan ha blivit kvar i grundvattnet från ytskiktet ända ner på förvarsdjup. SSM anser att SKB under en eventuell kommande konstruktionsfas för slutförvaret behöver genomföra ytterligare studier av sammansättningen av organiska ämnen inom kategorin DOC och särskilt andel och bildning av lågmolekylära organiska ämnen som skulle kunna underhålla mikrobiell sulfatreduktion.

SSM anser att det är osannolikt att eventuella ytterligare korrosionsbidrag från lokal sulfidbildning skulle ha en avgörande inverkan på bedömningen av kapslarnas långsiktiga beständighet. För korrosionsberäkningarna är det den ackumulerade massöverföringen av sulfid som ger en påverkan på korrosionsdjupet och därför behöver grundvattenkemiska processer som påverkar sulfid vara av långsiktig karaktär.

SSM:s externa expert (SSM Technical Note 2012:10) har i sin granskning tagit upp frågan kring huruvida vätgas från kopparkorrosion i sig, eller från radiolys vid kapselytan kan ge ett betydelsefullt bidrag till mikrobiell sulfatreduktion. Möjligheten att förhöjda temperaturer ger mera optimala betingelser för mikrobiell sulfatreduktion liksom att de kan medverka till att bryta ner annars icke-reaktivt organiskt material i bufferten tas också upp i denna granskning. SSM bedömer att SKB på ett acceptabelt sätt har visat att vätgasbildning från sulfidkorrosion av koppar inte ger något betydelsefullt bidrag till väte som kan underhålla fortsatt sulfatreduktion (se avsnitt 5.3.2 SKB TR-10-66). Processen är möjlig men har för lågt stökiometriskt utbyte för att underhålla en kedjereaktion och ger inget signifikant bidrag till korrosion. Frågan kring radiolys på kapselns yta har beaktats av SKB i perspektivet av att bildade oxidanter orsakar kopparkorrosion snarare än bildat väte (SKB TR-10-66, avsnitt 5.1.2). Den maximala korrosionen pga. radiolytiska oxidanter uppskattas till 35 mol vilket motsvarar ett korrosionsdjup på ca 14 μm . SSM anser att det är ett mindre sannolikt fall att radiolys samtidigt kan orsaka kopparkorrosion både via bildade oxidanter och via mikrobiell sulfatreduktion från bildat väte. Om det hur som helst skulle ske skulle bildad vätgas ge mindre korrosion än radiolytiska oxidanter på grund av sämre stökiometriskt utbyte. SSM anser dock att frågan kring organiskt material i bufferten kan ha betydelse för sulfatreduktion åtminstone fram till dess att buffertens svälltryck har hunnit utvecklas.

Termokemisk sulfatreduktion omnämns överhuvudtaget inte i SKB:s korrosionsanalys, men tas upp som en tänkbar process i processrapporten för kopparkapseln (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4). Processen skulle kunna innebära ytterligare tillskott till sulfidbildning i direkt anslutning till kopparkapseln under den första fasen efter förslutning av förvaret när kapselytan är som varmast. Det finns sannolikt vissa osäkerheter kring den nedre temperaturgränsen för vilken processen kan ha en betydelse. SSM anser dock att även om hänsyn tas till dessa finns sannolikt en säkerhetsmarginal till dess att processen börjar få en reell betydelse för kapselkorrosion. Processen är dock viktig att beakta vid

fastställandet av en övre temperaturgräns för slutförvaret och rutiner behövs för att undvika att temperaturen vid kapselytan oavsiktligt blir högre än förväntat.

4.7 Kemisk och mekanisk utveckling för buffert och återfyllnad

4.7.1 Kemisk utveckling

Upp till drygt 1000 år efter förslutning av slutförvaret är lermaterialen i buffert och återfyllnad utsatta för externa påfrestningar som triggar en kemisk och mekanisk utveckling. De viktigaste faktorerna är värme och strålning från bränslet samt förändringar i koncentrationer av lösta ämnen i porvatten. Både lermineralet montmorillonit och accessoriska mineral är involverade i kemiska förändringar av bentoniten. Detta beror bland annat på närvaron av grundvatten som inte är i kemisk jämvikt med dessa mineral. Vissa reaktioner sker snabbare vid hög temperatur som råder i närområdet av slutförvaret under de första tusen åren. Strålningsenergin kan i viss utsträckning påverka kemiska betingelser i bufferten.

Enligt SKB är de viktigaste säkerhetsfunktionerna för bufferten att förhindra advektion eller vattenflöde i deponeringshålen, att begränsa mikrobiell aktivitet samt att förhindra transport av kolloidpartiklar (SKB TR-10-15, avsnitt 2.2.1). Återfyllnaden ska bl.a. ha förmåga att begränsa vattenflödet i deponeringstunnlarna och begränsa buffertens svällning och expansion uppåt (SKB TR-10-16, avsnitt 2.2.1). Bufferten ska upprätthålla mekaniska och kemiska förhållanden så att kopparkapseln i sin tur kan motstå isostatiska laster, skjuvlaster och korrosionsangrepp (SKB TR-10-14, avsnitt 2.2.1). Vissa kemiska reaktioner i bentoniten kan ha negativ inverkan på barriärernas säkerhetsfunktioner. Grundvatten som kan orsaka kopparkorrosion har exempelvis inte den ursprungliga sammansättningen då det flödar i sprickan, utan en sammansättning nära kemisk jämvikt efter att det reagerat med reaktiva mineral i bentonit. Om temperaturen i närfältet av slutförvaret hypotetiskt skulle vara för hög och om den geokemiska utvecklingen i bufferten till följd av detta blir förknippad med omfattande mineralomvandling, kan buffertens säkerhetsfunktioner äventyras genom att bufferten får ett minskande svälltryck, ökande hydraulisk konduktivitet, samt ökad styvhet.

I detta avsnitt, granskar och bedömer SSM kemiska, fysikaliska och biologiska processer som pågår under återmättnadsprocessen när temperaturen fortfarande är relativt hög, dock mindre än 100° C som krävs vid tiden för slutförvarets initiala tillstånd (avsnitt 3.5.1 i denna rapport). De viktigaste processerna under denna tid är kemiska förändringar av accessoriska mineraler, omvandling av montmorillonit, cementering, mikrobiell aktivitet som kan ske innan svälltrycket hos bentoniten har uppnått 2 MPa samt strålning mindre än 1 Gy/h (avsnitt 3.5.1 i denna rapport). Andra kemiska processer som främst är aktuella efter att bentoniten är vattenmättad kommenteras i avsnitt 5.6 i denna rapport. Processer som enbart är aktuella i samband med radionuklidtransport i buffert och återfyllnad (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5 och 4.4), såsom advektiv transport, diffusiv transport, kolloidtransport, samt sorption kommenteras i avsnitt 7.4.3 och 7.3.3 i denna rapport. Processen av porvattenradiolys granskas och bedöms i avsnitt 4.2 och 5.1 tillsammans med bränslerelaterade frågor. Frågan om frigörelse av kolloidpartiklar från montmorillonit granskas och bedöms i avsnitt 5.8 i denna rapport.

4.7.1.1 Underlag från SKB

SKB redovisar de kemiska processerna i bufferten i avsnitt 3.5 och i återfyllnaden i avsnitt 4.4 (SKB TR-10-47), samt sammanfattningsvis i avsnitt 10.3.10 (SKB TR-11-01).

Specifikt i SKB TR-10-47 redovisas kemiska förändringar av accessoriska mineral i bufferten i avsnitt 3.5.6 respektive i återfyllnaden i avsnitt 4.4.4; omvandling av montmorillonit i bufferten i avsnitt 3.5.9 respektive i återfyllnaden i avsnitt 4.4.7; cementering i bufferten i avsnitt 3.5.15; mineralomvandling inducerad av strålning i bufferten i avsnitt 3.5.12 respektive i återfyllnaden i avsnitt 4.4.9, samt mikrobiell process i bufferten i avsnitt 3.5.14 respektive i återfyllnaden i avsnitt 4.4.10.

SKB redogör i buffertprocessrapporten (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.1) att den kemiska strukturen av montmorillonit i bufferten och återfyllnaden ligger till grund för dess kemiska utveckling. Montmorillonit tillhör den så kallade smektitgruppen av lermaterial som har 2:1 skiktstruktur av dioktaedrisk typ med ett oktaedriskt skikt mellan två tetraedriska skikt. Laddningen är mellan 0,4 och 1,2 enhet per enhet strukturformel, med den oktaedriska laddningen högre än den tetraedriska laddningen. Treskiktstrukturen är cirka en nanometer tjock och några hundra nanometer stor i de andra två dimensionerna (Bergaya och Lagaly, 2006; Newman och Brown, 1987). Flera unika kemiska och mekaniska egenskaper hos bentonit är relaterade till den negativa laddningen i skiktstrukturen så som osmoseffekt och vattenupptag av omättad bentonit, utveckling av svälltryck under vattenmättnadsprocessen om den tillgängliga volymen är begränsad, förekomst av ett diffusivt skikt av laddningskompenserande joner mellan skiktstrukturen, kolloidfrigörelse i kontakt med vatten med mycket låg jonstyrka, ytdiffusion och jonexklusion, samt jonbytesreaktioner.

SKB har modellerat den kemiska utvecklingen av närområdet under den termiska perioden och återmättnadsprocessen (SKB TR-10-59) med det numeriska simuleringsprogrammet TOUGHREACT. Programmet simulerar kemiska reaktioner kontrollerade antingen av kemisk jämvikt eller av kemisk kinetik. Dessa kan kopplas till flerfasflöde med beaktande av temperaturskillnader, värmeöverföring samt transport av flera komponenter (SKB TR-10-59, avsnitt 3.1).

SKB:s modelleringsresultat visar att inga kloridsalter når mättnadsgränsen även om modellen också förutsäger en förångning när vatten kommer i kontakt med kopparkapseln. Anhydrit som är den stabila formen av kalciumsulfat vid högre temperaturer faller ut runt kapseln vid temperaturer över 56° C. När temperaturen i närområdet sjunker löser sig tidigare utfälld anhydrit och bildar gips. Under perioden med förhöjd temperatur kan också bentonitens ursprungliga innehåll av kvarts lösas upp i anslutning till kapselytan och falla ut närmare kontaktzonen mellan berg och buffert. De termiska förhållandena styr denna process eftersom lösligheten av kvarts ökar med ökande temperaturen (SKB TR-10-59, avsnitt 5.1.3). För MX-80 bentonit som nästan helt saknar karbonatmineraler kan kalcit falla ut men lösa upp igen inom några få år efter kontakt med omgivande grundvatten (SKB TR-10-59, figur 5-13). För Deponit CA-N bentonit som ursprungligen innehåller betydande mängder dolomit kommer detta mineral på lång sikt att lösa upp sig under bildning av kalcit. Under den initiala varma perioden kan dock dolomit falla ut i närheten av kapselytan, för att senare lösa upp sig när temperaturen sjunker ned mot berggrundens omgivningstemperatur. I samband med upplösning av dolomit och bildning av kalcit kan porvattenkoncentrationen av magnesium öka med cirka en tiopotens (SKB TR-10-59, avsnitt 5.2).

TOUGHREACT har även använts för att kunna simulera fältförsöket LOT-A2 (Long-term test of buffer material) som har utförts vid Äspölaboratoriet. Beräkningsresultaten från simuleringen som involverar transport och kemiska processer stämmer väl överens med de experimentella resultaten med avseende på utveckling av kloridhalt, upplösning av utfällning av gips, anhydrit och kalcit (SKB TR-10-65). Vid LOT-A2-försöket har bentonitringar av MX-80-typ med reducerad diameter på 10 cm under fem års tid blivit exponerade för temperaturer mellan 130 och 85° C (SKB TR-09-29, avsnitt 4.3.2).

TOUGHREACT har även testats inom FEBEX-projektet (Full-scale Engineered Barriers Experiment) som utförs vid Grimsellaboratoriet i Schweiz (Villar m.fl., 2007). Även i detta fall stämmer en simulerad utveckling av kloridhalter relativt bra överens med experimentella resultat.

SKB anser att lermaterialet montmorillonit kan omvandlas till andra mineraler med samma grundläggande skiktstruktur dock med högre genomsläpplighet och mindre förmåga att svälla. Omvandlingen börjar med att påverka laddningsdensiteten i skiktstrukturen och orsaka en minskning av interaktionen mellan lerskiktstrukturerna och porvattnet. Resultatet blir en kraftig minskning av avståndet mellan skiktstrukturerna och därmed även en minskning av svälltrycket. Denna typ av process bedöms dock vara långsam i slutförvarsmiljö och ha liten betydelse för förvarets långsiktiga säkerhet. Processer av detta slag har därför inte ingått i SKB:s geokemiska modellering av buffertutveckling (SKB TR-06-16, avsnitt 4.2; SKB TR-10-59), men de har analyserats teoretiskt (SKB TR-06-11, SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.9) och har även studerats experimentellt (SKB TR-09-29, kapitel 9).

Termodynamisk stabilitet för montmorillonit är enligt SKB i första hand beroende av aktiviteten för löst kisel och kalium. Om kvarts fälls ut i närvaro av kalium är montmorillonit inte längre stabil och omvandling till mineralet illit påbörjas (SKB TR-06-11, avsnitt 2.3). Omvandlingen anses vara en diagenesprocess som kan ske med två olika mekanismer; (i) upplösning av montmorillonit och därefter utfällning av illit också kallad upplösning/kristallisering DC (Dissolution/Crystallisation), eller (ii) aluminium ersätter kisel i det tetraedriska skiktet med kalium som motjon, dvs. en fastfasreaktion under vilken den grundläggande skiktstrukturen av montmorillonit förblir oförändrad, så kallad fastfasomvandling SST (Solid State Transformation) (SKB TR-88-15, avsnitt 3.2; SKB TR-06-11, avsnitt 2.3; Altaner och Ylagan, 1997). En tredje möjlig mekanism nämns av Altaner och Ylagan (1997), så kallad Ostwald-mogning OS (Ostwald ripening) där kristaller med mindre storlek löses upp och bildar kärnor till större kristallpartiklar. Denna mekanism anses dock inte av författarna kunna beskriva omvandlingsprocessen på ett tillfredställande sätt. Den första mekanismen (DC) är oftast viktig i flödesdominerade system såsom i porutrymmen i sandsten (Pollastro, 1985; Nadeau m. fl., 1985; Altaner och Ylagan, 1997; SKB TR-06-11, avsnitt 2.4), medan den andra mekanismen (STT) är viktigare i tätare formationer såsom bentonit eller lerig och siltig sediment (Kirsimäe m. fl., 1999; SKB TR-06-11, avsnitt 2.4).

SKB har studerat och jämfört tre olika kvantitativa kinetikmodeller för att förutsäga omvandlingshastigheten av montmorillonit till illit (SKB TR-06-11, avsnitt 2.4); (i) Pyttes modell (Pytte och Reynolds, 1989), (ii) Huangs modell (Huang m. fl., 1993), och (iii) Cuadros modell (Cuadros och Linares, 1996). Alla tre modeller är utvecklade baserat på experimentella försök, alla har ett temperaturberoende av Arrhenius-typ och alla tar hänsyn till kalium- och kiselkoncentrationerna. I Pyttes modell ingår även natriumkoncentrationen. Skillnaderna mellan modellerna avser främst Arrhenius-parametrarna frekvensfaktor och aktiveringsenergi, samt reaktionsordningar för kisel och kalium. SKB anser att Huangs modell är mest lämplig för att analysera mineralomvandlingar i slutförvaret (SKB TR-06-11, avsnitt 2.4.2), baserat på en analys av modellernas teoretiska förankring och förmåga att prediktera baserat på validering av naturliga analogier. Beräkningsresultaten med Huangs modell visar att under 90° C sker nästan ingen omvandling i ett miljonårsperspektiv, vid 100° C kan omvandlingen bli betydande från hundratusen år och framåt, samt vid 130°C börjar processen blir viktig redan från tiotusen år (SKB TR-10-47, figur 3-28). Anledningen till att omvandlingen sker långsamt i ett slutförvarsområde är begränsning av temperaturen till under 100° C samt brist på kalium i närområdet (SKB TR-06-11, avsnitt 3.1.1). SKB anger att experimentella resultat från olika fältförsök stöder dessa beräkningsresultat. Från till exempel LOT-A2-



försöket finns inga indikationer på att strukturförändringar av montmorillonit har ägt rum (SKB TR-09-29, avsnitt 9.2.3).

SKB har också analyserat andra omvandlingsprocesser av montmorillonit förutom den till illit som diskuteras ovan; (i) omvandling av montmorillonit till klorit, (ii) substitution med andra katjoner än kalium, (iii) frigörelse av kisel vid höga pH, (iv) frigörelse av kisel inducerad av en temperaturgradient, (v) oktaedrisk ersättning inducerad av redoxprocesser, samt (vi) oktaedrisk ersättning inducerad av höga temperaturer. SKB anser att de flesta processerna inte har någon betydelse för slutförvarets långsiktiga säkerhet, antingen beroende på att processen sker i en helt annan miljö än den som förväntas i slutförvaret, eller beroende på att processen är långsammare än omvandlingen till illit som diskuteras ovan. Frigörelse av kisel inducerad av höga pH samt oktaedrisk ersättning inducerad av redoxprocesser kan dock ha en betydelse. Den förstnämnda mekanismen beaktas av SKB eftersom endast betong av låg-pH typ får användas vid konstruktion av slutförvarsanläggningen. Den sistnämnda mekanismen är relevant men sker enbart efter kapselbrott har ägt rum och när segjärninsatsen korroderar. Denna fråga beskrivs och granskas i avsnitt 5.9 i denna rapport.

SKB använder cementering som ett allmänt begrepp som avser processer i bentonit som leder till specifika förändringar av bentonitens hydrauliska och mekaniska egenskaper. Utfällning av mineraler eller bildning av amorfa faser kan minska interaktionen mellan montmorillonit och porvatten och därför leda till högre hydraulisk konduktivitet samt lägre svälltryck. Dessutom förväntas mineralutfällningar öka skjuvspänningen och minska töjningen vid brott hos bentoniten. Både geokemiska förändringar av accessoriska mineraler och omvandling av montmorillonit till illit kan leda till denna typ av mineralutfällningar. Vid omvandlingar faller vanligen kiseldioxid ut på grund av den oktaedriska ersättningen av kisel med aluminium. SKB anser att såväl de numeriska modelleringarna (SKB TR-10-59; SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.9) som experimentella försök (SKB TR-93-02; SKB TR-00-22; SKB TR-09-29) visar att mineralutfällning och därmed cementering inte sker i en omfattning som har stor betydelse för bentonitens hydrauliska och mekaniska egenskaper, under förutsättningen att temperaturen i närområdet begränsas till under 100° C.

MX-bentonit har under ett laboratorieförsök blivit bestrålad med en gammadosrat på 3972 Gy/h vid en temperatur på 130° C under ett års tid. Den totala gammadosen är cirka 30 MGy, vilket är flera tioposer högre än vad som förväntas i slutförvarsmiljön. Ingen nämnvärd förändring av montmorilloniten kunde observeras efter att försöken hade avslutats (SKB TR-93-03; SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.12). Efter kapselbrott kan även alfastrålning ha betydelse eftersom alfastrålande radionuklider kan transporteras in i bufferten. Beräkningar inför säkerhetsanalysen SR-97 (SKB TR-99-07) visade en total dos på 8×10^{15} alfa/g kan förekomma närmare kapseln efter ett tidigt kapselbrott och under en fortsatt tid på en miljon år. Denna dos motsvarar en absorberad dos på 8 MGy, som är fler tiopotenser lägre än tröskelvärdet (30 GGy) för amorf omvandling av montmorillonit (Gu m. fl., 2001; SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.12).

SKB anser att mikrobiella processer under vissa omständigheter kan resultera i bildning av reaktiva gaser och vätesulfid i vattenlösning (Pedersen, 2002). Både fält- och laboratorieförsök har visat att vissa sporbildande bakterier kan överleva i mättad bentonit med en bulkdensitet på 2000 kg/m³ (Pedersen m. fl., 2000a), även om de inte är mikrobiologiskt aktiva i detta tillstånd. Två arter av de sulfatreducerande bakterierna (SRB) *Desulfovibrio aespoensis* och *Desulfomicrobium baculatum* visade sig vara livsdugliga vid en vattenmättad densiteten hos bentonit på 1500 kg/m³, men de överlevde inte längre än 60 dagar vid de högre densiteterna 1800 och 2000 kg/m³ (Motamedi m. fl., 1996). I samband med LOT-försöket vid Äspölaboratoriet överlevde endast de

sporrbildande sulfatreducerande bakterierna en temperatur på 50 - 70° C (Pedersen m.fl., 2000a). Laboratorieförsök med en blandning av olika bakterier inklusive SRB-arten *Desulfomicrobium baculatum*, som har isolerats vid Äspö på 600 m djup, visar att sulfatreducerande bakterier kan vara aktiva med sulfidbildning i bentonit vid en densitet på 1500 kg/m³, men att sådan aktivitet upphör vid högre densiteter (Pedersen m.fl., 2000b). Dessutom har det visats att SRB är aktiva och producerar vätesulfid under den initiala fasen när bentonitens svälltryck utvecklas. Aktiviteten av SRB är omvänt korrelerad med den slutliga densiteten hos bufferten (Masurat och Pedersen, 2003; Masurat m.fl., 2010).

SKB:s redovisning av den kemiska utvecklingen ovan har till största delen fokuserats på bufferten. Utvecklingen av återfyllnaden är dock till största delen likartad med den i bufferten. Skillnaden är dock att påverkan från hög temperatur och strålningsenergi är betydligt mindre än i bufferten och temperatur- och strålningsrelaterade processer är därför också mycket långsammare. Dessutom är svälltrycket i återfyllnaden efter full återmättad lägre än i bufferten och mikroberna måste förutsättas vara aktiva i återfyllnaden oavsett om materialet har uppnått full återmättad eller inte (SKB TR-10-47, avsnitt 4.4.4, 4.4.7, 4.4.9 samt 4.4.10).

4.7.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning av de kemiska förändringarna av accessoriska mineral, omvandling av montmorillonit samt cementering i bufferten och återfyllnaden är vetenskapligt välgrundad. Slutsatserna att processerna sker i en mycket begränsad utsträckning i slutförvarsmiljö och att de inte på ett väsentligt sätt kommer att påverka säkerhetsfunktionerna hos bufferten och återfyllnaden under relevanta tidskalor är trovärdiga. SKB:s numeriska simuleringar bygger till stor del på väletablerad kunskap och en i huvudsak god teoretisk förståelse av de ingående mineralens kemiska jämviktstillstånd respektive kinetik för kända omvandlingsreaktioner.

Modelleringsresultaten stämmer i rimlig utsträckning väl överens med observationer från ett flertal fält- och laboratorieförsök samt även observationer från studier av naturliga analogier. Enligt SSM:s bedömning har SKB presenterat ett godtagbart underlag med avseende på processernas temperaturberoende. Det har en stor betydelse för omvandlingsreaktionernas omfattning att temperaturen i närområdet av slutförvaret kan begränsas till under 100° C.

Säkerhetsfunktionsindikatorerna för bufferten (tillräckligt högt svälltryck och låg hydraulisk konduktivitet) bibehålls så länge som andelen montmorillonit är högre än 75 %, oavsett om det är natrium- eller kalciumtyp (avsnitt 3.5.2 i denna granskningsrapport). Detta innebär att de kemiska processer såsom katjonbyte, utfällning och upplösningsreaktioner som inte leder till omvandling av montmorillonit inte har någon säkerhetsbetydelse i detta avseende. SSM bedömer i likhet med SKB att om temperaturen i slutförvaret kan med säkerhet begränsas till under 100° C sker ingen betydande mineralomvandling av montmorillonit. SSM bedömer därför att de ovan nämnda säkerhetsfunktionerna för bufferten inte på ett betydande sätt påverkas av en normal och förväntad kemisk utveckling för bufferten. SSM bedömer att säkerhetsfunktionerna för återfyllnaden inte heller påverkas. Denna bedömning baseras på samma resonemang som för bufferten.

Buffertens styvhet har stor betydelse för att skydda kapseln med avseende på en eventuell skjuvlast på grund av ett närliggande stort jordskalv. Styvheten finns inte med som en av buffertens säkerhetsfunktionsindikatorer, men beaktas genom att begränsa den initiala densiteten med beaktande av att bentoniten kan förekomma som kalciumtyp (SKB TR-10-34, avsnitt 3.4). Cementeringsprocesser kan under vissa omständigheter påverka



buffertens elastiska och plastiska egenskaper och därför indirekt styvheten. SSM anser dock att SKB:s numeriska simuleringar och återopade fältförsök har visat att cementeringen endast förväntas förekomma i liten omfattning i ett KBS-3-förvar. SSM bedömer därför att buffertens styvhet inte kommer att påverkas negativt av den geokemiska utvecklingen, även i detta fall under förutsättningen att temperaturen kan begränsas till under 100° C.

Beträffande den kemiska utvecklingens inverkan på buffertens förmåga att skydda kapseln mot korrosion, baserar SSM bedömningen på utvecklingen av koncentrationer av korroderande ämnen. Frågan om eventuell omfattning av ackumulation av klorid i närheten av kapselytan som SKB har studerat i samband med LOT-försöket har viss betydelse för bedömning av kopparkorrosion med klorid (se avsnitt 4.10.4 i denna granskningsrapport). Enligt SSM:s bedömning har förväntade mineralomvandlingar involverande sulfatmineralen anhydrit och gips endast en liten säkerhetsbetydelse för kapselkorrosion eftersom den totala mängden av svavel som initialt introduceras i bufferten kan kontrolleras genom användning av acceptanskriterier (se avsnitt 3.5.1 i denna granskningsrapport). Den totala omfattningen av korrosion beaktats av SKB med en massbalans (avsnitt 4.10.4 i denna granskningsrapport). SSM:s bedömning med avseende på den långsiktiga utvecklingen av sulfidkoncentrationer redovisas i avsnitt 4.6.4. SSM:s bedömning av den kemiska utvecklingens inverkan på säkerhetsfunktionerna för både bufferten och kapseln har baserats på att temperaturutvecklingen i bufferten med hög konfidensgrad kan visas begränsas till maximalt temperaturen 100° C. SSM:s granskning av den termiska utvecklingen återfinns i avsnitt 4.2 i denna granskningsrapport. SSM bedömer att SKB:s redovisning av hur bentonitens egenskaper påverkas av det förväntade strålfältet inom bufferten är rimlig. SSM anser att SKB:s redovisning har visat att strålningens negativa inverkan på egenskaperna hos buffert och återfyllnad är mycket begränsad. Slutsatserna bygger på de experimentella observationerna att ingen nämnvärd förändring av egenskaperna förekommit när materialet bestrålats med doser som är flera tiopotenser högre än de som kan förväntas i slutförvarsmiljö.

SSM anser dock att SKB behöver eftersträva en fördjupad kunskap av mekanismer involverade i strålningspåverkan på bentonit. De återopade försöken har baserats på en mycket hög dosrat för att under en rimlig tid uppnå en total dos som är jämförbar med exponeringen i slutförvarssituationen. Det är dock inte säkert att det enbart är den totala dosen som avgör risken för skadeverkningar. SSM anser därför att SKB behöver ta fram ytterligare resultat för att visa bestrålningstidens inverkan. I kommande steg av SKB:s program behöver säkerhetsredovisningen baseras på en fördjupad kunskap av mekanismer, och med detta en förståelse för hur omfattningen av skadeverkningar påverkas av en identisk total dos men med olika dosrater och bestrålningstider.

SSM bedömer att SKB:s redovisning av mikrobiella processer i bentoniten och återfyllnaden, som är baserade på ett antal laboratorie- och fältförsök, är ändamålsenlig och slutsatserna är trovärdiga. Ett av de mest betydelsefulla resultaten som framgår av SKB:s redovisning är att de sulfatreducerande bakterierna blir inaktiva när den homogena vattenmättade densiteten hos bentonit överstiger 1 800 kg/m³. Det bör noteras att detta innebär att mikrobiell sulfatreduktion behöver antas vara aktiv innan buffertens svälltryck har hunnit byggas upp tillräckligt liksom även efter att ett eventuellt advektivt förhållande kopplad till en erosionsprocess uppstår. För återfyllnaden kan mikrobiell aktivitet pågå även efter att återmättnadsprocessen har avslutats, eftersom tillräckligt densitet och svälltryck inte uppnås. Som påpekades i avsnitt 3.5.7.2 i denna granskningsrapport anser SSM att SKB behöver karaktärisera molekyllära former av organiskt kol i återfyllnaden i detta sammanhang. SSM anser således att mikrobiell sulfatreduktion i buffert och återfyllnad är en viktig process med potentiellt stor betydelse för allmän korrosion av kopparkapslar. Mikrobiellt bildad sulfid i närheten av kapselytorna kan också ha en

inverkan på lokala korrosionsprocesser. Ytterligare synpunkter kring mikrobiell sulfatreduktion framkommer i avsnitt 4.6 och 4.10 i denna granskningsrapport. SSM anser att SKB behöver genomföra ytterligare studier av mikrobiell sulfatreduktion respektive studier av vilka typer av organiskt material som konsumeras vid mikrobiell sulfatreduktion. SKB:s slutsatser bygger på observationer från ett fåtal försök som har utformats för att efterlikna slutförvarsmiljön. SKB behöver inför kommande steg i sitt program utforska vilka faktorer som styr mikrobiell aktivitet i olika buffertmaterial vid olika svälltryck och med en vattenmättad densitet mellan 1500 och 1800 kg/m³.

4.7.2 Mekanisk utveckling

Buffertens primära funktion är att säkerställa en begränsad diffusionskontrollerad transport av korroderande ämnen från berget till kapseln och av eventuella läckande radionuklider från kapseln till berget. Bentonitens egenskaper med uppbyggnad av ett svälltryck förväntas täta alla spalter och säkerställa att berget och bufferten står i kontakt med varandra. Ett alltför högt svälltryck behöver dock undvikas med syfte att begränsa den totala isostatiska belastningen av kapseln som även påverkas av andra bidrag som t.ex. kommande islast.

Bentoniten har dock förutom svälltrycket andra mekaniska egenskaper som påverkar kapselns långsiktiga integritet. Bentonitens elastisk-plastiska egenskaper påverkar exempelvis buffertens homogeniseringsprocess i deponeringshålet, både initialt och efter en eventuell massförlust orsakad av erosionsprocesser, samt buffertens uppåtriktade expansion in i återfyllnaden och deponeringstunneln. Egenskaperna påverkar dessutom hur djupt en kapsel kan sjunka ner i deponeringshålet som ett resultat av elastisk eller plastisk deformation. Buffertens styvhet, dvs. sträckgräns mot skjuvspänning, är av betydelse för kapselns förmåga att motstå skjuvlast vid jordskalv.

I detta avsnitt granskas och bedöms SKB:s hantering av bentonitens mekaniska egenskaper och de processer som exemplifieras ovan. Processer involverade i den uppåtriktade expansionen av bufferten in i deponeringstunneln och återfyllnaden redovisas dock i avsnitt 3.5.6 i denna rapport. Transportrelaterade processer under den initiala homogeniseringen av bufferten och återfyllnaden, såsom bentonitmateriallets vattenupptag redovisas i avsnitt 4.8.

4.7.2.1 Underlag från SKB

SKB redovisar uppbyggnad av svälltryck i bufferten samt de spänning-töjning-relaterade mekaniska processerna i avsnitt 3.4 i SKB TR-10-47 och sammanfattningsvis i avsnitt 10.3.9 i SKB:s säkerhetsanalys SR-Site (SKB SR-Site huvudrapport).

Den speciella egenskapen att utveckla ett betydande svälltryck är unik för lermaterial som innehåller en hög andel av mineralet montmorillonit. Denna egenskap är avgörande för både buffertens och återfyllnadens funktion i slutförvaret. Konstruktionsförutsättningarna hos buffert och återfyllnad ställer krav på det minimala svälltrycket för att säkerställa barriärernas säkerhetsfunktioner. För bufferten är gränsen högre än 2 MPa för att begränsa mikrobiell aktivitet (SKB TR-11-01, avsnitt 5.5.1; SKB TR-10-15, tabell 2-1) för återfyllnaden är den högre än 0,1 MPa för att motverka uppåtriktad svällning av bufferten (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 5.6.1; SKB TR-10-16, kap 4). Dessa funktionsindikatorer kommenteras i avsnitt 3.3.1 respektive 3.3.6 i denna granskningsrapport. En begränsning av svälltrycket till högst 15 MPa med syfte att begränsa tryck på kapsel och berg har formulerats som en del av säkerhetsfunktionerna för bufferten (SKB SR-Site huvudrapport, figur 10-2). I konstruktionsförutsättningarna för bufferten finns dock inte denna begränsning införd.



Enligt SKB kommer de två referensbuffertmaterialen MX-80 och Ibeco RWC (även benämnd Deponit CA-N) att vid referensdensiteten (2000 kg/m^3) ha ett svälltryck på mellan 7,5 till 8 MPa. Med hänsyn tagen till de tillåtna variationerna i densitet (1950 till 2050 kg/m^3) kan svälltrycket variera mellan 4,5 och ungefär 13 MPa (SKB TR-10-47, figur 3-12 och 3-13, SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.9).

I SKB:s mekaniska modell för bentonit i buffert och återfyllnad används konceptet effektiv spänning (effective stress), vilken erhålls genom att räkna bort porvattentrycket från den totala spänningen. Konceptet introducerades i mekaniska teorier av lermaterial för att beskriva egenskaper hos lermaterial som ett vattenmättat kontinuum bestående av tvåfaser (Schofield och Wroth, 1968, avsnitt 1.6; Das, 2008, avsnitt 2.3). När konceptet tillämpas för montmorillonit orsakas den effektiva spänningen inte bara från kontakten mellan partiklarna utan även från interaktion mellan negativt laddade montmorillonitflak och omkringliggande porvatten (SKB TR-88-30, kapitel 1).

SKB anser att svällning av bentonit främst orsakas av den repulsiva kraften mellan montmorillonitflak (SKB TR-10-47, avsnitt 3.4.1). För andra vanliga svällande material kan den effektiva spänningen bestå av bidrag från både kontaktinteraktion mellan mineralpartiklar samt elektrostatisk interaktion. För svällande material som även har stark plasticitet såsom vattenmättad bentonit finns dock ingen betydande kontaktinteraktion. I detta fall består den effektiva spänningen endast av bidraget från elektrostatisk interaktion, vilken är grunden till svälltrycket och buffertens säkerhetsfunktioner (SKB TR-06-38, kapitel 1).

SKB modellerar bentonitmateriallets homogeniseringsprocess med den numeriska koden Code_Bright (Cimne, 2002) som baseras på den finita elementmetoden (SKB TR-10-11, tabeller 5-1 till 5-9). Koden består av olika delar såsom den termiska delen (tabell 5-2), vattenretentionsdelen (tabell 5-3), samt delen för ångtransport (tabell 5-5), som är formulerade på samma sätt som vid modellering av återmättnadsprocessen (jmf. tabeller 5-2, 5-3 och 5-5 med ekvationer 4-16, 4-17 respektive 4-19 i SKB TR-10-11). Den hydrauliska delen (tabell 5-4) baseras på flöde genom ett poröst medium med beaktande av att porositeten är en variabel i homogeniseringsprocessen samt att den hydrauliska konduktiviteten är en funktion av porositeten. SKB beaktar den elastisk-plastiska deformationen i modelleringen av homogeniseringsprocessen med den så kallade BBM-modellen (Barcelona Basic Model) eller den modifierade BBM-modellen (tabeller 5-6 till 5-9 i SKB TR-10-11).

SKB:s modelleringsresultat har jämförts med resultat från återtagsförsöket CRT (Canister Retrieval Test) vid Äspölaboratoriet. En god överensstämmelse mellan beräkningar och experimentella resultat har uppnåtts med avseende på den radiella fördelningen av portal (void ratio) och vattenretention (SKB TR-10-11, avsnitt 5.5.2) i bufferten. Den beräknade axiella spänningen är dock högre än den uppmätta. SKB anser att avvikelsen beror på ett kontaktproblem vid installation av spänningssensorerna (SKB TR-10-11, avsnitt 5.5.2). Kapselns genomsnittliga densitet är mycket högre än buffertens. Detta innebär att det finns en vertikal nettobelastning på buffertblocken under kapseln i deponeringshålet. Belastningen kan leda till att kapseln sjunker in i buffertblocken. Hur djupt en kapsel kan sjunka beror på buffertens utveckling genom konsolidering. SKB anger tre olika typer av tidsberoende förskjutningar av bufferten som orsakas av kapselns tyngd. Den första är relaterad till vad som i geoteknik kallas "primär konsolidering", den andra är "sekundär konsolidering" eller volymkrypning och den tredje är tidsberoende skjuvdeformation eller deviatorisk krypning (SKB TR-10-47, avsnitt 3.4.1; Smith och Smith, 1998, avsnitt 9.1). Det finns i litteraturen vissa skillnader med avseende på benämningen av dessa processer (t.ex. Smith och Smith, 1998).

Vid den primära konsolideringen bär porvattentrycket en del av nettobelastningen och utflöde av porvatten är den dominerande processen till dess att den hydrauliska gradienten har jämnats ut. Volymkrypningen under den sekundära konsolideringen orsakas av en mikrostrukturell omorganisation av lerpartiklarna som dock inte leder till massförlust utan snarare en kompression av bufferten under kapseln. Den deviatoriska krypningen förekommer när deviatorisk spänning uppstår i materialet och spänningen är beroende på materialets interna friktion och kohesionskraft. De två sistnämnda parametrarna minskar långsamt med tid vilket medför en viss kapselsjunkning (SKB TR-10-47, avsnitt 3.4.1). SKB har modellerat svällning och konsolidering av bufferten på grund av kapselns belastning med koden Abaqus (Dassault Systemes, 2012), tillsammans med ett uttryck för den deviatoriska krypningen. Den deviatoriska krypningen representeras i modellen med Singh-Mitchells teori för krypning (SKB TR-06-04, ekvation 2-1; Li och Xie, 2013; Singh och Mitchell, 1968). Alla relevanta processer förutom volymkrypning ingår i modellen. Motivet för att utesluta volymkrypning är att denna process inte leder till en förlust av buffertmaterial under kapseln och inte heller någon nämnvärd kapselsjunkning (SKB TR-06-04, kap 1). SKB:s beräkningar visar att kapselsjunkning är mycket liten; cirka 0,35 mm i fallet med fixerat randvillkor och med ett svälltryck i bufferten på 7 MPa. Ett svälltryck på denna nivå är det förväntade genomsnittsvärdet i deponeringshålet. Även vid ett mycket lågt svälltryck på 80 kPa uppgår kapselsjunkningen till endast 23 mm under 100 000 år (SKB TR-06-04).

SKB anser att ett jordskalv kan orsaka en skjuvrörelse längs en spricka som skär ett deponeringshål. Bergets förskjutning kommer att trycka bentoniten i deponeringshålet på den aktiva sidan och orsaka höga skjuvspänningar som leder till elastisk och plastisk deformation i området mellan sprickan och kapseln. Trycket på den aktiva sidan överförs till kapseln, vilket kan medföra böjspänningar och att kapseln börjar luta i deponeringshålet. Inverkan av bergets skjuvrörelse på kapselns integritet beror på styvhet eller skjuvhållfasthet hos bentoniten i förhållande till styvheten hos kapseln. Skjuvhållfasthet hos bentonit är i första hand beroende av buffertens densitet och deformationens hastighet (SKB TR-10-47, avsnitt 3.4.1). Skjuvhållfasthet hos bufferten vid modellering av jordskalv (SKB TR-10-34, avsnitt 3.4) representeras av en bentonitmodell (SKB TR-10-31, kap 2). I denna modell antar SKB att odränerade förhållanden föreligger som ett resultat av den mycket snabba rörelsen. I modelleringen beaktas endast den minst gynnsamma kalciumdominerande bentonittypen som ger den högsta deviatoriska spänningen vid brott. Bentonitmodellen består av ett förhållande mellan svälltryck och portal, ett förhållande mellan deviatorisk spänning vid brott och svälltryck, samt ett förhållande mellan skjuvhållfasthet och skjuvhastighet (SKB TR-10-31, ekvationer 2-3, 2-4, respektive 2-5). Dessutom ingår kurvor för elastisk-plastisk spänning-töjning hos bentonit (SKB TR-10-31, figur 2-1). Dessa kurvor består av en elastisk del som karaktäriseras av Youngs modul och Poissons tal, samt en del för plastisk härdning som representeras av von Mises spänningar vid olika plastiska töjningar (SKB TR-10-31, tabell 2-1, figur 2-1). Skjuvhållfasthet är den största von Mises spänningen på kurvan eller brottpunkten. I dataprogrammet Abaqus används den porös-elastiska modellen, Drucker-Pragers plastiska modell, samt de ovan diskuterade relationerna och kurvorna för att modellera bufferten i skjuvlastfallet (SKB TR-10-34, avsnitt 3.4).

SKB har tagit fram en stor mängd experimentella resultat till stöd för förhållanden och kurvor som används vid modelleringen av bufferten. Triaxialförsök har utförts vid mycket låg skjuvhastighet (runt 5×10^{-8} m/s) med syfte att bestämma friktionsvinkel och kohesion hos bentonit samt förhållandet mellan deviatorisk spänning och deformation (SKB TR-95-20, avsnitt 2.2). Vid SKB:s skjuvlastförsök i skala 1:10 bestämdes relationen vid högre skjuvhastigheter (SKB TR-86-26; 0,032 mm/s, 1,9 mm/s respektive 160 mm/s) och ett empiriskt förhållande mellan bentonitens skjuvhållfasthet och skjuvhastighet etablerades (SKB TR-88-29, avsnitt 4.4). Ännu högre skjuvhastigheter uppnåddes vid användning av

kompressionsmaskin med hastigheter mellan 1×10^{-4} till 0,3 m/s samt i försök med fallande hammare med hastigheter från 1,3 till 6,0 m/s (SKB TR-04-02, avsnitt 3.4). I SKB:s modellering av skjuvlastfallet är den representativa skjuvhastigheten 1 m/s (SKB TR-10-34, avsnitt 8.1; SKB TR-04-02, avsnitt 4.4). SKB:s tidiga försök avsåg främst egenskaperna hos natriumdominerad MX-80-bentonit (SKB TR-86-26, TR-04-02), medan vid senare försök har även andra material testats vid skjuvhastigheter upp till 0,3 m/s, så som kalciumdominerad Deponit CaN samt jonbytt kalcium-MX-80-bentonit (SKB TR-10-32).

SKB har observerat sprött brott vid reducerad töjning på prover som utsatts för höga temperaturer på 150°C och som har genomgått cementering, på prover med vattenkvot på ca 0 % före vattenmättnad, på prover med slutlig vattenmättnadsgrad mindre än 97 %, samt på ett prov som har utsatts för konsolidering under prepareringen (SKB TR-10-41). Försöken har genomförts vid mycket låg skjuvhastighet på 0,003 mm/s (SKB TR-10-41, avsnitt 3.4). Maximal spänning vid brott är dock fortfarande jämförbar med bentonit av samma typ och samma densitet med exponering vid temperaturer runt 115°C (jämför SKB TR-10-41 figur 5-9, med SKB TR-10-32 figur 3-5).

4.7.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning av mekaniska processer angående bentonitens svällning är ändamålsenlig. SKB:s hantering är i enlighet med den allmänna förståelsen av involverade mekanismer (Craig, 2004, avsnitt 1.1). Det möjliga intervallet för buffertens svälltryck har tagits fram på basis av omfattande experimentell verksamhet i laboratorier och vid fältförsök. Det bedöms därför vara trovärdigt. SSM anser att det föreligger vissa osäkerheter kring statusen för en övre gräns för buffertens svälltryck, men det är sannolikt praktiskt möjligt att implementera gränsvärdet 15 MPa, eftersom de båda referensmaterialen MX-80 och Ibeco-RWC nästan alltid har svälltryck som är lägre än detta värde vid buffertens referensdensitet.

SSM bedömer att SKB:s redovisning av homogeniseringsprocessen hos buffert och återfyllnad är vetenskapligt välgrundad och slutsatserna är rimliga. SKB:s hantering av kopplade processer (SKB TR10-11, tabeller 5-2 till 5-9) har baserats på modellering av värmeöverföring och ångtransport med Fouriers respektive Ficks lag, vattenretention med von Genuchtens ekvation (Szymkiewicz, 2013, ekv. 2.17), flöde och hydraulisk konduktivitet med Kozeny–Carman ekvation (Das, 2008, ekv. 5.36), spänning och sträckgräns med BBM (Barcelona Basic Modell) eller modifierad BBM (Alonso m.fl., 1990). Dessa angreppssätt är att betrakta som standardmetoder för att hantera de ovan nämnda processerna, vilket referenserna ovan visar. Både BBM och modifierad BBM kan betraktas som en utvidgning av Cambridge Clay Modell (Davis och Selvadurai, 2002, avsnitt 3.6). SKB har visat att lämpliga experimentella resultat i många fall finns tillgängliga för jämförelser och analys av modelleringsresultat.

SSM bedömer att SKB:s modellering av kapselsjunkning i deponeringshålet är trovärdig. SSM anser att SKB:s modellering har baserats på väletablerade koncept och parametrar från välkontrollerade experiment. SSM bedömer i likhet med SKB att volymkrypning inte leder till minskning av massa under kapseln utan snarare till kompression, samt att volymkrypning av lermaterial är i samma storleksordning som den deviatoriska krypningen (Havel, 2004, kapitel 3 och 4). SSM instämmer med SKB att kapselsjunkning med all sannolikhet är liten under slutförvarets långsiktiga utveckling.

SSM anser att SKB:s val att endast analysera kapselsjunkning i deponeringshål med en redan vattenmättad buffert medför en viss osäkerhet, vilken dock kan betraktas som mycket begränsad. Denna bedömning har baserats på följande resonemang; i samband med kapselsjunkning i en omättad buffert ökar återmättnadsgraden och svälltrycket hos



bufferten. SKB har visat att kapselsjunkning endast är 23 mm under 100 000 år för en buffert med så lågt svälltryck som 80 kPa. SSM bedömer att detta svälltryck relativt snabbt uppnås med utgångspunkt från resultat från analysen av svälltryckets utveckling under återmättnadsprocessen (SKBdoc 1415873, figur 17). SSM anser dock att SKB i senare steg av sitt program behöver beakta fallet omättad buffert för att öka precisionen i förutsägelser kring kapselsjunkning och för att utöka förståelsen för processkopplingar och säkerhetsmarginaler.

SSM bedömer att SKB:s mekaniska bentonitmodell som används i modellering av kapsel och buffert i samband med fallet skjuvrörelse i berget inducerad av jordskalv är vetenskapligt och tekniskt välunderbyggd och trovärdig. Modellen har även implementerats med beaktande av de mest pessimistiska fallen och hanteringen i säkerhetsanalysen bedöms därför vara konservativ.

SSM:s bedömning har baserats på att modellen har sin utgångspunkt i grundläggande samband med avseende på elasticitet och plasticitet av lermaterial, samt relationen mellan deviatorisk spänning och töjning som teoretiskt används för att representera materialets styvhet vid odränerade förhållanden. Parametrarna i modellen har erhållits från relativt omfattande välkontrollerade laboratorieförsök med syfte att representera förväntade händelser och förhållanden i slutförvaret. Parametervärdena har erhållits även för skjuvrörelser med höga skjuvhastigheter.

SSM ser positivt på att SKB har studerat fenomenet sprött brott vid reducerad töjning på bentonitprover som har genomgått cementering, är helt torra och som inte är helt vattenmättade. SSM bedömer att denna typ av brott inte kommer att påverka bentonitens betingelser under skjuvlast negativt, eftersom den maximala spänningen är samma för dessa prover som hos bentonit enligt specifikationen för slutförvarets referensutformning. SSM anser dock att SKB behöver komplettera studierna av skjuvhållfasthet och deformabilitet hos bentoniten som har genomgått cementering under skjuvningshastighet på upp till 1 m/s, vilket antas av SKB som rimligt lastförhållande vid verifiering av kapselns tålighet vid skjuvrörelser i berg orsakade av ett jordskalv.

4.8 Återmättnad av buffert och återfyllnad

Bufferten och återfyllnaden installeras i deponeringshålen respektive deponeringstunnlarna med ett partiellt vattenmättat tillstånd med en vattenmättnadsgrad på cirka 70-80 %. Återmättnadsprocessen för bufferten påbörjas efter att buffertskyddet har avlägsnats och bentonitpellets har installerats. Återmättnadsprocessen för återfyllnaden påbörjas direkt efter installation av återfyllnadsblock och pellets eftersom inget motsvarande skydd används i deponeringstunnlarna. Av SKB:s redovisning framgår att det finns en fördelning av återmättnadstider som beror på de lokala transportförhållandena i berget runt deponeringshål och deponeringstunnlar. Bufferten blir i vissa deponeringshål inte fullständigt återmättad förrän om mer än 1000 år. Lermaterialet i buffert och återfyllnad återmätts genom inflödet av grundvatten från vattenförande sprickor i omgivande berg och/eller porvatten från bergmatrisen. SKB använder kopplade numeriska termiska-hydrauliska-mekaniska (THM) koder för att modellera återmättnadsprocessen. I detta avsnitt redovisas och granskas SKB:s analys av återmättnadsförloppet.

På SSM:s begäran har SKB tagit fram kompletterande information om ett antal frågor kopplade till återmättnadsprocessen. Följande svar från SKB har inkommit till SSM:

- analys av konceptuell modellosäkerhet inklusive jämförelse med tillgängliga experimentella studier (SKBdoc 1385067; SKBdoc 1415874; SKBdoc 1415870; SKBdoc 1415872; SKBdoc 1415875; SKBdoc 1415879)



- analys av möjliga fördelningar av återmättnadstider för bufferten med hänsyn till lokala hydrogeologiska betingelser på förvarsdjup (SKBdoc 1385067; 1415879)
- säkerhetsbetydelse av mättnadsgrad och eventuell inverkan av heterogena förhållanden inom bufferten (SKBdoc 1385067; 1415873; 1415878)
- analys av termisk påverkan på bentonitens mekaniska och hydrauliska materialegenskaper (SKBdoc 1385067; 1415876)
- analys av hur långsam återmättnad kan förändra materialegenskaper hos bufferten (SKBdoc 1385067, 1415886).

4.8.1 Underlag från SKB

Buffertens säkerhetsfunktioner är att förhindra vattenflöde i deponeringshålen, att begränsa mikrobiell aktivitet, att mildra effekterna av skjuvrörelser i berget, att motstå geokemiska förändringar, att förhindra kapselsjunkning, att utöva begränsat tryck på berg och kapsel, samt i samband med kapselbrott, att sorbera radionuklider, att tillåta passage av gaser från korrosion av insatsen samt att förhindra transport av kolloidpartiklar (SKB TR-10-15, avsnitt 2.2.1).

SKB redovisar återmättnadprocesser för buffert och återfyllnad i SR-Site (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.8), i processrapporten för bufferten (SKB TR-10-47, avsnitt 3.3), samt för återfyllnaden inklusive förslutningen (SKB TR-10-47, avsnitt 4.2). Även svällning och omfördelning av massa i bufferten under återmättnadsprocessen redovisas i buffertprocessrapporten (SKB TR-10-47, avsnitt 3.4.1). SKB drar slutsatser i första hand från omfattande numerisk modellering av återmättnadsprocessen (SKB TR-10-11, kapitel 2 till 5). Återmättnadsprocessen av återfyllnaden i deponeringstunnlarna har även modellerats vilket redovisas i SKB R-09-19 (Bilaga C) samt i SKB R-10-06. Modellering har utförts i en skala som täcker hela anläggningslayouten.

Återmättnadsprocessen i svällande lera representeras som vattenströmning i ett omättat poröst material med tvåfasflöde av vatten och luft. Vattenpotentialen i leran under omättade förhållanden är negativ (suction), vilket är den drivande kraften för återmättnadsprocessen. Den kan uttryckas som summan av matrisens kapillära potential och den osmotiska potentialen. Den osmotiska komponenten beaktas för att ta hänsyn till lerans elektriska laddning (Dueck 2004, avsnitt 2.2.1). Vattenretentionskurvan, som beskriver förhållandet mellan vattenmättnadsgraden och vattenpotentialen, modelleras av SKB med hjälp av van Genuchten's ekvation (SKB TR-10-11, ekvation 3-4). Den hydrauliska konduktiviteten i leran beräknas sedan som en funktion av vattenmättnadsgraden (SKB TR-10-11 ekvation 3-5). Massöverföring i ångfasen antas ske genom diffusion (SKB TR-10-11, ekvation 3-6). Inverkan av termiska processer på återmättnadsprocessen modelleras genom att ett flertal faktorer antas vara beroende av temperaturen, så som vattnets och vattenångans densitet, den relativa fuktigheten, vattenångstrycket, vattnets viskositet samt vattenångans diffusivitet (SKB TR-10-11, ekvationer 3-2, 3-5 och 3-6).

SKB har genomfört en omfattande modellering av buffertens och återmättnadens initiala utveckling (SKB TR-10-11) med hjälp av dataprogrammen Abaqus (Dassault Systèmes, 2015) och Code_Bright (Cimne, 2002). Processerna som har modellerats är bevätning av återfyllnaden och bufferten (SKB TR-10-11 kapitel 2 och 3), fördelning av vattenånga (kapitel 4) samt buffertens homogenisering (kapitel 5). Redovisningen i SKB TR-10-11 är en uppdatering och komplettering av liknande modellering som utförts för att ta fram underlag till SKB:s tidigare säkerhetsanalyser (SKB TR-99-41; SKB TR-06-14). Olika fall med olika begynnelse- och randvillkor har modellerats för att täcka in rumsliga variationer och för att utforska konceptuell osäkerhet med hjälp av alternativa antaganden. Vid modellering av återfyllnaden har SKB exempelvis använt; (i) en tvådimensionell icke-



symmetrisk geometri med avstånd mellan sprickorna på 6 respektive 24 m, och (ii) en tvådimensionell plangeometri (SKB TR-10-11, avsnitt 2.2).

SKB har på experimentell basis bestämt parametrarna i flera empiriska och konstitutiva ekvationer för MX-80-bentonit. För att få fram vattenretentionskurvan har förhållandet mellan vattenkvot och relativ fuktighet bestämts genom två metoder som antingen tillämpar en sorptionsvåg eller en exsikator (Dueck, 2004; SKB R-10-44; SKB TR-10-55, avsnitt 3.2). Bentonitens mekaniska egenskaper har med beaktande av volymförändringar bestämts med kompressionsförsök och svällnings- eller krypningsförsök för några specifika spännings- och fuktvägar. Uppmätta spänningar, deformationer och relativ fuktighet har tagits fram (SKB TR-10-55, avsnitt 3.3). Dessutom har fukttransport och omfördelning av fukt undersökts (SKB TR-10-55, avsnitt 3.4 och 3.5). Parametrarna för andra typer av bentonit har också bestämts experimentellt och redovisats av SKB, t.ex. för vattenretentionskurvan för Asha- och Friedland-bentonit (SKB R-08-136) och för Ibeco RWC BF-bentonit (SKB R-10-44; Villar, 2002). En sammanställning av resultaten för andra typer av bentonit tillsammans med data för MX-80-bentonit har tagits fram (SKBdoc 1415875, figur 4-1).

Ett urval av beräknade tider för återfyllnadens och buffertens mättnadsförlopp har sammanställts av SKB (SKB TR-11-01, figur 10-49 respektive figur 10-50; SKB TR-10-11, figur 2-35 respektive figur 3-41). Dessa beräknade mättnadstider är baserade på materialegenskaper för MX-80-bentonit. SKB:s preliminära analyser visar att mättnadstider för andra typer av bentonit kan vara kortare än för MX-80-bentonit, medan däremot homogenisering av andra typer av bentonit är liknande som för MX-80-bentonit (SKBdoc 1415875).

Modellering av återfyllnadens mättnadsförlopp har även genomförts med det numeriska programmet DarcyTools (SKB R-07-38) och detta arbete har täckt in deponeringstunnlarna och hela anläggningslayouten (SKB R-09-19, bilaga C; SKB R-10-06). DarcyTools har kapaciteten att modellera vattenflödet i deponeringstunnlarnas närområde samtidigt som hela slutförvarsskalan har inkluderats i modellen. Det storskaliga formatet kan inte hanteras av de båda andra huvudsakliga beräkningsverktygen Abaqus eller Code_Bright. I programmet DarcyTools anpassas och förenklas angreppssättet som använts i modellering med Abaqus eller Code_Bright, såsom beaktande av att den hydrauliska konduktiviteten för den omättade återfyllnaden är beroende av mättnadsgraden, vilken i sin tur är beroende på vattenretentionen i återfyllnaden (SKB R-09-19, avsnitt C.4). Beräknade resultat visar att återfyllnaden blir vattenmättad efter cirka 200 år (SKB R-09-19, avsnitt C.6), vilket stämmer relativt väl överens med resultat för liknande fall beräknade med programmen Abaqus eller Code_Bright (SKB SR-Site huvudrapport, figur 10-49).

På begäran av SSM har SKB beräknat inte bara intervall för återmättnadstider utan även en fördelning av återmättnadstider baserat på varierande flödesförhållanden i enskilda deponeringshål. I dessa beräkningar har hänsyn tagits till både fördelningen av vatteninflödet från sprickor i berget till enskilda deponeringshål och till tunnelsystemet i berget samt transport av vatten baserat på den intakta bergmatrisens hydrauliska konduktivitet. Resultaten av den ackumulerade fördelningen av återmättnadstider börjar på några decennier upp till många tusentals år beroende av flödesfördelning i sprickor samt bergmatrisens hydrauliska konduktivitet (SKBdoc 1415879, figur 15). Fördelningen av grundvattenflöden i sprickor som skär deponeringshål har tagits från modellen för grundvattenflöde i anläggningsområdet vid Forsmark innan installation av tekniska barriärer (SKB R-13-21). Direkta mätningar på intakta borrhärlor utan sprickor från Forsmarksområdet ger värden för bergets hydrauliska konduktivitet på 5×10^{-12} till 4×10^{-14} m/s (SKB P-07-162). SKB skiljer på fallet som motsvaras av att återmättnaden enbart äger

rum genom flöden i bergets sprickor, samt fallen som motsvaras av att bidrag till återmättnadsprocessen även kommer från transport av porvatten från den intakta bergmatrisen med en hydraulisk konduktivitet av 10^{-11} , 10^{-12} , 10^{-13} och 10^{-14} m/s, där det sista och lägsta värdet anses av SKB som ett extremt lågt värde (SKBdoc 1415879, figur 15). Dessutom beräknades återmättnadstider med antagandet att inget transportmotstånd finns i återfyllnaden och att allt vatten som strömmar in i deponeringstunnlarna blir tillgängligt för att väta bufferten. Beräkningarna visar på återmättnadstider kring cirka 1 500 år för fallet med en hydraulisk konduktivitet på 10^{-13} m/s för bergmatrisen, som anses vara ett lågt värde (SKB P-07-162, tabell 5-1). SSM:s granskning av SKB:s redovisning av grundvattenflödesmodellering och platskaraktärisering återfinns i andra delar av denna granskningsrapport (avsnitt 3.1.5, 4.5, 5.4).

För att underbygga antaganden och parametrering av SKB:s TH- eller THM-modeller samt för att bemöta kommentarer från SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2012:18) har SKB som en del av kompletteringsförfarandet tagit fram en jämförelse mellan beräknade och uppmätta inflöden i återtagsförsöket CRT som har genomförts vid Äspölaboratoriet (SKB IPR-02-30). Om inte de detaljerade experimentella villkoren beaktas kan de beräknade resultaten skilja sig från uppmätta inflöden (SSM Technical Note 2012:18). När de detaljerade experimentella villkoren beaktats i modelleringen erhöles en god överensstämmelse mellan de uppmätta och beräknade inflödena (SKBdoc 1415870). Ett exempel på ett sådant villkor är att filtermattan som tillför vatten till bufferten kan vara omättad om trycket blir för lågt.

Konceptuella osäkerheter förknippade med termiska, hydrauliska och mekaniska processer i närområdet av ett slutförvar har undersökts både teoretiskt och genom storskaliga experiment i ett antal EU-projekt och inom det internationella DECOVALEX-projektet (DEvelopment of COupled models and their VALidation against Experiments, Tsang m.fl., 2009). I samband med modelleringen och monitorering av FEBEX-mock-up-försöket (Full-scale Engineered Barriers Experiment) vid CIEMAT (Alonso m.fl., 2005) drogs efter att försöket hade pågått cirka 900 dagar slutsatsen att återmättnadsprocessen i praktiken går långsammare än i jämförelse med modelleringsresultat. Baserat på dessa studier har konceptuella osäkerheter i den konventionella modellen för flerfasflöde identifierats och testats. Flera modifieringar av modellkonceptet har rekommenderats:

- Ett tröskelvärde för den hydrauliska gradienten i Darcys lag kan behöva införas, vilket skulle innebära att inget vattenflöde sker om gradienten är lägre än ett tröskelvärde (Sánchez m.fl., 2007).
- Irreversibel termodynamisk växelverkan av termo-osmos kan behöva beaktas, vilket innebär att osmotiskt flöde påverkas av en termisk gradient (Zheng och Samper, 2008).
- Utveckling av porstruktur under återmättnadsprocessen kan behöva inkluderas i modellen (Thomas m.fl., 2003), vilket innebär att den absoluta permeabiliteten (intrinsic permeability; ekvation 3-5 i SKB TR-10-11) förutsätts minska med ökning av återmättnadsgraden pga. förändring av porstrukturen.

SKB har redovisat den teoretiska grunden för ovan identifierade modellmodifieringar samt utvärderat relevansen för de TH- eller THM-beräkningar som utfördes i SR-Site (SKBdoc 1415874):

- Antagandet att det finns ett tröskelvärde för den hydrauliska gradienten har ingen betydelse för resultaten i SR-Site-beräkningarna eftersom den hydrauliska gradienten i bufferten alltid är högre än det gängse tröskelvärdet (SKBdoc 1415874).
- En modell med termo-osmos leder till att full mättnad inte nås så länge det finns en temperaturgradient. Mättnadsgraden kan dock bli hög innan effekten blir

betydelsefull. Ett exempel visar att den torraste delen av bufferten efter 200 år ändå kan uppnå en mätnadsgrad på mer än 97 % (SKBdoc1415874, figur 4-6).

- En modell som tar hänsyn till utvecklingen av porstrukturen kan leda till att det tar längre tid för bufferten att vattenmättas i jämförelse med vad som redovisas i SR-Site. Med de lägsta empiriska värdena för ångdiffusion skulle tiden till full vattenmättnad öka med en faktor 3,5 för de deponeringshål där buffertens permeabilitet och hydrauliska konduktivitet är styrande. Dessa hål har dock de kortaste beräknade tiderna för att uppnå full vattenmättnad (SKBdoc 1415874).

Ytterligare en konceptuell osäkerhet har analyserats av SKB nämligen betydelsen av naturlig konvektion av vattenånga framkallad av en betydligt högre temperatur i deponeringshålet än i det omgivande berget. Konvektionen kan potentiellt bidra till större fuktomfördelning. SKB:s analys visar att konvektion möjligen kan förekomma i deponeringshål om det inte förekommer någon svällning av pellets och om ingen kondensation av ånga sker (SKBdoc 1415874). SKB:s experimentella studier av processen visar dock att kondensation är den dominerande mekanismen för återmätning av pellets om transport av ånga från toppen av deponeringshålen förhindras (SKB R-13-42). SKB har genom modellering visat att återmättnadsförloppet för bufferten förblir homogent snarare än ojämnt i samtliga deponeringshål med ett punktföde på mindre än 5×10^{-6} l/min, eftersom porvattnet huvudsakligen tillförs jämnt från bergmatrisen. Om vattenflödet från sprickan är större än 10^{-3} l/min sker inte heller någon ojämn återmättnad av bufferten eftersom pellets runt bufferten beväts mycket snabbt inom 2 år, vilket möjliggör en jämn tillförsel av vatten till bufferten. SKB uppskattar dock att cirka 500 deponeringshål har vatteninflöden mellan 5×10^{-6} l/min och 10^{-3} l/min (SKB R-13-21). I dessa hål kan en ojämn återmättnadsprocess förekomma, men inverkan på densitetsfördelningen och därmed svälltrycket bedöms vara mycket begränsad. Detta beror i huvudsak på att homogeniseringsprocessen inte är starkt beroende på spänningsutvecklingen (SKBdoc 1415878).

I ett svar på SSM:s begäran om komplettering redovisar SKB förutsättningarna för en artificiell tillförsel av vatten alternativt en justering av vattenmättnadsgraden för att påverka och i första hand förkorta återmättnadsförloppet för bufferten. SKB anser att det är praktiskt svårt att genomföra artificiell vätning av bufferten vid installation och samtidigt uppnå det specificerade initialtillståndet för bufferten. Denna bedömning har baserats på erfarenheter av försöken CRT och Lasgit (Large scale gas injection test) i Äspölaboratoriet. Det är dock möjligt att producera buffertblock med högre vattenkvot och med bibehållen referensdensitet, men vidare teknisk utveckling krävs för att detta alternativ skall kunna betraktas som tillgängligt (SKBdoc 1385067).

SKB redovisar att säkerhetsfunktionerna för bufferten och återfyllnaden ursprungligen har definierats för ett fullständigt vattenmättat tillstånd. Enligt SKB:s syn är det dock inte nödvändigt att alla buffertens funktionskrav är uppfyllda så länge deponeringshålet är omättat eftersom det inte sker någon materieöverföring mellan kapsel och grundvatten i berget så länge detta omättade tillstånd fortgår (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.8; SKBdoc 1415873). En frågeställning som SKB identifierat är dock att säkerhetsfunktionen att begränsa mikrobiell aktivitet (att svälltrycket är högre än 2 MPa) samt att undvika advektion i bufferten (att den hydrauliska konduktiviteten är lägre än 10-12 m/s samt svälltrycket är högre än 1 MPa) kan analyseras innan bufferten uppnått fullständig mättnad. Andra säkerhetsfunktioner för bufferten bedöms inte vara av relevans innan tiden för fullständig återmättnad. Beräkningsresultat visar att svälltrycket i alla delar av bufferten kan uppnå det minimivärde som krävs för att begränsa mikrobiell aktivitet (> 2 MPa) innan bufferten blir helt vattenmättad (jämför SKBdoc1415873, figur 17 med SKBdoc1415879, figur 15). Beträffande experimentell verifikation av dessa resultat anger SKB att de inväntar resultat från försök kring mikrobers betingelser i omättad bentonit

(projektet gradientförsök). Beroende på utfallet av dessa försök kan säkerhetsfunktionen utökas till att inte bara innefatta det vattenmättade tillståndet utan också inkludera det förutvarande omättade tillståndet (SKBdoc 1415873).

SKB:s grundsyn är att återmättnadsförloppet i sig inte har någon direkt inverkan på buffertens eller återfyllnadens säkerhetsfunktioner. Det anses ändå viktigt att uppnå en detaljerad förståelse av detta förlopp eftersom det påverkar barriärernas tillstånd under förvarets tidiga utvecklingsskede (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.8). Det är exempelvis viktigt att temperaturvillkoret $< 100^{\circ} \text{C}$ uppfylls även under återmättnadsprocessen. Om temperaturen i bufferten runt kapseln lokalt blir högre än 150°C har det visats att bentonitens mekaniska egenskaper påverkas på ett betydande sätt, exempelvis skjuvhållfasthet och töjningen vid brottlast. Vid ännu högre temperatur runt 250°C påverkas även svälltrycket och den hydrauliska konduktiviteten i bufferten på ett betydande sätt (SKBdoc 1415886). Man har också i samband med LOT-försöket med en kraftig temperatur- och/eller vattenmättnadsgradient samt vid temperaturer runt 150°C observerat en ojämn fördelning av klorid i buffertens porvatten och en ojämn fördelning av relativt lättlösliga sekundära mineral i bufferten så som gips (SKB TR-09-31). En annan möjlig konsekvens av omättade förhållanden är att vätesulfid möjligen kan transporteras i gasfasen från återfyllnad till kapselytan via bufferten (SKBdoc 1437441, avsnitt 2). SSM kommenterar denna frågeställning i avsnitt 4.10.4 i denna granskningsrapport.

4.8.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s redovisning av återmättnadsprocessen i buffert och återfyllnad är ändamålsenlig och godtagbar i detta skede av SKB:s program. SKB:s modelleringsarbete för återmättnadsprocessen bedöms vara lämpligt för att på ett ingenjörsmässigt sätt och med rimlig precision uppskatta bl.a. återmättnadstider samt för att belysa osäkerheter i återmättnadsförloppet. SKB har i de flesta fall använt vanligt förekommande angreppssätt och modelleringsstrategier för att kvantifiera återmättnadsprocessen. Konceptuella modeller som har använts bygger till stor del på väletablerad kunskap om bl.a. flerfasströmning. SKB för rimliga resonemang beträffande de konceptuella osäkerheter som har identifierats. Modelleringsresultat har i en godtagbar omfattning jämförts med resultat från flera stora fältförsök såsom CRT- och FEBEX-försöket.

SSM bedömer att ett ändamålsenligt experimentellt program har genomförts för karakterisering av bentonit via laboratorie- och fältförsök. SKB:s program för kvantifiering av ingående parametrar har i huvudsak baserats på väletablerade metoder (SKB TR-10-55). SSM anser dock att SKB behöver förbättra mätmetoder för omättad bentonit eftersom bentonitens egenskaper i omättat tillstånd är mindre kända än för mättat tillstånd. För detta krävs i högre utsträckning ett tvärvetenskapligt betraktelsesätt eftersom återmättnadsförloppet är en komplicerad process som involverar många kopplade mekanismer. SSM anser liksom sina externa experter att SKB behöver utöka modelleringsarbetet till att innefatta andra bentonitmaterial än MX-80 så som Ibeco-bentonit (SSM Technical Note 2012:18). Detta beror på att de flesta genomförda simuleringarna är baserade på MX-80-bentonit och har jämförts med data från försök med MX-80-bentonit.

SSM anser att SKB i kommande steg av SKB:s program mer ingående behöver studera det intakta bergets hydrauliska konduktivitet och ta fram ett utförligt underlag kring bergmatrisens variabilitet. SKB har endast redovisat resultat från laboratoriemätningar med avseende på ett fåtal borrhälar och endast från ett borrhål (KFM01D; SKB P-06-162). SKB:s beräkningar visar att bergmatrisens hydrauliska konduktivitet är en betydelsefull parameter för kvantifiering av återmättnadsförloppet i synnerhet för



deponeringshål som inte skärs av sprickor (SKBdoc 1415879). De beräkningsfall som medför mycket långa återmättnadstider involverar utan undantag berg utan sprickor och med en låg hydraulisk konduktivitet för det intakta berget. SSM ser positivt på att SKB har genomfört simuleringar av återmättnadsförloppet för återfyllnaden med datorprogrammet DarcyTools. Dessa beräkningar innefattar hela slutförvarslayouten, hanterar vattenflödet från deponeringstunnlarnas närområde till hela platsskalan samt inkluderar en anpassad numerisk representation av återmättnadsmekanismer från koderna Abaqus och Code_Bright. Resultaten från detta kompletterande modelleringsarbete visar en rimligt god överensstämmelse med resultat från modellering med hjälp av Abaqus och Code_Bright. Modellering med de två sistnämnda modelleringsverktygen inkluderar en högre grad av detaljeringsgrad med avseende på mekanismer involverade i återmättnadsförloppet men däremot en förenklad modell för tillförsel av grundvattnet från det omgivande berget.

SSM anser att SKB:s beräkning av fördelningen av återmättnadstider för bufferten är ändamålsenlig. Modelleringsresultaten har på ett tydligt sätt belyst att fördelningen av återmättnadstider i hög grad beror på transportmotståndet i återfyllnaden samt på fördelningen av hydraulisk konduktivitet för bergmatrisen. SSM anser dock att SKB i kommande steg av sitt program behöver ta fram en utförligare analys av de kopplade THM-processerna för omfördelning av vattenånga och transport av ånga i pellets med naturlig konvektion. Denna process kan ha stor betydelse för temperaturutvecklingen samt för omfördelning av klorid och lättlösliga mineraler innehållande bland annat svavel under inverkan av temperaturgradienten.

SSM är positiv till att SKB, förutom att ha beräknat återmättnadstid med kopplade termiska- och hydrauliska (TH) modeller, även har belyst återmättnadsprocessen med kopplade termiska-, hydrauliska- och mekaniska (THM) modeller (SKB TR-10-11, kapitel 5). Med THM-modelleringarna kan den initialt ojämna massfördelningen i bufferten hanteras, vilken beror på skillnad mellan densitet för buffertblock och densitet för buffertpellets. Modelleringen ger en förståelse för homogeniseringen av bufferten och utjämnningen av materialets porositet. Mer ingående granskning och bedömning av homogeniseringen återfinns i avsnitt 4.7 i denna granskningsrapport. SSM anser att SKB:s redovisning om transport av vattenånga i en omättad buffert är godtagbar och att SKB har visat att processen sannolikt inte har någon stor betydelse för buffertens långsiktiga säkerhetsfunktioner. Omfördelning av fukt genom transport av vattenånga leder till en viss torkning av den del av bufferten som ligger närmast kapseln. SKB har dock genom modelleringsinsatser visat att torkningen begränsas så att fukthalten överstiger cirka 10 % i det torraste området. Det bör beaktas att denna modellering har utförts med det konservativa antagandet att bufferten har en mycket lägre initial vattenkvot än vad som finns specificerat i beskrivningen av initialtillståndet (SKB TR-10-11, kapitel 4). En torkningsprocess med denna begränsade omfattning påverkar buffertens temperaturutveckling endast med cirka 10 %. Denna grad av påverkan ligger inom säkerhetsmarginalen för buffertens temperaturutveckling (avsnitt 4.2 i denna granskningsrapport). SSM anser dock att SKB:s modelleringsarbete i kommande steg av SKB:s program behöver uppdateras med användning av mer realistiska antaganden som bättre avspeglar SKB:s specifikation av buffertens initialtillstånd. SSM bedömer att SKB har följt upp forskningsframsteg i området, har genomfört förbättringar av sina beräkningsmodeller samt har hanterat identifierade konceptuella osäkerheterna inom modelleringen. Denna bedömning har baserats på att SKB har som en del av kompletteringsförfarandet har redovisat en fördjupad analys av konceptuella osäkerheter kopplade till den standardiserade modellen och har studerat säkerhetsbetydelsen av de konceptuella osäkerheterna.

SSM konstaterar att SKB:s modellering av återmättnadsprocessen har utförts inom ramen för ett stort internationellt engagemang för att förstå återmättnadsprocesser. Återmättnadsprocessen för buffertmaterial har studerats i många länder samt i flera stora internationella projekt och EU-projekt såsom DECOVALEX (Tsang m. fl., 2009), PEBS (Schäfers m.fl., 2014) och FEBEX (Alonso m.fl., 2005). SKB har deltagit i ett flertal projekt. SSM och den dåvarande myndigheten Statens kärnkraftsinspektion har följt upp SKB:s forskning inom området genom att stödja externa experters deltagande i internationella forskningsprojekt samt genom att utföra oberoende modelleringsinsatser (t.ex. SKI Report 2008:08).

SSM har genomfört en granskning av SKB:s kvalitetsäkringsprogram för numeriska modeller och koder inom SR-Site. Det kan konstateras att dokumentation och kvalitetssäkring av datakoderna Abaqus och Code_Bright kan anses vara godtagbar. Vissa brister har dock identifierats så som avsaknad av information om programmets utvecklingsfaser (SSM Technical Note 2012:35). Vissa förbättringar av kvalitetssäkringsrutiner under särskilt programutvecklingsarbete måste anses vara angelägna att genomföra.

SSM anser att SKB:s redovisning kring betydelsen av ojämn svällning av bufferten är godtagbar (SKBdoc 1415878). SSM konstaterar baserat på SKB:s redovisning att stora svårigheter måste övervinnas för att kunna genomföra artificiell bevätning av bufferten vid installation och samtidigt uppnå det specificerade initialtillståndet. SSM instämmer med SKB att återmättnadsförloppet i sig sannolikt inte har en stor inverkan på buffertens och återfyllnadens säkerhetsfunktioner. Slutsatserna bygger på att det går att verifiera att utvecklingen av temperaturen under återmättnadsprocessen inte leder till högre temperaturer än 100°C, vilket erfordras för en långsiktig uppfyllelse av säkerhetsfunktionerna. SSM anser däremot att buffertens återmättnadstid kan ha stor betydelse för vissa typer av lokal korrosion av kopparkapseln, så som gropkorrosion och spänningskorrosion, samt för processen för krypdeformation av kopparkapseln. SSM anser att SKB ytterligare behöver studera transportprocesser för korroderande ämnen i gasfas i en omättad buffert för att minska betydelsen av osäkerheter kring dessa processer.

4.9 Kanalbildningserosion av buffert och återfyllnad

När bufferten och återfyllnaden har installerats uppstår en hydraulisk gradient mellan berget och deponeringstunneln samt i deponeringshålen. Vattentrycket i berget som omger förvaret motsvarar ungefär 450 m vattenpelare medan atmosfäriskt tryck råder i tunneln. Vattenflödet i vattenledande sprickor som skär genom deponeringstunnlarna eller genom deponeringshålen blir därför högre jämfört med tiden då deponeringstunneln har återfyllts och förslutits med pluggen och den hydrauliska gradienten har återställts. Innan bufferten eller återfyllnaden är vattenmättad har svälltrycket och kohesionen (cohesion) i lermaterialet inte fullt utvecklats. Det innebär att det är möjligt att buffertmaterial transporteras genom kanaler som bildas av det initialt relativt höga grundvattenflödet till tomrum i deponeringstunneln. Materialet i återfyllnaden skulle även kunna transporteras från ett ställe i tunneln som har högre snittdensitet till ett ställe som har lägre snittdensitet. I båda fallen benämns denna process kanalbildningserosion (piping and erosion).

Massförlusten i bufferten påverkar direkt dess säkerhetsfunktioner (SKB SR-Site huvudrapport, figur 8-2 och 8-3) eftersom både buffertens förmåga att förhindra vattenflödet i deponeringshål och att begränsa mikrobiell aktivitet bygger på att bufferten har en tillräcklig densitet (SKB TR-10-15, avsnitt 2.2.1). Därutöver kan en minskad buffertdensitet negativt påverka säkerhetsfunktionerna att förhindra kapselsjunkning samt att filtrera kolloider. En omfattande massomfördelning i deponeringstunneln kan möjligen



också leda till lokala områden med låg snittdensitet i deponeringstunneln och därmed påverka återfyllnadens säkerhetsfunktioner (SKB TR-10-16, avsnitt 2.2.1).

Dessutom kan ojämn vätning och kanalbildningserosion i återfyllnaden möjligen försvåra installation av återfyllnaden, eftersom processerna kan påverka stabiliteten för de staplade återfyllnadblocken.

På begäran av SSM har SKB tagit fram kompletterande information i följande dokument:

- SKBdoc 1371890. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande buffert och återfyllning under driften av slutförvarsanläggningen.
- SKBdoc 1372560. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kritiska faktorer för val av deponeringspositioner.
- SKBdoc 1434717. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande konstruktionsförutsättning "inflöde till deponeringshål mindre än 150 kubikmeter".

4.9.1 Underlag från SKB

SKB redovisar kanalbildning med åtföljande erosion (piping and erosion) i SR-Site (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.2.4) samt i buffertprocessrapporten i avsnittet om bufferten/återfyllnadens hydrauliska processer (SKB TR-10-47, avsnitt 3.3.4).

Vatteninflödet i deponeringshål och deponeringstunnlar sker i huvudsak genom sprickor i berget, vilket medför att buffert och återfyllnad återmättas och homogeniseras. I vissa fall kan dock inte bufferten eller återfyllnaden absorbera allt vatten som rinner genom en spricka varför ett vattenövertryck bildas när inflödet hindras. Om inte mottrycket och hållfastheten i den omättade bufferten eller återfyllnaden är tillräckligt stor kan kanalbildning med åtföljande fysikalisk erosion uppstå (SKB TR-10-47, avsnitt 3.3.4 och 4.2.4; SKB R-06-80, sammanfattningen).

SKB anser att tre delprocesser bör urskiljas i sammanhanget; kanalbildning, tätning samt slutligen förlust av material. Kanalbildningen betraktas som en hydraulisk process med vattentransport genom ett rör, vilken upprätthålls så länge porttrycket är lika med eller överstiger svälltrycket i den omkringliggande bentoniten. Flödes hastigheten antas vara relaterad till den hydrauliska gradienten och rörets radie i enlighet med Hagen-Poiseuilles ekvation (SKBdoc 1371890).

När en kanal väl har bildats sker två konkurrerande processer, nämligen svällning av leran som täpper till kanalen samt erosion som avlägsnar lermaterial och håller kanalen öppen. Utfallet av processernas totala inverkan beror på vatteninflödets hastighet och vattentryckets ökningshastighet (SKB R-05-50, avsnitt 7.2). Tätningprocessen betraktas som en hydromekanisk process, vilken inkluderar vattenuptag i omkringliggande bentonit som i sin tur leder till svällning av bufferten. Erosion uppträder om dragkraften på lerpartiklarna från vattenrörelsen är större än summan av friktions- och attraktionskrafterna mellan partiklarna och lerstrukturen. Förlust av material är en komplex process som innefattar erosion av bentonit från bufferten till en rörlig vattenfas, sedimentation samt advektiv transport av bentonit. Erosionen förutsätts generellt att vara styrd av bentonitens skjuvhållfasthet samt av skjuvkrafterna från vattenströmningen. Efter att bufferten och återfyllnaden blivit vattenmättade och homogeniserade samt efter att den hydrauliska gradienten har återställts, kommer kanalen eller öppningarna som förorsakats av erosionen stängas och ett svälltryck kommer att etableras. Därefter finns en mycket liten risk för ytterligare kanalbildning, eftersom kanalbildningen kräver en stark och snabb ökning av en vattentrycksgradient lokalt i berget vid kontakten med bufferten



eller vid kontakten med återfyllnaden (SKB TR-10-47, avsnitt 3.3.4; SKB R-06-80, kapitel 2).

SKB har identifierat flera ”nödvändiga” villkor för att kanalbildning ska uppstå (SKB TR-10-47, avsnitt 3.3.4; SKB R-06-80, kapitel 2):

- Vattentrycket i sprickan, när vattenflödet väl förhindras, måste vara högre än summan av det motverkande sammanhållningstrycket från leran och skjuvmotståndet hos leran.
- Den hydrauliska konduktiviteten i leran måste vara så låg att vattenflödet in i leran blir tillräckligt begränsat för att upprätthålla ett högt vattentryck i sprickan.
- Det måste finnas ett utrymme tillgängligt nedströms för vattenströmning i det eroderade materialet för att kanalen skall kunna hållas öppen.

SKB har genomfört ett antal försök för att utreda kanalbildningsprocessen:

- Buffertringar av MX-80 och pellets av antingen Cebogel-QSE- eller MX-80-bentonit i en stålcylinder (280 mm i diameter, 100 mm i höjdd) eller i en plexiglastub (0,1 m i diameter, 0,4-4 m längd) (SKB R-10-70).
- Återfyllnad med kompakterade block av Friedlandlera med hög bulkdensitet ($2233-2320 \text{ kg/m}^3$) och MX-80-pellets (SKB R-06-72) samt kompakterade block av Friedlandlera med låg bulkdensitet ($1940-2180 \text{ kg/m}^3$) och pellets av MX-80 samt Cebogel-QSE-bentonit som återfyllnadsmaterial, i stålrännan eller i Plexiglastuben (SKB R-08-135). SKB har även testat andra material som inte ingår i SKB:s referensförutsättningar för återfyllnaden.
- Återfyllnad med kompakterade block av Friedlandlera, pellets av Cebogel-bentonit som fyller tomrum mellan blocken och mellan blocken och tunnelväggen, samt pellets av Cebogel-bentonit som används att fylla tunnelgolvet. Försöket genomfördes i en betongkammare med 2 m i diameter med syftet att simulera en deponeringstunnel. Grundvatten från Äspöberget tillfördes med olika hastigheter för att studera effekten av vattentillförsel samt blockstapelns stabilitet under installationsprocessen (SKB R-08-134).
- Återfyllnad med kompakterade block av Friedlandlera och pellets av Cebogel-bentonit i en stålkammare vid bentonitlaboratoriet, med ungefär halva storleken för en deponeringstunnel (SKB R-08-132).
- Buffert med integrerad KBS-3H-kapsel och distansblock som används i ett KBS-3H-förvar (horisontal deponering) med kompakterade MX-80-bentonitblock (SKB R-05-50; SKB R-08-40).

De viktigaste observationerna från dessa försök är:

- Kanalbildningserosion påverkas av vattenflödes hastigheten, vattnets salinitet samt hastigheten för ökningen av vattentrycket (SKB R-05-50, avsnitt 7.2; R-06-72, avsnitt 4.3.2). Dessutom finns en allmän trend att erosionen avtar med tiden (t.ex. SKB R-08-135, avsnitt 4.4.2).
- Kanalbildningserosion sker i bentonit och andra lermaterial både i buffert och i återfyllnad redan vid låga vattenflödes hastigheter från en inflödespunkt (ner till 10-4 liter per minut). Erosions hastigheten minskar med flöde hastigheten (SKB R-06-72, kapitel 3 och 4; SKB R-10-70, avsnitt 3.3.4; SKBdoc 1434717).
- Hävning av bufferten kan förekomma även vid mycket lågt vatteninflöde. Hävningen orsakas av en relativt hög fuktighet i bentonitpellets som leder till sprickbildning av buffertblocken. Rörelserna minskar vid belastning från andra block eller återfyllnadsmaterial som verkar ovanifrån (SKB R-09-29, kapitel 4; SKB R-10-70, avsnitt 6.2.2).
- Kanalbildningserosion kan påverka stabiliteten hos stapeln av återfyllnadsblock. Pellets mellan blocken och tunnelväggen ger stöd till blockstapelns stabilitet och



- spalten bör därför fyllas så snart som möjligt. Om så inte sker tål inte stapeln ett punktinflöde med en hastighet på cirka 0,1 l/min (SKB R-08-134, avsnitt 6.1.2).
- Installation av återfyllnaden bör genomföras i rask takt. Stapeln av återfyllnadsblock med en tillsats med pellets blir instabil om installationsarbetet avbryts några dygn, vid ett punktinflöde med en hastighet högre än 0,25 till 0,5 l/min som ligger mindre än 0,6 m bakom stapelns front på sidan av stapeln. Tiden till instabilitet kan bli ännu kortare om flödet kommer från tunnelns golv (SKB R-08-132; R-08-134).
 - Eroderat material per vattenvolym verkar vara begränsat även om vatteninflödets hastighet kan variera mycket (SKB R-08-135, kapitel 7; SKB R-10-70, avsnitt 5.5).

SKB har tagit fram en empirisk modell baserat på observationer kopplade till den sista punkten ovan (SKB TR-10-47, ekvation 3-13; SKB R-08-135, ekvation 7-1; SKB R-10-70, ekvation 5-1). Modellen relaterar ackumulerad mängd eroderat material till den ackumulerade volymen av vatten som transporterats genom kanalen. Modellen beaktar alla hittills insamlade data från kanalbildningsförsöken. Ett annat viktigt resultat är att kanalbildning inte kommer till stånd om grundvattnets inflöde till ett deponeringshål understiger 10^{-5} liter per minut (SKBdoc 1434717).

På begäran av SSM (SKBdoc 1371890; SKBdoc 1434717) har SKB tagit fram beräkningar för att uppskatta omfattning av buffertmaterialförlust baserat på inflödesdata (SKB R-13-21) och den empiriska modellen som diskuteras ovan (SKB TR-10-47, ekvation 3-13). Utifrån resultat från beräkningarna anser SKB att acceptanskriterier för deponeringshål kopplat till hydrogeologiska förhållanden (SKB TR-10-18, tabell 2-1 och tabell 2-3) behöver modifieras (avsnitt 3.2.5 i denna granskningsrapport). Kravet på att buffertmaterialförlust förorsakad av kanalbildningserosion inte får överstiga 100 kg kvarstår dock. Vetenskapligt underlag till kravet är följande; om en massa av 130 kg i en halvsfärisk geometri skulle förloras kan mer än 96 % av buffertens volym i denna del ändå få ett svälltryck högre än 1 MPa efter fullständig återmättnad. Denna slutsats har baserats på kopplad hydraulisk och geomekanisk modellering (SKB TR-06-13, figur 4-10; SKB R-10-70, figur 5-2).

SKB:s beräkningar baserade på inflödesdata för samtliga deponeringshål (SKB R-13-21) visar att det totalt sett är 5 deponeringshål av 6916 där erosionen möjligen överstiger kravet på 100 kg. Av dessa har ett hål så högt inflöde att det inte skulle accepteras för deponering och ett har så lågt inflöde att kanalbildningserosionen knappt skulle uppkomma. En avgörande faktor för massförlusten från bufferten är förutom det volymetriska vatteninflödet till deponeringshål, förhållandet mellan inflödet till hålet och det totala inflödet till deponeringstunneln (SKBdoc 1371890; avsnitt 3.2.5 i denna granskningsrapport).

När det gäller kanalbildningserosion i återfyllnaden, anser SKB att med en total volym av tomrum på $1\,250\text{ m}^3$ kommer den största möjliga erosionen att vara 1 640 kg. Erosion i återfyllnaden har den praktiska innebörden att material omfördelas inne i tunneln. I enlighet med tabell 5-21 i SR-Site huvudrapport kommer den totala mängden återfyllnad i en 300 m lång tunnel att vara cirka 10 200 ton. Med hänsyn till den stora mängden återfyllnadsmaterial i en tunnel bedöms en omfördelning av 1 640 kg inte ha någon betydelse för återfyllnadens funktion.

4.9.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning om kanalbildning med åtföljande fysikalisk erosion ger tillräcklig information som grund för en trovärdig argumentation kring genomförbarhet för installation av buffert och återfyllnad i enligt med specificerade krav med avseende på initialtillståndet. SSM anser dock att ytterligare utvecklings- och demonstrationsinsatser behövs inom detta område inför kommande steg i SKB:s program (se även avsnitt 3.2.5, 3.5.5 och 3.5.9 i denna granskningsrapport). SSM:s bedömning är baserad på att SKB har genomfört ett stort antal försök i olika skalor samt har utvecklat en bra grundläggande förståelse för de ingående processerna. Ett flertal fenomen kopplade till kanalbildningserosion har undersökts experimentellt.

Kanalbildningserosionens påverkan på stabilitet för en installerad stapel av återfyllnadblock har demonstrerats i laboratoriet. SSM anser dock att eftersom stapelns stabilitet kan påverkas av flera sammanverkande faktorer förutom kanalbildningserosion så som ojämn återmättnad av blocken behövs inför kommande steg av SKB:s program ytterligare vidareutveckling och demonstration för att säkerställa initialtillståndet. Beträffande kanalbildningserosionens inverkan på buffertens säkerhetsfunktioner bedömer SSM att SKB:s redovisning kring massförlust från bufferten i deponeringshålen är godtagbar. SSM ser positivt på att ett förhållande mellan ackumulerad eroderad massa av lermaterial och ackumulerat vatteninflöde har tagits fram. Det är också betydelsefullt att SKB har preliminärt tagit fram ett tröskelvärde på vatteninflödes hastighet till ett deponeringshål (10^{-5} l/min) under vilket erosionen inte verkar ske. En godtagbar insats har genomförts för utvärdering av konsekvenserna av kanalbildning och erosion i bufferten (SKBdoc 1371890, SKBdoc 1434717). Baserat på resultaten av beräkningarna anser SSM att kanalbildningserosionens påverkan på buffertens säkerhetsfunktioner kan förväntas vara begränsad och hanterbar.

SSM noterar att SKB med beräkningarna har visat att det inte nödvändigtvis är de deponeringshål som är utsatta för den största massförlusten är de hål som har högst ekvivalent flöde. Detta innebär att det inte finns någon fullständig korrelationen mellan massförlust under kanalbildningserosionen och massförlust senare under den kemiska erosionen (avsnitt 5.7 i denna granskningsrapport). Risken för att samma deponeringshål kommer att utsättas för båda typer av erosion i betydande omfattning och därmed förlora oacceptabla mängder av buffertmaterial är begränsad. En liknande bedömning framförs även ur SSM:s granskning av hydrogeologiska perspektiv på frågan (avsnitt 3.2.5 i denna granskningsrapport).

SSM anser att det är positivt att experimentella försök har genomförts av SKB i stor omfattning för att utreda mekanismer och kvantifiera massförlusten vid kanalbildningserosionen. SSM bedömer dock att det inför kommande steg i SKB:s program behövs ett mer systematiskt angreppssätt för försöksverksamheten. SSM anser att SKB:s förståelse av processen av kanalbildningserosion i betydande utsträckning fortfarande är av empirisk karaktär vilket medför vissa osäkerheter i SKB:s analys av den totala massförlusten för bufferten. Ett empiriskt angreppssätt behöver dock inte vara otillräckligt om det har genomförts på ett systematiskt sätt och om en tillräcklig mängd försöksresultat finns tillgängliga. Flera faktorer än det ackumulerade volymetriska vatteninflödet kan möjligen påverka processen, såsom grundvattnets salinitet, vattentryck, buffertens svälltryck, samt kanalernas geometri och porslingrighet. SSM bedömer därför att SKB mer ingående behöver studera kanalbildningserosionsprocessen exempelvis med standardiserade statistiska metoder för att bättre kvantifiera olika faktorerens inverkan på massförlusten. SSM delar de externa experternas bedömning att osäkerheter kopplade till de långa tidsskalorna för buffertens och återfyllnadens återmättnad behöver uppmärksammas liksom att förmågan att förutse denna process behöver förbättras (SSM Technical Note 2015:33). Dessutom behöver SKB ytterligare analysera hur osäkerheter



som SSM har identifierat inom ramen för granskning av hydrogeologiska beräkningar påverkar beräkningarna med avseende på kanalbildningserosion. En sådan fråga är hur många realisationer av DFN-nätverket som erfordras.

SSM:s bedömning kring kanalbildningserosion har baserats på ett antal osäkerheter som kan kopplas till SKB:s redovisning av kanalbildningserosion:

- Det empiriskt anpassade förhållandet mellan massförlusten och ackumulerat vattenflöde varierar cirka två tiopotenser, medan endast det centrala värdet används i SKB:s analys.
- I SKB:s framtagna empiriska förhållande för massförlust (SKB TR-10-47, ekvation 3-13) är känsligheten stor mot osäkerheter i exponenten som bestämdes experimentellt.
- Både ur ett teoretiskt perspektiv och från experimentella observationer kan det konstateras att grundvattnets salinitet har en stor påverkan på massförlusten. Detta faktum har dock inte explicit inkluderats i det empiriska förhållandet.
- Det saknas fortfarande en detaljerad förståelse för inverkan av andra faktorer förutom det volymetriska grundvatteninflödet och grundvattnets salinitet på buffertens massförlust.
- SKB:s ställningstagande kring om det finns ett tröskelvärde för grundvattenflödes hastighet under vilken kanalbildningserosionen inte förekommer är fortfarande av preliminär karaktär.
- De hydrogeologiska modelleringsresultaten som bildar utgångspunkten för beräkningarna kring kanalbildningserosion är behäftade med osäkerheter.
- Massförlusten har hittills endast beräknats mot grundvatteninflödesdata från en enstaka stokastisk realisation och beräkningarnas statistiska betydelse är därmed svårbedömd.

SSM bedömer att SKB:s krav på att mindre än 100 kg buffert i ett deponeringshål ska eroderas bort genom kanalbildningserosion är tillräckligt konservativt. Det finns dock en viss avsaknad av pedagogisk tydlighet när kravet kopplas till svälltrycket i SKB:s redovisning. SKB behöver därför koppla kravet till buffertens vattenmättade densitet så att det direkt kan utläsas huruvida antagandet är konservativt eller inte. I avsnitt 3.2.5 i denna granskningsrapport redovisar SSM ytterligare frågor kring konstruktionsförutsättningar som relaterar till inflöden till deponeringshål.

Beträffande inverkan av kanalbildningserosion, bedömer SSM i likhet med SKB att denna process inte har någon betydelse på återfyllnadens säkerhetsfunktioner. Denna bedömning har baserats på att den eroderade massan är försumbar jämfört med den totala mängden av bentonitmaterialet i en deponeringstunnel, och att den eroderade massan i huvudsak omfördelar sig i samma tunnel utan betydande massförlust.

4.10 Korrosionsprocesser för koppar

I detta avsnitt återfinns en beskrivning av SKB:s redovisning kring kopparkorrosion under de första 1000 åren efter förslutning samt SSM:s bedömningar kring denna fråga.

SKB:s strategi för att demonstrera tillförlitlighet och ändamålsenlighet med en korrosionsbarriär av koppar på 50 mm har baserats på att visa att kapselns tjocklek är tillräcklig för att motstå förväntade korrosionsprocesser i slutförvarsmiljön, i huvudsak korrosion med syre som blivit kvar från driftsfasen av slutförvarsanläggningen samt korrosion med sulfid som antingen bildas i tillfört buffert- och återfyllnadsmaterial, eller som tillförts via grundvattenflöde. En tillräckligt liten omfattning av korrosionsangrepp under hela säkerhetsanalysens tidsskala motiveras med att mängderna tillgängligt syre kan begränsas under driftsfasen, samt att sulfidhalterna i en näringsfattig miljö på 500 m djup



är låga och rimligt välkända samt att transporthastigheter av korroderande ämnen med vissa undantag är låga i en buffert med fullt utvecklat svälltryck och/eller i ett förhållandevis tätt omgivande berg.

Dimensionerande för om korrosionsbarriären är tillräcklig är kapselns tjocklek, samt egenskaper i berget och grundvattnets koncentration av sulfid för de deponeringshål som kan anses vara acceptabla att använda. SKB har studerat betydelsen av dessa faktorer genom beräkningar kring olika urvalskriterier för deponeringshål samt beräkningar kring effekten av att istället för 50 mm tjock koppar använda 25 mm respektive 100 mm.

Det är möjligt att dela in korrosionsprocesserna beroende på om de i huvudsak påverkas av massöverföring mellan det omgivande berget och kapselytan eller om de styrs av interna processer och korroderande ämnen i konstruktionsmaterial som tillförts slutförvaret:

- Korrosion orsakad av växelverkan med omgivande grundvatten
- Korrosion orsakad av reaktioner med initialt tillförda material vilka är oberoende av materietransport utanför de utsprängda tunnlarna.

Syftet med denna kategorisering är att identifiera och särskilja faktorer som har betydelse för olika korrosionsformer. Omfattning av processer inom den första kateogrin bestäms exempelvis i huvudsak av typen av deponeringshål, dvs. med avseende på bergets täthet och i vilken omfattning dessa påverkas av grundvattenflöden i berget. Utplaceringen och kriterier för deponeringshål har därför en betydelse i detta sammanhang.

Korrosionsprocesser inom den andra kategorin är inte direkt beroende av omfattningen av grundvattenflöde och styrs i huvudsak av andra faktorer så som innehållet av reaktiva komponenter i buffert eller återfyllnadsmaterial. Den andra kategorin omfattar också faktorer som är svåra eller omöjliga att påverka som exempelvis hur korrosionen påverkas av bränslets initiala strålfält.

SSM redovisar i detta avsnitt granskningen av SKB:s hantering av korrosionsprocesser drivna av interna processer som förväntas ha störst betydelse under de första 1000 åren. Dessa kan delas in i allmän och lokal korrosion under först oxiderande betingelser i närvaro av syre och därefter med sulfid under reducerande kemiska betingelser. Det finns ett särskilt fokus på två av de viktigaste formerna av lokal korrosion nämligen gropkorrosion respektive spänningskorrosion. Korrosion orsakad av reaktioner med initialt tillförda material förväntas gradvis klinga av och ha sin största betydelse under de första 1000 åren. I detta avsnitt inkluderas inte sulfidkorrosion som är driven av omgivande grundvattenflöde, anoxisk korrosion i syrgasfritt vatten eller korrosion kopplad till infiltration av syresatta glaciala smältvatten. De två föregående processerna kommer att pågå även under de första 1000 åren men har sin huvudsakliga säkerhetsbetydelse efter de första 1000 åren och berörs därför i avsnittet om förvarsutvecklingen för tidsperioden mellan 1000 år och 100 000 år efter förslutning (se kapitel 5 i denna granskningsrapport).

Detta kapitel inleds med en sammanfattning av SKB:s strategi för att upprätthålla en korrosionsbarriär och en översiktlig sammanfattning och bedömning av SKB:s redovisning kring de viktigaste omgivningsbetingelserna. Under de första 1000 åren sker en gradvis utveckling av slutförvarsmiljön från omättade oxiderande förhållanden till kemiskt reducerande och i huvudsak mättade förhållanden i buffert och återfyllnad. Det sker en gradvis förändring av strålfältet med gammastrålning vid kapselns ytteryta som gradvis försvinner under loppet av cirka trehundra år pga bränslets avklingning. Temperaturen vid kapselytan sjunker från maximalt drygt 100 °C till ca 40°C efter 1000 år. Dessa omgivningsbetingelser har betydelse för korrosionsförloppet för kapslar i ett KBS-3-förvar vid Forsmark. SSM:s detaljerade granskning av SKB:s redovisning av omgivningsbetingelserna redovisas i andra avsnitt i denna rapport.

SKB har på SSM:s begäran inkommit med flera förtydliganden och kompletteringar relaterade till kapselkorrosion under de första 1000 åren:

- Svar till SSM på begäran om komplettering avseende degraderingsprocesser för kapseln (SKBdoc 1398013)
- Svar till SSM på begäran om komplettering rörande interaktion mellan kopparkorrosionsprodukter och bentonit (SKBdoc 1416864)
- Corrosion of the copper canister inside due to radiolysis of remaining water in the insert (SKBdoc 1419961)
- Influence of high chloride concentration on copper corrosion (SKBdoc 1398014)
- Sulphide mass-transport limited corrosion (SKBdoc 1422182)
- Svar till SSM på begäran om komplettering rörande grundvattenkemi på kort och medellång sikt (SKBdoc 1437441)
- Svar till SSM på begäran om förtydligande avseende svar på tidigare begäran om komplettering rörande grundvattenkemi på kort och medellång sikt (SKBdoc 1476865)

4.10.1 Sammanfattning av SKB:s säkerhetsfunktioner, strategi för att upprätthålla en korrosionsbarriär, initialtillstånd och omgivningsbetingelser av relevans för korrosionsförloppet under de första 1000 åren

4.10.1.1 Underlag från SKB

Kopparkapselns huvudsakliga barriärfunktion i KBS-3-konceptet är att långsiktigt upprätthålla täthetskravet. En förutsättning för att uppnå detta tillstånd är uppfyllelse av den säkerhetsfunktion som SKB kallar att upprätthålla en korrosionsbarriär. SKB:s definition av denna säkerhetsfunktion är att för samtliga kopparytor måste höljets tjocklek överstiga noll under den aktuella tidsperioden givet beaktande av alla rimliga korrosionsprocessers omfattning. SKB räknar som bästa uppskattning en total omfattning av korrosion under de första 1000 åren på cirka 1 mm, och SKB bedömer därför att kravet kommer vara uppfyllt under denna tidsperiod (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.16). Pessimistiska beräkningsfall pekar dock på mer omfattande korrosion under särskilda omständigheter.

SKB har i sin säkerhetsanalys dels sammanfattat tillgängliga kunskaper om olika korrosionsprocesser (SKB TR-10-46; SKB TR-10-67), dels genomfört beräkningar för att utvärdera betydelsen av vissa korrosionsformer i perspektiv av slutförvarets långsiktiga säkerhet (SKB TR-10-66). Betydelsen kan delas in i olika klasser av korrosionsprocesser:

- som inte bedöms ske i slutförvarsmiljön
- som sker i sådan liten omfattning att det inte föreligger någon risk för att kapseln kan falla som ett resultat av processen
- som innebär risk för att en kapsel kan falla i en viss tidsskala som ett resultat av processen eller i kombination med andra processer

De sistnämnda kategorierna är dimensionerande för kapselns tjocklek och behöver beaktas i riskanalysen. Ingen av de korrosionsprocesser som SKB har analyserat medför ensam eller i samverkan med andra processer kapselbrott för tidsperioden de första tusen åren.

SKB:s strategi för att hantera korrosionsfrågor innefattar dels att påvisa att omfattningen av ett flertal korrosionsformer är liten och var för sig inte äventyrar kapselns integritet, dels att anföra argument varför vissa korrosionsformer helt kan uteslutas med hänvisning till de omgivningsbetingelser och transportförhållanden som råder i slutförvarsmiljön.



Därefter sker en sammanfattande bedömning av risken för kapselbrott och en analys av vissa korrosionsformer i riskanalysen. SKB bedömer dock i SR-Site att det är så stor skillnad i säkerhetsbetydelse för olika korrosionsformer att det inte behöver göras någon formell summering av bidrag till korrosion från olika korrosionsformer.

De viktigaste korrosionsbidragen under perioden fås enligt SKB från kvarvarande syre, oxidanter från radiolys samt från sulfider antingen i buffert och återfyllnad och/eller sulfid som bildas från mikrobiell sulfatreduktion i dessa material. Däremot räknar SKB med att korrosion från föroreningar i bufferten, återfyllnaden eller andra konstruktionsmaterial ger upphov till försumbara korrosionsbidrag.

SKB:s nuvarande kapselutförning har baserats på ett 50 mm tjockt kopparhölje. SKB räknar dock med att mindre avvikelser i svetsgodstjockleken kan förekomma, vilket innebär att kopparhöljets tjocklek förväntas bli minst 47,5 mm för 99 % av förvarets 6000 kapslar. För att undvika korngränskorrosion i kopparhöljet redovisar SKB som konstruktionsförutsättning att högren koppar ska användas med maximalt några tiotals ppm syre (SKB TR-09-32, avsnitt 3.1.5).

Beträffande de faktorer som påverkar korrosionsbarriären under de första 1000 åren och som är möjliga att påverka i samband med konstruktion av slutförvaret omnämner SKB den initiala minsta koppertjockleken, och mängden korroderande ämnen som finns eller kan bildas i buffert och återfyllnad (SKB TR-11-01, avsnitt 12.6.1). Förutom korrosionsprocesserna som sådana, anger SKB att transportbetingelser så som diffusion i bufferten och återfyllnad samt i berget i närheten av deponeringshålen påverkar korrosionsförloppet (SKB TR-11-01 kap, avsnitt 12.6.1).

Av betydelse för korrosionsförloppet under de första 1000 åren är hur lång tid oxiderande betingelser från kvarvarande syre och förvarets öppethållande under driftperioden förväntas vara. SKB räknar med att perioden kan ta allt ifrån 10 till 300 år (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4). I en särskild studie som avser återfyllnaden kommer SKB dock fram till mycket kortare tider för syrekonsumention som snarare avser dagar pga bland annat mikrobiell aktivitet. SSM kommenterar denna fråga under 4.10.2 nedan.

Under de första 1000 åren förväntar sig SKB att bufferten eliminerar risken för att kapseln kommer att stå i kontakt med rörligt grundvatten och den bidrar därmed till att skydda kapseln ur korrosionssynpunkt. Bufferten kommer i viss utsträckning att påverka den kemiska sammansättningen av det vatten som kommer i kontakt med kapseln. Vissa komponenter i buffertmaterialet kan i viss utsträckning medföra kapselkorrosion. SKB har därför introducerat följande konstruktionsförutsättningar för bufferten: (i) halten av organiskt kol bör vara mindre än 1 vikt-%, (ii) halten sulfid bör inte överstiga 0,5 vikt-% av den totala massan, och (iii) den totala svavelhalten inklusive sulfid bör inte överstiga 1 vikt-%.

Av betydelse för korrosionsanalysen är också kopparkapselns temperaturutveckling. SKB redovisar att bränslets resteffekt resulterar i maximala temperaturer i förvarets närområde efter omkring tio år (SKB TR-11-01, avsnitt 2.4.3). För förhållandevis torra deponeringshål är den maximala temperaturen vid kapselns yta och vid kapselns mitt i höjddled omkring 2 °C högre än den maximala bufferttemperaturen och som allra högst 102 °C, dock endast för några få kapslar (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.13). För deponeringshål med snabbare tillförsel av grundvatten och med förhållandevis snabb buffertsvällning kommer kapseln att stå i direktkontakt med bufferten. Temperaturen vid kapselns yta och i bufferten kommer då att vara upp till 20 °C lägre jämfört med det torra fallet. Temperaturen i segjärnsinsatsen kommer att som högst vara 117 °C (SKB TR-10-46), även för den högsta temperaturen som kan förekomma vid den yttre kapselytan. SKB



antar att det finns ett argonfyllt mellanrum mellan järnet och kopparn och att den högsta toleransen på gapet förekommer samt en polerad kopparyta som minimerar strålningsvärmen. Denna temperatur är lägre än temperaturen 125 °C som specificeras i konstruktionsförutsättningarna för insatsen.

Samtidigt som temperaturen hos bufferten gradvis ökar på grund av bränslets resteffekt kommer buffertens vattenmättnadsgrad successivt att öka och ett svälltryck kommer att byggas upp genom tillflöde av grundvatten och matrisvatten från berget. Detta förlopp har en påverkan ur korrosionssynpunkt främst därför att svälltrycket inhiberar mikrobiell aktivitet och därför att förekomst av en gasfas i närheten av kapselytan kan medföra diffusion av korroderande ämnen i gasfas (SKBdoc 1476865). Tiden till full återmättnad för bufferten kan variera från några tiotals år för deponeringshål som skärs av vattenförande sprickor till upp till tusentals år för deponeringshål som inte skärs av vattenförande sprickor (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.8). SKB har som en del av kompletteringsförfarandet visat att extremt långa återmättnadstider är kopplade till inte bara avsaknad av sprickor i berget utan också låg hydraulisk konduktivitet för den intakta bergmatrisen (SKBdoc 1415879).

Strålning från det inkapslade använda kärnbränslet förväntas ge upphov till radiolys av gas och/eller bentonitporvatten som finns runt en deponerad kapsel, vilket under en viss period påverkar de kemiska betingelserna och förutsättningarna för kopparkorrosion. SKB har låtit genomföra detaljerade beräkningar av dosraten för ett antal geometrier runt olika kapselalternativ (SKBdoc 1077122). Ytdosraten på kapseln varierar runt mantelytan och variationen är större för PWR-kapseln än för BWR-kapseln. Beträffande kapslar med MOX-bränsleelement förväntas varken totaldos eller neutrondos runt mantelytan påverkas signifikant under förutsättning att detta element placeras centralt i kapseln. En viktig parameter för kopparkorrosion gäller flödet av sekundärelektroner. SKB redovisar att den faktiska lokala dosraten bestäms av flödet av sekundärelektroner vid kopparytan (SKB TR-04-06). Detta flöde utgör också en ström genom ytan, vilket kan påverka korrosionen av kopparmaterialet. SKB:s analys visar att inverkan av de lokala förhållandena vid ytan är ganska liten, och att stråldosen till vatten utanför kopparytan är tämligen väl bestämd av gammadosraten. Sammanfattningsvis, förväntad strålnings-dosrat vid ytan av kapseln är ganska låg och endast små mängder av oxiderande ämnen kan bildas via radiolys av grundvatten (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4).

4.10.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s metod för att analysera och beskriva korrosionsförloppet under de första 1000 åren med en definition av initialtillståndet, slutförvarsmiljön samt en identifikation, beskrivning och kvantifiering av relevanta korrosionsprocesser med beaktande av slutförvarsbetingelserna är godtagbar. Att metoden anses godtagbar innebär dock inte nödvändigtvis att metoden har tillämpats fullt ut i alla sammanhang. Det finns i dagsläget skillnader med vilken tillförlitlighet man kan förutsäga olika miljöfaktorer som kan påverka korrosionsförloppet i slutförvarsmiljön. Förutsägelser kring temperaturutveckling och strålfältets utveckling har exempelvis hög tillförlitlighet beroende på en mycket god förståelse av de underliggande processerna. Förståelse för återmättnadsförloppet kan baseras på konceptuellt väl etablerad kunskap men det föreligger dock fortfarande osäkerheter kring kvantifiering av återmättnadsförloppet i deponeringshål utan förbindelser med spricknätverk i berget. Detta beror bland annat på att det finns lite information om den sprickfria bergmatrisens hydrauliska konduktivitet (SKBdoc 1415879). SSM anser att förekomst av omättade förhållanden i slutförvaret under lång tid i viss utsträckning försvårar bedömningen av slutförvarets utveckling under de första 1000 åren. Omättade förhållanden som förblir bestående under lång tid är ett resultat av mycket långsam tillförsel av grundvatten och/eller matrisvatten från berget med långsamt materiebbyte mellan deponeringshål och det omgivande berget.



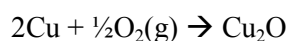
SSM drar slutsatsen att en långsiktigt kvarstående fas med omättade förhållanden i buffert och återfyllnad under de första 1000 åren medför andra frågor av relevans ur korrosionssynpunkt, som att mikrobiell sulfatreduktion kan förekomma i bufferten innan svälltrycket har hunnit byggas upp, och att gasformig diffusion av korroderande vätesulfid från återfyllnaden kan förekomma så länge ett sammanhängande område med gasfas som förbinder de centrala delarna av buffert och återfyllnaden finns kvar. Det krävs därför en analys av dessa frågeställningar för en bedömning av korrosion av kapseln under denna tidsperiod. En sådan redovisning fanns inte i det ursprungliga ansökansmaterialet (SKB SR-Site huvudrapport) men nya beräkningar har tillförts i efterhand via kompletteringar (SKBdoc 1437441, SKBdoc 1476865). SKB har visat att mikrobiell sulfatreduktion i återfyllnaden möjligen kan medföra ett bidrag till korrosionsdjupet för allmän korrosion på 2-3 mm som ett resultat av diffusion av gasformig vätesulfid (SKBdoc 1437441). Eftersom omfattning av mikrobiell sulfatreduktion kan kopplas till materialets innehåll av organiska ämnen och svälltrycksförhållanden i förvaret får acceptanskriterier för buffert- och återfyllnadsmaterial en betydelse för korrosionsfrågan, liksom även frågor kring beredning av materialet inför driftfasen med parametrar som initial vattenmättnadsgrad, kompakteringsgrad etc. I senare delar av detta avsnitt framkommer ett flertal detaljerade synpunkter kring SKB:s hantering av korrosionsmekanismer under omättade förhållanden i säkerhetsanalysen SR-Site och dess kompletteringar.

SSM konstaterar att SKB enbart jämför storleksordningar av olika korrosionsprocesser (SKB TR-10-66, figur 6-1). SSM anser att SKB behöver redovisa de olika korrosionsmekanismernas sammanlagda effekt och relativa betydelse för olika faser i slutförvarets långsiktiga utveckling samt hur konceptuella osäkerheter, parameterosäkerhet samt scenariosäkerhet påverkar denna relativa betydelse (se vidare kapitel 9 i denna granskningsrapport). Nya betydande korrosionsprocesser har också adderats till de som ursprungligen redovisas i säkerhetsanalysen SR-Site (SKBdoc 1437441). SSM anser att SKB behöver definiera en kvarvarande kapseltjocklek efter korrosion > 0 så att kapseln fortfarande uppfyller täthetskravet. Detta eftersom en mycket tunn kvarvarande rest av kopparhöljet sannolikt är svår att definiera som en tillförlitlig täthetsbarriär som uppfyller krav på höljet med avseende på mekaniska egenskaper.

SSM redovisar frågor kopplade till kapselns initialtillstånd i kapitel 3 i denna rapport. Frågor som kopplar till påverkan på korrosionsbetingelser i slutförvaret orsakade av omfattande externa processer som klimatförändringar beskrivs i kapitel 5 i denna granskningsrapport.

4.10.2 Allmän korrosion av koppar under oxiderande betingelser under de första 1000 åren efter förslutning

Under den initiala perioden med oxiderande betingelser oxideras koppars av kvarvarande syre. Metallerna övergår gradvis till oxider eller hydroxider eller blandfaser med olika anjoner som hydroxikarbonater etc. till följd av syreförbrukning. Reaktionerna kan sammanfattas som:



Allmän korrosion kopplat till närvaro av syre kan delas in i följande kategorier:

- atmosfärisk korrosion
- korrosion av kvarvarande syre i tunnlar vid förslutning
- korrosion av syre som eventuellt läcker in i en försluten deponeringstunnel under förvarets öppethållande



Den initiala korrosionen med syre förväntas ske under den tid omättade förhållanden föreligger med närvaro av en gasfas. Alla kapslar och deponeringshålspositioner är lika utsatta. Korrosion av syre som läcker in genom en försluten deponeringshålstunnel kan dock i första hand påverka kapselpositionen närmast deponeringshålspluggen.

Atmosfärisk korrosion avser tiden innan kapslarna har placerats i sitt deponeringshål och processen styrs därför av hur länge kapslarna behöver förvaras innan deponering.

4.10.2.1 Underlag från SKB

Beträffande atmosfärisk korrosion har SKB sammanställt information från den vetenskapliga litteraturen och har genomfört experiment vid Äspö-laboratoriet. Resultaten pekar på låga korrosionshastigheter och att en förväntad förvaring under en tidsperiod av 2 år innan deponering resulterar i ett korrosionsangrepp på $<1 \mu\text{m}$ (SKB TR-10-67, avsnitt 4.1.2). Korrosionen kommer därefter att fortsätta i samband med att kapslarna förs ned i den fuktiga luften i slutförvarsanläggningen. SKB har i korrosionsförsök vid Äspö-laboratoriet detekterat korrosionsprodukten paratacamite ($\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}(\text{s})$) men även de rena oxidfaserna är troliga korrosionsprodukter (SKB TR-10-67). I samtliga beräkningsfall för korrosion med syre förutsätter SKB hypotetiskt bildning av koppars(I)oxiden ($\text{Cu}_2\text{O}(\text{s})$) eftersom denna korrosionsprodukt ger den mest omfattande korrosionen för varje tillförd syre.

Efter deponering av kapslarna i deponeringshål och efter återfyllnad och förslutning av deponeringstunnlarna redovisar SKB att kvarvarande syre motsvarar 475 mol/kapsel varav den stora andelen är syre från deponeringstunneln. SKB visar genom användning av massbalansargument att denna syremängd kan orsaka ett jämnt korrosionsdjup i kopparkölet på 0,8 mm. För att ta höjd för att korrosion inte behöver vara jämnt fördelad utefter kapselns yta ansätter SKB i det mest pessimistiska fallet att om endast 10 % av kapselns övre del korroderar kommer korrosionsdjupet bli 5,5 mm. SKB argumenterar för att massbalansargumentet i detta fall är mycket konservativt beroende på att andra syregasförbrukande reaktioner förutom kopparkorrosion inte har beaktats. Om syre förbrukas på annat sätt så som oxidation av pyrit i buffert och återfyllnad, reaktion med ett flertal mineraler i berget samt förbrukning genom mikrobiella processer kommer korrosionsangreppet bli mindre. SKB:s mera realistiska fall är därför ett korrosionsangrepp på 0,26 mm som endast omfattar locket och 10 % av mantelytan med annan syreförbrukning i buffert och återfyllnad, samt 0,1 mm med beaktande av diffusion och syreförbrukning ut i berget (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4).

Förutom syre som blivit kvar i en deponeringstunnel vid förslutning behöver även eventuellt syre som kan tillföras efter förslutning av deponeringstunneln beaktas. SKB har i svar på komplettering till SSM (SKBdoc1437441, SKBdoc1476865) redovisat att om inga åtgärder vidtas kommer en betydande inträngning av ytterligare syre ske under slutförvarets driftfas via tunnelpluggen på grund av förhållandevis snabb gasdiffusion av syre. SKB räknar hypotetiskt att för kapseln närmast deponeringspluggen kan det sammanlagda korrosionsdjupet bli 6 mm om korrosionen blir jämnt fördelad på kapselns yta (SKBdoc 1437441). Om korrosionen fördelar sig på endast 10 % av kapselns övre del blir korrosionsdjupet 120 mm d.v.s. mer än kapselns tjocklek på nominellt 50 mm. SKB anger att trots att beräkningsexemplen är konservativa visar dessa att transportkapaciteten i en kontinuerlig gasfas är hög och måste förhindras. Detta kan enligt SKB ske genom att krävställa att tätningen i tunnelpluggen måste hållas vattenmättad under förvarets driftfas. SKB avser att uppdatera konstruktionsförutsättningarna för betongpluggen som försluter deponeringstunnlarna med krav på gastäthet (SKBdoc1398013). Vid vattenmättad tunnelplugg som uppfyller kraven på gastäthet bedömer SKB att maximalt 30 mol syre kan transporteras in genom deponeringspluggen om stamtunnlarna är öppna under 100 år. Denna mängd syre skulle ge ett försumbart tillskott av korrosion.



Efter frågor från SSM angående deponeringstunnels täthet mot den närliggande transporttunneln kompletterade SKB ytterligare analysen av kapselkorrosion pga. syre (SKBdoc 1476865). I denna analys antogs att drifttiden för slutförvaret är 40 år vilket medför att hypotetiskt ytterligare maximalt 120 mol syrgas kan tränga in i deponeringstunneln via diffusion i tunnelväggen, vilket motsvarar 3,1 mol syre per år. SKB bedömer att tillskottet till korrosion blir försumbart även om allt syre som läcker in i deponeringstunneln under driftfasen orsakar korrosion på den kapsel som är närmast tunnelpluggen.

4.10.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser att angreppssättet att beräkna omfattning av allmän kopparkorrosion genom massbalanser för syre är robust så länge korrosionsangreppen är jämnt fördelade över kapselytorna eller fördelade på ett rimligt förutsägbart sätt.

SSM konstaterar att SKB:s uppskattningar av tiden för förbrukning av syre baserat på olika typer av syreförbrukande processer och material med olika sammansättning och egenskaper varierar från flera århundraden (SKB TR-10-46; SKB TR-94-02) till endast några dagar (SKB R-06-106). Baserat på SKB:s redovisning anser SSM att det finns skäl att anta att skillnader kan föreligga mellan olika material beroende på innehållet av material med kapacitet för snabb syreförbrukning som siderit ($\text{FeCO}_3(\text{s})$) eller finkorning pyrit ($\text{FeS}_2(\text{s})$). En annan viktig fråga är om betingelser för mikrobiella processer är gynnsamma eller ogynnsamma. Om vattenaktiviteten för det omättade materialet i bufferten är för låg kan det innebära att också den mikrobiella aktiviteten i buffertblock och invid kapselytor är låg. Man kan däremot förvänta sig att det finns förutsättningar för en högre mikrobiell aktivitet i pelletsfyllda utrymmen samt invid tunnarnas bergväggar innan fullt svälltryck har byggts upp. Lokala korrosionsprocesser under oxiderande betingelser redovisas i avsnitt 4.10.3 i denna granskningsrapport. SSM anser att SKB behöver genomföra en utförligare analys av vilka tidsintervall som kan komma ifråga med avseende på exponering av kapselytorna i en oxiderande miljö. Detta bör kunna åstadkommas med en integrerad analys av kopplingen mellan kapselkorrosion och andra syreförbrukande kemiska och biologiska processer liksom även transportprocesser i återfyllda deponeringstunnlar och deponeringshåll.

SSM anser att frågan kring atmosfärisk korrosion av koppar är ett väl undersökt område och att det är mycket osannolikt att kvarvarande osäkerheter har någon säkerhetsbetydelse. SSM bedömer liksom SKB att korrosionsangreppen förväntas vara små och de är dessutom möjliga att kontrollera innan slutlig deponering av kapseln.

SSM anser att SKB:s angreppssätt för att beräkna korrosion med kvarvarande syre är godtagbart. Omfattningen av korrosion av kvarvarande syre i tunnlar vid förslutning styrs av hur stor gasvolym som finns tillgänglig i den igenfyllda tunneln, vilket innebär att de viktigaste faktorerna är dimensionerna hos utsprängda tunnlar samt vattenmättnadsgraden i buffert och återfyllnad. SSM anser liksom SKB att det är mycket osannolikt att syre enbart kommer att förbrukas i slutförvarsmiljön genom korrosion av koppar. Eftersom den större delen av syret finns i deponeringstunnlarna snarare än deponeringshålen kommer denna del sannolikt att förbrukas i väsentlig omfattning tack vare mineralreaktioner så som pyritoxidation och mikrobiella processer. Konsumtion av syre i bufferten är möjligen långsammare än i återfyllnaden på grund av hög densitet och låg vattenaktivitet och därmed mindre gynnsamma förutsättningar för mikrobiell aktivitet. Korrosionsangreppen förväntas vara väsentligt mindre än 5,5 mm. Det finns dock inte tillräcklig information för att göra några säkra förutsägelser kring hur länge oxiderande betingelser kvarstår invid kapselytan eller för att ta fram en sannolikhetsfördelning kring korrosionsangreppens omfattning. Dessutom anser SSM att SKB inte har beaktat i vilken omfattning

gropkorrosion för koppar under oxiderade förhållanden kan inträffa. SKB behöver i kommande steg av sitt program genomföra verifierande mätningar av syrekonsumention i tilltänkta kandidatmaterial. SKB behöver utvärdera syrekonsumention i en demonstrationstunnel och ta fram acceptanskriterier för återfyllnadsmaterial med avseende på syreförbrukning. Det är vid behov möjligt att påverka syreförbrukningen för att säkerställa att korrosionsangreppen inte blir för omfattande.

SSM anser att deponeringshålspluggens täthet är av stor betydelse för kapselkorrosion i deponeringshålspositioner i närheten av tunnelmynningen. Det är dock viktigt att påpeka att tätheten enbart har betydelse så länge slutförvaret är i drift, eftersom den möjliga transportvägen för syre försvinner efter förvarets slutliga förslutning. Efter slutlig förslutning har tunnelpluggen ingen säkerhetsfunktion. SSM konstaterar att SKB gjorts uppmärksam på processen i ett sent skede av tillståndsprovningen men bedömer ändå att de åtgärder som SKB föreslår ger goda förutsättningar att undvika ytterligare kopparkorrosion. Denna process som innefattar transport av syre genom berg och en betongbarriär går att monitera och följa under slutförvarets driftfas i exempelvis en demonstrationstunnel. Det är möjligt att vidta olika åtgärder för att minimera problemet, som tillförsel av syreförbrukande material och förbättrade tätningar. Det finns en koppling till frågan ovan som avser återfyllnadsmaterialets förmåga att konsumera syre. Om denna förmåga säkerställs och kan verifieras så kan betydelsen av små läckage minimeras. SSM anser att SKB genom fältmätningar behöver verifiera förslutna deponeringstunnlars täthet mot en närliggande transporttunnel. SKB behöver under slutförvarets driftfas genomföra fortlöpande monitorering och kontroller av att tunnelpluggarnas filterdel kontinuerligt hålls vattenmättad. SKB behöver vid behov vidta åtgärder för att säkerställa kapacitet hos tillförda material att konsumera syre. SSM bedömer att det finns förutsättningar för SKB att ta fram konstruktionsförutsättningar för att säkerställa mättade betingelser i tunnelpluggen och omkringliggande berg runt tunnelpluggen under hela slutförvarets drifttid.

4.10.3 Lokal korrosion av koppar under oxiderande betingelser

De korrosionsformer i oxiderande miljö som kan leda till ojämna korrosionsangrepp är:

- Spaltkorrosion ("under deposit corrosion")
- Gropkorrosion
- Saltackumulation och masstransport i gasfas ("bastu"-effekten)
- Strålningsinducerad korrosion
- Korrosion av kopparhöljets insida på grund av radiolys och kvarvarande vatten

SKB anser att lokal korrosion är något mera sannolik under oxiderande förhållanden i jämförelse med reducerande förhållanden, men anför olika argument varför processerna inte har stor betydelse för slutförvarets långsiktiga säkerhet.

4.10.3.1 Underlag från SKB

Det har genomförts en rad olika mätningar av kopparkorrosion i oxiderande slutförvarsmiljö med korrosionskuponger. SKB beskriver ett antal korrosionsförsök med korrosionskuponger av koppar i buffertmaterial och porvatten som har genomförts i Äspö-laboratoriet med exponeringar under loppet av ett antal år (SKB TR-10-46). Dessa utgör underlag för att dra slutsatser kring risk för gropkorrosion och spaltkorrosion i slutförvarsmiljön under oxiderande betingelser. I inget fall har gropkorrosion i samband med närvaro av en passiverande film kunnat noteras. Under försöken har hela ytorna blivit korroderade och SKB drar slutsatsen att ingen utpräglad gropkorrosion har förekommit. Korrosionsprofiler från dessa försök visar dock att korrosionen har skapat en betydande yttråhet med variationer i korrosionsdjupet på omkring 50 µm. SKB betraktar detta som en form av spaltkorrosion, men eftersom denna korrosionstyp inte anses vara baserad på

permanent separation av anod och katodytor förväntar sig SKB ingen omfattande propagering av gropkorrosion. SKB framför också argumentet att gropkorrosion av koppar i oxiderande miljö är ett relativt väl utforskat område i och med att det under speciella omständigheter förekommer i samband med korrosion i vattenledningsrör av koppar.

SKB anser att risken för gropkorrosion av koppar i en oxiderande miljö starkt kan kopplas till rådande kemiska förhållanden invid kopparytan (SKB TR-10-67; SKB TR-13-27). Kemiska betingelser som leder till gropkorrosion, som främst styrs av fördelningen av anjoner och pH motiveras genom resultat från ett antal refererade vetenskapliga publikationer. Höga karbonathalter och höga pH tenderar att skapa passiverade kopparytor som dock kan störas av klorid- och sulfatjoner och i denna process kan gropkorrosion påbörjas. Höga klorid- och sulfathalter i förhållande till karbonatjoner skapar ytor som är aktiva ur korrosionshänseende och helt förhindrar uppkomst av passiverande ytfilm alternativt bryter ner ytfilmerna i sådan omfattning att allmän korrosion påbörjas. SKB anser att en grundförutsättning för uppkomst av gropkorrosionsrisk är att kopparytorna först har blivit passiverade och att risken sedan beror på en balans mellan faktorer som upprätthåller en passivering av kopparytan och faktorer som motverkar en passivering. SKB:s övergripande slutsats är att den kemiska miljön i bentonitbufferten vid oxiderande betingelser är sådan att passiverande förhållanden aldrig uppstår som ett resultat av kombinationen av höga kloridhalter, neutrala pH och låga karbonathalter.

SKB har formulerat svar på en kompletteringsbegäran från SSM angående en probabilistisk analys för gropkorrosionsrisk som redovisar att potentialskillnaden mellan korrosionspotentialen och gropkorrosionspotentialen, E_b , för koppar i den aktuella miljön är tillräcklig för att utesluta gropkorrosion. SKB pekar i första hand på att passiverande förhållanden inte förväntas uppstå (SKBdoc 1398013; SKB TR-13-27). SKB konstaterar vidare att en analys baserad på förutsättningen att sådana förhållanden existerar förhindras av att befintliga litteraturdata antyder att återpassiveringspotentialen är mera positiv än gropkorrosionspotentialen. Om korrosionspotentialen sjunker under gropkorrosionspotentialen anses det inte föreligga någon risk för gropkorrosion. Om gropkorrosion väl har initieras anses dock inte gropkorrosionen upphöra förrän återpassiveringspotentialen nås som således ska vara lägre än gropkorrosionspotentialen. Återpassiveringspotentialen ska vara ett mera konservativt mått vid analys av gropkorrosionsrisk. SKB anser dock att eftersom det omvända förhållandet råder är en sådan analys inte möjlig att genomföra. SKB konstaterar att korrosionspotentialen ligger under gränslinjen för kemisk jämvikt mellan koppar(I) och koppar(II)oxiderna vilket anses vara gränsen för gropkorrosionsrisk (SKB TR-13-27, avsnitt 4.1.1).

SSM har även efterfrågat en ytterligare analys och bedömning av inverkan av saltanrikning invid kapselytan (SKBdoc 1398013; SKB TR-13-27). I det ursprungliga ansökansunderlaget lyftes experimentella resultat från LOT-försöket fram som visade att en tunn film av kalciumsulfat/karbonat bildas på kopparytan under en exponering på upp till 6 år, som ett resultat av antingen avdunstning eller lägre löslighet vid högre temperaturer (SKB TR-10-46). SKB anger att dessa salter inte är elektrisk ledande och därför inte ger upphov till gropkorrosionsrisk. Ingen ackumulation av kloridsalter noterades vid dessa försök. SKB anser dock att denna typ av utfällningar möjligen kan bildas på kapselytan och under en period orsakar lokala eller ojämna korrosionsangrepp, men att klorider och nitrater har en stark tendens att lösas upp i samband med upptag av fukt från gasfasen eller tillförsel av porvatten via kapillärkrafter och kommer därför försvinna på relativt kort tid (SKB TR-10-67, avsnitt 4.3.2). Om passiverande oxidfilmer inte bildas ger inte heller ackumulation av kloridsalter någon förhöjd gropkorrosionsrisk. SKB anför avslutningsvis att lokala korrosionseffekter begränsas av de förhållandevis små



mängderna tillgängligt syre och den förhållandevis korta perioden med oxiderande betingelser.

I kompletteringen anger SKB att ytbeläggningar på kapseln kan vara orsaken till spaltkorrosion som dock endast visats ge en begränsad ojämnhet av kopparytan. SKB diskuterar risken för att kopparhöljet blir överdraget av ett lager aluminiumhydroxid, men drar sedan slutsatsen att en mekanism som involverar en sänkning av pH nära kapselytan är osannolik med tanke på närvaron av pH-buffrande mineral i bufferten (SKB TR-13-27, avsnitt 4.2). SKB har genomfört vissa försök för att studera förutsättningar för ångtransport genom bufferten till återfyllnaden, vilket skulle kunna medföra ökad omfattning av saltackumulering (SKB R-13-42). Resultaten visade att det var svårt att bilda sig en uppfattning om pelletsfyllningens upptag av ånga eftersom ångan först kondenserade i den pelletsfyllda spalten som omger bufferten tack vare temperaturgradienten och därefter togs upp av pelletsfyllningen. Testerna ansågs dock inte helt representativa för slutförvarssituationen, men SKB drar ändå slutsatsen att en kondensation kommer till stånd som ett resultat av temperaturgradienten. SKB har också genomfört beräkningar för att kvantifiera kloridhalter i bufferten och invid kapseln för deponeringshål med återmättnadstider på 10, 100 och 1000 år (SKB TR-10-59, avsnitt 5.1.2).

Gammastrålning på kapselns ytteryta förväntas under återmättnadsskedet och vid tillgång på fuktig luft innehållande kvävgas leda till bildning av salpetersyra. Bildad salpetersyra antas sedan reagera med koppar och orsaka korrosion. SKB har genomfört enkla överslagsberäkningar baserat på strålfältets utveckling och det kemiska utbytet för reaktionen under en tidsperiod av 1000 år (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4). Halveringstiden 30 år har använts eftersom gammastrålfältet utanför kapseln förväntas domineras av bidrag från radionukliden Cs-137. Resultaten pekar på att 0,015 mol salpetersyra bildas vilket omsatt till korrosionsdjup motsvaras av 7 nm under de första 1000 åren efter förslutning under förutsättning att korrosionen fördelas jämnt över kapselytan. Även efter full återmättnad kan dock strålningsinducerad korrosion fortsätta på grund av radiolys av vatten, vilket bildar oxidanter som kan reagera med kopparkapseln. SKB har uppskattat den totala omfattningen av denna korrosionsform genom att betrakta en analogi mellan korrosion och strålfältets förmåga att oxididera järn(II) i lösning (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4). Effekten av gammalradiolys av vatten bedöms fortgå under ungefär 320 år efter deponering, vilket motsvaras av tio halveringar av den dominerade isotopen Cs-137 som ger upphov till gammastrålning vid sönderfall. Korrosionsdjupet beräknas genom att teoretiskt räkna fram mängden korroderad koppar som orsakas av radiolysprodukter som bildas i den vattenvolym som innefattas i ett 5 mm tjockt lager runt kapseln. De totalt 35 mol förbrukad koppar svarar mot ett totalt korrosionsdjup av kopparhöljet på maximalt 14 µm. SKB framhåller dock att vissa experimentella studier visar att gammastrålning vid dosrater kring 13 -30 Gy/h inte ökar utan snarare minskar korrosionshastigheten av koppar. I slutförvarsmiljön är dosraten mindre än 1 Gy/h. En förklaring till minskningen av korrosionshastighet är att ytfilmen blir mer passiverande under inverkan av strålfältet.

SKB har på SSM:s begäran tagit fram ytterligare information med avseende på korrosion av kopparhöljets insida orsakad av kombinationen radiolys samt kvarvarande vatten i bränsleelementen och lättflyktiga fissionsprodukter (SKBdoc 1398013; SKBdoc 1419961). I SKB:s svar förutsätts att 600 g vatten finns i kapseln och att stållocket inte är tätt så att vattnet kommer åt kopparhöljet. I det mest konservativa fallet bildas en 134 mm hög vattenpelare nära höljets botten och om allt vatten sönderdelas via radiolys och reagerar med kopparn skulle det totala korrosionsdjupet bli drygt 1 mm i den påverkade delen av kapselhöljet. SKB anser dock att ett sådant fall är osannolikt eftersom: (i) det är mycket osannolikt att så mycket som 600 g vatten skulle finnas kvar i en enskild kapsel vid förslutningen, (ii) insatsen av järn skulle ha en benägenhet att reagera med eventuellt

kvarvarande vatten och därför konsumera vatten innan reaktionen med koppar, och (iii) korrosion av koppar skulle inte äga rum bara i anslutning till vattenpelaren utan även andra kopparytor. I en annan analys av omfattningen av radiolys befanns korrosionsdjupet bli runt 0,1 mm. SKB anser att insatsen av segjärn fungerar som offeranod med avseende på kopparmaterialet och som därmed korroderar istället för kopparmaterialet. SKB anger att korrosion orsakad av lättflyktiga fissionsprodukter som klorid och jodid maximalt kan korrodera 0,1 mol koppar och skulle därför ge försumbara korrosionsbidrag. Det är mest sannolikt att de istället skulle reagera med järninsatsen.

4.10.3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att risk för lokala korrosionsangrepp av betydelse i förhållande till allmän korrosion är kopplad till närvaro av ett passiverande oxidskikt. Ojämna korrosionsangrepp som involverar hela den korroderande ytan av den typ som noterats vid korrosionsförsök i Äspö-laboratoriet har en begränsad betydelse för höljets långsiktiga integritet.

SSM anser att risk för gropkorrosion av koppar i oxiderande miljö är ett förhållandevis väl undersökt område med tillämpningar långt utanför kärnavfallsområdet. Gropkorrosion i samband med vattenledningsrör och arkeologiska fynd av koppar är tydliga bevis för att viss gropkorrosionsrisk föreligger vid användning av kopparkapslar. Under vissa kemiska förhållanden har en tiopotens djupare korrosionsgropar uppmätts (SKBF rapport 83-05), i jämförelse med vad SKB anger som avvikelser från ett medelkorrosionsdjup (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.2.5). I vissa vattenkemiska miljöer i vattenledningsrör förekommer gropkorrosion med halvfariska frätgropar.

Enligt SSM:s bedömning är SKB:s experimentella observationer kring en maximal avvikelse på 50 µm kring ett genomsnittligt korrosionsdjup inte ensamt tillräckliga för att utesluta gropkorrosionsrisk eftersom det inte tydligt kunnat visas att förhållanden under vilka experimenten har genomförts täcker in de tidsskalor som är aktuella för oxiderande förhållanden i ett slutförvar. SSM konstaterar samtidigt att erfarenhet från andra sammanhang visar att gropkorrosionsrisk är kopplad till speciella grundvattenkemiska betingelser. Laboratorieundersökningar har visat vilka vattenkemiska faktorer som gynnar allmän korrosion snarare än bildning av passiverande oxidfilmer. I slutförvarsmiljön kan gropkorrosionsrisk begränsas av de förekommande intervallen för kloridhalt, karbonathalt och pH. Variabiliteten för kemiska förhållanden invid kapselytorna med avseende på kemiska processer i bufferten och den tidiga utvecklingen under varierande återmättnadsförhållanden finns dock inte explicit analyserad och representerad, vilket försvårar en bedömning av frågan.

Beträffande betydelsen av saltanrikning i anslutning till kopparkapslarna under perioden med omättade förhållanden (även kallad bastu-effekten eller ”sauna”-effekten) konstaterar SSM att halterna av karbonat och sulfat invid kapselytor förväntas bli löslighetsbegränsade i anslutning till bildning och upplösning av kalcit respektive anhydrit i bufferten och i direkt anslutning till kapselytorna. Det finns dock sannolikt en mindre påverkan på de kemiska betingelserna med tanke på dessa fasers temperaturberoende löslighet. Den kanske viktigaste frågan avser troligen omfattningen av en ackumulation av klorid som ett resultat av inflöde av omgivande grundvatten med hög salthalt. Denna effekt kan ha en större betydelse för de kemiska betingelserna eftersom de fasta kloridfaserna har mycket högre löslighet. SSM konstaterar att SKB:s befintliga beräkningar antyder att även denna effekt är mycket liten (SKB TR-10-59, avsnitt 5.1.2) men att dessa beräkningar behöver enligt SSM:s bedömning kompletteras med en mera detaljerad redogörelse och känslighetsanalys kring parametrar som styr transport av ånga i bufferten. Arbetet med att karaktärisera kemiska betingelser i bufferten bör i högre utsträckning integreras med analysen av buffertens och återfyllnadens termiska och hydrauliska utveckling (SKB TR-10-11). Även i detta fall finns dock begränsande faktorer



så som att i de deponeringshål som är förbundna med de mest vattenförande sprickorna och som är förknippade med det mest betydande inflödet av salt grundvatten har snabba återmättnadstider. Tiden för en betydande ackumulation är därför förhållandevis kort. För deponeringshål med mycket långa återmättnadstider finns å andra sidan längre tid för en möjlig ackumulation, men i dessa hål är dock inflödet av omgivande salt grundvatten mycket långsamt beroende på att dessa hål är omgivna av intakt berg utan vattenförande sprickor. Kapseltemperaturerna i dessa hål hinner också sjunka betydligt i tidsskalan av återmättnadsförloppet innan tillflöde av betydande mängder salt grundvatten. SSM anser att SKB bör beakta risken för saltanrikning i samband med undersökning av bergets egenskaper i direkt anslutning till deponeringshålen samt i samband med buffertens och återfyllnadens detaljerade utformning.

SSM anser baserat på den förhållandevis korta tiden med ett betydande gammastrålfält vid kapselns ytteryta att allmän korrosion medför en liten ackumulerad produktion av oxidanter och en allt för begränsad reduktion av kopparhöljets tjocklek för att ha någon väsentlig påverkan på kapselns skyddsförmåga. Grunden för detta ställningstagande är den intakta kapselns strålskärning och halveringstiden på 30 år för den i sammanhanget dominerande nukliden Cs-137. Detta medför en definitiv begränsning av tidsperioden med strålningsinducerad allmän korrosion.

Beträffande strålningsinducerad lokal korrosion av koppar kan SSM konstatera att resultaten från de studier som SKB citerar i ansökan delvis motsägs av nyligen publicerade resultat, som visar att ett gammastrålfält kan ge upphov till en ökning av den lokala korrosionshastigheten och gropkorrosion av koppar (Björkbacka 2015). Korrosionsangrepp på kopparkuber som exponerats för dosrater mellan 0,02-0,2 Gy/s är mera betydande och av mera lokal karaktär än i jämförelse med referensprover. Korrosionsprofiler för prover som exponerats för totala ackumulerade doser kring 100 kGy visar på ca 1 µm djupa frätgropar. Denna dos motsvarar dosen för kapselkoppar efter cirka 100 år i slutförvarsmiljön. Korrosionsprodukter består huvudsakligen av $\text{Cu}_2\text{O}_{(s)}$. Föroxiderade prover bildar både tjockare oxidlager och större frigörelse av koppar i vattenlösningen, men oxidfilmen med en tjocklek av cirka 100 nm svarar för den större andelen av oxiderad koppar. En mekanism för strålningsinducerad kopparkorrosion föreslås som baseras på interaktioner mellan hydroxidradikaler och kopparoxider. SSM anser att även om omfattningen av korrosionsangreppen har begränsad betydelse skulle exempelvis en passivering av oxidlagret under inverkan av strålfältet kunna ha betydelse för risken för lokala korrosionsangrepp under det fortsatta korrosionsförloppet. Resultat från SSM-finansierad forskning visar också att korrosionspotentialen kan påverkas betydligt av gammaradiolys (SSM forskningsrapport 2012:11). SSM anser därför att SKB inte har beskrivit risk för gropkorrosion på ett tillräckligt allsidigt sätt för att kunna utesluta denna process i de av SKB analyserade scenarierna (se även kapitel 9 i denna granskningsrapport).

Förutsättning för lokal korrosion av kapselns kopparhölje har uppmärksammats i de oberoende expertgranskningar som SSM låtit genomföra (SSM Technical Note 2012:17; SSM Technical Note 2012:21). Följande frågeställningar med avseende på gropkorrosion har speciellt lyfts fram i dessa granskningar; (i) frånvaro av probabilistiskt angreppssätt i syreinhållande miljöer, (ii) inverkan av blandning av kemiska ämnen, (iii) inverkan av avlagringar på kapselytan, och (iv) inverkan av gammaradiolys. SKB:s angreppssätt för hantering av gropkorrosion bygger delvis på att skillnad mellan gropkorrosionspotential och korrosionspotential är så stor att risken för gropkorrosion helt kan uteslutas. Bestämning av gropkorrosionspotentialen är beroende på exempelvis material-sammansättning, elektrolytinhåll, mikrostruktur, yttjämnhet och potentialens scanningshastighet vid elektrokemisk bestämning (SSM Technical Note 2012:21). Detta



gör att gropkorrosionspotentialen vanligen beskrivs genom en statistisk fördelning av värden vilket inte SKB har beaktat i nuvarande redovisning.

SSM anser att behovet av ett probabilistiskt angreppssätt kan kopplas till behovet av att analysera en samverkan av olika korrosionsprocesser och ett förtydligande kring hur variabilitet och osäkerhet i gropkorrosionspotentialen och återpassiveringspotentialen påverkar risk för gropkorrosion under tidsperioden med oxiderande betingelser. Även om man accepterar SKB:s grundläggande premiss att inga förutsättningar för bildning av passiverande oxidfilmer och gropkorrosion finns med tanke på den ursprungliga kemiska sammansättningen av porvatten i kontakt med kapselytorna, återstår frågor t.ex. kring huruvida gammastrålning i samverkan med den kemiska miljön kan åstadkomma en passiverande ytfilm och/eller om avlagringar på kapselytorna kan påverka förutsättningarna för lokala korrosionsangrepp. SSM anser att SKB:s argumentation är för förenklad genom att adressera processerna en och en samt att helhetgreppet kring samtliga faktorer som inverkar på risken för lokala korrosionsangrepp behöver förbättras. SSM anser att SKB behöver inför kommande steg i sitt program ta fram ett mera integrerat angreppssätt som involverar samverkan mellan tänkbara mekanismer som kan orsaka lokala korrosionsangrepp respektive beaktande av variabilitet för kemiska och fysikaliska betingelser. SKB redovisar i ett svar på en kompletteringsbegäran från SSM med avseende på en probabilistisk analys som redovisar att potentialskillnaden mellan korrosionspotentialen och gropkorrosionspotentialen, att gropkorrosionspotentialen (E_b) och återpassiveringspotentialen (E_r) inte går att beskriva för de aktuella porvattensammansättningarna (Skbdoc1398013). SSM anser dock att E_b och E_r är statistiskt fördelade och en bedömning av risk för gropkorrosion därmed behöver innefatta denna typ av analys.

SSM anser sammanfattningsvis att även om frågeställningar kring ojämna korrosionsangrepp i slutförvarsmiljön kvarstår så begränsas säkerhetsbetydelsen sannolikt av att tiden för oxiderande betingelser i slutförvarsmiljön sannolikt är kort och att mängden syre och radiolytiska oxidanter som är tillgänglig för kopparkorrosion är förhållandevis liten. Det sistnämnda beror på den begränsade tiden för ett betydande gammastrålfält vid kapselns ytteryta samt att mängden kvarvarande syre är begränsad och konsumeras av andra processer förutom korrosion i slutförvaret. Det finns dock fortfarande vissa osäkerheter kring vilka andra syrekonsumerande processer som är tillförlitliga att tillgodoräkna sig i säkerhetsanalysen. För att argumentet begränsad syremängd ska vara giltigt krävs också att det med stor tillförlitlighet går att visa att inläckage av syre via tunnelpluggen kan uteslutas. Mängden syre tillgänglig för korrosion är i viss mån påverkbar genom justering av mängden av syrekonsumerande mineral i de material som används. En probabilistisk analys som visar på en mycket liten risk för ojämna korrosionsangrepp skulle möjligen kunna rättfärdiga SKB:s slutsats att risken för gropkorrosion under oxiderande betingelser begränsas till det av SKB experimentellt fastställda värdet på 50 μm , men om å andra sidan om mera omfattande lokala korrosionsangrepp inte kan uteslutas behöver SKB:s analys omprövas och kompletteras med andra angreppssätt för att bedöma korrosionsangreppens omfattning under tiden för oxiderande betingelser (se SKB TR-10-67, avsnitt 5.3.3).

Beträffande kopparkorrosion av kapselns insida orsakad av vatten i skadat bränsle anser SSM att SKB:s gränssättande beräkning med jämn korrosion omfattande ungefärligt djup på 1 mm inte i alla avseenden är konservativt. Fallet förutsätter korrosion på 134 mm av kopparkapselns nedre som motsvarar maximal volym vatten inuti kapseln, men detta fall förutsätter att allt vatten från insatsen under kort tid kommer ut till spalten mellan höljet och insatsen. Om vattentillförseln sker långsammare och om korrosionsangreppen koncentreras till en mindre del av kapselarean kan korrosionsangreppen teoretiskt bli mer omfattande. SSM bedömer emellertid att segjärnsinsatsen i stor utsträckning kommer att

korrodera av vattnet i de skadade bränsleelementen och därför begränsas kopparkorrosionen. Dessutom är det sannolikt endast ett fåtal av kapslarna som innehåller skadade bränsleelement. Baserat på dessa överväganden bedömer SSM att kopparkorrosion av kapselns insida endast bör ha en mycket liten påverkan på korrosionsbarriären. Däremot kvarstår frågan av hur kvarvarande vatten och innesluten luft kan skapa förutsättning för spänningskorrosion, vilket behandlas nedan.

4.10.4 Spänningskorrosion av koppar under oxiderande betingelser

Spänningskorrosion kan inträffa då mekaniska dragspänningar föreligger i ett material som är känsligt för spänningskorrosion i en tillräckligt korrosiv kemisk miljö. SKB anser att risken för kapselskador från denna typ av process är mycket liten, men att det nuvarande kunskapsläget inte är tillräckligt för att helt utesluta processen.

4.10.4.1 Underlag från SKB

I en oxiderande miljö anses risken för spänningskorrosion av koppar vara kopplad till förekomsten av ett passiverande oxidskikt ($\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$) samt förekomst av vissa aggressiva species i grundvatten. För oxiderande miljö finns ett relativt stort antal experimentella undersökningar genomförda som visar på sprickbildning vid förhållandevis höga koncentrationer av ammonium, nitrit eller acetat (SKB TR-10-67, tabell 6-1), och koppar kan därför inte anses vara immun mot spänningskorrosion i dessa miljöer. Det finns enligt SKB en mekanistisk förståelse för spänningskorrosion i aggressiva kemiska miljöer, varav de huvudsakliga mekanismerna anses vara: (i) ”film rupture”, (ii) ”tarnish-rupture”, (iii) ”film-induced cleavage”, och (iv) ”surface mobility”. Experimentella observationer kring sprickbildning förklaras vanligen av att en passiverande film störs av dragspänningar i godset åtföljt av sprickbildning och korrosiva förhållanden i sprickspetsen, vilket ger upphov till gradvis sprickpropagering. Eftersom mekanismerna förutom (iv) är beroende av kemiska förhållanden och relateras till termodynamisk stabilitet av passiverande oxidfilmer anser SKB att faktorer som motverkar uppkomsten av passiverande förhållanden också minskar eller eliminerar risken för spänningskorrosion. SKB har på basis av denna hypotes utvecklat en beslutsträdsmodell för uppskattning av spänningskorrosionsrisk (SKB TR-10-04, figur 4-5) där ett antal faktorer stegvis utvärderas: (i) korrosionspotential och pH som medger termodynamisk stabilitet av ett passiverande oxidskikt, (ii) förekomst av aggressiva kemiska species så som ammonium, nitrit eller acetat i tillräcklig koncentration (iii) inverkan av kloridhalt (iv) inverkan av temperatur och (v) förekomst av dragspänningar. SKB anser att det finns experimentella belägg för att spänningskorrosionsrisken minskar med ökande kloridhalt med förklaringen att höga kloridhalter inhiberar filmstabilitet. De experimentella resultaten visar också att spänningskorrosion är mindre trolig vid höga temperaturer eftersom högre temperatur ger upphov till en minskning av korrosionspotentialen som gynnar allmän korrosion på bekostnad av lokal korrosion. Beträffande ”surface mobility” som inte är beroende av någon kemisk process och därmed inte kan kopplas till miljöfaktorer eller närvaro av en passiverande film, så anser SKB att om mekanismen verkligen förekommer är hastigheten så låg att den inte skulle ha någon betydelse ens i säkerhetsanalysens tidsskala.

Den kanske viktigaste förutsättningen för spänningskorrosion, att dragspänningar föreligger i godset, förklaras av den mekaniska belastningen på kopparhöljet som orsakas av det omgivande hydrostatiska vattentrycket, och buffertens svälltryck. Under den inledande oxiderande fasen kommer dragspänningarna att byggas upp under det att buffertens vattenmättnadsgrad gradvis ökar. Dragspänningar är lokaliserade till vissa områden i närheten av svetsfogen och det omgivande trycket ger upphov till lokala områden med omfattande deformation (SKBdoc 1399768). Beroende på om det föreligger sprickor som skär deponeringshålen kan vattenmättnadsförloppet ta allt ifrån några

årtionden till hundratals eller möjligen tusentals år. SKB har visat att under vissa förutsättningar kan dragspänningar föreligga genom hela kopparhöljet i vissa områden på kapseln (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.5).

SKB argumenterar i huvudsak kring att risken för spänningskorrosion är som högst i inledningskedet under de första ca 10 – 100-tals åren på grund av att oxidanterna O₂ och Cu(II) finns tillgängliga, andra i detta sammanhang aggressiva joner som ammonium, nitrit eller acetat, kan vara närvarande som rester från konstruktionsarbeten, samt att klorid från omgivande grundvatten som inhiberar filmstabilitet inte hunnit nå kapselytan (SKB TR-10-67, avsnitt 6.2.2.3 och 6.3). Pålastningen på kapseln på grund av hydrostatiskt tryck och buffertsvällning sker också under denna fas vilket initialt ger de högsta dragspänningarna innan höljet har hunnit deformeras i sådan omfattning att det kommit i kontakt med insatsen. Bedömningen att spänningskorrosion trots allt inte kommer inträffa under denna fas motiveras i huvudsak med att koncentrationer av kända aggressiva joner som ammonium, nitrit eller acetat inte förekommer i tillräcklig omfattning i slutförvarsmiljön (SKB TR-10-04). SKB gör dock i underlagsrapporten för SR-Site (SKB TR-10-46) den sammanlagda bedömningen att risken för spänningskorrosion om än liten inte helt kan uteslutas baserat på tillgängligt kunskapsunderlag.

SSM har i begäran om komplettering efterfrågat en analys av hur oxidanter från radiolys påverkar spänningskorrosion (SSM2011-2426-57).

SKB har även kompletterat ansökan med ytterligare underlag som beskriver spänningskorrosion av koppar orsakat av radiolysprodukter eller sulfidinnehållande syrgasfria miljöer (SKBdoc1398013). Radiolys av kvävgas löst i vatten bedöms av SKB ge upphov till nitrit och ammoniak som är tre tiopotenser lägre än de halter som gett upphov till spänningskorrosion vid laboratorietester. SKB anser det vara osannolikt att anrikning av nitrit och ammoniak kan ske vid kapselns yta efter deponering. Dessutom anser SKB att initiering av spänningskorrosion från kopparhöljets insida genom radiolys av luft eller vatten är mycket osannolik, eftersom mängden kvävgas och mängden vatten befanns vara mycket liten i förhållande till kopparhöljets inneryta.

4.10.4.2 SSM:s bedömning

SSM konstaterar att spänningskorrosion av koppar i oxiderande miljö är ett förhållandevis väl undersökt område (SKB TR-10-67, tabell 6-1). SSM anser dock att det finns vissa svagheter kopplat till SKB:s huvudsakliga argument som är att aggressiva ämnen inte förekommer i sådana koncentrationer som i experiment kunnat visas ge upphov till spänningskorrosion. Även om det är frågan om stora koncentrationsskillnader på flera tiopotenser finns en viss risk att experimentella försök som genomförts i lägre koncentrationsintervall inte förmått detektera spänningskorrosion på grund av begränsad exponeringstid. SKB förväntar sig, baserat på experimentella observationer och teoretisk förståelse, att passiverande oxidfilmer som kan orsaka lokala korrosionsfenomen inte kommer att bildas på kopparytorna. Detta talar mot flertalet spänningskorrosionsmekanismer som kan relateras till termodynamisk stabilitet av oxidfilmer. Så som framgår ovan är dock SSM inte övertygad om att SKB har visat att detta förhållande gäller för samtliga kapselpositioner och för hela tidsintervallet med oxiderande betingelser. SSM konstaterar vidare att risken för spänningskorrosion under oxiderande förhållanden är liksom gropkorrosion kopplad till längden av det tidsintervall under vilken oxiderande betingelser kvarstår i slutförvarsmiljön, vilket är svårt att bedöma baserat på tillgängligt underlagsmaterial (se avsnitt 4.10.2.2 i denna granskningsrapport). Om tiden för oxiderande betingelser är kort i förhållande till även de snabbaste återmättnadstiderna (SKB TR-10-11, avsnitt 3.6.3) så sammanfaller inte situationen spänningskorrosionsrisk och fullt utvecklade dragspänningar i kapselhöljet. Är tiden med oxiderande förhållanden längre än något/några år kan en risk föreligga eftersom tiden för spänningskorrosionsrisk



under oxiderande förhållanden sammanfaller med tiden då buffertens svälltryck har utvecklats. SSM anser liksom SKB att risken inte helt kan uteslutas, samtidigt noterar SSM att SKB trots att de inte anser sig kunna utesluta risken har SKB inte hanterat denna slutsats vidare i säkerhetsanalysen. I sammanfattningen av de viktigaste uteslutna FEP finns processen omnämnd, dock i detta sammanhang med försumbar sannolikhet (SKB TR-11-01, avsnitt 14.4.3).

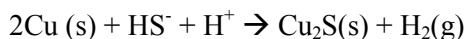
SSM anser att det är svårt att baserat på SKB:s underlag helt eliminera spänningskorrosionsrisk under en tidsperiod då mekaniska dragspänningar föreligger genom hela kapselns kopparhölje tillsammans med aggressiva ämnen som finns i grundvatten eller som kan produceras under radiolys av vatten. Den sannolikt korta tidsperioden med betydande närvaro av syre vars tidsintervall kan påverkas genom framtida materialval för buffert och återfyllnad, vilket om denna möjlighet beaktas medför att spänningskorrosionsrisk under oxiderande förhållanden i perspektivet slutförvarets långsiktiga utveckling kan betraktas som mycket liten. Perioden med oxiderande betingelser behöver sammanfalla med en period med utvecklade dragspänningar i kopparhöljet för att fallet ska bli aktuellt. SSM anser dock att SKB inför kommande steg i slutförvarsprogrammet utförligare behöver redovisa betydelsen av faktorer i slutförvarsmiljön som kan bidra till risk för spänningskorrosion. SKB behöver också antingen som ett hypotetiskt fall eller som ett faktiskt fall kopplat till slutförvarsrisk utreda betydelsen av en påbörjad respektive fullbordad sprickbildning av kopparhöljet.

SSM anser vidare att om det blir aktuellt med en konstruktionsfas bör SKB monitorera halter av kväveföreningar från sprängmedel under konstruktions- och driftfaserna samt vidta åtgärder för att minska dessa halter så långt som möjligt.

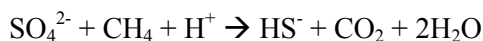
Mängden kvarvarande kvävgas inuti en försluten kapsel kan ha en betydelse för kapslar med betydande mängder kvarvarande vatten för fall med bildning av nitrit och ammoniak då radiolysprodukter reagerar med kvävgas. En viss mängd kvävgas kan kvarstå även efter byte av atmosfär inuti kapseln till en gas med > 90 % argon (SKB TR-10-13, avsnitt 3.1.4), SSM konstaterar att luft förekommer i spalten mellan den gjutna insatsen och kopparkapseln. I vilka koncentrationer nitrit och ammoniak kan uppkomma i miljön inuti kapseln har dock inte blivit analyserat av SKB. SSM anser mot denna bakgrund att spänningskorrosion i kopparhöljet initierad från kopparhöljets insida för närvarande inte helt kan uteslutas. SKB redovisar vidare halter av nitrit och ammonium i grundvatten (SKB TR-10-58), men det finns ingen analys som explicit fastställer koncentrationnivåer för dessa kväveföreningar vid kapselytan under inverkan av gammarradiolys. Acetatkoncentrationerna förväntas inte bli påverkade av gammastrålfältet men mikrobiell aktivitet och sulfidproduktion vid kapselytorna kan ha en betydelse för spänningskorrosion.

4.10.5 Allmän korrosion av koppar under reducerande betingelser

Efter att kvarvarande syre har förbrukats kommer en reducerande kemisk miljö att etableras i slutförvaret. Under dessa förhållanden kommer korrosion av koppar med sulfid att äga rum:



Förutom att sulfid finns i grundvattnen/porvatten kan detta korroderande ämne bildas från sulfat och organiskt material via mikrobiell sulfatreduktion. I det följande exemplifieras processen med metan som reduktant:



I detta avsnitt beskrivs korrosion som uppstår till följd av till slutförvaret tillförda material, främst buffertmaterial och återfyllnad. Korrosionen uppstår till följd av sulfider som finns i materialen från början och möjligen med större betydelse, sulfider som kan bildas i slutförvarsmiljön till följd av mikrobiell sulfatreduktion från de båda komponenterna sulfat samt organiska material och/eller vätgas. Mindre mängder sulfider kan bildas från förutom buffert och återfyllnadsmaterial armeringsjärn som producerar vätgas i samband med korrosion samt organiska rester som blir kvar i slutförvaret. Gemensamt för dessa korrosionsformer i motsats till de som är beroende av grundvattenflöde i berggrunden, är att de är mest aktiva i slutförvarets inledningsskede för att därefter avstanna varefter de mest reaktiva komponenterna av de tillförda substanserna förbrukas. Motsvarande korrosionsprocess som äger rum som ett resultat av tillförsel av sulfid från grundvattenströmning i berget redovisas i kapitel 5 i denna granskningsrapport.

Följande korrosionsformer innefattas av allmän korrosion till följd av tillförda material:

- Korrosion från pyrit i buffert och återfyllnad
- Termokemisk sulfatreduktion
- Korrosion från mikrobiell sulfatreduktion i buffert och återfyllnad mättade förhållanden
- Korrosion från mikrobiell sulfatreduktion i buffert och återfyllnad omättade förhållanden
- Korrosion från mikrobiell sulfatreduktion övriga till slutförvaret tillförda material

4.10.5.1 Underlag från SKB

Beträffande korrosion orsakad av sulfid från pyrit (FeS_2) i buffertmaterial visar SKB:s beräkningar på en mycket liten påverkan eftersom pyrit vid vanligt förekommande järnkonzentrationer har mycket låg löslighet i en kemiskt reducerande miljö. Resultaten antyder realistiska korrosionsangrepp på maximalt 1 μm även om de högsta pyrithalterna beaktas. SKB analyserar även ett pessimistiskt fall med ett porvatten med mycket låg järnhalt samt att sulfid kan diffundera i oladdad form och får då korrosionsangrepp på ca 0,1 mm för tidsperioden en miljon år. SKB redovisar inte specifikt hur mycket korrosion som kan orsakas av pyrit de första 1000 åren. Om man bortser från alla begränsningar med avseende på löslighet och transport, och hypotetiskt förutsätter att all sulfidsvavel i pyrit reagerar med kopparkapseln blir angreppens storlek då maximalt 3 mm. SKB beaktar bara inverkan av pyrit i bufferten och inte pyrit i återfyllnaden. SKB har formulerat kravet att halten sulfidsvavel i buffertmaterial ska vara maximalt 0,5 vikt %. I de material som hittills har undersökts varierar halten sulfidsvavel från 0,04 – 0,3 vikt%.

Termokemisk sulfatreduktion innebär att reduktion av sulfat till sulfid kan ske som en kemisk process utan mikrobiell aktivitet. SKB konstaterar baserat på litteraturstudier att processen inte kan ha någon betydelse vid 100°C och att temperaturer på uppemot 175°C krävs för att reaktionshastigheten ska kunna ha någon betydelse för kopparkorrosion.



Halveringstid för tillgängligt sulfat har uppskattats till 100 000-tals år vid 100°C som ett resultat av den låga reaktionshastigheten för termokemisk sulfatreduktion.

En annan källa till kopparkorrosion är sulfid som bildas av sulfatreducerande mikrober i buffert och återfyllnadsmaterial (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.13). SKB räknar inte med att sulfat som finns i grundvatten, buffert och återfyllnadsmaterial är en begränsande faktor, utan analysen av korrosionens möjliga omfattning har baserats på tillgången till organiskt kol som kan användas som energikälla för mikroberna. Tillgång på sulfat kan förekomma i bufferten t.ex. i form av mineralet gips med upp till 1 vikt%. Den största mängden substrat som skulle bidra till mikrobiell sulfatreduktion består av organiska föreningar i de tänkbara återfyllnadsmaterialen. Bufferten innehåller också organiska föreningar men det rör sig om en väsentligt mindre mängd. SKB anger att den större delen av dessa föreningar sannolikt är humusämnen och fulvosyror som är nära förbundna med leran och därför sannolikt inte kommer att kunna lösas upp och reagera. Enligt SKB:s acceptanskrav för referensmaterial ska buffertmaterial ha mindre än 1 vikt% organiska material. Något motsvarande krav för återfyllnadsmaterial finns för närvarande inte.

Om allt organiskt material i återfyllnaden skulle förbrukas av sulfatreducerande mikrober så skulle det motsvaras av 13 600 mol per deponerad kapsel. Detta är en stor mängd och SKB använder därför en massöverföringsberäkning snarare än en massbalansberäkning, i vilken bildning av sulfider i återfyllnaden förutsätts som sedan antas diffundera genom vattenfasen i den övre delen av bufferten. SKB argumenterar också för att återfyllnaden har en densitet som begränsar mikrobiell aktivitet, men beaktar sedan inte detta argument vidare. SKB räknar med en pessimistisk sulfidkoncentration i återfyllnadsmaterialet på 0,1 mM, endimensionell diffusion från tunnelgolvet till kapselns lock, samt att korrosionen omfattar 10 % av kapselytan. SKB anger inte specifikt omfattningen av korrosion under de första 1000 åren men för hela säkerhetsanalysens tidsintervall blir den ackumulerade korrosionsskadan 2 mm.

För inverkan av organiskt material i bufferten använder SKB delvis ett annat angreppssätt för att uppskatta betydelsen av mikrobiell sulfatreduktion. SKB beaktar förmåga hos svälltrycket i bufferten att inhibera mikrobiell aktivitet snarare än att hypotetiskt förutsätta att allt tillgängligt organiskt material förbrukas genom denna process. Omfattningen av mikrobiell sulfatreduktion har visats sjunka när buffertens svälltryck byggs upp. Svälltrycket är i sin tur beroende av bentonitbuffertens initiala densitet. Till stöd för detta angreppssätt har försök genomförts i vilka sulfidbildningshastighet i kompakterade bentonitprover har kunnat mätas. Det har varit möjligt att noggrant följa produktionen av bildad kopparsulfid som ett resultat av korrosionsprocessen (Masurat m.fl., 2010). Resultaten visar att vid fullt utvecklat svälltryck och vid en nominell buffertdensitet på 2000 kg/m³ motsvarar sulfatreduktionen en total korrosion på 0,2 mm efter en miljon år, men om man använder en lägre buffertdensitet på 1800 kg/m³ blir korrosionens omfattning 2,2 mm. Mätningarna överskattar sannolikt sulfidbildning eftersom laktat som är ett lättillgängligt substrat tillsattes under experimenten. SKB summerar sammanfattningsvis de totala korrosionsangreppen i både buffert och återfyllnad till pessimistiskt 3 mm.

SKB redovisar vidare att sulfatreducerande mikrober även kan använda annat organiskt material i slutförvaret samt vätgas producerat från korrosion av järnkomponenter som lämnats kvar i berget efter uppförandet av tunnarna, exempelvis bergbultar. Genom massbalans erhåller SKB att maximalt 353 mol sulfid/kapsel kan bildas av denna orsak, vilket omräknat till korrosionsdjup av en kopparkapsel motsvarar 0,3 mm med antagandet att korrosion sker jämnt över kapselns yta samt att transportbegränsningar inte beaktas.



SKB specificerar emellertid inte hur mycket korrosion som kan orsakas av denna sulfidkälla under de första 1 000 åren.

SKB konstaterar att innan bufferten har blivit helt återmättad kan mikrobiell aktivitet inte helt uteslutas, även om vattenaktiviteten kan förväntas vara låg vilket verkar som en begränsande faktor (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.13). Omättade förhållanden innebär också att gasfaskorrosion och transport i gasfas är möjlig, vilket inte hanterades i SKB:s ursprungliga ansökan. Efter en begäran om komplettering från SSM angående den tid då kapslarna är i kontakt med en gasfas har SKB tillfört en ytterligare korrosionsprocess för den omättade perioden. Denna korrosionsprocess underhålls genom att vätesulfid som genereras i återfyllnaden diffunderar genom bufferten i det omättade systemets gasfas (SKBdoc 1398013, SKBdoc1437441, SKBdoc1476865) snarare än enbart i vattenfasen som i den ursprungliga dokumentationen. De förväntade förvarförhållandena medför att vissa kapslar under lång tid kan vara i kontakt med en gasfas, pessimistiskt som längst 6000 år (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.8). Gasfasen kommer då att stå i jämvikt med det omättade porsystemet i buffert och återfyllnad. För att bedöma korrosion på kopparkapslarna för detta fall ansätter SKB en sulfidhalt i porvattnet på 10^{-6} M samt ett pH-värde i porvattnet på pH 7. pH-värdet har betydelse eftersom andelen löst H_2S av den totala sulfidhalten ($HS^- + H_2S$) i vattenfasen, som står i jämvikt med gasformig sulfid, ökar med minskande pH. Med dessa förutsättningar redovisar SKB att transport och reaktion med sulfid i gasfas motsvarar ett korrosionsdjup på 2,4 mm jämnt fördelat på kapselns lock (SKBdoc1437441). Denna beräkning förutsätter att andelen gasfyllda porer i bufferten är 18,5 % och att inget annat än transporhastighet i gasfas begränsar korrosionen. SKB anger vidare att den ansatta sulfidhalten i porvattnet (10^{-6} M) förvisso är två tiopotenser lägre än den mest pessimistiskt använda sulfidhalten för opåverkade grundvattenförhållanden på 0,1 mM men att 10^{-6} M i högre grad motsvarar de speciella förhållandena som existerar i deponeringstunnlarna. Bakgrunden till SKB:s resonemang att använda 10^{-6} M härleds genom experimentella undersökningar av sulfidhalt i ett fåtal bentonit-vattenblandningar på SKB:s kemilaboratorium (SKBdoc 1385099). SKB anger som ytterligare stöd till att använda sulfidhalter på 10^{-6} M att inga rapporter om lukt av svavelväte kring bentonitförekomster föreligger, vilket enligt SKB tyder på att de naturliga sulfidhalterna i porvattnet är låga även i ett längre tidsperspektiv (SKBdoc 1476865).

4.10.5.2 SSM:s bedömning

SSM anser generellt att SKB:s analys för omfattningen av allmän korrosion av koppar som funktion av tiden och jämförelsen med tjockleken på kopparkapseln har genomförts på ett korrekt sätt för allmän korrosion i syrefri miljö. Angreppssättet har baserats på att korrosionsdjupet beräknas genom att betrakta totala mängden av de ämnen som kan orsaka korrosion på slutförvarsdjup via massbalanser eller massöverföringshastigheter och sedan beräkna hur stort allmänt korrosionsdjup detta motsvarar. Reaktionshastigheter bortses från helt vilket är att betrakta som konservativt. Under förutsättning att korrosion omfattar en yta som kan definieras på rimligt goda grunder anser SSM att angreppssättet är robust.

Enligt SSM:s bedömning är SKB:s slutsats kring den begränsade betydelsen av korrosion från pyrit i buffert och återfyllnad med all sannolikhet korrekt. Den låga lösligheten och reaktiviteten av pyrit i ett grundvatten som är kemiskt reducerande och som innehåller löst järn talar emot betydande korrosionsangrepp från sulfid i pyrit. Mängden sulfid som tillförs ett deponeringshål via bufferten kan inom vissa intervall justeras genom val av acceptanskriterier för sulfidsvavel i bufferten och val av bentonittyp. En möjlighet är t.ex. att för bufferten välja en bentonittyp med mycket låg halt pyrit som MX-80. Även om mängden pyrit i återfyllnaden är mycket större än i bufferten så innebär kombinationen av faktorerna mycket låg löslighet vid normala grundvattenkemiska betingelser och långa



diffusionsavstånd små korrosionsbidrag. SSM anser dock att det är viktigt att beakta att en viss mängd pyrit i både buffert och återfyllnadsmaterial också kan ha en fördel i perspektivet långsiktig säkerhet eftersom dessa material är betydligt mera reaktiva i en oxiderande kemisk miljö och bidrar till syreförbrukning under den första tiden efter deponering av kapseln.

SSM håller med SKB om att så länge maximala temperaturer i slutförvarsmiljön hålls under 100°C genom termisk dimensionering så är termokemisk sulfatreduktion med all sannolikhet ingen betydelsefull process. Förekomsten av sådan process skulle dock kunna ha en starkt negativ inverkan på kapslarna och är därför ett viktigt skäl till den temperaturbegränsning som SKB har definierat.

SSM anser att SKB:s experiment har visat att buffertbetingelser med höga svälltryck och låg vattenaktivitet även i närvaro av tillfört lättillgängligt organiskt material ger små förutsättningar för en betydelsefull mikrobiell sulfatreduktion. En nackdel med att i säkerhetsanalysen förlita sig på omgivningsbetingelser snarare än tillgång på organiskt material är dock att effekten bara är verksam i ett förhållandevis snävt intervall av buffertdensiteter. SSM håller vidare med SKB om att det organiska material som finns i buffertmaterialen sannolikt har en låg löslighet och reaktivitet och därför bara i begränsad omfattning är tillgängligt för mikrobiell sulfatreduktion. Organiskt material i den del av bufferten som är närmast kapselytorna kan möjligen omvandlas till mera lättillgängliga former genom exponering för gammastrålning och förhöjda temperaturer (SSM Technical Note 2012:10).

SSM anser att det sannolikt kommer att vara mycket svårare att eliminera betydelse av mikrobiell sulfatreduktion i återfyllnaden än i bufferten eftersom man måste kunna hantera mycket större materialmängder och oregelbundna tunnelväggar. Lägre densiteter och svälltryck bland annat genom att använda förhållandevis stora mängder pellets och möjligen material med högre andel organiska ämnen innebär att mikrobiell sulfatreduktion sannolikt kommer att kunna fortgå under lång tid i viss omfattning. SSM anser dock att långsam diffusion genom en vattenmättad buffert sannolikt innebär att korrosionsangreppen på kapseln blir små även vid betydande mikrobiell sulfatreduktion i återfyllnaden. Det finns större osäkerheter kopplade till den omättade fasen som vara betydande för en viss kategori av deponeringshål (se nästföljande avsnitt).

SSM håller med SKB om att korrosionsangrepp till följd av tillförsel av andra material förutom buffert och återfyllnad som bergbultar med mera är små och saknar betydande inverkan på den långsiktiga strålsäkerheten.

SSM anser att SKB i rimlig omfattning har visat att en mättad buffert med fullt utvecklat svälltryck och tillräckligt hög densitet har en god förmåga att begränsa mikrobiell aktivitet till mycket låga nivåer. SSM anser emellertid att SKB:s redovisning innehåller större osäkerheter med avseende på förmågan hos en omättad buffert helt utan eller med lågt svälltryck. Mikrobiell sulfatreduktion på grund av organiskt material i bufferten har dock liten betydelse för allmän korrosion beroende på den begränsade mängden. Det finns ett tänkbart fall då en aktiv biofilm på kapselytan temporärt påverkar korrosionsförloppet under omättade förhållanden tills ett tillräckligt svälltryck har hunnit byggas upp. SSM anser att dessa fall kan ha betydelse för de maximala halter av sulfid som kan förekomma invid en kapselyta samt att biofilmer möjligen kan orsaka lokal korrosion eller korrosion avgränsad till en mindre del av kapseln. Det sistnämnda eftersom biofilmer inte behöver vara homogent utspridda över hela kapselytan. SKB konstaterar att sulfidhalter vid kapselytorna kommer att vara mycket låga vid ett förväntat diffusionsstyrt korrosionsförlopp, men en åtminstone temporär avvikelse från denna situation kan uppstå om mikrober bildar sulfid i direkt anslutning till kopparytorna. SSM anser att risk för

högre sulfidhalter behöver beaktas vid bedömning av risken för lokala korrosionsangrepp orsakade av sulfid.

Enligt SSM:s bedömning är med tanke på de relativa mängdförhållandena den viktigaste osäkerheten kring sulfidangreppens totala omfattning under de första 1000 åren sannolikt risken för gasformig transport av sulfid som har bildats i återfyllnaden snarare än i bufferten beroende på att mängden återfyllnad per kapsel är minst tio gånger högre i jämförelse med buffertmaterial. Bildandet av gasformig sulfid ingår även som en del i den så kallade bastueffekten som redovisats tidigare. I återfyllnaden är svälltrycket lägre pga. den stora mängden tillförda pellets och lägre kompakteringsgrad för block. Dessutom är mängderna tillfört material cirka 10 gånger större och materialvalet kan av ekonomiska skäl behöva inriktas på material av lägre kvalitet i termer av andel svällande mineral och möjligen större andelar av oxiderbart organiskt material. Det finns därför en större risk för att en betydande mikrobiell sulfatreduktion äger rum i återfyllnaden i jämförelse med bufferten. Förutsättning för gasfaskorrosion har analyserats av SKB med resultatet att denna korrosionsform ger jämt fördelade korrosionsangrepp på locket med en omfattning på cirka 2,4 mm. Dessa korrosionsangrepp kan således inte betraktas som försumbara (SKBdoc 1437441). SSM bedömer dessutom att det finns osäkerheter med avseende på dessa korrosionsberäkningar eftersom ytan över vilken denna korrosionsform fördelas bestäms av en svårförutsägbar kontaktarea mellan gasfasen och kopparytan. Det är sannolikt svårt att förutsäga återmättnadsförloppet i sådan detaljeringsgrad så att osäkerheter kopplade till kontaktarean kan elimineras. Därför behöver analysen av denna korrosionsform baseras på alternativa/kompletterande angreppssätt. Om endast en mindre del av kapselytan exponeras för gasfasen och om sulfidhalterna i återfyllnaden under någon fas i utvecklingen möjligen skulle vara högre än 10^{-6} M kan mer omfattande korrosionsangrepp än beräknade 2,4 mm möjligen förekomma om den påverkade kapselytan är mindre än den av SKB ansatta ytan. Dessutom anser SSM att risk för gropkorrosion istället för allmän korrosion inte kan uteslutas i detta specifika fall vilket även detta kan medföra större korrosionsdjup. Det behöver dock noteras att förutsättningar och randvillkor för fallet är pessimistiska i den bemärkelsen att de förutsätter att sulfid kontinuerligt fortsätter att bildas i återfyllnaden under 1000-tals år, att bildad sulfid avgasas utan att reagera med löst järn, samt att transportvägen från återfyllnad till en viss del av kapselytan kontinuerligt hålls öppen under slutförvarets hydrogeologiska utveckling.

SSM anser att SKB behöver utveckla förståelsen kring återmättnadsförloppet i deponeringshål utan förbindelse med vattenförande sprickor samt undersöka hydraulisk konduktivitet för den intakta bergmatrisen. Ett syfte med ett sådant arbete är att möjliggöra utförligare analyser av inverkan av gasformiga transportvägar mellan återfyllnaden och kapselytorna. Behovet av sådana analyser styrs delvis av med vilken tilltro förutsägelser kan göras kring mikrobiell sulfatreduktion i återfyllnadsmaterial. SSM anser därför att SKB också behöver undersöka förutsättningar för mikrobiell sulfatreduktion under mättade och omättade betingelser i de återfyllnadsmaterial och i de buffertmaterial som kan bli aktuella. Det kan också finnas ett behov av att utvärdera och vid behov justera acceptanskriterier för återfyllnadsmaterial för att säkerställa begränsade mängder av reaktiva organiska material. Möjligen finns också tänkbara åtgärder för att begränsa gasdiffusion mellan återfyllnad och buffert. SKB anger i inlämnade kompletteringar att gasfaskorrosion även innan fullständig återmättnad av bufferten begränsas av reaktion med löst järn i buffert som har blivit fullständigt återmättad (SKBdoc 1422182, avsnitt 4.1), men SSM har ingen kännedom om studier kring förekomst av löst järn i återfyllnaden.

4.10.6 Allmän korrosion av koppar under inverkan av höga kloridhalter

4.10.6.1 Underlag från SKB

SKB har på begäran av SSM som en komplettering till ansökan tagit fram ett utökat underlag till stöd för antagandet att kloridhaltassisterad kopparkorrosion kan uteslutas för koncentrationer mindre än 2 M och $\text{pH} > 4$ (SR-Site huvudrapport, figur 8-2, säkerhetsfunktion R1f) samt att sulfidkorrosion är masstransportbegränsad i slutförvarsmiljön. SSM:s experter efterfrågade i sin granskning en förstärkt motivering för att utesluta att sulfid i samverkan med CuCl_2^- -bildning inte kan ha en katalytisk funktion utan att förbrukas (SSM Technical Note 2012:18). Enligt SKB:s analys är sulfidflöde mot kopparytan den begränsande faktorn för kopparmaterialets korrosionshastighet utom möjligtvis i fall med förhållandevis höga flöden som $2 \times 10^{-13} \text{ mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, vilka i realistiska fall är förknippade med advektiva förhållanden. I fallen med höga flöden är dock korrosionshastigheterna snarare lägre än högre än motsvarande flöde, och av detta skäl anser SKB att det är konservativt att räkna med transportbegränsad kinetik.

SKB anger som primärt bevis för att sulfid konsumeras stökiometriskt i korrosionsprocessen att elektrokemiska polarisationsexperiment visar att den elektriska laddningen som behövs för att reducera en Cu_2S -film på elektroden är lika stor som laddningsmängden som åtgår för att bilda filmen (SKBdoc 1422182). SKB analyserar dock en hypotetisk mekanism där löst sulfid i närvaro av höga kloridhalter skulle kunna katalysera kopparkorrosion utan att förbrukas genom att sorberad sulfid på kopparytan reagerar med klorid och bildar CuCl_2^- -komplex vilket återbildar sulfid i vattenlösning. En förutsättning för att sulfid inte förbrukas är dock att dessa två ämnen inte reagerar med varandra. SKB konstaterar baserat på beräkningar med jämviktskonstanter att aktiva kloridkomplex förekommer i så extremt låga koncentrationer att mekanismen inte bedöms ha någon betydelse.

Frågan kring betydelsen av kloridkomplex är också nära förbunden med frågan kring huruvida kloridkorrosion i sig kan tänkas ha betydelse för omfattningen av kopparkorrosion, vilket också ingick som en fråga i SSM:s kompletteringsbegäran. SKB formulerade ursprungligen säkerhetsfunktionsindikatorerna att $\text{pH} > 4$ och kloridkoncentrationerna mindre än 2 M för att kunna utesluta kloridkorrosion (SR-Site huvudrapport, figur 8-2). SKB har som utgångspunkt för sitt ställningstagande formulerat hur kopparkoncentration i jämvikt med kopparmetall varierar som en funktion av pH och kloridhalt (SKB TR-10-67, avsnitt 5.2.2). SKB har, baserat på konventionen total kopparhalt 10^{-6} M i lösning (Pourbaix, 1974), med en enkel transportmodell utvärderat betydelsen av generella stabilitetsområden i Pourbaix-diagram (SKBdoc 1398014). Vid låga pH ökar koppars tendens att oxideras och tillföra koppar(I)-joner i lösning. Kloriden har sin generella betydelse eftersom den stabiliserar koppar(I)-joner i lösning. Modellen har baserats på en antagen analogi mellan transport av kloridkomplex bort från kopparytan och transport av sulfid till kopparytan, antingen genom en intakt eller genom en eroderad buffert, genom att invertera randvillkoren tvärs över bufferten samt korrigera för den förändrade stökiometrin. SKB konstaterar att, det vid användning av konventionen 10^{-6} M i kopparkoncentration i lösning, finns en mycket stor marginal för fallet intakt buffert och en faktor 10 i marginal för fallet advektion i bufferten baserat på den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen. Sedan finns ytterligare en säkerhetsfaktor som grundar sig på att faktiska slutförvarsförhållanden skiljer sig väsentligt från dem som indikatorerna för den berörda säkerhetsfunktionen avser. SKB illustrerar vilka kombinationer av klorid och pH som skulle krävas för att uppnå de totala kopparkoncentrationerna 10^{-5} M , 10^{-6} M och 10^{-7} M med en modell för beräkning av aktivitetskoefficienter med antingen Helgessons eller Davies ekvationer. Det rör sig generellt om kemiska miljöer som avviker från den som förväntas i slutförvaret med avseende på främst pH men även kloridhalt. SKB konstaterar att de ursprungliga kriterierna för säkerhetsfunktionerna $\text{pH} > 4$ och



kloridkoncentrationerna < 2 M inte är unika eftersom man kan tänka sig andra kombinationer som möjliga kriterier t.ex. vid $\text{pH} > 4,5$ blir kriteriet för klorid < 3 M.

4.10.6.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s argument varför sulfidkorrosion under normala transportbetingelser och kemiska förhållanden i bufferten är masstransportbegränsad och att tillförd sulfid ingår i reaktionsprodukten är rimliga. Med tanke på fasernas termodynamiska stabilitet och den mycket låga lösligheten för Cu_2S är det enligt SSM:s bedömning föga sannolikt att sulfid återbildas i vattenfasen i en sådan omfattning att det skulle ha en stor inverkan på korrosionsförloppet (SKBdoc1422182). SSM anser att SKB:s komplettering avseende omfattningen av kloridkorrosion ger en rimlig förklaring till hur SKB har definierat kriterier för relevanta funktionsindikatorer. Denna korrosionsform bedöms baserat på kända termodynamiska data att ha en mycket liten betydelse för kopparkapselns långsiktiga beständighet. Grunden till detta ställningstagande är att de låga pH som krävs i slutförvarsmiljön för att korrosionsformen ens ska närma sig betydelsen av sulfidkorrosion (pH 2-3) är mycket osannolika i slutförvarsmiljön ens i miljonårsperspektiv beroende på bergets stora förmåga att bilda alkalinitet genom vittringsreaktioner och buffra pH via reaktioner i vattenlösning och invid mineralytor. De kloridkoncentrationer på flera molar som krävs överstiger också uppmätta värden på cirka 0,1 – 0,2 M med en tiopotens vilken även gäller för förväntade kloridkoncentration inom ramen för kommande glaciationscykler och perioder med havsövertäckning.

SKB har analyserat kloridhalt i närheten av kapselytan i samband med återmättnadsförloppet men ökning av halterna är måttlig (SKB TR-10-59, avsnitt 5.1.2). För vissa deponeringshål med medelhöga grundvattenflöden kan möjligen en mera omfattande ackumulation ske som ett resultat av avdunstning under den period då kapselytorna är varma, grundvattenflödesriktningen är riktad mot deponeringshålet och efter att tillräckligt mycket salt grundvatten tillförts. På lång sikt kommer diffusion i vattenfasen att utjämna eventuella koncentrationsskillnader av klorid som bildats i buffert och invid kapselytor. SSM anser att även om osäkerheter föreligger kring kloridhalt i anslutning till kapselytorna under vissa faser i slutförvarsutvecklingen, så gäller detta i väsentligt mindre utsträckning pH-förhållanden. Även om det är ytterst osannolikt att mycket höga kloridhalter och låga pH skulle uppstå samtidigt anser SSM att ytterligare experimentella studier av kopparkorrosion vid höga kloridhalter i kombination med sulfider är berättigade (SSM technical note 2012:21; Scully och Edwards 2013). Som underlag för sådana studier bör en fördelning av möjliga kloridhalter i anslutning till kapselytorna kunna tas fram som beaktar kopplade processer i närheten av kapselytorna. SSM konstaterar även att det finns en koppling mellan denna fråga och frågan kring kopparkorrosion i rent syrgasfritt vatten vilket diskuteras i kapitel 5 i denna granskningsrapport.

4.10.7 Lokal korrosion av koppar under reducerande betingelser

I detta avsnitt redovisas och granskas frågeställningar kopplade till gropkorrosion och spänningsskorrosion i kemiskt reducerande miljö i närvaro av sulfider.

4.10.7.1 Underlag från SKB

SKB:s ståndpunkt är att det inte finns risk för gropkorrosion i sulfidmiljö i slutförvarsmiljön. SKB citerar dock vissa experimentella undersökningar som visat att gropkorrosion på grund av sulfidfilmer kan vara möjlig, dock vid redoxpotentialer betydligt högre än vad som är aktuellt i slutförvarsmiljön efter att reducerande betingelser har etablerats (SKB TR-10-67, avsnitt 5.3.2). Senare experimentella undersökningar visar att vid realistiska porvattensammansättningar med avseende på sulfidhalter passiveras inte kopparytorna eftersom den bildade sulfidfilmen är porös i ett brett intervall av kloridhalter

och kolumnformad vid mycket höga kloridhalter och sålunda inte passiverande i något av dessa fall (SKB TR-13-27).

I en komplettering till ansökan som efterfrågats av SSM finns ytterligare redovisning kring risken för lokal korrosion i syrgasfritt grundvatten (SKBdoc 1398013; SKB TR-13-27). SKB åberopar som underlag en serie publikationer av Chen m.fl. (2010, 2011a, 2011b, 2012) som har undersökt bildning av sulfidfilmer på kopparytor vid olika sulfidkoncentrationer och kloridkoncentrationer. Undersökningsmetoderna innefattande mätningar av korrosionspotential, impedansspektroskopi och svepelektronmikroskopi. Vid låga sulfidhalter är korrosionshastigheten konstant och sulfidfilmen inte heltäckande med linjär kinetik, vid högre halter än runt 1 mM blir sulfidfilmerna mera kompakta och korrosionshastigheten följer ett paraboliskt samband vilket indikerar diffusionskontrollerad kinetik genom sulfidfilmen. Denna tendens till bildning av mera kompakta Cu_2S -filmer kan möjligen vara potentiellt passiverande och kan därför medföra risk för gropkorrosion. En nedbrytning av en sådan film t.ex. vid en tillfällig potentialhöjning skulle kunna initiera gropkorrosion. För kombinationen höga sulfidhalter och höga kloridhalter blir bildning av sulfidfilmen återigen linjär vilket indikerar att även kloridhalt har en betydelse för sulfidfilmens egenskaper. Det kan som en jämförelse nämnas att typiska sulfidhalter i Forsmarks grundvatten är 1 μM och med några mätningar på 10 μM . Invid kapselytorna förväntar sig SKB att sulfidhalterna blir lägre eftersom materieöverföring av sulfid sker genom långsam diffusion och sulfid konsumeras vid kapselytan genom allmän korrosion (SKB TR-10-04). SKB:s slutsats av dessa undersökningar är att för sulfid- och kloridkoncentrationer som är relevanta i slutförvarsmiljön är sulfidfilmer som bildas porösa och icke-passiverande och förutsättningarna för gropkorrosion uppfylls därmed inte.

SKB gör i ansökansunderlaget bedömningen att det inte finns någon väletablerad mekanism för spänningskorrosion och sprickbildning av koppar under reducerande kemiska förhållanden (SKB TR-10-46). Publicerade studier kring risk för spänningskorrosion av koppar avser med några få undantag oxiderande förhållanden och inverkan av en oxidfilm snarare än reducerande förhållanden. Det finns visserligen resultat från experimentella försök där spänningskorrosion i koppar påvisats i sulfidhaltig miljö (Taniguchi och Kawasaki, 2008), men SKB påpekar att sulfidhalter vid försöken på 5-10 mM är 2-3 tiopotenser högre än vad som förväntas i förvarsmiljön. SKB anser att eftersom tillförsel av sulfid förväntas vara diffusionskontrollerad genom bufferten så talar det för att sulfidhalterna kan förväntas vara lägre i anslutning till kopparytorna än i omgivande grundvatten eftersom sulfid förbrukas genom allmän korrosion av koppar. SKB anser också att kopparsulfidfilmer inte är vidhäftade på metallen på ett sådant sätt att sulfid tillförs sprickspetsen i en spricka (SKB TR-10-67, avsnitt 6.2.2.).

En annan typ av spänningskorrosion som skulle kunna vara verksam även utan oxiderande betingelser avser ytmobilitet som för metallatomer bort från sprickspetsen eller introduktion av vakanser i sprickspetsen. SKB argumentar mot dessa mekanismer, dels eftersom sprickorna i modellerna inte beaktar kapillaritetstermen och att mycket spetsiga sprickor är osannolika, dels därför att en korrigerad modell för sprickbildningshastigheten visar på så låga värden att mekanismen inte skulle ha någon betydelse ens i slutförvarssammanhang.

SKB har efter en begäran om komplettering från SSM redovisat risken för spänningskorrosion i närvaro av sulfid, samt har kommenterat den så kallade "Aaltonen-mekanismen" för spänningskorrosion i syrgasfria miljöer. SKB:s konsulter betraktade mekanismen som osannolik men kunde inte helt utesluta att mekanismen kan vara associerad med en sulfidfilm (SKB TR-10-04). SKB rapporterar att ett antal ytterligare studier har gjorts i Kanada och Finland sedan inlämning av ansökan, men ingen av dessa

studier har kunnat påvisa spänningskorrosion i sulfidmiljö (bl.a. SKB TR-12-06). I en av undersökningarna påvisades dock inträngning av sulfid i korngränserna hos OFP-koppar (Ari-Lahti m.fl., 2011), men en uppföljande undersökning indikerade att inträngningen orsakades av förbehandling av proverna genom utmattningsluft för att öppna upp sprickorna (Ari-Lahti m.fl., 2012). SKB redovisar också att experimentella resultat från Minican-försöket inte uppvisar någon sprickbildning eller annan form av lokal korrosion. Beträffande "Aaltonen-mekanismen" så anser SKB att det är svårt att dra några slutsatser om en sådan mekanism i sulfidmiljö. Sammanfattningsvis så bedömer SKB att spänningskorrosion i en sulfidmiljö inte hotar kapslarnas integritet men de avser ändå fortsätta forskningsarbetet med att undersöka hur sulfidlösningar påverkar koppars mekaniska egenskaper. SKB:s bedömning är dock att det endast är i en enstaka studie som spänningskorrosion i sulfidmiljö har blivit påvisad (Taniguchi och Kawasaki, 2008) och denna studie är baserad på sulfidkoncentrationer minst två storleksordningar högre än vad som förväntas i förvaret.

4.10.7.2 SSM:s bedömning

SSM anser att gropkorrosion för koppar i sulfidmiljö inte helt kan uteslutas baserat på SKB:s underlag. SSM har förutom att begära in kompletterande information tagit fram experimentella resultat med bäring på risken för gropkorrosion i sulfid- och kloridhaltiga lösningar (Mao m.fl., 2014). Mätningarna har visat att en passivfilm kan bildas under vissa förutsättningar och eventuellt brytas ned vilket i så fall medför gropkorrosionsrisk. I studien studeras koppars korrosionsegenskaper med hjälp av elektrokemiska mätningar i lösningar med förhållandevis höga sulfid- (0,2 mM) och kloridhalter (0,01 - 5 M). Gropkorrosionspotentialen anses vara normalfördelad och bli mer negativ vid ökande kloridhalt och temperatur vilket ökar materialets mottaglighet för gropkorrosion. Uppskattade gropkorrosionsfaktorer minskar med tiden och med minskande temperatur för att slutligen medföra en gropkorrosionsfaktor PF mellan 4-14, varav det övre intervallet avser högre temperaturer.

SSM konstaterar att de av SKB citerade studierna kring gropkorrosionsrisk till viss del överensstämmer med SSM:s studie så till vida att passiverande ytfilmerna även enligt dessa studier kan bildas vid höga sulfidflöden som motsvarar halter kring 0,5 mM (Taylor m.fl., 2015). Dessa experiment visar dock att vid lägre sulfidflöden motsvarande halter på 0,05 och 0,1 mM bildas icke-passiverande porösa sulfidfilmer som inte medför gropkorrosionsrisk. Sådana låga sulfidhalter studerades inte i den av SSM finansierade motsvarande studien. Detta resultat är av relevans för korrosion i slutförvarsmiljön eftersom uppbyggnad av höga sulfidhalter i anslutning till kopparkapseln sannolikt förhindras av att en icke passiverad kopparyta kommer att reagera med bildad löst sulfid som tillförs via långsam diffusion i vattenfasen. Koncentration av sulfid invid kapselytor som ett resultat av allmän korrosion av koppar med sulfid kan förväntas vara mycket låg under sådana betingelser, vilket borde gynna uppkomst av porösa sulfidfilmer. Det är dock tveksamt om det förhållandevis begränsade tillgängliga experimentella underlaget är tillräckligt för att dra definitiva slutsatser kring i vilken kemisk miljö gropkorrosion av kopparkapslar kan förekomma.

SSM anser att lokal förekomst av höga sulfidhalter kan kopplas till två fall, dels att sulfid bildas i direkt anslutning till kopparytan som ett resultat av mikrobiell sulfatreduktion innan fullt svälltryck har utvecklats samt att sulfid tillförs betydligt snabbare i omättade deponeringshål via diffusion av gasformig vätesulfid som har bildats i återfyllnaden. Dessa omständigheter har en betydelse för förutsättningar för bildning av kompakta sulfidfilmer med passiverande egenskaper och därmed risk för lokal kopparkorrosion. Risken för förekomst av höga sulfidhalter under mättade buffertförhållanden bedöms vara väsentligt mindre. Det finns även andra skäl för att en eventuell gropkorrosion har störst betydelse i den tidiga delen av slutförvarets långsiktiga utveckling som ett resultat av

kombinationen förhållandevis höga temperaturer, högre kloridhalter, samt att det dessutom föreligger en allmän trend för att groptillväxt avtar som funktion av tiden (Mao m.fl., 2014).

SSM anser att groppkorrosion under reducerande förhållanden inte kan uteslutas och bör därför beaktas i SKB:s scenarioanalys. En utförlig analys av variabilitet och osäkerhet kring sulfidhalter och andra kemiska betingelser invid kapselytorna skulle bidra till analys av den maximala korrosionsskadan som tidig sulfidkorrosion kan medföra. SSM anser att ett probabilistiskt angreppssätt behövs för att fördjupa utvärderingen av risken för och omfattning av lokala korrosionsskador under slutförvarets reducerande fas. SSM anser också att analys av konsekvenserna kopplat till att en passiverande sulfidfilm trots allt bildas behövs för förståelsen av processens potentiella säkerhetsbetydelse.

En fråga som har betydelse i detta sammanhang är hur länge en passiverande oxidfilm kan fortsätta att påverka korrosionsförloppet efter att kemiskt reducerande förhållanden har uppstått och filmen inte längre är termodynamiskt stabil. SSM anser dock att denna fråga har blivit adresserad med forskning som visar att en Cu_2O -film kommer att brytas ned och ersättas med en Cu_2S -film (Smith m.fl., 2007).

SSM anser att spänningskorrosion inte kan uteslutas som en mekanism som långsiktigt kan initiera sprickbildning av kopparkapseln när denna är exponerad i en sulfidmiljö med förhållandevis höga sulfidhalter. Så som SKB påpekar är det visserligen tveksamt om mekanismen kan betraktas som väletablerad med tanke på att den i huvudsak är baserad på en eller ett fåtal vetenskapliga publikationer, men myndigheten konstaterar samtidigt att mycket få studier i ämnet har genomförts överhuvudtaget. Kopplingen till behov av en passiverande sulfidfilm medför att bedömningen kring denna process delvis överensstämmer med motsvarande för groppkorrosionsrisk som beskrivs ovan. Detta mot bakgrund av att en passiverande sulfidfilm som påverkas av dragspänningar möjliggör en kanalisering av sulfidjoner som inte förbrukas av allmän korrosion till en sprickspets på ett sådant sätt som möjliggör sprickprogagering. SSM anser emellertid att det möjligen förekommer en spänningskorrosionsmekanism ”Aaltonen-mekanismen” som inte kräver en passiverande sulfidfilm. SSM konstaterar att även i detta sammanhang är risken mycket liten om sulfidhalterna i slutförvarsmiljön konsekvent håller låga nivåer så att porösa icke-passiverande sulfidfilmer bildas, vilket leder till att långsam tillförsel av sulfider förbrukas genom allmän korrosion, vilket sannolikt är fallet i mättade deponeringshål. För omättade deponeringshål gäller dock som i fallet med groppkorrosion att högre sulfidhalter kan uppstå som ett resultat av gasformig tillförsel av sulfid samt lokal mikrobiell sulfatreduktion. För fallet lokal mikrobiell sulfatreduktion är dock sannolikheten för en påverkan mindre än i fallet groppkorrosion eftersom biofilmen måste täcka just de förhållandevis små områden av kapseln som är exponerade för genomgående dragspänningar. Däremot kan spänningskorrosion åtminstone hypotetiskt ge en upphov till kapselbrott efter kortare tid från och med den initierande tidpunkten. I omättade deponeringshål med långsam pålastning av kapsel som ett resultat av mycket långsam buffertsvällning kan dragspänningar i kopparkapseln förekomma under längre tidsperioder. SSM konstaterar att SKB själva inte utesluter risk för spänningskorrosion i sulfidmiljö (SKBdoc 1398013).

SSM anser att SKB behöver genomföra en utförligare analys kring förutsättningar för spänningskorrosion i slutförvarsmiljön samt mera explicit redovisa konsekvenser kopplat till att processen kommer till stånd med beaktande av inte bara kemiska betingelser utan även lastsituationen i deponeringshål med hela intervallet av återmättnadstider. Det finns även behov av fortsatt mera grundvetenskapliga arbeten kring detaljerade mekanismer för uppkomst av spänningskorrosion i sulfidhaltiga miljöer, se vidare kapitel 9 i denna rapport. En viktig fråga är huruvida det går att helt utesluta att sulfidfilmer är förknippade

med passiverande förhållanden med beaktande av den variabilitet i kemiska betingelser som kan förekomma innan full återmättnad har kommit till stånd. SSM anser även att SKB behöver analysera Aaltonen-mekanismen som möjligen kan orsaka spänningskorrosion i sulfidmiljöer ingående då denna inte helt har kunnat uteslutas och de inte har levererat en tydlig argumentation för detta (SKB TR-10-04). SSM anser även att det saknas en redovisning i säkerhetsanalysen kring den eventuella betydelsen av denna process.

4.10.8 Kvalitetssäkring av SKB:s korrosionsförsök

4.10.8.1 Underlag från SKB

SKB har bedrivit ett experimentellt program för studier kring korrosion av koppar (Betova m.fl., 2004, Smith m.fl. 2007, Boijnov m.fl., 2010). Försök har genomförts som en del av forskning vid universitet och högskolor för att belysa olika typer av möjliga korrosionsmekanismer samt vissa aspekter av komplexa korrosionsförlopp i slutförvarsmiljö. Försöksbetingelser i denna typ av försök renodlas i syfte att uppnå tydliga vetenskapliga tolkningar av försöksresultaten snarare än att efterlikna realistiska slutförvarsmiljöer i perspektivet transportförhållanden och kemisk miljö med t.ex. komplex grundvattenkemi. SKB:s nuvarande konceptuella förståelse av kopparkorrosionsprocesser redovisas som en grund för säkerhetsanalysen SR-Site (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4). Kopparkorrosionshastigheter har erhållits genom att också beakta information om förhållanden vid Forsmarksplatsen. Denna information har använts för att kvantifiera omfattningen av korrosion under olika tidsperioder i slutförvarets långsiktiga utveckling (SKB TR-10-66). SKB:s experimentella studier ger dock inte korrosionshastigheter under olika faser i slutförvarets utveckling. Korrosionens omfattning kvantifieras istället via antingen enkla överslagsberäkningar eller modelleringsinsatser baserade på konceptuell förståelse för korrosionsprocesser samt information om faktorer som påverkar korrosionsförloppet i slutförvarsmiljön. Dessa faktorer är till exempel diffusion av lösta species i bufferten, interaktion mellan grundvatten, matrisvatten och bentonitporvatten, långsiktig grundvattenkemisk utveckling samt grundvattenflödes hastigheter i sprickor som skär deponeringshål.

SKB har förutom de mera renodlade vetenskapliga experimenten genomfört ett antal experiment under fältmässiga förhållanden vid Äspö-laboratoriet. De mest omfattande korrosionsförsöken har genomförts i samband med en serie långsiktiga buffertförsök kallade LOT. I dessa försök har olika aspekter av buffertens långsiktiga utveckling studerats vid höga temperaturer i ett flertal buffertpelare i en reducerad diameter med en central värmare för att simulera bränslets resteffekt. Försöken påbörjades i början av 90-talet och några buffertpaket har redan tagits upp för karaktärisering och analys efter en flerårig exponering. Försöken utfördes på ungefär 450 m djup i berget vid Äspö-laboratoriet. Tre av försöken har genomförts vid i slutförvaret initialt förväntade bufferttemperaturer på 90°C och fyra andra vid en avsiktligt förhöjd temperatur på 130°C. Korrosionsdelen av experimentet omfattas av korrosionskuponger som har varit inpackade i bufferten under exponeringen och som sedan har undersökts med avseende på kopparyornas utseende, korrosionsprodukter samt omfattningen av korrosion via gravimetrisk bestämning.

SKB genomför också en annan serie korrosionsrelaterade experiment vid Äspölaboratoriet som benämns Minican-försöken. Även dessa försök inkluderar korrosionskuponger för karaktärisering av kopparkorrosion i en slutförvarsliknande miljö. Huvudsyftet med dessa försök är dock att studera korrosion av en miniatyrversion av en kopparkapsel med järninsats där ett genomgående hål har bildats i kopparkapseln så att även järn deltar i korrosionsprocessen. SKB har även genomfört korrosionsförsök med korrosionskuponger

för att studera inverkan av atmosfäriska förhållanden för den tid då kapseln hanteras i ett öppet slutförvar, samt korrosionskuponger har använts som en del av SKB:s mest storskaliga försök vid Äspö, det så kallade prototypförvarsförsöket.

SKB bedriver sedan ett antal år forskning kring frågan om korrosion av koppar i rent syrgasfritt vatten vid Uppsala universitet och vid företaget Microbial Analytics Sweden AB. Vissa försök kopplat till ämnesområdet bedrivs också vid University of Chemical Technology and Metallurgy i Bulgarien samt vid VTT i Finland. Företaget Microbial Analytics har också varit involverat i forskningen kring mikrobiellt inducerad kopparkorrosion i en bentonitbuffert. Andra viktiga frågeställningar som SKB adresserar genom experimentell forskning är egenskaperna hos sulfidfilmer som bildas på koppar vid sulfidkorrosion, samt risken för spänningskorrosion av koppar utsatt för dragspänningar i en sulfidmiljö. Dessa försök utförs vid University of Toronto och University of Western Ontario i Kanada.

SKB konstaterar att man inledningsvis inte har använt kvalitetssäkringsprogram för sin experimentella forskning kring kopparkorrosion (SSM forskningsrapport 2010:17). SKB har dock i de flesta fall använt sig av aktivitetsplaner och projektstyrning enligt fastställda principer. SKB specificerar också krav på leverantörer som implementerar ett eget kvalitetssäkringsprogram som skall godkännas av SKB. De flesta företagen har grundcertifiering enligt ISO 9001 och ISO 14001. Vissa försöksprogram använder rådgivande externa expertgrupper som ytterligare kvalitetssäkringsåtgärd. För frågorna om korrosion i syrgasfritt vatten användes en extern referensgrupp med bland annat representanter från KTH som genomförde de ursprungliga experimenten. SKB anser att för forskning vid universitet och högskolor är det inte möjligt att utöva detaljstyrning av försöken, även om kvalitetspåverande frågor regelbundet diskuteras vid möten.

4.10.8.2 SSM:s bedömning

SSM anser att behov av långtgående kvalitetssäkring i allmänhet föreligger vid genomförande av kopparkorrosionsexperiment som grund för säkerhetsanalys. Försök kan vara kvalitetskritiska så till vida att små avvikelser/misstag kan få en inverkan på tolkning av försöksresultat. Ett område inom vilket SSM har granskat kvalitetssäkring är försöken kring korrosion av koppar i syrgasfritt vatten. Mängden vätgas som produceras är beroende av flera parametrar som behöver kontrolleras och i vissa fall kontinuerligt övervakas. Det behövs noggranna metoder för att upptäcka vätgasproduktionen eftersom reaktionen sker långsamt och en liten vätgasutveckling är svår att mäta. En låg bakgrundsnivå av vätgasproduktion från utrustningsdetaljer behöver säkerställas och även ett mycket begränsat syreläckage kan få en betydelse för tolkning av resultat.

SSM anser att ett kvalitetssäkringsprogram behöver innefatta en specifikation och dokumentation av experimentella metoder samt en beskrivning av ansvarsförhållanden under försöken. För långtidsförsök som är svåra att upprepa med rimliga resurser och tidsåtgång är det särskilt viktigt att ett kvalitetssäkringsprogram innehåller en kartläggning av vilka projektrisker som föreligger och som kan få en betydelse för resultaten.

SSM har låtit genomföra en oberoende expertgranskning av SKB:s kvalitetssäkring av kopparkorrosionsförsök som en del av granskningen av SKB:s ansökan (SSM Technical note 2015:29). SSM genomförde en liknande granskning 2010 som avser vissa av de experiment som SKB använt som grund för säkerhetsanalysen SR-Site (SSM research report 2010:17). I den första granskningen konstaterades att SKB vid detta tillfälle hade rimliga aktivitetsplaner och en acceptabel projektstyrning av pågående korrosionsförsök. Ett problem ansågs dock vara att SKB:s huvudsakliga fältmässiga försök egentligen utformats för att studera andra processer i slutförvarsmiljön som buffertutveckling och utveckling av en skadad kapsel snarare än renodlade kopparkorrosionsprocesser i

slutförvarsmiljön. Fältnässiga tester som enbart utformats för studier av renodlad kopparkorrosion bör kunna genomföras på ett sätt som förenklar tolkningen av försöksresultat. Ett annat potentiellt problem som påpekades angående projekten är relaterat till att ett flertal organisationer och externa konsulter har varit inblandade, vilket i viss mån försvårar kommunikation och beslutsfattande. Detta kan också innebära att SKB:s egen kontroll över inriktning och utformning av experiment försvagas. Vid den externa granskningen framkom också vissa kvalitetsproblem så som att vissa primärdata som indikerade mycket höga korrosionshastigheter inte fanns med i redovisningen, att analyser av osäkerheter i försöken befanns vara bristfälligt rapporterade, samt att publikation av primärdata i vissa fall tagit mycket lång tid. En viktig observation kring de så kallade LOT-försöken är att ingen fullständig förståelse för utvecklingen av redoxförhållanden finns tillgänglig vilket försvårar tolkningen av den gravimetriskt bestämda totala omfattningen av kopparkorrosion vid försökens slut.

Vid den andra granskningen konstaterades att senare rapporter från SKB om kopparkorrosion visar på en ökad medvetenhet och rapportering kring kvalitetskritiska frågor (SSM Technical Note 2015:29). Monitering och kontroll av fältnässiga försök verkar dock fortfarande innehålla problematiska inslag så som att vissa komponenter inte fungerat, att realtidsmätningar av korrosionshastigheter inte har fungerat tillfredställande, att det fortfarande inte finns någon detaljerad förståelse kring den rumsliga och tidmässiga fördelningen av redoxförhållanden under vissa korrosionsförsök och att det i vissa fall tagit lång tid mellan att ett fel har blivit upptäckt och att det har blivit åtgärdat.

Med tanke på kapselns viktiga roll i SKB:s program och i SKB:s säkerhetsanalys anser SSM att SKB i kommande steg i SKB:s program behöver utveckla ett program för dels fortsatta studier av korrosionsmekanismer, liksom ett program för långsiktig mätning och monitering av korrosionsprocesser i representativ slutförvarsmiljö. Det förstnämnda för att ge underlag för kommande säkerhetsanalyser och det sistnämnda för långsiktig verifiering av barriärfunktioner.

4.10.9 SKB:s fältförsök med fokus på kopparkorrosion

4.10.9.1 Underlag från SKB

I detta avsnitt beskrivs tre av SKB:s fältförsök under vilka korrosionsmätningar har genomförts:

- LOT-försöken
- Prototypförvaret
- Minican-försöken

SKB initierade under slutet av 1990-talet en serie försök vid Äspö-laboratoriet som benämns LOT ("Long term test of buffer material") med det huvudsakliga syftet att undersöka buffertegenskaper och buffertens mineralogiska utveckling under lång tid under förvarslignande förhållanden (SKB TR-00-22). Försöksuppställningen utgjordes av testpaket innehållande värmare, kopparrör, förkompakterade bentonitblock och instrument i vertikala borrhål i kristallint berg. Kopparröret bestod av så kallad Cu-DHP, vilket är deoxiderad ren koppar (Cu 99,9 vikt-%) med en liten del fosfor (0,015–0,04 vikt-%). Vid kontakt med luft väntas en tunn (nm-tjock), skyddande oxidfilm (Cu_2O och CuO) att bildas (Speckmann m.fl. 1985). Även kopparkuptioner tillverkade av det planerade kapselmaterialet placerades i vissa bentonitblock (SKB TR-00-22). Ursprungligen skapades sex olika testpaket med planen att utsättas för slutförvarsmiljö under ett år (A1, S1), fem år (A2, S2, A3) och tjugo år (S3) (SKB TR-98-19). Paketerna med benämningen S utsattes för förhållanden som efterliknade den förväntade slutförvarsmiljön (ca 90°C vid värmaren) medan de med benämningen A utsattes för aggressivare förhållanden, såsom



förhöjd temperaturgradient över bufferten (ca 130°C vid värmaren), förhöjt pH och förhöjd kaliumkoncentration i bentonitporvattnet. Sedermera initierades även ett ytterligare testpaket, A0, (SKB TR-09-31) eftersom bentonitblocken innehållande kopparkupongerna i A1-paketet råkade förstöras vid friborningen. Våren 2017 pågår fortfarande försöken för S2, S3 och A3. SKB motiverar i Bilaga K:3 till ansökan sitt val att låta S2-försöket fortgå dels med att en längre drifttid krävs för att göra det enklare att observera förändringar i bentonitleran, och dels med att upptagande och den efterföljande analysen kräver en bättre planering och mer resurser än vad som ursprungligen uppskattats.

Analys av försöken för de upptagna paketen finns redovisade i SKB:s slutrapporter (SKB TR-00-22 för A1 och S2, SKB TR-09-31 för A0, SKB TR-09-29 för A2). Dessutom publicerades en rapport med en utökad analys av den kopparkorrosion som ägt rum i försökspaketet A2 (SKB TR-13-17). Detta avsnitt summerar SKB:s presentation av resultaten avseende kopparkorrosion i dessa LOT-försök.

I försöken för A1- och S1-paketen (SKB TR-00-22) placerades 4 kopparkuponger i respektive paket medan 4 användes som referens. Dock förstördes kupongerna i A1-paketet av misstag under friborningen. Korrosionshastigheten för kopparkupongerna i S1, som under försökstiden utsattes för temperaturer omkring 50°C, fastställdes gravimetriskt till 3 µm/år. Korrosionsangreppen analyserades med svepelektronmikroskop och ojämna korrosionsangrepp kunde noteras, dock ej i sådan grad att gropkorrosion kunde fastställas. Ett flertal korrosionsprodukter observerades, bland annat kuprit (Cu₂O) och malakit (Cu₂CO₃(OH)₂). Förhöjd kopparhalt i bentoniten kunde noteras i närheten av kupongerna men av storleksordningen att koppar bedömdes inkorporerad i montmorillonitstrukturen. Denna process bedömdes ha en försumbar påverkan på bentonitens fysikaliska egenskaper.

För A0-paketet, som friborrades efter 498 dagar vid maximal värmartemperatur om 140°C, utfördes liknande analyser (SKB TR-09-31, Appendix B). I detta försök utsattes fyra kopparkuponger för temperaturen på ca 80°C respektive 35°C. Korrosionsmedelhastigheten för de båda kupongerna var likvärdig och uppskattades utifrån gravimetriska mätningar till knappt 4 (3,5-3,6) µm/år. Även på dessa kuponger noterades en ojämn korrosionsattack. Aktiv gropkorrosion bedömdes dock ej ha ägt rum.

A2-paketet utsattes för aggressiv slutförvarsmiljö med maximal temperatur från värmaren under 5 år och 3 månader (SKB TR-09-29). Fyra kuponger exponerades för temperaturer omkring 75°C respektive 300°C under denna tid. Grundvatten leddes in genom en titanspets i testpaketets övre del för att mätta bufferten. Full mättnad bedömdes ha inträffat efter två års exponering. Korrosionsmedelhastigheten beräknades gravimetriskt till under 0,5 µm/år, alltså mindre än den som bestämts för A0-, A1- och S1-paketen. Efter upptagning analyserades kupongerna med SEM och röntgendiffraktion (Cu Kα1 XRD). Från XRD fastställdes kuprit och paratakamit (Cu₂(OH)₃Cl) som de huvudsakliga korrosionsprodukterna. Även i dessa försök fastställdes utifrån SEM en ojämn korrosionsattack men gropkorrosion bedömdes ej ha förekommit. Penetrationsdjupet för koppar in i bentoniten bestämdes under dessa försök till 500 µm. Uteslutande klorid innehållande korrosionsprodukter observerades också i de så kallade FEBEX-försöken som utförts i Schweiz och letts av den schweiziska slutförvarsorganisationen NAGRA men där även SKB har deltagit. Liknande korrosionsmedelhastigheter som för A2-paketet observerades (0.5 µm/år över en artonårsperiod). Kopparkupongerna i dessa försök hade utsatts för gropkorrosionsangrepp motsvarande djup på omkring 20-66 µm (Wersin and Kober, 2017).

SKB utkom senare med en utökad, utförligare analys av A2-resultaten med betoning på kopparkorrosion av koppartuben (SKB TR-13-17). Initialtillståndet i termer av mängd oxiderad koppar för koppartuben vid deponering i testhålet bestämdes dock aldrig. Massminskning av koppar, och således korrosionsdjupet (normaliserat till koppartubytan), uppskattades genom att, i bentonitblock med varierande temperaturgradient, analysera kopparkoncentrationen i bentoniten som funktion av avstånd från koppartuben. Korrosionsmedelhastigheten i varma bentonitblock uppskattades till $1,7 \mu\text{m}/\text{år}$ medan den för den kalla delen av tuben beräknades till $0,12 \mu\text{m}/\text{år}$. SKB jämför sina korrosionshastigheter med liknande studier (Kumpulainen m.fl. 2010, Kim m.fl. 2007) och erhåller jämförbara hastigheter för den kalla regionen av tuben. SKB påpekar vidare att för korrosionshastigheten uppskattad för den varma delen av tuben ligger värdet under gränsen för vad som förutspås vid oxiderande betingelser utifrån utförd modellering i (SKB TR-94-25).

Under oxiderande förhållanden är de huvudsakliga kopparkorrosionsprodukterna, beroende på lösningssammansättning, kuprit, malakit och paratakamit (King m.fl., 2002) vilket innebär att $0,25 \text{ mol}$ syrgas fordras för att korrodera 1 mol Cu(I) . Baserat på uppskattad initial mängd syrgas per block i LOT-paketet gör SKB massbalansberäkningar för de heta och kalla bentonitblocken och erhåller för de kalla blocken en överflödigt mängd syre som de sedan antar trycks mot de hetare delarna av systemet, där mängden tillgängligt syre inte räcker till ur massbalanssynvinkel då massminskningen av koppar är ungefär dubbelt så hög som för de kalla delarna. När de istället beaktar syremängden i hela A2-paketet får SKB matematiskt ihop sin massbalans, under antagandet att inget syre reagerar med andra ämnen än koppar.

SKB framhåller även att Fe(III) i bentonitleran kan verka som korrodant där Fe(III) i leran reduceras till Fe(II) och Cu(0) oxideras till Cu(I), vilket kan ge ett bidrag till den observerade massminskningen för koppar i tuben. Det saknas dock experimentellt belägg för denna reaktion. En förhöjd katjonbyteskapacitet i leran nära tuben identifierades av Clay Technology, vilket är i analogi med den Fe-reduktion som föreslås, men detta kunde dock inte någon annan av de involverade grupperna påvisa och ingen tidigare publicerad studie visar heller på liknande resultat (SKBdoc 1416862).

Vid anoxiska förhållanden är HS- huvudkorrodanten (King m.fl., 2002), vilken oxiderar koppar till Cu_2S . I kompakterad bentonit är kopparkorrosion relaterat till HS-flödet i det omgivande grundvattnet (SKB TR-94-25, Smith m.fl. 2007) men de komplexa randvillkoren i LOT-försöken gör en uppskattning av sulfidflödet svårbedömd (SKB TR-13-17). Problemet med att uppskatta korrosionsdjupet angrips av SKB på två olika sätt: i) genom att anta steady-state-flöde av HS- och tillämpa Ficks första diffusionslag, med olika diffusionskoefficienter beroende på temperaturen i bentonitblocken, ii) genom en mixing-modell av grundvatten med en given HS-koncentrationen och bentonitporvatten med en given volym och bestämning av total korroderad substansmängd koppar utifrån mängd sulfid i bentonitporvattnet. I det första fallet erhålls ett totalt korrosionsdjup på $0,014 \mu\text{m}$ efter fem år (för varma block) medan det andra fallet ger ett totalt korrosionsdjup på $0,01 \mu\text{m}$ (SKB TR-13-17, avsnitt 2). Andra sulfidkällor är pyrit i bentoniten vilket uppgår till $0,24 \%$ (SKB TR-09-29) men under reducerande förhållanden är pyrit mycket svårslösligt vilket gör sulfidflödet från pyrit försumbart i jämförelse med det från grundvattnet. Vid omättade buffertförhållanden finns även möjlighet för sulfatreducerande bakterier att producera sulfid. Med ökat svälltryck minskar denna aktivitet men SKB påpekar att det finns osäkerheter rörande detta (SKB TR-13-17). SKB lyfter fram studien av (Masurat m.fl., 2010) som visar på avtagande mikrobiell aktivitet med ökande svälltryck och en korrosionshastighet vid mättad bentonitdensitet ($2000 \text{ kg}/\text{m}^3$) på $1,8 \cdot 10^{-4} \mu\text{m}/\text{år}$. SKB konstaterar att massbalansberäkningar utifrån dessa uppskattningar inte kan förklara massminskningen koppar i koppartuben.

Olika heta bentonitblock närmast koppartuben analyserades separat. Forskargruppen från Andra (SKB TR-13-17) studerade mikroskopiskt (SEM, TEM) och med röntgenfotoelektron-spektroskopi (XPS) bentoniten med syfte att kategorisera korrosionsprodukter. SEM- och TEM-mätningarna visade på bildat CaSO_4 tillsammans med små partiklar (ca 5 μm) berikade med Cu, S och Fe. XPS-data indikerar förekomst av både kopparsulfid och kopparoxid även om resultaten var svårtolkade och bedömdes vara osäkra. Den övergripande tolkningen är att Cu förekommer som små partiklar av sulfid och oxid. BGR-gruppen tillämpade elektronmikroskopi för att studera bentonitytan i kontakt med koppartuben och nådde liknande slutsatser och dessutom att de små kopparsulfidpartiklarna bildats från sulfatreduktion triggat av kopparkorrosion. Den sammanslagna tolkningen av de separata studierna är att bildning av kopparrika sulfidpartiklar med varierande Fe-innehåll bildas, möjligen tillsammans med $\text{CuSO}_4(\text{s})$. Kopparsulfid associerad med silikat detekterades inte så ingen påverkan på montmorillonitstrukturen kunde fastslås. Det är osäkert huruvida kopparoxider bildats nära tuben även om viss indikation från XPS-mätningar tyder på det. Från dessa resultat gör SKB tolkningen att koppar växelverkar med pyrit i bentoniten men massbalansberäkningar utifrån innehållet pyrit i MX-80-bentonit (0,24%) visar på att mängden pyrit i leran inte är tillräcklig för att binda den från tuben frigjorda kopparn. Utöver slutrapporterna för de upptagna testpaketen och Wersin-rapporten (SKB TR-13-17) har separata studier publicerats (bl.a. Rosborg m.fl. 2004a, 2004b, 2005). Dessa studier baserades på elektrokemiska mätningar (linjär polarisationsresistans (LPR), harmonisk distorsionsanalys och elektrokemiskt brus (EN)) på kopparelektroder som placerats i bentonitring 36 i testpaket A2 vid LOT-försökets början med målen att löpande kunna monitorera korrosionshastigheter samt utvärdera utveckling av potentiell lokal korrosion. Viktigt att notera är dessutom att dessa mätningar utfördes utan formella referenselektroder då risken med tillämpning av sådana bedömdes för hög under rådande förhållanden med höga svälltryck (Rosborg m.fl., 2005). Istället användes en tre-elektroduppsättning med identiska kopparelektroder vilket möjliggjorde alternering mellan de tre elektroderna att i turordning vara arbetselektrod, motelektrod och referenselektrod. På så sätt kunde utökad information erhållas rörande spridning av data och asymmetri i korrosionsattackerna på de tre elektroderna (Rosborg m.fl., 2004c). LPR-tekniken fungerar på så sätt att den, under antagandet att steady-state råder, polariserar elektroden med en liten störning i form av en sinusvåg i den linjära regionen omkring korrosionspotentialen i I-V-kurvan varpå strömresponsen mäts. Från denna kan polarisationsresistansen uppskattas. Korrosionsströmtätheten kan sedermera beräknas med hjälp av Stern-Geary-ekvationen (Stern, Geary, 1957), i vilken korrosionsströmtätheten relateras till polarisationsresistansen genom Stern-Geary-konstanten som bestäms genom harmonisk distorsionsanalys av strömresponsen och dess övertoner. Mer konkret erhålls Tafel-koefficienterna för anod- och katodreaktionerna som sedan används för att beräkna Stern-Geary-konstanten. Från den erhållna korrosionsströmtätheten beräknas korrosionshastigheten (penetrationsdjupet) med hjälp av Faradays lag.

EN, som kan betraktas som en kompletterande teknik till LPR, är termen som används för att beskriva de lågfrekventa ström- och potentialfluktuationerna med låg amplitud som observeras i många elektrokemiska system. EN har fördelen att det är en passiv metod, vilket innebär att ingen ström injiceras i systemet, som följaktligen är okänslig för artificiella polarisationseffekter i elektroderna. Erhållna data kan dock ofta vara svårtolkade vilket gör att resultaten ofta bedöms kvalitativt (Ropital, 2009). I korrosionssammanhang associeras bruset med exempelvis sprickprogagering eller (oxid)filmbrott och kan således användas för att detektera lokal korrosion även om allmänna korrosionshastigheter också kan erhållas (Ropital, 2009). För att bestämma de senare tillämpas, som i LPR, Stern-Geary-ekvationen genom harmonisk distorsionsanalys av de uppmätta strömfluktuationerna. Risken för lokal korrosion indikeras av ett så kallat

lokalisationsindex (LI) (definition finns i exempelvis Rosborg m.fl. 2004a) där låga värden (omkring 10^{-2}) visar på allmän korrosion och värden närmare 1 indikerar lokal korrosion. I (Rosborg m.fl. 2004a) redovisas ett LI på 0,15 som mättes i december 2002, vilket tolkades som tendenser till lokal attack. I samma studie gjordes även en grov uppskattning av allmän korrosion på $0,5 \mu\text{m}/\text{år}$. I (Rosborg m.fl. 2004c) gjordes vidare tolkningen att en LI omkring 0,1 innebar att den lokala attacken inte kunde fortgå utan den avstannade.

Efter upptagningen av A2-paketet friborrades bentonitblocket som innehöll kopparelektroder för vidare analys och nya kopparelektroder installerades i bentoniten (SKB R-13-15) med syfte att analysera dugligheten hos de elektroder som varit installerade under LOT-försökets gång. Impedansmätningar utfördes på både de nya och de gamla elektroderna (Rosborg, Pan, 2008) och de upptagna elektroderna uppskattades ha en tunn, skyddande kupritfilm närmast bulkkopparn med en tjockare porös film utanpå, också den bestående i huvudsak av kuprit. Själva upptagningen ansågs påverka systemet kraftigt (SKB R-13-15) då ett sjunkande bentonitsvälltryck observerades vilket bedömdes ha möjliggjort, på grund av syreinträngning i systemet, den förhöjda initialt uppmätta korrosionshastigheten efter upptagning. Före upptagning uppmättes hastigheten till ca $2 \mu\text{m}/\text{år}$ medan den efter upptagning uppgick till närmare $8 \mu\text{m}/\text{år}$, varpå den sjönk stadigt efterkommande månader. I (Rosborg m.fl., 2005) understryks vikten av att korrelera elektrokemiska realtidsmätningar med faktiskt korrosionsbeteende bestämda genom gravimetriska mätningar. Detta visas också av diskrepansen mellan dessa realtidsmätningar och de gravimetriska mätningarna för kopparkupongerna (SKB TR-13-17). Senare redovisades korrosionsmätningar gjorda över en treårsperiod med elektriska resistanssensorer som i januari 2007 installerades i samma system som ovan (Rosborg m.fl. 2011a). Det utfördes även kompletterande mätningar med hjälp av elektrokemisk impedansspektroskopi (Rosborg m.fl. 2011b). Dessa finns även utförligt redovisade i (SKB R-13-15). Bägge teknikerna visar på en korrosionsmedelhastighet för koppar i oxiderande miljö (över 3 år) på under $3 \mu\text{m}/\text{år}$.

Prototypförvaret är ett fältförsök vid Äspölaboratoriet som SKB startade upp 2001. Sex fullskaliga kopparkapslar placerades i uppborrade deponeringshål med bentonitbuffertringar. Efter inplaceringen färdigställdes buffert och återfyllnad och försöken förseglades. Försöken pågick på 450 m djup i berget i olika deponeringshål med syfte att efterlikna slutförvarsförhållanden (SKB TR-13-22). Experimenttunneln utgjordes av två sektioner separerade med en armerad valvplugg: en inre del med fyra deponeringshål och en yttre med två hål. Den yttre delen förslöts också med en armerad valvplugg. Båda sektionerna återfylldes med en blandning av bentonit (30 viktsprocent) och krossat berg (70 viktsprocent). Kapslarna innehöll elektriska värmare med syfte att simulera resteffekten från det använda kärnbränslet. De två kapslarna som placerats i den yttre sektionen (deponeringshål (Dh) 5 och 6) togs upp ur förvaret efter ca sju år. Förvaringen av kapslarna i den inre sektionen (Dh 1-4) planerades till tjugo år – dessa är således ännu ej upptagna. I respektive Dh 1 och 5 placerades tre identiska kopparelektroder för mätning av realtidskorrosion enligt samma metod som beskrivits ovan (se även Rosborg, 2013a). I både Dh 1 och 5 var exponeringstemperaturen för elektroderna omkring 30°C (Rosborg 2012). Under försökets gång mättes aldrig korrosionspotentialen. Efter upptagning av försökspaketet i Dh 5 mättes dock denna och den befann sig i området omkring -60 till -30 mV jämfört med standardväteelektroden (SHE), förhållanden som SKB kategoriserade som mildt oxiderande. Den dominerande korrosionsprodukten fastställdes till kuprit (Rosborg 2012). De uppmätta korrosionshastigheterna, utan korrektion för mätfrekvens, var under $1,3 \mu\text{m}/\text{år}$. Om korrektion görs för mätfrekvensens underskattning av polarisationsresistansen uppskattas korrosionshastigheten istället till $0,4 \mu\text{m}/\text{år}$ vilket är jämförbart med vad som uppskattades från elektrokemiska mätningar för A2-paketet i LOT-försöket. Utifrån de gravimetriska



mätningarna som gjordes på kopparkupongerna i A2-försöket och som renderade en korrosionsmedelhastighet om $0,5 \mu\text{m}/\text{år}$ gör SKB bedömningen att realtidskorrosionsmätningar kan tillämpas för att erhålla konservativa korrosionshastigheter.

SKB har även publicerat en serie rapporter med fokus på analys av mikrobiell aktivitet, gaser och vattenkemi i främst buffert och återfyllnad i prototypförvaret (bl.a. SKB P-13-16, SKB P-11-16).

I (SKB P-13-50) undersöks de kopparkapslar som förvarats under omkring sju år i deponeringshål 5 och 6 i prototypförvaret avseende korrosion. Genom studier av kopparytans morfologi och mätningar på dess ytprofil med hjälp av SEM har SKB ämnat fastställa eventuella gropfrättingsattacker. Från analys av de båda kapslarna drogs slutsatsen att i den försöksuppställning som använts, där miljön locket utsatts för skiljde sig från övriga kapseln, så var bottenplattan den mest utsatta delen med djupast gropar (ca $7 \mu\text{m}$) medan mitten på kapselcylindern var mest skonad. Överlag gjordes bedömningen att korrosionsangreppen på de båda kapslarna var likvärdig om än större (20% djupare gropar) för kapseln i deponeringshål 6.

I de så kallade Minican-försöken, som initierades i slutet av 2006, låg SKB:s huvudfokus på att studera omfattningen av korrosion av segjärnsinsatsen vid vattenpenetration genom en liten defekt i kopparhöljet. I respektive försökspaket, hela försöket omfattade fem paket innehållandes småskalekapslar ($300 \times 150 \text{ mm}$), förborrades således ett litet hål för att simulera processen. Kapslarna utrustades även med elektrokemisk utrustning för detektion av kopparkorrosion under försökets gång samt kopparkuponger för att kunna utföra gravimetriska mätningar vid upptagning. Av de fem kapslarna omgärdades tre av lågkompakterad bentonitlera (Experiment 1,2,3), en av högkompakterad bentonitlera (Experiment 4) liksom den som avses för det planerade slutförvaret, samt en utan bentonit överhuvudtaget (Experiment 5). För paketen med lågkompakterad bentonit förväntas den mikrobiella aktiviteten vara högre än för de med högkompakterad bentonit, och således den av bildade sulfidjoner inducerade kopparkorrosionen. Efter knappt 4 år, i augusti 2011 grävdes en av kapslarna som omslutits av lågkompakterad bentonitlera (Experiment 3) upp. En sammanställning av resultaten från analys av försökspaketet presenteras i (SKB TR-12-09). Från mätningar av redoxpotentialen fastställdes det att reducerande kemisk miljö erhöles relativt snabbt (SKB P-12-13). Kopparelektroden var täckta av ett svart material som tolkades att bestå av främst järnkorrosionsprodukter. Den underliggande kopparytan var i sin tur täckt med en tunn film av kopparoxid/sulfid (sammansättning ej fastställd av SKB). Kopparkupongerna täcktes av små kristaller av främst kopparsulfid (även blandning av järn- och kopparsulfid), vilket SKB menar förekommer i miljöer där sulfatreducerande bakterier är aktiva och refererar till (Little, Lee 2007). Från de gravimetriska mätningarna fastställdes en korrosionsmedelhastighet till $0,15 \mu\text{m}/\text{år}$ för Experiment 3. Ingen gropkorrosion kunde detekteras (SKB TR-12-09). Från de elektrokemiska realtidsmätningarna (se främst SKB P-12-13) av samtliga fem kapslar erhöles betydligt högre korrosionshastigheter (upp till några hundra $\mu\text{m}/\text{år}$) vilket, enligt SKB, indikerade att problem uppstått i mätningarna. En förklaring SKB ger (SKB P-12-13) är att den bildade järnsulfiden (som är elektriskt ledande) på elektrodytan orsakar de överskattade korrosionshastigheterna. För Experiment 4, som kanske är av störst intresse då det bäst simulerar den förväntade slutförvarsmiljön, uppmättes initialt en korrosionshastighet på ca $1 \mu\text{m}/\text{år}$ varpå den ökade till vad SKB bedömde som realistiska nivåer. Detta förklarades med att svälltrycket påverkade den elektriska anslutningen i mätinstrumenten. Noterbart är dock att korrosionshastigheterna ökar då redoxpotentialen markant sjunker (SKB P-12-13, avsnitt 5.2.1).

4.10.9.2 SSM:s bedömning

SSM anser att LOT-försöken vid Äspö utgör ett bidrag till förståelsen för den initiala utvecklingen av de tekniska barriärerna i slutförvarsmiljön under både förväntade förhållanden och förhållanden aggressivare än förväntat, i termer av bland annat högre temperaturgradienter över bufferten. Värdefulla observationer innefattar exempelvis bentonitlerans mineralogiska utveckling, identifikation av kopparkorrosionsprodukter samt de korroderade kopparyornas morfologi. SSM:s övergripande bedömning är dock att det inte möjligt att dra säkra slutsatser avseende den relativa betydelsen av olika korrosionsmekanismer eftersom försöken genomfördes under fältmässiga förhållanden utan detaljerad kontroll över randvillkor och omgivningsbetingelser.

Som beskrivs i SKB:s underlag ovan rapporteras i de formella slutrapporterna från LOT-försöken korrosionens totala omfattning på kopparkupongerna (SKB TR-09-29) och kopparröret (SKB TR-13-17) främst utifrån gravimetriska mätningar vilket gör det svårt att, utifrån de resultaten, med säkerhet avgöra om kopparkorrosionen företrädesvis har ägt rum under en förhållandevis kort tid efter försökets installation och därefter har avstannat, eller om den varit jämnare fördelad under hela försökstiden. Dock gjordes försök att med elektrokemiska metoder mäta korrosionen i realtid i A2-paketet under LOT-försökets gång (Rosborg m.fl., 2004a-c, Rosborg m.fl. 2005) genom installation av kopparelektroder i bentonitring 36, något som inte rapporterades om i den formella slutrapporten om A2-paketet (SKB TR-09-29) och ej heller i uppföljningsrapporten om korrosionsresultaten i A2 (SKB TR-13-17). I en annan rapport (SKB TR-13-15) redovisades dock resultat från mätningar som utförts på både de kopparelektroder som varit nedgrävda i A2-paketet och på nyinstallerade sådana, liksom på elektriska resistanssensorer som installerades i försökssystemet i januari 2007, alltså ett år efter upptagning.

SSM anser att det hade varit värdefullt att samla all rapportering rörande kopparkorrosionsrelaterade experiment utförda på samma LOT-paket i en och samma rapport för att på så sätt ge en så överskådlig bild som möjligt av de försök som utförts och de resultat som erhållits. Exempelvis utelämnades information rörande de elektrokemiska realtidsmätningarna i slutrapporten för A2-paketet vilket fordrade ytterligare informationssökning för att möjliggöra en samlad bedömning av de korrosionsrelaterade experiment som utfördes i anslutning till huvudförsöket. SSM anser också att det finns osäkerheter associerade med den typ av elektrokemiska experiment som SKB har utfört och menar vidare att SKB:s val att installera nya elektroder i det upptagna paketet för att underlätta tolkningar av data samt validera funktionen hos de nedgrävda elektroderna var välgrundat. SSM anser att dessa typer av elektrokemiska mätningar bör kalibreras mot gravimetriska mätningar för att valideras. Resultaten som SKB erhöll visade också på en högre korrosionshastighet uppmätt i realtidsmätningarna jämfört med korrosionshastigheten uppskattad från gravimetri vilket understryker poängen.

Av korrosionsprodukterna på kopparkupongerna i A2-försöken, som studerades med XRD, att döma anser SSM att det i anslutning till kupongerna med största sannolikhet funnits syrgas närvarande under stora delar av försöket. Då ingen liknande analys gjorts av koppartuben är korrosionsprocesserna som ägt rum vid tuben mer svårbedömda. SSM anser att totala massbalanser med avseende på syre måste betraktas som approximativa liksom några antaganden om korrosionshastigheten, vilket försvårar tolkningen av resultatet. SSM anser vidare att det inte går att dra slutsatsen att det enbart rör sig om korrosion under oxiderande betingelser och att det heller inte går att utesluta att syre även kan ha förbrukats genom andra processer.

Beträffande mikrobiell sulfatreduktion konstaterar SSM att mikrobiella processer inuti bentonitlera kan variera från förhållandevis snabb till mycket långsam beroende på



omgivningsbetingelser som vattenaktivitet, svälltryck, temperatur, tillgång till substrat, näringsämnen m.m.

SSM har genomgående i granskningsrapporten inte uteslutit vare sig att processen kan vara snabb (omfattningen veckor, månader) men heller inte förhållandevis långsam (omfattningen år) och möjligen variera beroende på lokala förhållanden i olika deponeringshål med avseende på fysikaliska betingelser, kemiska betingelser, transportprocesser osv. Detta har betydelse bl.a. för bedömning av vissa typer av korrosionsprocesser som äger rum under oxiderande förhållanden vilket finns redogjort för i avsnitt 4.10 i granskningsrapporten.

SSM noterar att koppar i bentonitleran i dessa försök finns i jonbytespositioner, och i små mängder som kopparsulfider och även metallisk koppar (SKBdoc 1416862).

SSM konstaterar att korrosionsresultaten från de elektrokemiska mätningarna gjorda på kopparelektrodena i prototypförvaret är jämförbara med de som erhöles i LOT-försöket. SSM anser dock att det medför osäkerheter att inte kalibrera resultat från dessa typer av mätningar mot relevant gravimetrisk data från samma försök. SKB gör en kvalitativ jämförelse med de gravimetriska mätningarna som gjordes för A2-paketet och får överensstämmande resultat. SSM anser dock att en sådan jämförelse, mellan två försök vid vilka de kemiska betingelserna med största sannolikhet varierar, bör göras med försiktighet. Att den kemiska miljön skiljer sig åt understryks av de i prototypförvaret mer påtagliga korrosionsgroparna, vilket gör jämförelsen än mer osäker.

SSM anser att kopparkorrosionsresultaten från MiniCan Experiment 3 är svårbedömda då i synnerhet de elektrokemiska mätningar som tillämpats uppvisar stora osäkerheter och dessutom inte korrelerar med de gravimetriska mätningarna av kopparkupongerna. Av de senare att döma är korrosionsomfattningen jämförbar med de andra fältförsöken (LOT, Prototypförvaret) som SKB har utfört. SSM anser vidare att även om de uppmätta absoluta värdena från de elektrokemiska mätningarna går att bortse från så finns det indikationer på att korrosionsförändringar direkt speglar förändringarna i kemisk miljö med en ökad mikrobiell aktivitet som resultat, vilket i sig är en intressant observation.

SSM:s sammanfattande bedömning avseende de elektrokemiska realtidsmätningarna av kopparkorrosion i de fältförsök som utförts (LOT, MiniCan, Prototypförvaret) är att alltför stora osäkerheter rörande i synnerhet kalibrering gör det svårt att med tillförlitlighet fästa någon vikt vid dessa resultat. SSM baserar istället sin översiktliga bedömning på de gravimetriska mätningar som utförts på kopparkuponger placerade i LOT A0, S1 och A2 samt i MiniCan Experiment 3.

I tabell 4.10.1 nedan sammanfattas de gravimetriskt uppmätta korrosionshastigheterna från kopparkuponger använda i de fältförsöken LOT och MiniCan som beskrivits ovan.

Tabell 4.10.1 Korrosionsmedelhastigheter för kopparkuponger placerade i bentonitblock i försök med slutförvarsliknande miljö.

Försökspaket	Försökslängd (år)	Korrosionsmedelhastighet ($\mu\text{m}/\text{år}$)	Korrosionsprodukter
LOT A0	1	3,5 ^b	Kuprit, blågrön produkt
LOT A1	1	Ej tillgänglig ^a	-
LOT S1	1	3 ^a	Kuprit, malakit
LOT A2	5	< 0,5 ^c	Kuprit, para-atacamit
MiniCan Experiment 3	4	0,15 ^d	Kopparsulfid

Data hämtad ur SKB:s rapporter: a) SKB TR-00-22, b) SKB TR-09-31, c) SKB TR-09-29 och d) SKB TR-12-09. Notera att försökslängderna är avrundade till jämna år.

Enligt rapporterna SKB TR-00-22 och SKB TR-09-31 utfördes ingen röntgendiffraktion på korrosionsprodukterna som bildades på kopparkupongerna i A0- och S1-försöken. SKB gör uppskattningen utifrån optiska och mikroskopiska analyser att den huvudsakliga produkten i dessa fall är kuprit men att även malakit eller para-atacamit har bildats. I SKB TR-09-29 däremot redovisades XRD-resultat på korrosionsprodukterna och kuprit och para-atacamit kunde fastställas som produkter. Dessa är vedertagna produkter från korrosionsprocesser som sker vid reaktion i oxiderande miljö. Kloridinnehållande produkter noterades uteslutande även i de så kallade FEBEX-försöken (Wersin och Kober, 2017). Detta anser SSM ytterligare understryker en av de huvudsakliga slutsatserna från försöksrapporten att oxiderande förhållanden har haft en stor betydelse för korrosionsförloppet. I resultaten från MiniCan-försöket påvisades kopparsulfid som huvudsaklig korrosionsprodukt. Den omgivande miljön i detta MiniCan-försök skiljde sig avsevärt från LOT-försöket då bentonitleran var lågkompakterad och således tillät högre mikrobiell aktivitet vilket främjar snabb syrekonsumtion och förhöjd sulfidproduktion från sulfatreducerande mikrobiella processer som i sin tur kan korrodera kopparn. Trots detta är den erhållna korrosionshastigheten på 0,15 $\mu\text{m}/\text{år}$ mycket låg.

Avslutningsvis anser SSM att de erhållna korrosionshastigheterna från LOT-försöken (0,5-3,5 $\mu\text{m}/\text{år}$) med största sannolikhet är en förväntad varians vid rådande betingelser (i huvudsak oxiderande, att döma av korrosionsprodukterna) då den lokala miljön vid kupongerna ofrånkomligen varierar. Om massbalanser bortses ifrån och antagande görs att oxiderande betingelser skulle råda under hela slutförvarsperioden skulle kapseln falla inom 15 000 år om korrosionshastigheten konstant är 3,5 $\mu\text{m}/\text{år}$ vilket är den gravimetriskt maximalt erhållna korrosionshastigheten i LOT-försöken. SKB:s mest konservativa uppskattning i säkerhetsanalysen är att oxiderande förhållanden upphör inom 300 år. Dock konstaterar SSM att det inte finns någon utförlig sammanhängande analys av hur länge oxiderande förhållanden kommer råda vid kapselytorna vilket gör en kvantitativ uppskattning av korrosionsomfattningen utifrån de från LOT-försöken erhållna resultaten svårgörlig. När miljön övergått till att bli reducerande styrs den huvudsakliga korrosionsprocessen av tillgången på sulfidjoner vilken är rimligt förutsägbar givet information om bl.a. tillgång på organiskt material och grundvattensammansättningar. Omfattningen av allmän korrosion från sulfidjoner förväntas i de flesta fall vara liten även om SSM identifierat osäkerheter i SKB:s underlag i fall där buffertens svälltryck ej byggts upp och i synnerhet det potentiella angrepp på kapseln som kan ske från gasformig sulfid som bildats i återfyllnaden. SSM:s bedömning i detta avseende diskuteras utförligt i avsnitt 4.10.5.2 i denna granskningsrapport.



Alternativa korrosionsprocesser, såsom att koppar spontant skulle reagera med vatten och korrodera, bedöms av SSM att ha liten betydelse på grund av materieöverföringsbegränsningar och låg termodynamisk drivkraft (avsnitt 5.11.4 i denna rapport).

4.10.10 SSM:s sammanfattande bedömning av kopparkorrosion under de första 1000 åren

SSM anser sammanfattningsvis att SKB:s redovisning kring allmän korrosion under oxiderande betingelser är rimligt välmotiverad och att korrosionsangreppens omfattning under denna tidsperiod endast har en liten påverkan på kopparkapslarnas skyddsförmåga. Den största risken kopplat till denna typ av processer bedöms vara att ett läckage av syre kommer tillstånd mellan en deponeringstunnel och den intilliggande transporttunneln under slutförvarets driftfas. För att argumentet begränsad syremängd ska vara giltigt är det emellertid avgörande att SKB med mycket stor tillförlitlighet vidtar tillräckliga åtgärder som visar att inläckage av syre via tunnelpluggen och omkringliggande berg kan uteslutas.

SSM konstaterar att SKB behöver förbättra redovisningen kring lokala korrosionsprocesser under oxiderande betingelser eftersom inga probabilistiska analyser av denna typ av processer har redovisats. SKB har dessutom inte entydigt redogjort för hur långa tider oxiderande betingelser kan förväntas förekomma. Analys och redovisning av spänningskorrosion under oxiderande förhållanden behöver förbättras och förnyas. Tiden tills allt syre har förbrukats bedöms vara delvis påverkbar genom val av buffert och återfyllnadsmaterial samt utformningen av tunnelpluggar och bergtätningar vilket behöver demonstreras av SKB.

SSM anser att SKB:s analys för omfattningen av allmän korrosion av koppar i syrefri och sulfidhaltig miljö har genomförts på ett i huvudsak korrekt sätt. Korrosionsangreppens omfattning bedöms vara begränsad i förhållande till kapseln tjocklek under den för detta kapitel aktuella tidsperioden. Det är dock inte möjligt att dra lika säkra slutsatser kring korrosionsdjupet för deponeringshål som under lång tid blir exponerade för omättade förhållanden där förekomst av gasformiga korroderande ämnen och saunaeffekten kan medföra påverkan på de kemiska förhållandena i anslutning till kapselytorna. Under omättade förhållanden kan större mängder sulfid tillföras via gasfasen än via vattenfasen som ett resultat av mikrobiell sulfatreduktion i återfyllnaden. SKB behöver genomföra undersökningar med avseende på omfattning av mikrobiell sulfatreduktion i olika återfyllnadsmaterial, samt analyser av gasdiffusion från återfyllnadsmaterial till kapselytor för att säkrare kunna fastställa omfattningen av denna korrosionsform. Det behövs vidare ytterligare experimentella studier av kopparkorrosion vid höga kloridhalter i kombination med sulfider, eftersom viss ackumulation av klorid i närheten av kapselytorna kan förekomma under vissa faser av slutförvarets långsiktiga utveckling.

SSM anser att en betydelse av lokala korrosionsmekanismer i sulfidmiljö inte kan uteslutas baserat på SKB:s säkerhetsanalys och på det befintliga kunskapsunderlaget. För bedömning av risk för både spänningskorrosion och gropkorrosionsangrepp är en avgörande fråga om förekomst av passiverande sulfidfilmer kan uteslutas för samtliga tänkbara förlopp i slutförvarsmiljön. Dessutom anser SSM att gammarradiolys av vatten måste beaktas för att bedöma risk för lokala korrosionsangrepp. Experimentella studier visar att passiverande sulfidfilmer kan bildas under vissa förutsättningar (Mao m.fl., 2014). SSM bedömer att förutsättningar för uppkomst av höga sulfidhalter i närheten av kapselytorna är förknippade med omättade förhållanden samt mikrobiell sulfatreduktion. Det bör noteras att det inte är de omättade förhållandena i sig som kan skapa förutsättningar för spänningskorrosion och gropkorrosion utan kombinationen omättade förhållanden och mikrobiell sulfatreduktion. Förhållandevis snabb tillförsel av sulfid kan

kopplas till två fall, dels att en biofilm av sulfatreducerande bakterier bildas direkt på kapselytan, dels genom diffusion av gasformig sulfid genom en omättad buffert från återfyllnaden. Under mättade förhållanden i bufferten saknas dessa förutsättningar för snabb tillförsel av sulfid. SSM vill emellertid även poängtera att spänningskorrosion utan passiverande sulfidfilm ("Aaltonen-mekanismen") inte heller helt kan uteslutas baserat på den argumentation som SKB hittills har redovisat. SSM bedömer att risken för spänningskorrosion i sulfidmiljö är den mest betydelsefulla osäkerheten, med tanke på den potentiellt mera betydande och förhållandevis snabba inverkan på kapselns skyddsförmåga i jämförelse med andra typer av korrosionsprocesser. SSM anser därför att fortsatta experimentella undersökningar kopplade till risk för lokala korrosionsprocesser i sulfidmiljö behöver genomföras. SSM anser att SKB har hanterat dessa processer på ett ofullständigt sätt i SR-Site genom att dessa båda processer inte har integrerats i scenarioanalysen för att utröna deras potentiella betydelse under olika förutsättningar och inom ramen för olika scenariovarianter utan enbart har hanterats genom processbeskrivningar och FEP-hantering. Som underlag för dessa nya scenarier behövs förutom kunskap om korrosionsprocesserna mera detaljerade analyser av återmättnadsförloppet liksom av förutsättningar för mikrobiell sulfatreduktion med beaktande av aktuell förvarsutformning och aktuella material för buffert och återfyllnad. Dessutom behövs en analys av hur väte som bildas under syrgasfria förhållanden har förmåga att diffundera in i kopparmaterialet och undersökningar av om denna indiffusion kan påverka kopparmaterialets mekaniska egenskaper.

4.11 Mekanisk deformation av kopparkapseln från svälltrycksfall

Ett förhöjt hydrostatiskt tryck från grundvatten och isens tryck samt det ytterligare tillägget från buffertens svälltryck ger en isostatisk last på kapseln som SKB definierar till maximalt 45 MPa. I SKB TR-09-22 uttrycks detta som en konstruktionsförutsättning för kapseln som formuleras:

"Kapseln ska tåla en isostatisk last på 45 MPa som utgör summan av det maximala svälltrycket och maximalt grundvattentryck."

I detta avsnitt behandlas enbart kapselns tålighet mot summan av buffertens svälltryck och vattentryck som av SKB anges till max 18 MPa (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.16). De mest begränsande lastfallen avseende svälltryck under de första 1000 åren är dock sådana som ger upphov till ojämn svällning på grund av geometriska förhållanden i deponeringshålet och/eller på grund av ojämn densitetsfördelning i bentoniten. I avsnitt 5.8.1 i denna granskningsrapport behandlas tåligheten med avseende på den definierade maximala isostatiska lasten på 45 MPa som inkluderar islaster vid kommande glaciationer.

4.11.1 Tålighet mot plastisk kollaps

Tålighet mot plastisk kollaps innebär att kapseln ska kunna tåla en isostatisk last under de svälltryckslastfall som kan uppstå då bentoniten sväller, utan att kapseln havererar på grund av plastisk kollaps.

4.11.1.1 Underlag från SKB

I SR-Site definierar SKB svälltryckslastfallet (SKB TR-11-01) och hänvisar vidare till underlagsrapporter för redovisning av analysernas resultat (SKB TR-10-14; SKB TR-10-28). Flera av de mer detaljerade analyserna redovisas i olika SKBdoc-rapporter.

SKB har genomfört analyser av kapseln för identifierade svälltryckslastfall under den inledande vattenmättnadsfasen men även efter full vattenmättnad (SKBdoc 1206894). Det värsta fallet för segjärnsinsatsen som SKB har identifierat uppkommer vid en kombination



av bananformat deponeringshål och lokal spjälkning som uppträder efter deponering. Det leder till ojämn svällning och därmed böjning av kapseln för vilken SKB med förenklade analytiska lösningar för balkböjning har beräknat den största axiella böjspänningen i BWR-insatsen till 111 MPa i ett tvärsnitt mitt på kapseln. PWR-insatsen har ett större böjmotstånd och därmed erhålls lägre böjspänningar än för BWR-insatsen.

SKB har även genomfört noggrannare finita elementberäkningar av samma lastfall (SKBdoc 1407337). Enligt dessa beräkningar är den största axiella böjspänningen i BWR-insatsen 78 MPa i stället för 111 MPa som framgår av de analytiska lösningarna. Anledningen till denna skillnad är enligt SKB att spänningsfördelningen från bentoniten är jämnare i de numeriska beräkningarna än vad som ansattes i de analytiska beräkningarna samt att kopparhöljet reducerar och omfördelar spänningarna från bentoniten. Detta ska jämföras med den nominella sträckgränsen för segjärnet som är 270 MPa. I kopparhöljet erhålls lokalt en plastisk töjning på 4,4% för detta lastfall.

Ett annat lastfall som SKB har identifierat är en ojämn densitetsfördelning utefter kapselns längd. Det mest konservativa fallet är om bentonitens densitet just under kapseln är 2 050 kg/m³ och 1 950 kg/m³ just ovanför kapseln. Fallet kan uppkomma då en lokal spjälkning uppstår efter deponering kring övre delen av kapseln med åtföljande lägre bentonitdensitet. Detta lastfall har SKB identifierat som mest kritiskt för kopparhöljet då det leder till skjuvspänningar utefter kapselns längd som måste tas upp av kopparcylindern. I SKB TR-09-32 redovisas analysresultat för kopparhöljet för detta lastfall. Störst effektivspänning erhålls i ett ytterhorn i kopparhöljet där den cylindriska delen övergår i en fläns. Där erhålls lokalt en plastisk töjning på 2%.

SKB har även genomfört kompletterande analyser avseende ojämn svällning av bentonitbufferten vid toppen av kapseln och dess inverkan på kapselns mekaniska integritet. Lokal svällning vid kopparlocket kan uppstå om en vattenförande spricka skär deponeringshålet och beväter bentoniten vid toppen av kapseln. I den genomförda analysen antas att ett fullt utvecklade svälltryck bildas runt toppen av kapseln under vattenmättnadsfasen, men utan att ett radiellt utvecklat mottryck bildas (SKBdoc 1419643). Dessutom antar SKB att ett fullt utvecklat axiellt svälltryck verkar på kopparlockets plana del. Detta fall kan relateras till att det är svårt att fylla urtaget i kopparlocket under lyftflänsen med bentonit och att det radiellt verkande mottrycket inte utvecklas. Det analyserade lastfallet anges av SKB som gränssättande för belastningarna på kopparflänsen avseende svälltryckseffekter i toppen. Detta eftersom det radiellt verkande mottrycket sätts till noll och det yttre verkande trycket till maximalt svälltryck. Effekten på kopparlocket är dock mycket liten. Töjningarna är små, mindre än 0,7%.

Ytterligare ett i sammanhanget relevant fall har analyserats av SKB. Vid detta fall antas att det finns ett tillflöde av vatten inte bara i toppen utan längs hela kapselns mantelyta. Situationen motsvarar att deponeringshålet skärs av många vattenförande sprickor eller att vatten på annat sätt sprids axiellt och radiellt i deponeringshålet. Vid analysen beaktas kapselns egentyngd samt friktionen mellan insatsen, kopparhöljet och bentoniten. Detta fall ger tillkommande belastning i form av axiellt verkande skjuvspänningar på kopparhöljet på grund av friktionen mellan kopparhöljet och den radiellt/axiellt expanderande bentoniten. De högsta töjningarna är de som sammanfaller med hydrostatiskt radiellt undertryck i kopparhöljet vilket motsvarar radiella dragtöjningar. I toppen av kapseln uppstår dessa töjningar i kopparlockets undersida samt i kopparhöljets mantelyta i ett område under svetsen. I samtliga fall är töjningarna mindre än 6,2%. Små töjningar (< 0,5 %) uppstår även i kopparhöljets rördel samt i bottensvetsens rot.

4.11.1.2 SSM:s bedömning

SSM har bedömt SKB:s underlag för tålighet mot plastisk kollaps av insatsen och stora deformationer av kopparhöljet vid svälltryckslastfall i följande avseenden:

- Värdering av SKB:s hållfasthetskriterier för tålighet mot plastisk kollaps.
- Värdering av SKB:s hållfasthetsanalyser för svälltryckslastfall inklusive de känslighetsanalyser och kompletterande analyser som SKB utfört.
- En bedömning om det finns förutsättningar för att kapslarna ska erhålla tillräcklig tålighet mot plastisk kollaps av insatsen samt tålighet mot stora deformationer av kopparhöljet för relevanta svälltryckslastfall.

Med plastisk kollaps menas här global plastisk kollaps med stora synliga deformationer och förlust av kapselns bärförmåga. Innan detta tillstånd uppnås kan lokal genomplastisering erhållas av vissa ligament i segjärnsinsatsen så att flytleder bildas, vilket brukar benämnas lokal kollaps. Det betyder dock inte att bärförmågan för insatsen går förlorad utan endast att spänningarna omfördelas till andra delar av skalkonstruktionen under en ökande yttre last. En lokal kollaps leder endast till små deformationer av kopparhöljet vars integritet inte är hotad. För att global kollaps ska inträffa i en skalkonstruktion krävs i allmänhet att flera flytleder successivt utbildas under en ökande last. Till slut kan inte konstruktionen hålla emot den yttre lasten, bärförmågan förloras och global kollaps inträffar.

I detta avsnitt som omfattar svälltryckslaster är de maximala spänningarna i insatsen så små att det inte behövs någon djupare analys för bedömning av kollapståligheten. För kopparhöljet bedöms den plastiska töjningens storlek och fördelning i förhållande till kopparmaterialets brotttöjning, vilken SKB anger i materialkraven till minst 40 %. SSM noterar här att de plastiska töjningarna i kopparhöljet vid svälltryckslastfallen är små och i många fall endast lokalt utbredda. I avsnitt 5.9 i denna granskningsrapport görs en utförligare genomgång av hur SSM ser på SKB:s hållfasthetskriterier för tålighet mot plastisk kollaps under en glaciation för både för insatsen och för kopparhöljet och där kapseln utsätts för betydligt högre tryck än svälltrycket från bufferten.

SSM bedömer att SKB:s hållfasthetsanalyser med avseende på svälltryck är genomförda på ett korrekt sätt enligt goda ingenjörsmässiga principer. De använda finita elementprogrammen är väl beprövade dataprogram för strukturmekaniska analyser. Den största böjspänningen i insatsen för det mest begränsande lastfallet uppgår till 78 MPa vilket ska jämföras med den nominella sträckgränsen för segjärnet som är 270 MPa. Det innebär att svälltryckslastfallen endast ger upphov till måttliga elastiska spänningar i insatsen. Detta ligger långt från den last som skulle kunna orsaka plastisk kollaps. För kopparhöljet är bedömningen att de från svälltryckslastfallen orsakade plastiska töjningarna ligger på en betryggande marginal gentemot brotttöjningen för kopparmaterialet.

En bedömning av krypdeformationer i kopparhöljet och risken för krypbrott görs i avsnitt 4.12 i denna granskningsrapport. SSM bedömer att materialmodellen för bentonitleran, (SKB TR-10-31, kapitel 2) som SKB har tagit fram samt det elastisk-plastiska förhållandet mellan spänning och töjning (SKB TR-10-31, figur 4-1) som har bestämts experimentellt för bentonitleran, är trovärdiga (se avsnitt 4.7 i denna granskningsrapport).

SSM bedömer att kapslarna, insats och kopparhölje för både BWR och PWR, har tillräcklig integritet mot plastisk kollaps av insatsen samt tillräcklig tålighet mot stora deformationer av kopparhöljet vid de identifierade svälltryckslastfallen.



4.11.2 Skadetålighet

En analys av skadetåligheten innebär att man förutsätter förekomst av sprickor inklusive volymetriska defekter i olika positioner av kapseln och baserat på beräkningar bestäms sedan de acceptabla sprickstorlekarna. SKB anger att dessa värden ska ligga till grund för hur stora defekter som SKB behöver detektera i kapseln med oförstörande provning (OFP) vid tillverkningen. SKB postulerar sprickor i ett plan vinkelrätt mot de största dragspänningarna. SKB antar att kompressiva spänningar inte kan öppna sprickor och de utgör därför inget hot mot kapselns brottmekaniska integritet. SKB har inte genomfört skadetålighetsanalyser för kopparhöljet som antas vara så segt att eventuella sprickor inte har någon brottmekanisk påverkan för den strukturella integriteten.

4.11.2.1 Underlag från SKB

I SKB TR-10-28 sammanfattar SKB resultaten för skadetålighetsanalyserna för svälltryckslastfallen och där de detaljerade analyserna genomförts i SKB R-10-11. SKB:s arbetsgång för bestämning av acceptabla sprickstorlekar i segjärnsinsatsen för svälltryckslastfall består av följande steg:

- Bestämma förekommande spänningar i kapseln på grund av svälltryckslastfall genom finita elementanalyser av en modell av kapseln.
- Postulera defekter (ytsprickor med halvelliptisk form, djup-längd förhållande 1:6) vinkelrätt mot de största dragspänningarna.
- Bestämma de minsta accepterbara sprickstorlekarna genom att använda den brittiska brottmekaniska proceduren som kallas R6-metoden.

R6-metoden bygger på en interpolation mellan haverimekanismerna sprött brott och plastisk kollaps (Milne m.fl., 1988). Härvid har SKB använt sig av brottsegheten K_{Ic} . Denna divideras med en säkerhetsfaktor SF som antingen sätts till $\sqrt{10} = 3,16$ eller till $\sqrt{2} = 1,41$. En säkerhetsfaktor $\sqrt{10}$ används i den amerikanska tryckkärlsstandarden ASME XI, IWB-3600 för normala lasthändelser, dvs. laster som är frekvent förekommande till skillnad från t.ex. jordskalvsfallet. En säkerhetsfaktor $\sqrt{2}$ används i ASME XI för lasthändelser som förekommer mycket sällan. SKB redovisar resultat för båda fallen med två olika val av säkerhetsfaktor. För de brottmekaniska analyserna med R6-metoden har SKB använt sig av en brottmekanisk handbok, med tillhörande datorkod ProSACC (Dillström m.fl., 2008).

SKB har genomfört brottmekaniska analyser för segjärnsinsatsen för det mest begränsande svälltryckslastfallet då kapseln utsätts för böjspänning på 111 MPa i ett tvärsnitt mitt på kapseln och postulerar ytsprickor i omkretsled i det högsta påkända tvärsnittet i BWR-kapseln (SKB TR-10-11). En brottseghet på $79,4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ har använts i analyserna som härrör från brottmekaniska prov från BWR-kapslar. Det acceptabla sprickdjupet i en koordinatriktning radiellt i själva tvärsnittet anges till följande värden:

Acceptabelt sprickdjup = 14 mm om SF = $\sqrt{10}$
Acceptabelt sprickdjup = 48 mm om SF = $\sqrt{2}$

SKB anger att det aktuella svälltryckslastfallet är ett osannolikt lastfall med hänsyn till att kombinationen av ett bananformat deponeringshål och lokal spjälkning är sällsynt och bedömer därför att en säkerhetsfaktor SF = $\sqrt{2}$ är mest relevant att tillämpa (SKB TR-10-28). Den acceptabla spricklängden i omkretsled erhålls genom att multiplicera de acceptabla sprickdjupen med en faktor 6 (djup-längd förhållande för defekterna antas vara 1:6). Den kritiska sprickstorleken utan säkerhetsfaktor för svälltryckslastfallet begränsas inte av brottsegheten utan bestäms snarare av giltigheten av de KI-lösningar för den ansatta sprickgeometrin, vilket är maximalt 80 % av tvärsnittets tjocklek.



För en PWR-kapsel erhålls större acceptabla defektstorlekar jämfört med en BWR-kapsel beroende på lägre böjspänningar vid samma svälltryckslastfall.

4.11.2.2 SSM:s bedömning

SSM har bedömt SKB:s underlag för skadetålighet vid svälltryckslastfall i följande avseenden:

- Värdering av SKB:s hållfasthetskriterier för bestämning av acceptabla sprickstorlekar.
- Värdering av SKB:s brottmekaniska analyser för svälltryckslastfall inklusive de ingångsdata, känslighetsanalyser och kompletterande analyser som SKB utfört.
- En bedömning från SSM:s sida om det finns förutsättningar för att kapslarna har tillräcklig skadetålighet vid svälltryckslastfall.

SSM bedömer att R6-metoden är en väl beprövad procedur för brottmekaniska analyser och som vanligen ger konservativa resultat jämfört med mer rigorösa analyser som t.ex. baseras på J-integralen. R6-metoden är en approximativ metod som bygger på en interpolation mellan haverimekanismerna sprött brott och plastisk kollaps. SSM behöver i detta fall inte ta ställning till vilken säkerhetsfaktor på brottsegheten K_{Ic} som är rimlig att använda. Eftersom skjuvlastfallet har en större betydelse är svälltryckslastfallen oavsett säkerhetsfaktor inte begränsande för att detektera defekter i insatsen (se avsnitt 5.10 i denna granskningsrapport).

SKB har i de brottmekaniska analyserna antagit halvelliptiska ytsprickor i omkretsled vinkelrätt mot de största spänningarna i insatsens yttersta delar med ett djup-längd förhållande för defekterna på 1:6, vilket SSM anser vara ett rimligt konservativt antagande då inga speciella förhållanden råder som gör att defekterna kan antas bli ännu mer långsträckta.

En antagen brottseghet på $79,4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ har använts i analyserna som härrör från brottmekaniska prov från BWR-kapslar (SKB R-10-11). Detta brottseghetsvärde är något högre än vad som använts för segjärnsinsatsen för PWR där brottseghetsdata bestämd från PWR-provstavar har använts (SKBdoc 1288288). Detta bedömer dock SSM är av mindre betydelse eftersom böjspänningarna från svälltryckslastfallet är lägre för PWR jämfört med BWR. SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s skadetålighetsanalyser med avseende på svälltryckslast är genomförda på ett korrekt sätt enligt goda ingenjörsmässiga principer.

SKB har inte genomfört skadetålighetsanalyser för kopparhöljet som antas vara så segt att eventuella sprickor inte har någon brottmekanisk påverkan för den strukturella integriteten. SSM instämmer i denna bedömning. Stöd för denna bedömning är enligt SSM att SKB har utfört brottmekanisk provning av kopparmaterialet för provstavar med en tjocklek på 45 mm (SKBdoc 1187725). Provningsen visade att den förutväntade sprickan vid pålastning trubbades av under stor plastisk deformation. Någon egentlig spricktillväxt erhöles inte vid provningen. Detta är karaktäristiskt för mycket sega material där brottmekanismen styrs av plastisk kollaps snarare än spricktillväxt. SSM har dock gjort en separat granskning av risken för krypbrott i kopparhöljet (avsnitt 4.12 i denna granskningsrapport).

Det minsta acceptabla defektdjupet för svälltryckslastfall anges till 14 mm eller 48 mm i segjärnsinsatsen (BWR) beroende på val av säkerhetsfaktor ($\sqrt{10}$ eller $\sqrt{2}$). SKB anser att en säkerhetsfaktor $SF = \sqrt{2}$ är mest relevant att tillämpa eftersom man anser att det aktuella svälltryckslastfallet är ett osannolikt lastfall. Detta bedömer SSM vara av mindre betydelse eftersom även med ett acceptabelt defektdjup på 14 mm, svarande mot en säkerhetsfaktor $SF = \sqrt{10}$, är detta inte det mest begränsande fallet för att kunna detektera



defekter i insatsen i jämförelse med skjuvlastfallet, vilket även är SKB:s slutsats (SKB TR-10-28). SSM noterar att om en trycklast från en glaciation skulle adderas till svälltryckslastfallet skulle detta resultera i ännu större acceptabla defektstorlekar eftersom en glaciationslast i huvudsak ger tryckspänningar i segjärnsinsatsen.

SSM bedömer att skadetåligheten är relativt god i de tvärsnitt som SKB ansatt defekter för BWR-kapslar. I denna värdering ingår att SSM beaktat att de angivna acceptabla defektstorlekarna bygger på en konservativt framräknad maximal böjspänning på 111 MPa. I mer noggranna finita elementberäkningar som SKB har tagit fram har dock böjspänningar fastställts till 78 MPa (SKBdoc 1407337). Mot denna slutsats talar dock att SKB inte har värderat inverkan av egenspänningar efter gjutningen på skadetålighetsanalyserna för svälltryckslastfallen. SSM noterar att resultat från egenspänningarna mestadels är kompressiva vid insatsens yttre delar (SKBdoc 1416697). Egenspänningar i drag uppstår endast i några få områden längre in i insatsens centrala delar för PWR-kapseln. För BWR-kapseln är resultaten från mätningarna av egenspänningen inte helt entydiga. I ett fåtal fall har positiva egenspänningar uppmätts utanför kanalrören. SSM bedömer sammantaget att egenspänningarna efter gjutningen inte i någon avgörande grad påverkar de framräknade minsta acceptabla defektstorlekarna.

SSM anser att även om skadetåligheten får anses som relativt god behöver dock SKB i kommande steg av sitt program via en kvalificeringsprocess visa att man med oförstörande provning (OFP) vid tillverkningen förmår detektera, karaktärisera och storleksbestämma de defektstorlekar som är framtagna i samband med skadetålighetsanalyserna. SSM noterar att svälltryckslastfallen inte utgör de mest begränsande fallen för att detektera defekter i insatsen jämfört med skjuvlastfallet (avsnitt 5.10 i denna granskningsrapport).

4.12 Kopparkapselns förmåga att motstå långsamma krypbelastningar

I KBS-3-konceptet är det segjärnsinsatsen som fungerar som lastbärande komponent medan det omgivande kopparhöljet har en funktion som korrosionsbarriär. För att säkerställa segjärnsinsatsens funktion har emellertid kopparhöljets deformation i samband med att buffertmaterialet sväller och att ett grundvattentryck byggs upp en betydelse. Då dessa yttre tryck anbringas på kapseln deformeras kopparhöljet till dess att kopparhöljet kommer i kontakt med segjärnsinsatsen. Eftersom att de mekaniska lasterna kommer att byggas upp under mycket långa tider behöver kopparmaterialet visas ha tillräcklig brottförlängning under långsamma deformationshastigheter, så kallad krypduktilitet. Tiden det tar för kopparhöljet att komma i kontakt med segjärnsinsatsen varierar mellan olika deponeringshål beroende på olika tidsskalor för uppbyggnad av isostatisk last som ett resultat av buffertens svällning och uppbyggnad av grundvattentrycket samt att plastisk deformation skiljer sig väsentligt beroende på temperaturen och tiden efter slutlig förslutning. Efter den inledande lastsituationen med isostatisk belastning kan en delmängd av alla kapslar bli utsatt för mer svårartade laster i form av skjuvning som ett resultat av stora jordskalv. Dessutom i en avlägsen framtid kommer de isostatiska lasterna att öka markant från ett omgivande tryck på ca 15 MPa orsakat av kombinationen svälltryck och grundvattentryck till tryck i storleksordningen 45 MPa som ett resultat av ytterligare påverkan från en inlandsis ovan slutförvaret. Deformation av kapseln i samband med dessa lastfall behandlas i kapitel 5 i denna granskningsrapport (avsnitt 5.9 och 5.10).

SKB har med avsikten att förbättra kopparens krypegenskaper valt en fosforlegerad koppar med ett fosforinnehåll på ca 30-100 ppm. Krypningen har i första hand en betydelse för kapselns säkerhetsfunktion att motstå isostatiska laster i slutförvarsmiljön. I



detta avsnitt sammanfattas och granskas SKB:s experimentella verksamhet, teoribildning och matematiska modelleringar kopplat till kopparkapselns deformation och krypning.

På begäran av SSM har SKB inom detta granskningsområde tagit fram följande kompletterande information:

- SKBdoc 1399615. Svar till SSM på begäran om förtydligande rörande krypdeformation för kapseln
- SKBdoc 1371849. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kapselns mekaniska integritet (frågorna 5 och 16)
- SKBdoc 1399768. "Analysis of creep in the KBS-3 copper canister due to internal and external loads"
- SKBdoc 1417069. "The role of phosphorus for mechanical properties in copper"
- SKBdoc 1419643. "Analysis of canister with unfavourable pressure load"
- SKBdoc 1457514. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande fosfors inverkan på koppars krypegenskaper
- SKBdoc 1458607. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande krypprovning och modellering
- SKBdoc 1452923. Svar till SSM på frågor i protokollet från kapselavstämningsmötet 25 juni 2014 (fråga 7 och 8)
- SKBdoc 1393179. A constitutive model for texture dependent deformation hardening and pressure dependent initiation of ductile failure in metallic materials
- SKBdoc 1496935. Svar till SSM på begäran om förtydligande angående krypmodell för OFP-koppar och implementering av modellen i Abaqus.

4.12.1 Experimentella studier av koppars krypegenskaper

4.12.1.1 Underlag från SKB

SKB:s rapport TR-09-32 innehåller en beskrivning av SKB:s arbete med att karaktärisera kopparens krypegenskaper samt en sammanfattning av SKB:s samtliga utförda krypprovningstester sedan slutet av 1980-talet (tabeller 14-1 till 14-9). I dessa tester undersöks provstavar av koppar i en krypprovmaskin, och resultaten åskådliggörs i en krypkurva som visar den totala töjningen som funktion av tiden. Krypprovningssmaskinen är utrustad med en ugn för temperaturkontroll och den dragspänning som provstavarna utsätts för regleras via vikter som fästs vid en hävarm. En begränsande faktor vid krypprovning är att tester som är utförda vid realistiska spänningar och temperaturer för slutförvarssituationen resulterar i orimligt långsamma deformationsförlopp och att praktiskt användbara resultat är svåra att få fram under rimlig tid. Försök som SKB har genomfört avser därför accelererad krypprovning vid högre temperaturer och högre spänningar än vad som kan förväntas i slutförvarsmiljön (SKB TR-09-32, avsnitt 3.6). De längsta försöken som SKB har genomfört har varat i några år. SKB anger att extrapolation av resultat från krypprovning vid olika temperaturer kompliceras av att mekanismerna för deformation av koppar är annorlunda i olika temperaturintervall och spänningsnivåer.

SKB:s första krypprovningsstudier gjordes på en högren syrefri koppar benämnd Cu-OF. Emellertid observerades vid dessa försök att krypbrottsförlängningen för detta material i ett flertal fall understeg 1 % vid temperaturer runt 200°C. Denna låga krypduktilitet var enligt SKB oacceptabel för att säkerställa kopparkapslarnas förmåga att deformeras på ett gynnsamt sätt i slutförvarsmiljön och i förlängningen för att säkerställa kopparhöljets funktion som korrosionsskyddande barriär i KBS-3 konceptet (SKB TR-09-32). Vid beaktande av den låga krypduktiliteten för Cu-OF beslutades på ett tidigt stadium att detta material inte kunde användas för slutförvaring av använt kärnbränsle. Baserat på att positiva erfarenheter erhållits för koppar som legerats med fosfor i tryckkärl valde SKB istället att använda detta material för kapselns kopparhölje. För att minska risken för



väteförspädning och för att förbättra materialets deformationsegenskaper valdes syrefri koppar med en fosforhalt mellan 30-100 ppm. Detta material benämns Cu-OFP.

SKB påbörjade efter valet av Cu-OFP som material för kapselhöljet ett stort antal kryptester vid olika kombinationer av temperatur och spänning. Resultaten visade att deformationsegenskaperna var betydligt bättre med krypbrottsförlängningar ungefär i intervallet 10 – 60 %. För temperaturer under 300°C var krypbrottsförlängningarna 30-50 %. Vid de tidiga testerna så uppmättes dock inte den ofta betydande initiala deformation vid pålastningen varför resultat från tidiga och sena kryptester inte är fullt jämförbara. En annan omständighet är att de flesta krypprovningar av praktiska skäl åtminstone vid något tillfälle avlastades för att sedan återstartas under testets gång.

Efter att generellt goda krypdeformationsegenskaper för Cu-OFP hade bekräftats påbörjades ett arbete med att studera inverkan av specifika faktorer som fosforhalt, kornstorlek och svavelhalt. Den sistnämnda faktorn identifierades som viktig med tanke på att en med fosfor analog ackumulation av svavel i korngränserna befarades försämra snarare än förbättra kopparens krypegenskaper. Svavel är således att betrakta som en förorening i detta sammanhang. Resultaten visade inte på några stora systematiska skillnader mellan proverna förutom att de bekräftade de sämre deformationsegenskaperna för koppar utan fosfor och att sämre egenskaper kunde konstateras för koppar med kornstorlekar runt 2 000 µm. Ytterligare studier genomfördes för att studera svetsgods dels från elektronstrålesvetsning, dels från friktionsomrörningssvetsning. Det visade sig att svetsgods från elektronstrålesvetsning hade sämre egenskaper sannolikt därför att det är förknippat med stora kornstorlekar kring 2 000 µm i jämförelse med 75 µm för gods från friktionsomrörningssvetsning. Reduktionen för kryphållfastheten för svetsgodset i förhållande till övrigt gods var dock liten i båda fallen. SKB konstaterar att kryphållfastheten för svetsgods från friktionsomrörningssvetsning för prover belastade i den radiella riktningen är sämre än de som belastats i den axiella, vilket möjligen kan bero på förekomsten av oxidslinger. SKB anser att denna fråga behöver undersökas ytterligare.

En annan fråga som har varit föremål för experimentella undersökningar är inverkan av kallbearbetning. SKB:s krypprovning av prover med olika nivåer av kallbearbetning visar att denna process konsumerar en del av utrymmet för kopparens plastiska deformation och därför ger upphov till försämringar av krypegenskaperna. Ett exempel är uppkomst av en fördjupning i kapseln som ett resultat av en oavsiktlig stöt som försämrar kapselns mekaniska egenskaper. SKB drar slutsatsen att åtgärder behöver vidtas för att skydda kapseln vid hantering efter tillverkningen.

SKB har även låtit genomföra försök baserat på brottmekanik och CT-provstavar av OFP-koppar (Wu m.fl., 2013). I dessa försök analyserades spricktillväxt från en befintlig spricka vid olika temperaturer. Resultaten visade på spricktillväxt för prover vid temperaturer 175 och 215°C, dock ej för prover vid temperaturer 20 och 75°C.

SKB:s hantering av krypdeformation i SR-site har baserats på ett krav att koppars krypduktilitet ska överstiga 15 % och att brottförlängningen av koppar vid enaxlig dragprovning ska överstiga 40 % (SKB TR-10-14, avsnitt 4.3.2). Krav på krypduktilitet uppnås enligt SKB genom att säkerställa en fosforhalt i intervallet 30-100 ppm samt en svavelhalt som maximalt uppgår till 12 ppm (SKB TR-10-14, avsnitt 3.2.1). SKB anger att verksamheten med krypprovning av OFP-koppar har visat att dessa krav kan uppfyllas (SKB TR-09-32). SKB har i en komplettering till ansökan beskrivit att extrapolation av experimentella krypdata kan göras med en faktor 3-4, vilket innebär cirka 30 år efter deponering. Eftersom att krypegenskaper i slutförvarssammanhang behöver förutsägas under mycket långa tidsrymder upp till hundratusentals år anser SKB att det finns ett behov av fundamentala modeller som beskriver krypmekanismen i kopparhöljet för att

beskriva materialets krypbeteende (SKBdoc 1417069). Frågor kring fundamentala krypmodeller redovisas och granskas i nästföljande avsnitt.

SKB beskriver konceptuellt inverkan av fosfor som att fosfor reducerar korngränsglidningen för syrefri koppar (SKB TR-07-02). SKB har under kompletteringsfasen visat ett något modifierat synsätt genom att fosfor även kan ha en inverkan på lokala krypdeformationer och dislokationsrörelser i korngränser (SKBdoc 1417069). Som ett svar på SSM:s begäran om komplettering har SKB beskrivit pågående utredningar kring mekanismen för fosfors inverkan på syrefri koppars krypduktilitet (SKBdoc 1457514). De viktigaste resultaten från denna forskning är att krypprovad Cu-OFP uppvisar en substruktur bestående av anhopningar av dislokationer, omlastning av krypprov innebär en ny period av primärkryp samt att Cu-OFP-material med hög respektive låg ljuddämpning uppvisar samma krypegenskaper (SKBdoc 1411196). Resultat från krypprovning pekar på att hastigheten för korngränsglidning inte påverkas av fosfor (SKB R-15-14) och inverkan av olika spänningstillstånd har visats beskrivas med framtagna modeller på krypdeformation (opublicerat resultat).

SKB sammanfattar kunskapsläget kring inverkan på fosfor på koppars krypegenskaper som att framsteg har gjorts för förståelsen även på atomär nivå (SKBdoc 1457514), men att den exakta mekanismen för hållfasthetshöjningen i korngränserna inte är klarlagd. SKB:s program för forskning under de närmaste åren innefattar:

- Experiment och modellering för studier av inverkan av fosfor inklusive framtagande av konstitutiva ekvationer, med inslag av modellering från atomär nivå till provstavar, fullstora kapslar samt kristallkorn och cellstrukturer
- Ab-initio-beräkningar för att studera inverkan av lösta atomer med vakanser, dislokationer respektive korngränser
- Modellering av diffusion i koppar av fosfor, vakanser och dislokationer
- Studier av segregering av element med TEM och SIMS analyser av korngränser
- Krypprovning i kombination av metallografiska undersökningar
- Modell för inverkan av kallbearbetning
- Teoretiska förklaringsmodeller för skillnad mellan OF- och OFP-koppar utan empiriska korrektionsfaktorer.

4.12.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har bedrivit en systematisk experimentell verksamhet för att ta fram kunskap kring kopparens deformationsegenskaper. SSM konstaterar emellertid i likhet med SKB (SKBdoc1417069) att det är svårt att extrapolera OFP-Cu krypegenskaper hundratusentals år baserat på krypprov som endast pågår något eller några år utan tillgång till fundamental processförståelse. SSM håller med SKB att utveckling av fundamentala modeller (SKBdoc 1417069) är av mycket stor betydelse för att med hög tillförlitlighet kunna beskriva kopparhöljets krypdeformation efter deponering. Resultat från krypprovning under olika temperatur och spänningsförhållanden har dock under många års tid givit en viss grundläggande processförståelse som behövs för att identifiera kvarstående kunskapsluckor. Exempel på områden inom vilka kunskap har tillkommit är t.ex. svetsgodsets krypegenskaper, inverkan av kornstorlek samt inverkan av kallbearbetningsgrad. Enligt SSM:s bedömning är det rimligt att SKB i sitt fortsatta arbete även fortsättningsvis utgår från fosforlegerad koppar även om en slutlig bedömning av lämpligheten av detta material behöver göras i samband med en ansökan om att ta slutförvaret i provdrift med utgångspunkt från den kunskapsbas som finns då. SSM kan t.ex. inte utesluta att ytterligare och/eller justerade acceptanskriterier och materialspecifikationer behöver tas fram i senare skeden.

SSM anser att SKB:s fundamentala krypmodell (Sandström, 2012) som utgår från OF-Cu inte har baserats på en konceptuell modell för inverkan av fosfor (SKBdoc 1417069).

Inverkan av fosfor med avseende på krypdeformation görs istället genom att komplettera SKB:s fundamentala krypmodell med den empiriskt framtagna $\dot{\epsilon}$ -faktorn. SSM anser att då koppar avsiktligt legeras med fosfor för att säkerställa en tillräcklig krypduktilitet, är SKB:s användning av den empiriska $\dot{\epsilon}$ -faktorn i den nuvarande modellen ett otillfredsställande inslag (SKBdoc1417069). SSM anser vidare att SKB:s fundamentala modell innehåller ytterligare parametrar q_1 och q_2 som kan betraktas som empiriska, eftersom SKB inte redovisat bakgrunden till dessa parametrar eller i vilken utsträckning dessa förändras då koppar legeras med fosfor. SKB använder den teknologiska spänningen och inte den sanna spänningen i sin krypmodell, vilket behöver en fysikalisk förklaring och motivering. SSM bedömer att den krypmodell som SKB för närvarande använder inte kan anses som fundamental och utan anpassningsparametrar (SSM Technical Note 2015:52). Detta medför att det för närvarande är svårt att bedöma tillförlitligheten på resultat från SKB:s modelleringsresultat för krypdeformationer vid långa tider överstigande ca 100 år. Inverkan av fosfor på krypduktiliteten har av SKB beskrivits vara orsakad av att fosfor reducerar korngränsglidning för syrefri koppar (SKB TR-07-02). Andra experimentella resultat baserat på uppmätningar av korngränsglidning för syrefri koppar med olika fosforhalter (Pettersson, 2010) ger dock anledning att överväga alternativa förklaringar till hur fosfor påverkar koppars krypegenskaper. Det har i litteraturen förekommit viss kritik mot dessa resultat baserat på att provtiderna som använts har ansetts varit för korta (Sandström och Wu, 2013). Pettersson har emellertid jämfört Sandströms krypmodell både med avseende på max-last och krypsprödhet och finner att resultat OF-Cu (ej fosforlegerad syrefri koppar) i Petterssons undersökning av korngränsglidning är i överensstämmelse med krypmodellen (SSM Technical Note 2016:02). Uppmätta nivåer på korngränsglidning är av samma storlek som de som redovisas i SKB:s motsvarande studie (SKB R-15-14).

Det senaste inslaget inom detta område är nyligen publicerade resultat från två kryptester med OFP-koppar vid 125°C (SKB R-15-14). Vid testerna undersöktes omfattningen av korngränsglidning genom att kopparytorna polerades och ristades på samma sätt som i den ursprungliga undersökningen (Pettersson, 2010). Efter testerna analyserades ytorna med hjälp av svepelektronmikroskop. Proverna undersöktes en första gång efter ungefär 3 % total töjning och sedan efter ungefär 20 %. Vid det första tillfället uppmättes korngränsglidning om 1 μm och i det andra om 5 μm . Överlag kunde dock korngränsglidning bara identifieras vid ett fåtal positioner. Författarna till SKB-studien anser att även om storleken av korngränsglidningen från de båda studierna kan anses vara jämförbara, kan de mindre till antalet funna områden med korngränsglidning i den senare studien möjligen förklaras av lägre töjningshastigheter och större kornstorlekar. Författarna redovisar även resultat som påvisar en avsevärd reduktion av hållfastheten ("softening") då koppar avlastas, vilket inte redovisats tidigare. Detta kan medföra att krypduktiliteten kan reduceras vid avlastning och efterföljande pålastning av kopparkapseln i samband med stora jordskalv (SKB R-15-14).

SSM anser att ingen enskild studie ensam ger tillräckligt entydiga resultat för att varken bekräfta eller avfärda en viss konceptuell förståelse kring fosfors inverkan på koppars krypegenskaper. SSM anser därför att SKB i kommande steg av sitt program behöver genomföra systematisk forskning kring frågan som involverar fortsatta experiment, modellering och metallografiska undersökningar. Detta beror på att KBS-3-metodens kapselutformning behöver, i mer eller mindre grad, baseras på kännedom om koppars deformationsegenskaper. SSM följer det forskningsprogram som SKB planerar inom området. En sammanlagd bedömning av krypdeformationens betydelse för kapselns långsiktiga utveckling behöver dock förutom konceptuell vetenskaplig förståelse även väga in andra faktorer som påverkar hur krypdeformationer behöver utnyttjas för upprättande av kapselns säkerhetsfunktioner.

4.12.2 Teoretisk analys av mekanismer för kryp i koppar

4.12.2.1 Underlag från SKB

SKB:s arbete med teoretisk förståelse kring mekanismer för kryp i koppar sammanfattas i rapport SKB TR-09-32 (kapitel 8-10). Som en del av kompletteringsförfarandet har SKB tagit fram en särskild redogörelse för att motivera förståelse för inverkan av fosfor på kopparens deformationsegenskaper (SKBdoc 1417069). SKB:s utveckling av teoretisk förståelse för kryp finns dokumenterad i ett antal vetenskapliga publikationer. SKB beskriver att krypbrott kan antingen ske duktilt eller sprött genom att kaviteter bildas i materialets korngränser (SKBdoc 1417069). Krypdeformation kan också i viss mån ha en positiv påverkan i och med att mekaniska spänningar i koppar relaxeras i de områden där kopparhöljet har kommit i kontakt med segjärnsinsatsen, vilket kan minska risken för mekanismer så som spänningskorrosion.

SKB beskriver olika faser vid deformation av koppar: (i) primär eller transient kryp som uppstår i anslutning till pålastning med initialt höga kryphastigheter, (ii) sekundär eller stationär kryp, samt (iii) tertiär kryp med snabb deformation innan brott (SKB doc 1417069). Vid höga temperaturer över 400° C är kryp i koppar relaterat till klättring av dislokationer. Vid lägre temperaturer relevanta för slutförvarsmiljön tillkommer glidning som mekanism för dislokationsrörelser som behövs för kopparens deformation (SKB doc 1417069). Eftersom mekanismerna skiljer sig för olika temperatur och spänningsförhållanden försvåras tolkningen av resultat från de accelererade kryptester som har beskrivits i det föregående avsnittet (SKB TR-09-32, avsnitt 3.6). Ytterligare en mekanism som anses ogynnsam är när deformation ger upphov till korngränsglidning. Förekommer detta i högre utsträckning bildas kaviteter mellan korngränserna i de båda stegen kärnbildning och tillväxt. Mekanismen är av stort intresse för kapselns integritet eftersom när deformationsgraden ökar så ökar också graden av kavitation vilket till slut leder till ett sprött krypbrott. SKB uppskattar att materialet brister när andelen kaviteter i korngränserna överstiger 25 % (SKBdoc 1417069).

Ett sätt att skapa en förståelse för sprött krypbrott är att studera SKB:s experiment med icke-fosfor-legerad-koppar som förordades i början på 1990-talet. Metallografiska undersökningar visade på interkristallint brott och kavitation vid så låga temperaturer som 75°C. Man fann att svavel hade ansamlats i korngränserna vilket bidragit till försprödning av materialet (SKB TR-09-32, avsnitt 8.1). Som beskrivits tidigare visade dock nya experiment med koppar med cirka 50 ppm fosfor att kryphållfasthet och krypduktilitet förbättrades markant. SKB betraktar detta som ett tämligen unikt fenomen eftersom effekten är stor även vid tillsats av fosfor i låga koncentrationer. SKB:s förklaring är att fosfor ansamlas i anslutning till dislokationer och korngränser i materialet med en hög anrikningsfaktor och detta minskar dislokationernas rörelser (SKBdoc 1417069). SKB:s slutsats kring segregation av fosfor till korngränser grundar sig också på resultat från ab-initio beräkningar (SKB TR-01-25).

SKB:s teoretiska analys syftar till att skapa förståelse för primär och sekundär kryp vilka bedöms ha betydelse för kapselns integritet. I den första fasen minskar kryphastigheten snabbt som ett resultat av deformationshärdning. I den andra fasen uppstår ett stationärt tillstånd när inverkan av deformationshärdning balanseras av statisk eller dynamisk återhämtning som ett resultat av interaktion av dislokationer. Tertiärt kryp bedöms inte vara nödvändigt att analysera närmare. SKB:s teoretiska modell har baserats på Kocks-Mecking-ekvationen kombinerat med ett uttryck för sekundär kryphastighet (SKB doc 1417069). SKB anför att denna grundläggande modell kan generaliseras till fleraxiella spänningar och kan förutsäga deformation av koppar under olika försöksbetingelser inklusive krypförsök med svetsgodsmaterial (SKBdoc 1417069). Förståelsen för fosfors inverkan på koppars krypegenskaper är dock inte komplett i och med detta och denna



omständighet har hanterats genom att ansätta en kvot för kryphastigheten av OF- respektive OFP-koppar. SKB har i modellering av kopparhöljets långsiktiga utveckling använt andra förenklade modeller för koppars deformation snarare än den grundläggande modellen (SKBdoc 1419643).

SKB har i en komplettering anfört att den framtagna modellen kan betraktas som en fundamental representation av krypdeformation som möjliggör kvantitativa prediktioner som kan extrapoleras till mycket långa tidsskalor (SKBdoc 1417069). Den prediktiva förmågan anses av SKB vara kopplad till grundläggande processförståelse. Extrapolationer baserade på experimentella data anses med de data som SKB har tillgängliga på cirka 8 år vara möjlig till cirka 30 år. Eftersom uppbyggnaden av externt tryck runt kapseln liksom kopparkapselns deformation kan ta betydligt längre tid i förhållandevis täta deponeringshål tillkommer dock behovet av fundamentala kryptmodeller. Behovet kan också kopplas till andra lastsituationer i slutförvarsmiljön som kan tillkomma efter kopparkapselns ursprungliga deformation, så som tillkommande skjuvlaster från framtida stora jordskalv som kan påverka en delmängd av alla deponeringshål.

4.12.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s teoretiska modell för kopparens krypegenskaper för närvarande inte kan betraktas som baserad på fundamentala principer och utan behov av passningsparametrar och måste därför anses vara delvis empirisk. Ett exempel på en empirisk parameter i modellen är fp-faktorn som avser inverkan av fosfor på koppars krypegenskaper. SKB:s konstitutiva modell innehåller ytterligare empiriska parametrar (q_1 och q_2) som SKB inte har redovisat bakgrunden till eller förklarat hur dessa förändras då koppar legeras med fosfor (SSM Technical Note 2015:52). SSM anser vidare att grunden för de gränsvärden för fosfor som SKB har specificerat (30-100 ppm) inte har motiverats i detalj och att det inte heller går att bedöma detta intervall med utgångspunkt från SKB:s fundamentala kryptmodell eftersom fosforhalt inte ingår som en parameter.

Betydelsen av hur inverkan av fosfor omhändertas i modellen kopplar till frågan om befintliga experimentella data ger en tillräcklig förståelse av på vilket sätt fosfor inverkar på kopparens långsiktiga krypegenskaper. Så som påpekas av en av SSM:s externa experter inom området så kan förekomsten av en låg kryptduktilitet i OFP-koppar av samma typ som detekterats för OF-koppar inte helt uteslutas om inverkan av fosfor inte kan förklaras (SSM Technical Note 2016:02). För att kunna ta fram mer välunderbyggda fundamentala kryptmodeller finns ett fortsatt behov av ytterligare studier av under vilka förutsättningar låg kryptduktilitet kan ske i OFP-koppar för prover som utsätts för dragspänningar snarare än skjuvspänningar (SSM Technical Note 2012:13).

Enligt SSM:s bedömning krävs en fundamental förståelse för kryptmekanismer för att säkerställa en tillräcklig kryptduktilitet i de aktuella tidsskalorna. En tydligare koppling mellan återmättnadsprocessen och kapsel deformation medför sannolikt en reduktion av parameterrymden då tidsförlopp och deformationsomfattning med större noggrannhet förväntas kunna bestämmas. Det är av stor betydelse att kvarstående konceptuella och parametriska osäkerheter inte medför en betydande risk för tidiga kapselbrott.

4.12.3 Finita element-modellering av kryp och kapseldeformation

4.12.3.1 Underlag från SKB

SKB beskriver översiktligt deformation av kopparkapslarna i kapselprocessrapporten (SKB TR-10-46, avsnitt 3.4.3) samt mer detaljerat i designanalysrapporten för kapseln (SKB TR-10-28). Två kompletterande modelleringsstudier har dessutom tillkommit efter ansökanstillfället (SKBdoc 1399768; SKBdoc 1419643).

Kopparhöljets deformation drivs initialt av att segjärnsinsatsen av tillverknings-skäl är något mindre än höljet med ett totalt gap på maximalt 3,1 mm och 3,5 mm i de axiella respektive radiella riktningarna. SKB har i analyser förutsatt att dessa gap är jämnt fördelade. Inför ansökan har SKB modellerat deformationsförloppet med finita elementmetoden baserat på mjukvaran Comsol Multiphysics (SKB TR-09-32, avsnitt 11.1) genom att ansätta ett omgivande tryck på 15 MPa och en temperatur på 80 °C. Spänningar runt 150 MPa uppträder initialt vid höljets inre vägg som också utsätts för de största töjningshastigheterna via plastisk deformation. Efter en tid blir spänningarna mer homogent fördelade tvärs kopparhöljets vägg och kapseln fortsätter deformeras långsamt via kryp. Kopparhöljet blir något timglasformat och efter en tid kommer höljet i kontakt med insatsen både längs kapselns sidor och vid kapselns topp och botten. Deformationen fortsätter via kryp i mer långsam takt som ett resultat av böjspänningar i hörnen av kapseln längs radien av kapselns lock och botten. Det är denna del av kapseln som utsätts för de största spänningarna. SKB räknar med att de maximala spänningarna i kapseln avtar med en hastighet som ungefär motsvarar logaritmen av tiden. Enligt denna modellering har deformationen nästan helt avstannat efter 10 år med en maximal deformation vid hörnen på cirka 12 % och en deformation längs kapselns sidor på cirka 0,3 %. Enligt SKB har primärkryp en stor betydelse för deformationen, vilket visats via jämförelser med tidigare modeller som enbart beaktat sekundär eller stationär kryp. Temperaturen och svälltrycket är känsliga faktorer. SKB räknar med att gapet sluts efter ett år efter pålastning från buffertens svälltryck om temperaturen är 85°C, medan tiden för deformationsförloppet är 10 år vid 75°C och 100 år vid 65°C. Högre svälltryck leder till ett mycket snabbare deformationsförlopp även om inverkan är mindre än vad som tidigare förmodats beroende på bidraget från primärkryp.

Ytterligare beräkningsfall avser inverkan av ojämn svällning på såväl kopparhöljet som segjärnsinsatsen. SKB har identifierat ett lastfall som ska illustrera inverkan av böjspänningar på kopparhöljet orsakade av belastningsskillnader i kapselns axiella riktning samt ett som avser högre buffertdensitet direkt under kapseln jämfört med direkt över (SKB TR-09-32, avsnitt 11-4, SKBdoc 1206894). I det sista fallet blir den plastiska deformationen mer omfattande, cirka 2 % vid toppen av kapseln med krypdeformation i liten omfattning. SKB drar slutsatsen att inget av dessa fall ger upphov till kapselskador. SKB har räknat på den deformation av koppar som krävs med beaktande av skillnader i den termiska utvidgningskoefficienten för koppar och segjärn, samt avsvältningsförloppet som ett resultat av avklingningen av det använda bränslets resteffekt. Eftersom koppars värmeutvidgningskoefficient är högre än motsvarande för segjärn skulle avsvältningsförloppet kunna ge upphov till deformationer i kopparhöljet. SKB antar i denna analys att gapet mellan hölje och insats är slutet redan vid början av analysen och att temperatursänkningen är 90°C. En överslagsberäkning antyder att deformationen på grund av dragspänningar är cirka 0,05 % vilket är väsentligt lägre än koppars krypduktilitet och SKB drar därav slutsatsen att inte heller detta fall kan påverka kapselns integritet (SKB TR-10-46, avsnitt 3.4.4).

SKB har genomfört ytterligare två studier av kopparhöljets långsiktiga deformation med den generella finita element (FE) koden Abaqus. Krypmodellen och dess implementering i Abaqus beskrivs i SKB-rapporten TR-10-34. Dessa studier syftar till att undersöka



samverkande effekter av inre och yttre belastningar samt att undersöka inverkan av höga isostatiska tryck (45 MPa) motsvarande under en kommande istid (SKBdoc 1399768 version 2), samt att undersöka ogynnsamma lastfall som kan uppstå under återmättnadsförloppet (SKBdoc 1419643). Modellen baseras på elastoplastisk deformation av både hölje och insats med spännings-töjnings-egenskaper för respektive material.

I den första kompletteringen till ansökan (SKBdoc 1399768/2.0) redovisar SKB ytterligare finita element-analyser av krypdeformationer i kopparhöljet med ett högre isostatiskt tryck på 45 MPa. I FE-analysen har en subrutin (CREEP) använts för att beskriva krypdeformationen av koppar. CREEP är baserad på den krypmodell för koppar enligt angreppsätt B vilket beskrivs i (SKB TR-09-32), det vill säga att kryptöjning är styrd av effektivspänning och inte en tensorformulering av spänningar. SKB anser denna förenkling vara rimlig men anger att ingen jämförelse mellan dessa formuleringar har gjorts (SKBdoc 1496935). Vad gäller de konstitutiva materialmodeller som används för att beskriva krypdeformation i koppar bygger dessa på den fundamentala krypmodellen som anges i (SKB TR-09-32). SKB har även visat att förutom sekundärkryp måste primärkryp beaktas i den konstitutiva modellen för att kunna beskriva krypdeformation för kapseln (SKB TR-09-32). Som tidigare nämnts i denna rapport innehåller den konstitutiva modellen för krypdeformation en empirisk faktor f_p för att beskriva inverkan av fosfor. Vidare har SKB använt den empiriska materialmodellen för primärkryp för beräkning av kapselns krypdeformationer, vilken innehåller ytterligare fyra empiriska faktorer, B, n_b , n_p och n_g (SKB TR-09-32). SKB har även utvecklat en fundamental modell för primärkryp (SKB TR-09-32).

Vid beräkning av krypdeformationer i kapselns kopparhölje måste fleraxligt spänningstillstånd beaktas. För dessa modeller använder SKB den teknologiska spänningen och inte den sanna spänningen som enligt SKB skulle varit mer naturlig att använda (SKB TR-09-32). I en komplettering till ansökan (SKBdoc 1496935) anger SKB vidare att den teknologiska spänning som används för att korrigera den mekaniska spänningen för beräkning av krypdeformation endast råkar vara lika med den teknologiska spänningen för ett enaxligt belastningsfall. Den teknologiska spänningen beräknas genom att multiplicera den sanna spänningen med en korrektionsfaktor $e^{-e_{eff}^{cr}}$, vilket enligt SKB är en korrektion av steg IV deformationshårdnande (SKBdoc 1496935). I resultaten från FE-beräkningen som redovisas i (SKB doc 1399768/2.0 och 1419643/1.0) beskriver SKB en förenklad analys med skalära effektivspänningar och inte med spänningstensorn som beskrivs i den ursprungliga kryptöjningsmodellen för koppar. Denna förenkling att använda en skalär spänning anser SKB vara rimlig (SKBdoc 1496935).

SKB har även kompletterat ansökan avseende beräkningar av krypdeformationer för kopparhöljet orsakade av buffertsvällning och hydrostatiskt tryck (SKBdoc 1419643/1.0, SKBdoc 1399768/2.0). I (SKBdoc 1399768/2.0) beaktas kapselgeometri, termisk längdutvidgning, jämnt svälltryck och inre övertryck avseende kopparhöljets krypdeformation. För lastfallet med jämn svällning av bufferten blir belastningen på kapseln orsakad av buffertens svällning och grundvattentrycket 15 MPa vilket ansätts till att ta 10 respektive 100 år efter deponering. Svälltrycket modelleras som ett yttre tryck, då buffertmaterialet inte är med i FEM-modellen. Vidare ansätts en högre isostatisk last (45 MPa) orsakad av en vattenpelare till följd av förekomsten av en inlandsis och buffertens svälltryck. Baserat på dessa förutsättningar redovisas att kryptöjningar förekommer genom hela godstjockleken i övergången mellan kopparlock och kopparrör efter 100 000 år. Det förekommer även kryptöjningar i det FSW-svetsade området med utsträckning av ungefär halva tjockleken av röret (SKBdoc 1399768/2.0). Storleken på dessa kryptöjningar är mellan 0,8 och 3 %.

Lastfallet som beskriver inverkan av inre övertryck i kapseln baseras på initialt övertryck av argon i insatsen, bildande av heliumgas i samband med radioaktivt sönderfall och bildande av vätgas från korrosionsprocesser i kapseln (SKBdoc 1333208/2.0). Trycket i kapseln redovisas öka till cirka 5 bar 10 år efter förslutning av kapseln. Detta tryck redovisas därefter vara konstant till 10 000 år varefter en tryckstegring sker till cirka 6 bar 100 000 år efter förslutning.

Resultat från beräkningar visar att övertryck av helium i kapseln resulterar i lokalt förhöjda krypdeformationer (cirka 5 %) vid spalten mellan kopparlock och kopparrör (SKBdoc1399768/2.0). Vid beräkningar av kryptöjningar orsakade av inre övertryck har SKB på kapselns lock applicerat ett svälltryck på 15 MPa, 10 år efter förslutning. Enligt SKB motsvarar detta simulerade belastningsfall svårigheter med att applicera buffertmaterial vid urtaget (lyftflänsen) i kopparlocket och att det radiellt verkande mottrycket inte utbildas på grund av att buffertmättnaden sker inhomogent. Detta fall är enligt SKB gränssättande för belastningarna på flänsen (SKBdoc 1371849). Enligt SKB:s analyser ger detta upphov till att lokala töjningar motsvarande 5 % uppkommer i området vid svetsen (SKBdoc 1419643). I (SKBdoc 1379643) har även ett belastningsfall simulerats där tillflöde av vatten längs hela kapselns mantelyta förekommer vilket ger upphov till ett radiellt svälltryck på kapselns utsida och en samtidig axiell expansion av bentoniten. Detta belastningsfall medför att en axiell skjuvspänning bildas på kapselns utsida vilken adderas till böjspänningen på locket då inget mottryck utbildas på lyftflänsen på grund av inhomogen radiell återmättnad. Denna lastsituation ger upphov till en plastisk töjning på cirka 6 % i ett område vid övergången mellan rör och lock (SKBdoc 1419643). SKB anser att plastiska töjningar i den storleksordning som sker i dessa beräkningsfall inte hotar kopparrörets integritet då brottförlängningen för koppar är minst 50 % (SKBdoc1419643).

4.12.3.2 SSM:s bedömning

SKB konstaterar inledningsvis att resultat från krypberäkningar som SKB redovisat vid ansökanstillfället och som SSM sammanfattat ovan (SKB TR-09-32) har bedömts vara icke granskningsbar på grund av ofullständig redovisning. SKB:s förnyade analys av kopparhöljets deformation som inkommit som ett resultat av kompletteringsbegäran har dock blivit dokumenterad i högre utsträckning och har därför kunnat utnyttjas som granskningsunderlag (SKBdoc 1419643/1.0; SKBdoc 1399768/1.0; SKBdoc 1399768/2.0).

Det är av stor betydelse att en tillräckligt hög geometrisk upplösning tillämpas vid modellering av kapselns långsiktiga deformationsförlopp eftersom lokala töjningar kan påverka höljets integritet. SSM bedömer att detta delvis har uppnåtts. SSM anser dock som tidigare har beskrivits i detta kapitel att empiriska inslag i krypmodelleringen försvårar en bedömning av beräkningsresultatets tillförlitlighet. SSM anser vidare att SKB i samband med implementeringen av krypmodellen i Abaqus har infört ytterligare empiriska parametrar B , n_b , p_b och g_{rate} , vilket medför att modelleringen av krypdeformation med tid blir ännu svårare att bedöma. Dessutom anser SSM att SKB i samband med implementeringen av krypmodellen i Abaqus inte har redovisat hur användningen av dels skalära spänningar, dels en reduktion av spänning med en faktor $e^{-\epsilon_{eff}^{CT}}$, påverkar storleken på utbildade krypdeformationer. SKB:s beräkningar visar att kryptöjningar som har stor betydelse för kapselns integritet uppträder i övergången mellan lock/botten och kopparröret.

SKB:s resultat för isostatlastfallet har visat att kryptöjning i någon omfattning förväntas ske genomgående i området vid övergången mellan lock/botten och kopparrör samt inom halva kopparrörets tjocklek inom det svetsade området (SKBdoc 1399768). Omfattande krypdeformationer sker i små områden kring svetsroten och i slitsen mellan lock/botten



och kopparrör, vilka enligt SKB är för små för att möjliggöra sprickpropagering. SSM bedömer att de hittillsvarande resultaten visar på behov av specificerade tillverkningsstoleranser vid serietillverkning och verifikation av dimensionerna för hölje och insats vid inkapsling av använt kärnbränsle.

SSM anser att en elastisk-plastisk materialmodell används vid beräkningar som redovisas i (SKB1419643/1.0), snarare än en krypmodell.

Enligt SSM:s bedömning ger SKB:s beräkningskapacitet i nuläget en ungefärlig uppfattning om krypdeformationernas storlek och vilka delar av kapseln som är mest påverkade. SSM anser dock att de nuvarande beräkningsmodellerna inte ger tillräcklig precision för att verifiera tillräcklig krypduktilitet för den i ansökan redovisade kapselutformningen. Denna slutsats har sin bakgrund i de kvarstående osäkerheterna kring kopparens långsiktiga krypegenskaper som diskuterats ovan. SKB behöver redovisa uppdaterade beräkningar som täcker in en mer fullständig uppsättning av lastsituationer som kan uppstå i slutförvarsmiljön, inverkan av de osäkerheter som då eventuellt kvarstår kring kopparens krypegenskaper, samt inverkan av geometriska osäkerheter kring kapselkomponenternas dimensioner.

SSM bedömer att de tider när krypdeformation förväntas inträffa behöver analyseras betydligt mer utförligt. SKB:s egen detaljerade studie kring återmättnadsförlopp i olika kategorier av deponeringshål visar att tiden fram till att alla deponeringshål har återmätts varierar från några 10-tals år till flera 1000 år beroende främst på eventuell förekomst av vattenledande sprickor, bergmatrisens hydrauliska konduktivitet samt inverkan från den störda zonen (SKBdoc 1415879). Tidsskalan har stor betydelse för uppbyggnaden av isostatisk last. SKB utgår emellertid i nuvarande modellering endast från två fall varav ett med full återmättnad efter 10 år och det andra efter 100 år. Osäkerheter kring kopparhöljets deformation i deponeringshål med de snabbaste återmättnadstiderna är förmodligen av begränsad betydelse, men förloppet i deponeringshål med långsam återmättnad behöver enligt SSM:s bedömning utredas ytterligare.

SSM anser att SKB behöver uppmärksamma fall där kapseln deformation är laststyrd snarare än förskjutningsstyrd exempelvis då kapseln enbart påverkas av inre övertryck (SSM Technical Note 2015:52). Laststyrda belastningar kan enligt SSM medföra större krypdeformationer jämfört med förskjutningsstyrda laster. SSM anser även att beräkningar av laststyrda fall bör baseras på en materialmodell som innefattar krypdeformationer. Det kan röra sig om deponeringshålspositioner i omgivande bergmatris med mycket låg hydraulisk konduktivitet utan buffertsvällning (SKBdoc 1415879) och deponeringshål med ojämn buffertsvällning, om man inte genom ytterligare undersökningar kan utesluta att sådana förhållanden förekommer. Tidsmässigt handlar det dock inte om när bufferten har blivit helt återmättad utan snarare den tid det tar för att bygga upp ett yttre svälltryck från bufferten som överstiger kapseln inre övertryck (SKBdoc 1415873).

Enligt SSM:s bedömning behöver SKB:s beräkningar av kapseln krypdeformation baseras på konstitutiva materialmodeller för koppar som har motiverats i högre utsträckning än vad som för närvarande är fallet. Det kan exempelvis nämnas att den fundamentala modellen för primärkryp inte har utnyttjats vid beräkningar av krypdeformation, och inte heller varför kryptöjningar kan anses vara styrda av skalära effektivspänningar snarare än tensorformulering av spänningar. Av stor betydelse är dessutom att användning av empiriska faktorer i fundamentala krypmodeller bidrar till osäkerheter vid analys av krypdeformationer som sker i mycket långa tidsskalor. SSM anser vidare att SKB mer utförligt behöver motivera användning av teknologiska spänningar snarare än sanna spänningar vid krypmodelleringen som enligt SKB hade varit mer naturliga att använda (SKB TR-09-32).

4.12.4 SSM:s sammanfattande bedömning av inverkan av kryp för kopparhöljets långsiktiga integritet

SKB:s hantering av kapselns krypdeformation i säkerhetsanalysen SR-Site inklusive dess kompletteringar innefattar bland annat följande moment:

- Specifikation av lastsituationer i slutförvarsmiljön, homogena svälltryck, inre tryck, uppbyggnad av grundvattentryck på försvarsdjup samt värsta fall för tänkbara inhomogena svällningsförlopp
- Konstruktion och detaljutformning av kapsel som ger kapselns geometri och tillsammans med beaktande av tillverkningstoleranser samt de relevanta lastfallen, de maximala lokala töjningar som behöver kunna hanteras
- Kravställning av högsta tillåten krypdeformation för koppar baserat på experimentella studier och teoretisk förståelse
- Framtagning av fundamentala modeller för krypdeformation för att understödja förståelse för krypprocesser och modellering i långa tidsskalor
- Matematisk modellering av kapselns långsiktiga deformation, samt kontroll av att maximal krypdeformation inte överskrider i någon del av kapseln.

Andra lastsituationer så som extremt höga isostatiska laster samt skjuvbelastning behandlas i kapitel 5 i denna granskningsrapport.

Sammanfattningsvis bedöms SKB baserat på modellering av kopparhöljets långsiktiga deformation, krypprovning och förståelse för krypmekanismer redovisat i framtagna kompletteringar ha en lämplig strategi för demonstration av tillräcklig krypduktilitet hos kopparhöljet. SSM anser dock att det inom flera områden fortfarande kvarstår osäkerheter och utvecklingsbehov innan SKB:s analys och vetenskapliga underlag har nått den nivå som skulle krävas för tillverkning och förslutning av kapslar med använt kärnbränsle. Det är av stor vikt att SKB med hög tilltro kan påvisa att krypdeformation av koppar i samband med de lastsituationer som kan uppstå i slutförvarsmiljön inte försämrar kopparhöljets tjocklek. Detta är grundläggande för kapselns säkerhetsfunktioner med tanke på SKB:s föreslagna kapselutformning med en lastbärande insats och en omgivande korrosionsbarriär av koppar.

SSM anser att frågan kring kopparhöljets deformation behöver ses ur ett längre tidsperspektiv på flera tusen år med tanke på deponeringspositioner helt utan vattenförande sprickor. För att utvärdera dessa tidsperspektiv krävs bättre kännedom om parametrar som den intakta bergmatrisens hydrauliska konduktivitet eftersom dessa avgör tidsperspektivet för långsam uppbyggnad av externt tryck runt kapseln i sådant berg. Osäkerheter föreligger kring fundamental förståelse och i synnerhet vetenskapliga förklaringar för hur fosfor påverkar kopparens krypegenskaper och dess krypduktilitet. Dessa osäkerheter får större betydelse ju längre tid det tar innan kopparhöljet har kommit i kontakt med segjärnsinsatsen. SSM anser därför att SKB behöver genomföra experimentell och teoretisk analys av krypmekanismer i koppar samt mer utförlig karaktärisering av förhållanden i berggrunden. Sådana utredningar och forskning bör kunna ge mer tillförlitlig information kring dels i vilken omfattning kopparhöljet kan deformeras utan att riskera kapselns säkerhetsfunktioner, och dels vilket tidsförlopp som behöver beaktas med tanke på varierande förhållanden i berggrunden.

Enligt SSM:s bedömning behövs också mer information från kapseltillverkning så som vilka tillverkningstoleranser som kan uppnås vid serietillverkning. Det behöver också preciseras vilken kontroll av kapselkomponenternas dimensioner som behöver göras i samband med tillverkning för att säkerställa gapet mellan insats och hölje samt att kopparhöljet inte kommer att kunna deformeras mer än vad som anses vara säkert vid tidpunkten för tillverkningen. SKB behöver beakta att hantering och deponering av kopparkapslar kan medföra en excentrisk placering av segjärnsinsatsen inuti kopparhöljet.

SKB:s matematiska modellering av deformationsförloppet för fullstora kapslar har utvecklats med en högre upplösning och detaljeringsgrad. I SKB:s modelleringar har höga lokala kryptöjningar konstaterats, men SKB har motiverat detta med att dessa töjningar avser mycket små områden och dessutom är i områden av kapseln med tryckspänningar snarare än dragspänningar. SSM anser dock att det finns ett stort utvecklingsbehov kopplat till både hur randvillkoren har omhändertagits och kring representationen av fundamentala kryppprocesser. Det behövs mer utförliga analyser som visar att tänkbara lastsituationer har beaktats och som illustrerar betydelsen av kvarvarande konceptuella osäkerheter kring OFP-kopparens krypegenskaper och dess kryppduktilitet som funktion av tiden. Enligt SSM:s bedömning bör SKB genomföra känslighetsanalyser för att definiera en minimal kryppduktilitet som kan anses säker för att upprätthålla kapselns täthetskrav.

4.12.5 Den omgivande miljös påverkan på kapselns mekaniska integritet

4.12.5.1 Underlag från SKB

I detta avsnitt granskar SSM hur den omgivande kemiska miljön påverkar kopparhöljet i samband med mekanisk belastning. Beroende på tiden för återmättnad av bufferten kommer perioden fram till 1000 år efter deponering av kapseln att beröra dels egenskaperna innan full återmättnad av bufferten, dels efter mättnad av bufferten. Beträffande redovisning av försprödning efter deponering av kapselns olika material (koppar, segjärn och stål) fanns i den ursprungliga ansökan inga processer redovisade i kapselprocessrapporten (SKB TR-10-46). SKB har dock i den så kallade FEP-rapporten (SKB TR-10-45) adresserat väteförsprödning i FEP:arna C05 och C07 (NEA FEP K2.10). SKB:s motiv för att utesluta dessa FEP:ar är att högttemperaturkrypning och väteförsprödning inte förväntas att påverka materialegenskaperna hos en intakt kapsel.

SKB har efter att SSM begärt komplettering av degraderingsprocessen kompletterat ansökan avseende försprödning av koppar och gjutjärn (SKBdoc 1398013). Den traditionella försprödningsmekanismen för koppar där oxider reduceras med väte till metalliskt koppar och vatten kallas vätesjuka. Denna process utesluts inte av SKB men arbete pågår för att reducera syrehalten i form av stråk av oxidpartiklar som kan förekomma i kopparhöljets svetsar. Vätesjuka kan enligt SKB ske då oxidpartiklar reagerar med vätgas från en extern källa eller med atomärt väte från korrosionsprocesser. SKB anser att den lägesrapport om korrosion av koppar i rent vatten visar att det vetenskapliga stödet för en korrosionsprocess i syrgasfritt vatten som överskrider den som förutsägs av termodynamiska data är svagt. SKB anser därför att korrosion av koppar i rent vatten inte kan vara en betydande orsak till väteinträngning i koppar. SKB har genomfört flera studier av väteladdning av koppar som visar att det endast är möjligt att få in väte ytligt till ett djup av 50 µm. SKB anser därför att SKB inte funnit någon process som genererar tillräckligt med väte för att tränga in i kopparmaterialet i sådan omfattning att det påverkar materialegenskaperna.

SKB har genomfört flera studier avseende väteladdning av koppar och inverkan av väte på kopparmaterialets egenskaper (SKBdoc 1398013). SKB redovisar att ett begränsat antal undersökningar har utförts för att studera inverkan av väte på koppars mekaniska egenskaper. Ett exempel på den klassiska formen av vätesjuka på koppars krypegenskaper finns redovisat för koppar som efter att värmebehandlats i syre vid 800 °C och därefter i ren vätgas vid 600 °C. För att undvika denna form av försprödning används enligt SKB koppar med låg syrehalt (Cu-OF) med eller utan fosforlegering. SKB anser även att det industriellt har blivit demonstrerat att användning av Cu-OF har eliminerat denna process. Förutom reaktion av kopparoxid med väte redovisar SKB att väteabsorption i koppar kan



påverka dess mekaniska egenskaper avseende ökad hårdhet, minskad sträckgräns och brottförlängning (SKBdoc 1420051).

SKB sammanfattar olika metoder för att öka koncentrationen av väte i koppar så som värmebehandling vid hög temperatur i vätgasmiljö och elektrokemisk laddning i en elektrolyt innehållande svavelsyra (SKBdoc1420051). Resultatet från den termiska laddningen visar att temperaturer över 675 °C medför en ökning av vätekoncentrationen medan en temperatur på 600 °C medför en minskad koncentration av väte. Från detta resultat drogs slutsatsen att termisk laddning av väte inte kan göras utan att risk för korntillväxt och därmed modifiering av mikrostrukturen under värmebehandlingsförloppet. Elektrokemisk väteladdning resulterade i betydligt högre vätehalter (100-1 000 ggr) jämfört med termisk laddning (SKBdoc1420051). Vid elektrokemisk laddning erhöles även vätebubblor i materialet ned till ett djup av 50 µm under ytan. SKB har även förfinat modellen genom att ta hänsyn till avgasning efter att elektrokemisk laddning avslutats. SKB anser att väteladdning endast kan förväntas ske under de första 300 åren efter deponering då vattnet i skadat bränsle har utsatts för gammabestrålning med tillräckligt hög intensitet (<1 Gy/h) (SKBdoc1420051). Med denna modell framgår att efter att elektrokemisk laddning avslutats reduceras vätehalten i koppar från 1 vikts-ppm till 10⁻⁵ vikts-ppm på 5 timmar. SKB har i försök att öka förståelsen av väte i koppar genomfört ytterligare ab initio-beräkningar för att studera bindning mellan väteatomer och syreatomer i koppargittret. Resultatet visar att två olika vätefallor, grunda och djupa, så kallade ”traps” förekommer. Väte som förekommer i de djupa vätefallorna är svåra att bli av med, i princip måste materialet vakuum-behandlas vid smälttemperatur. För vätet i de grunda vätefallorna kan vätet lätt avgasas med värmebehandling vid höga temperaturer.

SKB har även försökt att upprepa resultat som publicerats nyligen där elektrokemisk laddning pågick samtidigt som provet belastades (Yagodzinskyy m.fl., 2012), men hittills har dessa försök inte lyckats. SKB har även teoretiskt modellerat elektrokemisk laddning av väte i koppar som beskriver kärnbildning och tillväxt av vätegasbubblor i koppar. Modellen ger enligt SKB en god överensstämmelse mellan observerad storleksfördelning med djupet från ytan.

Sammanfattningsvis har SKB bedömt att elektrokemisk laddning av väte ger upphov till ett tunt lager på cirka 50 µm med förhöjd vätekoncentration (SKBdoc 1420051). SKB anser att koppars mekaniska egenskaper kan förändras i detta tunna lager men eftersom att påverkan avser ett försumbart ytskikt i förhållande till kopparhöljets tjocklek på 50 mm så antas att kopparhöljets mekaniska integritet inte kan hotas. SKB anser vidare att vatten inuti kapseln kommer att ge upphov till väte inuti kapseln och att sulfid i grundvattnet via korrosionsreaktioner kan ge upphov till väteladdning utanför kapseln. Däremot anser SKB att ingen större väteladdning förväntas, detta baserat på att tillgången på sulfid i grundvattnet är starkt begränsat. Korrosionsbidraget enbart från rent vatten är så litet att detta troligtvis inte ger upphov till någon väteladdning. SKB hävdar även att väte som förekommer inuti kapseln kommer att diffundera in i segjärnsinsatsen, men att väte inte kommer att diffundera in i kopparmaterialet eftersom detta kräver temperaturer överstigande 600 °C.

Beträffande inverkan av gammabestrålning av den gjutna insatsen och kopparhöljet redovisar SKB baserat på beräkningar att bestrålningsförsprödning av insatsen inte sker om kopparhalten i insatsen är lägre än 0,05 % (SKB TR-10-46, avsnitt 3.4.6). SKB har kompletterat ansökan med en experimentell undersökning där gjutjärn och en modellegering (FeCu) med 0,08 % koppar bestrålats med gammastrålning som motsvarar minst 40 år i slutförvaret (SKB R-13-50). Accelerationsfaktorn som användes bedömdes för FeCu-legeringen vara cirka en faktor 2750. Resultat från atomsondmätningar visar att



Cu-kluster börjar skiljas ut i modellegeringen men att storleken på dessa är små. För det bestrålade gjutjärnsprovet kunde inga Cu-kluster i atomsondsundersökningen urskiljas. SKB avser att fortsätta de experimentella studierna för att ytterligare verifiera att strålning inte inverkar på gjutjärnets egenskaper.

Statisk och dynamisk deformationsåldring är försprödningsmekanismer för segjärn som kan uppträda under vissa betingelser. Processerna uppmärksammades initialt av Kärnavfallsrådet i sitt yttrande över Fud-program 2016 (SOU 2017:62). SKB kommenterar fenomenens relevans i en komplettering till ansökan (SKBdoc 1602500, SKBdoc 1602640) och beskriver att de är relaterade till plastisk deformation och kan uppträda för vissa kombinationer av temperatur- och deformationsförhållanden i stål och segjärn. Nomenklaturen härleds till huruvida försprödnings av materialet sker under (dynamisk) eller efter (statisk) den plastiska deformationen. Utöver temperaturen påverkas försprödnings omfattning av halten av föroreningar och vissa typer av legeringar i materialet. Segjärnet som används för insatsen är enligt SKB den form av gjutjärn som är mest tålig mot deformationsåldring. I SKB:s underlag redovisas att dynamisk deformationsåldring för segjärn börjar uppträda först vid 200°C och är som mest omfattande vid 400°C medan statisk deformationsåldring inte sker vid låga temperaturer (SKBdoc 1602640). Ur temperatursynvinkel bedömer SKB därför fenomenen vara av liten betydelse. De lastfall som kan uppträda under den period efter förslutning då insatsen är som varmast är av så liten omfattning att plasticering av insatsen ej kan förväntas. Skjuvlastfall som uppträder under den tempererade perioden har en väldigt låg sannolikhet (2×10^{-5} enligt SKB TR-11-01, avsnitt 10.4.5). Skjuvrörelsens hastighet bedöms av SKB enligt tillgänglig litteratur vara för stor för att dynamisk deformationsåldring ska kunna uppträda då processen fordrar en långsammare pålastning. Fenomenet kräver dessutom högre temperaturer än vad som förväntas i slutförvarsmiljön och temperaturutvecklingen vid skjuvrörelsen är bara 1°C (SKBdoc 1353649) vilket bedöms vara försumbart i sammanhanget. Beträffande statisk deformationsåldring är temperaturerna oavsett för låga för att mekanismen ska kunna observeras. SKB:s bedömning är att statisk och dynamisk deformationsåldring inte är äventyrlig insatsens mekaniska egenskaper under de lastsituationer som kan uppstå efter förslutning.

4.12.5.2 SSM:s bedömning

I detta avsnitt bedöms hur miljön i slutförvaret påverkar tåligheten av kapselns kopparhölje och den gjutna insatsen efter deponering. Kapselns mekaniska integritet orsakad av laster från grundvattentryck och buffertens svällning hanteras i avsnitt 4.11 i denna granskningsrapport. Frågor som beskrivs i detta granskningsavsnitt har även en koppling till närvaron av sammanhängande oxidslinor vilket beskrivs i SSM:s bedömning av kapselns initialtillstånd (avsnitt 3.4.5.2).

SSM konstaterar att kopparhöljet är övermättat med väte relativt den termodynamiska lösligheten av väte i koppar, vilket nämns i beskrivningen av SKB:s underlag ovan. Därutöver kommer vätgas att i viss utsträckning bildas från korrosionsprocesser och således finnas i ytterligare överskott i kapselns närhet med risk för inträngning i kopparmaterialet och en potentiell påverkan på höljets mekaniska integritet. SSM konstaterar att det finns studier som visar på att väteinträngning i koppar kan ske i rent, syrgasfritt vatten (Hultquist m.fl., 2015) liksom i gammabestrålat vatten (Lousada m.fl., 2016). I den senare studien kan väte från vattenradiolys tränga in i metallen. Det kan inte uteslutas att tillfört väte föreligger i atomär form och då bör det beaktas att atomärt väte har högre reducerande förmåga än vätgas (Bergh, 1965). Väteladdning av betydande omfattning från gammabestrålat vatten har verifierats under förhållanden med högt strålfält och processen kan också förväntas i mindre omfattning under tidiga faser av slutförvarets utveckling. SSM konstaterar vidare att väteinträngning kan ske som ett resultat av korrosion orsakad av sulfid i grundvattnet vilket myndigheten anser att SKB



behöver närmare redovisa och beakta. I avsnitt 5.11.4 i denna granskningsrapport diskuteras processen korrosion av koppar i rent syrgasfritt vatten som en alternativ konceptuell modell och som sådan betraktad gör SSM bedömningen att väteupptag i kopparhöljet inte helt kan uteslutas i slutförvarsmiljön.

SSM anser att två mekanismer är av relevans för vätes möjliga påverkan på kopparhöljets mekaniska egenskaper. Den första väteförspredningsmekanismen kan betecknas vätesjuka och uppkommer av att väte som tränger in i koptaren reducerar lokalt förekommande kopparoxid och bildar vattenånga (Nieh och Nix, 1980). Det bildade vattnet ansamlas på grund av dess låga mobilitet i koptargittret, typiskt vid korngränser, med förspredning av koptarmaterialet som resultat. Denna process är i synnerhet associerad med förhöjda temperaturer (Louthan, 2008) även om studier påvisat reduktion av Cu(I)O-partiklar vid lägre temperaturer (Hamada, m.fl., 1992). Avseende förekomst av sammanhängande kopparoxider bedömer SSM att kravet på syrehalter som understiger 5 vikts-ppm medför att risken för detta är mycket låg. SSM kan dock konstatera att sammanhängande oxidslingor har påträffats efter FSW-svetsning vilket innebär att oxidreduktion från inträngande väte potentiellt skulle kunna äga rum. SSM har beskrivit det potentiella problemet med sammanhängande oxidslingor i kopparhöljet i kapitel 3 i denna granskningsrapport i avsnittet om kopparhöljets initialtillstånd. SSM bedömer dock att SKB kommit så pass långt i sin utveckling av FSW-metoden att det finns möjligheter att i kommande steg minimera förekomst av sammanhängande oxidstråk i svetsfogen.

Den andra förspredningsprocessen är utskiljning av vätegasbubblor, vilket har observerats och beskrivits i ett antal studier (t.ex. Wampler m.fl., 1976 och Nakahara, 1988) för olika temperaturer och förhållanden. I experiment där koptarmaterialet laddats elektrokemiskt med höga halter väte har vätegasbubblor detekterats upp till 50 µm in från ytan (SKB TR-13-09). I en modell som Martinsson och Sandström utvecklade adderades inflödet av väte i bubblorna till diffusionsekvationen vilket gav en god överensstämmelse med de experimentella resultaten (Martinsson och Sandström, 2012). Detta kan jämföras med resultat från en annan studie av koptars permeabilitet för väte (Horinouchi m.fl., 2013). Här användes en koptarfilm på 0.1 mm och vid 70°C (p=13.3 kPa) observerades att väte diffunderat igenom filmen. Detta visar på att en inträngning av väte på djup större än 50 µm skulle kunna ske.

I en finsk studie (Yagodzinsky m.fl. 2012) studerades den mekaniska påverkan på elektrokemiskt väteladdad koppar och försämrade krypduktilitet och sprickbildning noterades. SKB har försökt reproducera dessa experiment genom Swerea KIMAB utan att mekanisk påverkan kunde observeras i väsentlig omfattning. I (SKB TR-13-09) observerades att efter att laddningen upphörde reducerades väteinnehållet i koptarmaterialet och detta anser SSM vara en viktig observation och relevant för de betingelser som förväntas råda i slutförvarsmiljön. SSM konstaterar dock att numeriska simuleringar indikerar att väte kan påverka stabiliteten av gittervakanser samt att vanligt förekommande föroreningar i koppar, såsom svavel, syre, fosfor och silver även stabiliserar gittervakanser i koppar (Ganchenkova m.fl., 2014). Det kan för närvarande inte uteslutas att viss mekanisk påverkan sker trots avsaknad av oxidföroreningar.

Avseende den av SKB gjorda observationen av vätegasbubblor till ett djup av 50 µm (SKB TR-13-09) skulle vid uppbyggnad av buffertens svälltryck områden med högst krytöjningar genom kopparhöljet hypotetiskt kunna påverkas genom successiv sprickpropagering. SSM bedömer dock detta som mindre sannolikt.

Sammanfattningsvis anser SSM att risken för väteinträngning utgör ett tungt vägande skäl för att minimera risk för oxidföroreningar i kopparhöljet. Andra möjliga mekanismer för hur höljets mekaniska egenskaper påverkas av väteladdning har även identifierats, och bör



belysas dels genom att mekanismer för tillförsel och avgasning av väte i slutförvarsmiljön studeras ytterligare, dels genom mekanisk provning av väteladdad koppar. Denna typ av studier behöver beaktas vid framtagning av uppdaterade dimensionerande hållfasthetsanalyser av kopparhöljets långsiktiga integritet.

Beträffande den gjutna segjärnsinsatsen anser SSM att materialet kan påverkas av gammastrålning. Den redovisning som SKB lämnat visar enligt SSM att klustring av koppar inte sker vid de bestrålningsnivåer som använts. SSM anser att risken för att segjärn kan bli sprödare vid gammabestrålning är låg men att den inte helt kan uteslutas. SSM bedömer att fortsatta bestrålningsförsök av segjärn behöver göras med lägre accelerationsfaktorer samt att bestrålningsnivåer överstigande de som förväntas i slutförvarsanläggningen används. Dessutom anser SSM att inverkan av bestrålning på materialets seghetsegenskaper K_{IC} och J 2mm behöver bestämmas. Segjärnets brottegenskaper används av SKB i defekttålighetsanalysen vilken är beskriven tidigare i denna rapport och är därför viktig, speciellt vid SSM:s bedömning av skjuvlastfallet.

Beträffande deformationsåldring av segjärnsinsatsen anser SSM att SKB:s underlag är godtagbart för att kunna göra en bedömning av relevansen för kapselns mekaniska integritet. SSM delar SKB:s uppfattning att förutsättningarna för att processerna ska kunna ske fordrar temperaturer som inte är att förvänta i slutförvarsmiljö. SSM konstaterar också att brottförlängning av segjärn har studerats av Lui och Chao (1989) och en betydande minskning observeras vid höga temperaturer (300°C). Dragprover utförda av SKB på kapselns segjärn vid 125°C visar att brottgränsen minskar till skillnad från material som uppvisar ett åldringsbeteende. Dessa material uppvisar i stället en ökande brottgräns med ökande temperatur vid de relevanta temperaturerna (Desch, 1944), vilket SSM anser ger ytterligare belägg för att dynamisk deformationsåldring ej förväntas ha betydande effekt på segjärnets mekaniska egenskaper under de relevanta förhållanden som väntas råda i slutförvaret. SSM anser avslutningsvis att risken för att deformationsåldring av segjärnet skulle få en betydelse för segjärnets mekaniska integritet är liten i den förväntade slutförvarsmiljön.

4.13 Inverkan av jordskalv

Detta avsnitt behandlar SKB:s beräkningar av frekvens, sannolikhet och magnitud för jordskalv under de första 1 000 åren. Dessa beräkningar är centrala för uppskattningen av antalet potentiellt skadade kapslar N_{failed} under de första 1 000 åren efter förslutningen. Effekten av glacialt inducerade jordskalv redovisas i avsnitt 5.12 i denna granskningsrapport. Jordskalvens inverkan är central för bedömning av kapselns säkerhetsfunktion att motstå skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshålen (SR-Site huvudrapport, figur 8-2: Can3).

Förutom en potentiell inverkan på kapselns säkerhetsfunktioner så kan inducerade skjuvrörelser i samband med jordskalv under den termiska fasen även resultera i förändringar av bergets transportegenskaper p.g.a. spricköppning, sprickpropagering och spricksammanlänkning som påverkar grundvattnets flödesvägar. Den geohydrologiska utvecklingen redovisas i kapitel 4.5 i denna rapport.

4.13.1 Underlag från SKB

Jordskalvsscenarioet utgör det enda fallet i kategorin ”mindre sannolika scenarier” i SKB:s säkerhetsanalys och är det enda fallet som ger ett kvantifierbart riskbidrag för tiden de första 1 000 åren. SKB anger en risk för kapselbrott på grund av ett tektoniskt skalv vid 1000 år efter förslutning av slutförvaret på $2,4 \times 10^{-5}$, vilket är större än något annat scenariofall under de första 1 000 åren men som leder till en dos som är tiopotenser under dosen för föreskriftgränsen.

SKB redovisar en utvärdering beträffande sannolikhet för jordskalv under de första 1 000 åren efter förslutningen av slutförvaret i SR-Site huvudrapporten (SKB TR-11-01, avsnitt 10.3.5, 10.3.15, 10.3.16, 10.4.5) samt i processrapporten för geosfären (SKB TR-10-48, avsnitt 4.1.3, 4.3). Jordskalvfrekvensen för nutida skalv i Skandinavien har hämtats från tidigare arbeten (SKB R-06-67). SKB bedömer det vara möjligt att utesluta jordskalv som förekommer på stora djup, vilka motsvarar ungefär hälften av alla jordskalv, eftersom dessa inte anses bidra till risken för kapselskada. Enligt processrapporten för geosfären beräknas jordskalvsfrekvensen för momentmagnituder mellan 5,5 och 7,5 (SKB TR-10-48).

Med stöd av jordskalvsfrekvensen uppskattar SKB sannolikheten för ett jordskalv inom en radie på 5 km runt slutförvaret (SKB R-06-67). SKB har genomfört stabilitetsanalyser för att påvisa huruvida deformationszonerna i direkt anslutning till slutförvaret är stabila eller instabila med hänsyn till jordskalv och de antagna spänningsfälten (SKB TR-08-11). Dessa analyser pekar på att antingen en eller fem deformationszoner av 30 möjliga är instabila beroende på spänningsfältet, och kan därmed hysa ett jordskalv. Baserat på avståndet från dessa potentiellt instabila zoner beräknar SKB antalet kritiska sprickor i slutförvaret, dvs. sprickor som kan genomgå en skjuvrörelse lika stor eller större än 50 mm (SKB TR-10-21). SKB bedömer att de flesta potentiellt instabila zonerna ligger på ett avstånd av 600 m eller mer från slutförvaret och att de kritiska sprickorna då har radier större än 225 m. SKB förutsätter att så stora sprickor lätt kan identifieras i tunnlarna och undvikas vid bestämningen av slutförvarets detaljerade layout (SR-Site, avsnitt 10.4.5; SKB TR-08-11; SKB R-06-39).

SKB har uppskattat den maximala jordskalvsmagnituden som kan förekomma vid varje deformationszon i slutförvarsvolymen i Forsmark och baserat på dessa bestämt de minsta sprickstorlekarna som potentiellt kan hysa en skjuvrörelse på 50 mm (SKB TR-08-11, tabell 7-2). Radien för en sådan spricka definieras som ”kritisk” och kritiska radier bestäms med hjälp av dynamiska numeriska analyser för avstånd på 100, 200, 400 och 600 m från deformationszonerna. Den kritiska radien beror även på sprickans stupning på så sätt att den är mindre för flacka sprickor. Om deponeringshålspositionen skärs av sprickor som är lika stora eller större än den kritiska radien för en viss aktiv deformationszon antas skjuvrörelserna vid jordskalvet vara för stora och kapselbrott kan ske. SKB avser att välja bort dessa kritiska deponeringshålspositioner.

Den geologiska modellen för Forsmark beskriver förekomsten av sprickor i bergmassan vid slutförvarsdjupet (SKB TR-08-05, avsnitt 5.6). SKB använder sig av DFN-spricknätverksmodeller (”Discrete Fracture Network”), där sprickornas placering, orientering samt längd kvantifieras, för att simulera den verkliga bergmassan. Baserat på DFN-simuleringarna har SKB uppskattat antalet sprickor som kan skära deponeringshålen i den tilltänkta layouten för slutförvaret. Baserat på fördelningen av avstånd från deformationszonerna har sedan antalet kritiska sprickor för slutförvarslayout D2 bestämts (SKB SR-Site huvudrapport, tabell 10-17 och 10-18; SKB TR-10-21).

Sprickorna som kan hysa en skjuvrörelse lika stor eller större än 50 mm är mycket större än deponeringstunnelns tvärsnittsarea. Kritiska sprickor i tunnlarna eller i



deponeringshålen kan därför inte skiljas från icke-kritiska sprickor. För att säkerställa att så få kritiska sprickor som möjligt förbises vid slutförvarets uppförande väljer SKB att välja bort alla deponeringshålspositioner som skärs av branta sprickor som kan följas runt deponeringstunnelns periferi.

Deponeringspositioner som träffas av branta sprickor som skär hela tunnelkonturen sovras bort av SKB:s s.k. FPI-kriteriet (Full Perimeter Intersection). Beträffande flacka sprickor har SKB satt upp ett kriterium med innebörden att om fem eller fler intilliggande deponeringshål skärs av en och samma flacka spricka kommer dessa deponeringshålspositioner att förkastas. Detta kriterium kallar SKB EFPC-kriteriet (Extended Full Perimeter Criterion; SKB TR-10-21). Genom att tillämpa dessa kriterier anser SKB att deponeringshålspositioner i anslutning till de flesta längre sprickor som kan hysa skjuvrörelser lika stor eller större än 50 mm kan väljas bort. Vissa kritiska deponeringshålspositioner kan trots användningen av dessa kriterier undgå upptäckt vilket huvudsakligen beror på att det är svårare att upptäcka längre flacka sprickor och kritiska positioner vid deponeringstunnelnarnas mynning mot huvudtunneln eller vid tunnelsluten (SKB TR-11-01, tabell 10-17 och 10-18).

Jordskalv som sker längs med deformationszonerna i närheten av slutförvaret kan generera sekundära skjuvrörelser längs med befintliga bergsprickor i direkt anslutning till slutförvaret. SKB kopplar risken för brott av kapselns kopparhölje samt järninsats med skjuvbelastning inducerad av jordskalv. SKB bedömer att kapselbrott i anslutning till jordskalv endast kan ske när deponeringshålen skärs av sprickor som potentiellt kan hysa skjuvrörelser som överstiger kapselkriteriet på 50 mm, oavsett om skjuvrörelsen på 50 mm sker kumulativt över en lång tid eller momentant vid en enda större händelse (SR-Site, SKB-TR-11-01, avsnitt 10.4.5). Storleken för sekundära skjuvrörelser beror enligt SKB:s redovisning på sprickans längd samt på avståndet till den aktiva deformationszonen. SKB beräknar antalet potentiellt skadade kapslar N_{failed} för tiden fram till 1000 år efter förslutningen genom uppskattning av den årliga frekvensen och den passerade tiden med antalet kritiska positioner (avsnitt 5.18 i denna granskningsrapport). Resultat från beräkningar av N_{failed} -värden redovisas i SR-Site (SKB TR-11-01, tabell 10-20).

Den termiska fasen av slutförvaret med väsentligt förhöjda temperaturer beroende på det använda kärnbränslets resteffekt kan utlösa termiskt inducerad seismisk aktivitet. SSM har begärt kompletteringar (SSM2011-2426-90) av SKB:s ursprungliga redovisning av termiska skalv, vilket har resulterat att ytterligare beräkningar har genomförts (SKBdoc 1372546). I kompletteringen redovisar SKB beräkningar av sannolikhet, magnitud och frekvens för termiskt inducerade jordskalv, vilka kan förekomma under driften samt under de första 1 000 åren efter förslutningen av slutförvaret. I kompletteringen modellerar SKB det uppvärmda slutförvarets seismiska respons när den flackt stupande deformationszonen ZFMA2 aktiveras av ett skalv med momentmagnitud 5,5. Baserat på de kompletterande jordskalvsanalyserna bedömer SKB att risken för stora skalv under de första 1 000 åren, till följd av kärnbränslets värmeutveckling, är försumbart förhöjd jämfört med jordskalvfallen där inga termiskt inducerade spänningar antas.

SKB behandlar förändringen av spricktransmissivitet i närheten av deponeringshålen under den termiska fasen, men anser inte att det finns betydande bidrag från eventuella termiskt inducerade jordskalv.

4.13.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisade beräkningar av magnitud och frekvens för tektoniska jordskalv samt antal kritiska kapselpositioner under de första 1 000 åren efter förslutning är vetenskapligt välgrundade, samt utgör ett rimligt tillförlitligt underlag för säkerhetsanalysen i detta steg av SKB:s program. SSM:s följande kommentarer syftar till att minska nuvarande osäkerheter. SSM betonar särskilt behovet av fortsatta studier gällande termiskt inducerade skalv eller tektoniska skalv i samband med uppvärmning i slutförvaret samt behovet av att en probabilistisk riskanalys för PFDHA-förkastningsrörelseanalys (Probabilistic Fault Displacement Hazard Assessment) genomförs.

SSM har i granskningen utgått från SKB:s ursprungliga redovisning i ansökan som sammanfattas ovan. Förutom detta material har SSM även beaktat SKB:s kompletteringar samt granskningsarbete som har utförts av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2013:33; SSM Technical Note 2013:34; SSM Technical Note 2013:37; SSM Technical Note 2014:22; SSM Technical Note 2014:44; SSM Technical Note 2014:58; SSM Technical Note 2014:59; SSM Technical Note 2015:30; SSM Technical Note 2016:23). Med hjälp av detta underlag har SSM bedömt SKB:s beräkningar av frekvens, sannolikhet och magnitud för jordskalv samt SKB:s uppskattning av antalet potentiellt skadade kapslar N_{failed} under de första 1 000 åren efter förslutning.

SSM har bl.a. baserat på utredningar av SSM:s oberoende experter vissa reservationer gällande SKB:s bedömning av sannolikheten för jordskalv inom slutförvarsområdet (SSM Technical Note 2013:33; SSM Technical Note 2014:22). Med hjälp av sambanden i (SKB R-06-67) uppskattar SKB sannolikheten för ett jordskalv inom en radie på 5 km runt slutförvaret. Denna sannolikhet är baserad på en homogenisering av jordskalvsaktiviteten i Sverige över ett område på 650 km radie runt slutförvaret som sedan skalas ner till ett område med en radie på 5 km. Av detta skäl bör sannolikheten anses vara kopplat till ytan och inte till antalet deformationszoner. Med tanke på att slutförvarsområdet har en radie på ca 3 km bör sannolikheten för ett jordskalv inom slutförvarsområdet motsvara ca en tredje del av sannolikheten för ett område med en radie på 5 km. I redovisningen antar SKB att sannolikheten att ett jordskalv inträffar i de fem instabila deformationszonerna i direkt anslutning till slutförvaret är en sjättedel (5/30) av den totala sannolikheten för ett område med en radie på 5 km. SSM bedömer att detta antagande inte fullt ut beaktar osäkerheterna. En seismisk källkaraktisering av de aktiva förkastningarna skulle kunna ha satt fokus på regionala förkastningar som kopplar samman Forsmarksområdet med den nutida mer seismiskt benägna Höga Kusten i norr. Faktumet att Forsmarksområdet också hamnar i skarven mellan fyra olika regionala seismiska zoner, identifierade av EU-projektet SHARE ("Seismic Hazard Harmonization in Europe"), visar att SKB:s antagna seismiska homogenitet runt ett område på 650 km från Forsmark kan ifrågasättas. Vidare reducerar SKB jordskalvssannolikheten för förvarsområdet till hälften baserat på observationen att jordskalv ofta förekommer på större djup än förvarsdjupet (SKB TR-10-48, avsnitt 4.3.6). SSM anser att detta antagande kan ifrågasättas eftersom brottytor för flera nutida jordskalv med magnitud större än 6,5 har observerats på markytan fast deras hypocentrum varit på flera kilometers djup (SSM Technical Note 2013:33).

SSM anser att SKB som ett komplement till den nuvarande konsekvensbaserade hanteringen av jordskalvrisk i kommande steg av sitt program även behöver genomföra en deterministisk och/eller probabilistisk jordskalvriskanalys SHA (Seismic Hazard Analysis) (SSM Technical Note 2013:33). Framtagande av SHA rekommenderas även av IAEA (2010b) som ett underlag för riskanalyser för platser där kärntekniska anläggningar planeras. Trots att en fullständig SHA kanske inte är helt nödvändig som underlag för säkerhetsanalysen för tiden efter förslutning av ett geologiskt slutförvar, finns det viktiga steg i dess tillämpning som kan vara värdefulla för SKB:s fortsatta seismiska analys,

inkluderande; (i) att en seismisk källkaraktisering genomförs där aktiva förkastningar runt om det planerade slutförvaret identifieras, samt (ii) att den maximala jordskalvmagnituden samt magnitud-frekvensförhållanden tas fram för de identifierade aktiva förkastningarna. Nästa steg enligt SHA är genomförandet av en PFDHA (SSM Technical Note 2013:34). Detta steg genomförs för att ta fram egenskaper hos jordskalv vid den aktiva förkastningen i fråga, baserat på statistik från historiska jordskalv om hur rörelsefortplantning varierar längs med skärning av zonen på markytan samt om hur sekundära rörelser propageras. SHA-metoden kan därför sannolikt förstärka grunden för SKB:s tillämpade antaganden samt bekräfta de slutsatser som SKB kommer fram till från sin konsekvensbaserade riskanalys.

SKB förutsätter i säkerhetsanalysen att alla sprickor med radier större än 225 m med säkerhet kommer att kunna identifieras i deponeringstunnlarna samt i deponeringshålen (SKB R-06-39). SSM anser att SKB inte visat att denna förutsättning kan uppfyllas, särskilt med tanke på att observationer endast kan göras kring tunnelskalan om 10 m samt att sprickor som har en radie som är större än 225 m kan förväxlas med flera mindre sprickor i ett spricknätverk. SSM:s ståndpunkt i denna fråga innebär att sannolikheten för att långa sprickor nära aktiva sprickzoner förbises bör beräknas för alla 30 aktiva deformationszoner runt om slutförvarsområdet och inte enbart för de fem närmaste. Konsekvensen är att sannolikheten för att ett deponeringshål skärs av långa sprickor i viss utsträckning ökar. Detta leder även till en ökning av den totala sannolikheten för att ett jordskalv som kan orsaka skjuvrörelser lika stora eller större än 50 mm kan ske inom en radie på 5 km. SSM anser därför att SKB:s analys inte fullt ut beaktar alla osäkerheter, dels med tanke på SKB:s val att endast inkludera fem instabila deformationszoner, dels med tanke på SKB:s bedömning att samtliga sprickor med en radie större än 225 m som behöver upptäckas också kommer att upptäckas.

SKB har genomfört både analytiska och numeriska beräkningar för att bestämma skjuvrörelsen för en spricka med viss radie, samt för som ett underlag för analysen ett antal resonemang kring den konceptuella förståelsen av jordskalvsrisk (SKB TR-08-11). SKB gör visserligen ett flertal pessimistiska antaganden gällande parametrar, geometrier, konstitutiva modeller samt medelvärdes- eller maxvärdesbestämning, men inga pessimistiska antaganden förefaller ha gjorts vid bestämningen av sambandet mellan sprickans radie och dess största skjuvrörelse. Med tanke på att sprickans skjuvrörelser skalas upp och ner linjärt med hjälp av sprickans radie bör SKB:s analys även utvärdera betydelsen av giltigheten för detta samband, dvs. hypotetiskt anta att sprickor som är mindre än kritiska sprickor också skulle kunna hysa skjuvrörelser som är större än 50 mm. SSM anser att SKB inte har beaktat alla osäkerheter fullt ut med tanke på förekommande osäkerheter och förenklingar samt med tanke på att sambandet sprickradie och skjuvrörelser endast har baserats på en enstaka konceptuell modell (Eshelby, 1957). Exempel på betydande förenklingar innefattar geometriska osäkerheter i deformationszonsmodellen, förhållandet mellan deformationszonsorientering och bergspänningsfältet, osäkerheter i bergspänningsfälten samt interaktioner mellan sprickor i spricknätverket.

SKB har beräknat antalet potentiellt skadade kapslar efter 1 000 år till maximalt $2,4 \times 10^{-5}$ för hela slutförvaret (SKB TR-11-01, tabell 10-20). Baserat på SSM:s egen analys i denna granskningsrapport har en oberoende bedömning av antalet potentiellt skadade kapslar 1000 år efter förslutning tagits fram som tar hänsyn till följande aspekter; (i) bortser från SKB:s reduktion till hälften av sannolikheten för nutida skalv för att endast ta hänsyn till jordskalv på måttligt djup, (ii) tar i beräkning en större area där jordskalv som påverkar slutförvaret kan förekomma genom att använda ett större respektavstånd än 600 m, (iii) antar en jordskalvsannolikhet som baseras på frekvensen av historiska jordskalv (SKB R-06-67). Om parametrarna ovan används i SKB:s ekvation för antalet skadade kapslar kan



en oberoende bedömning av risken för kapselbrott göras. Den totala jordskalvsannolikheten ($5 \cdot f$) blir ca 5×10^{-7} per år för en area med utökat respektavstånd till 1 000 m (ca 17 km² av 78,5 km² för en 5 km radie i SKB TR-11-01, Tabell 10-20). För den nutida jordskalvsfrekvensen i Forsmark, baserat på en jordskalvsannolikhet på 5×10^{-7} per år, motsvarar det uppkomsten av ett skalv med momentmagnitud större än 5 varje 2 000 000 år, vilket förutsätter tempererade förhållanden utan någon glaciationscykel.

Antalet kritiska positioner uppskattas i avsnitt 5.12.2 i denna granskningsrapport till ca 0,05 för hela slutförvaret. För en tid på 1 000 år ger ekvationen för potentiellt antal skadade kapslar ca $2,5 \times 10^{-5}$, vilket överensstämmer med det maximala antal som har uppskattats av SKB för samma tidspunkt (SKB TR-11-01, Tabell 10-20). Baserat på denna jämförelse drar SSM slutsatsen att det finns förutsättningar att i tillräcklig omfattning reducera risken för tektoniska jordskalv under de första 1 000 åren efter förslutning av slutförvaret. Om man extrapolerar resultatet till en tidsperiod på 100 000 år skulle antalet potentiellt skadade kapslar bli ca 0,025, vilket är ca 22 gånger mindre än för fallet med en glaciationscykel.

SSM har genomfört oberoende modellering kring betydelsen av termiskt inducerade skalv i slutförvaret. Resultaten visar att de inducerade sekundära rörelser som kan påverka kapslarna med marginal underskrider gränsen på 50 mm för en kapselskada under de första 1 000 åren efter förslutning av slutförvaret (SSM Technical Note 2014:59; SSM Technical Note 2016:23). SSM anser dock att SKB inför kommande steg i sitt program behöver genomföra egna beräkningar av termiskt inducerade skalv i slutförvaret.

SKB har inte redovisat hur grundvattenflödet påverkas av förändringar av spricktransmissivitet som kan förekomma i samband med termiskt inducerade skalv. SSM:s oberoende analyser pekar dock på att förändringar med avseende på transmissivitet inducerade av ett tektoniskt jordskalv inte bör vara permanenta, och de bör därmed återgå till sitt ursprungliga läge efter ett jordskalv (SSM Technical Note 2013:37). Liknande förhållande som gäller för tektoniska jordskalv kan också gälla för termiskt inducerade skalv. SSM anser att SKB behöver utvärdera dessa frågor inför kommande säkerhetsredovisningar.

Uppvärmning av slutförvaret leder till bergspänningsvariationer vilket framförallt har betydelse för flacka deformationszoner som ZFMA2 (SSM Technical Note 2014:58). SSM:s oberoende analyser visar att bergspänningsvariationerna leder till att friktionskoefficienten för att förhindra skjuvning på ZFMA2 ökar i genomsnitt från 0,70 till 0,74. Detta motsvarar en ökning av den erforderliga friktionsvinkeln från ca 35° till 36,5°. På vissa ställen längs med ZFMA2 behöver den aktiverade friktionskoefficienten för att förhindra skjuvning vara upp till 1,15 vilken motsvarar en friktionsvinkel på ca 49°. Dessa höga värden förekommer dock inte genomgående i hela zonen men de innebär ändå att deformationszonerna blir mindre stabila. SSM anser därför att det är viktigt att SKB i kommande steg av sitt program explicit uppskattar magnituden för eventuella skalv som kan förekomma pga. uppvärmningen av bergmassan runt slutförvaret.

SKB har inte berört risken för propagering av deformationszoner in i slutförvarsvolymer pga. termisk belastning. SSM:s oberoende analys har studerat potentialen för deformationszonerna runt slutförvaret att propagera på grund av de termiskt inducerade bergspänningsvariationerna (SSM Technical Note 2014:58; SSM Technical Note 2015:30). SSM:s oberoende analyser pekar på att det sannolikt endast är zon ZFMA2 som kan propagera. Möjligheterna för sprickpropagering är emellertid begränsade av att zonen gränsar mot markytan samt mot andra befintliga deformationszoner (Eckarfjärden mot väst; ZFMWNW0123 mot öst; ZFMF1 mot djupet). Eventuell tillväxt av zonen mot sydost kan inte heller påverka slutförvaret.

Oberoende analyser som SSM har låtit genomföra med avseende på temperaturpåverkan under den termiska fasen påvisar bl.a. betydelsen av lokala effekter på deformationszonernas plan. Detta innebär dock inte nödvändigtvis att mindre skalv på mindre deformationszoner eller skjuvrörelser på sekundära sprickor inte alls förekommer. Det sistnämnda kan ha betydelse eftersom dessa zoner och sprickor, till skillnad från zon ZFMA2, kan ligga i direkt anslutning till slutförvaret. SSM har genomfört vissa analyser av deformationszoner med en spårlängd vid markytan på mindre än 3 km samt av spricknätverket i förvaret med hjälp av koden PFC2D (SSM Technical Note 2014:59; SSM Technical Note 2016:23). Resultaten visar att de termiska spänningarna i berget som omger slutförvaret kan orsaka multipla skalv med momentmagnitud upp till cirka 2,3 i slutförvarsområdet och sekundära skjuvrörelser längs med befintliga sprickor på upp till 12 mm. SSM:s oberoende beräkningar visar att rörelserna 50 år efter förslutning understiger gränsen för en skjuvrörelse på 50 mm som kan skada kapseln. SSM konstaterar att termiska skalv med stor sannolikhet kommer att inträffa under uppvärmningen av slutförvaret, medan däremot tektoniska skalv är aleatoriska händelser som kopplas till en viss begränsad uppkomstsannolikhet. SSM anser att SKB inför kommande steg i sitt program behöver visa att termiska skalv inte är skadliga för barriärsystemet i slutförvaret.

SSM understryker vikten av att analysera platsspecifika och realistiska geometrier för deformationszonerna runt om och i slutförvarsvolymen samt även att explicit ta hänsyn till realistiska realiseringar av spricknätverket där skjuvrörelserna studeras i detalj. SSM anser att SKB bör ägna ytterligare uppmärksamhet kring dessa frågor. Även om detaljerade redovisningar inte ingår i ansökan finns indikationer på att relevanta arbetsinsatser redan görs av SKB, vilket framgår av kompletteringar som SSM har tagit del av (SKBdoc 1372546, figur 4).

Konsekvenser av tektoniska och termiskt inducerade skalv för de första tusen åren bedöms i kapitel 7 i denna granskningsrapport.

5. Slutförvarets skyddsförmåga mellan 1 000 år och 100 000 år

SSM granskar i detta kapitel SKB:s redovisning kring slutförvarets utveckling från tiden 1000 år till 100 000 år efter slutlig förslutning. SSM har beaktat SKB:s beskrivning av den så kallade referensutvecklingen i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB TR-11-01, kapitel 10) respektive SKB:s val av scenarier för demonstration av kravuppfyllelse (SKB SR-Site huvudrapport, kapitel 11-12). SSM:s bedömning av förutsättningar till kravuppfyllelse återfinns dock på annan plats i denna granskningsrapport (Del 1). Den aktuella tidsperioden innefattar dels en del av den första perioden av tempererade förhållanden som enligt SKB innefattar de första 8000 åren (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3), dels den övriga delen av den första glaciationscykeln med periglaciala och glaciala klimatförhållanden (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4).

En utgångspunkt för SSM:s granskning av tidperioden är liksom för de första 1000 åren den detaljerade informationen kring specifika processer, egenskaper och händelser, ("Features Events Processes, FEP"), som förväntas ha stor betydelse för förvarets initiala utveckling. SKB har redovisat dessa dels i FEP-databasen (SKB TR-10-45), dels i högre detaljeringsgrad i de så kallade processrapporterna för använt bränsle och kapsel (SKB TR-10-46), buffert och återfyllnad (SKB TR-10-47), samt för berget (SKB TR-10-48). SSM:s bedömningar är i många fall överrenstämmande med de som avser de första 1000 åren efter förslutning (kapitel 4 i denna granskningsrapport), men den längre tidsperioden som beaktas i detta kapitel innebär att en hel rad nya frågeställningar kopplade till de förändrade förvarsförhållandena och andra tillhörande förvarsprocesser under tiden för de



första 100 000 år måste beaktas. Det finns dock ingen skarp gräns mellan olika tidsperioder, så vissa processer och förhållanden som bedöms vara mest betydelsefulla för perioden 1000 år till 100 000 år efter slutlig förslutning och redovisas i detta kapitel, kan också ha en betydelse för både kortare och längre tidsperioder.

Under de första 1000 åren domineras slutförvarets utveckling av inre processer kopplade till förvarets återmättnadsfas, bränslets resteffekt och det initiala strålfältet. Betydelsen av dessa fenomen klingar dock gradvis av för tider betydligt längre än 1000 år. Istället domineras utvecklingen av slutförvarsmiljön av extern påverkan, så som påverkan från förändrad grundvattenkemi, högre grundvattenflöden samt högre hydrostatiska tryck. Detta medför att förståelse för externa faktorer som klimatförhållanden och landhöjning ovan slutförvaret får stor betydelse för analys av förvarsutvecklingen och slutförvarets skyddsförmåga. Förutsägelser kring utvecklingen av dessa omgivningsbetingelser kan aldrig göras med hög precision utan SSM:s föreskrifter efterfrågar som grund för bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga att olika tänkbara förlopp specificeras och analyseras (12 §, SSMFS 2008:37).

Tidsgränsen de första 100 000 åren efter förslutning av slutförvaret definieras i första hand av att SSM:s föreskriftskrav specificerar att redovisningen ska baseras på en kvantitativ riskanalys. En riskanalys ska dock även genomföras för tider efter 100 000 men med skillnaden att den längre tidsperioden inte innefattar en strikt kvantitativ jämförelse med SSM:s kriterium för den maximala årliga risken (5 § SSMFS 2008:37). Riskanalysen utgör för dessa extremt långa tider över 100 000 år snarare ett av flera verktyg för att bedöma slutförvarets skyddsförmåga liksom ett verktyg för att utvärdera möjliga åtgärder för att förbättra skyddsförmågan. Vid utformning och analys av slutförvaret behöver således höga skyddskrav och de högre redovisningskraven under de första 100 000 åren särskilt beaktas. Riskanalysens särskilda fokusering på de första 100 000 åren innebär också ett behov av en fördjupad analys av betydelsen av granskningsfrågor för denna tidsperiod, vilken följer i detta kapitel av granskningsrapporten.

Det finns två ytterligare skäl för en särskild fokusering på tidsperioden de första 100 000 åren, dels utvecklingen av bränslets farlighet, dels att denna tidsperiod ungefärligen sammanfaller med tiden för en glaciationscykel. För de första 100 000 åren är använt kärnbränsle och i synnerhet de första 1000-talen år betydligt farligare än det naturliga uran som bränslet är tillverkat av. Efter 100 000 år börjar dock radiotoxiciteten hos bränslet närma sig farligheten hos natururan som står i radioaktiv jämvikt med sina dotternuklider som ett resultat av radioaktivt sönderfall av fissionsprodukter och transuraner som bildas i bränslet under driften i reaktorn. Detta innebär dock inte att det använda bränslet blir ofarligt efter 100 000 år endast att farligheten är jämförbar med vad som kan förväntas i samband med förekomster av natururan. Tiden 100 000 år är en ungefärlig storleksordning av utsträckningen av de långsiktiga och storskaliga klimatförändringar som involverar förutom tempererat klimat perioder av permafrost, förekomst av en inlandsis ovan slutförvaret samt övergångarna mellan dessa faser som förväntas förekomma under en glaciationscykel. SSM har tidigare framfört åsikten att den senaste nedisningen över Skandinavien, Weichsel-istiden som tog sin början för ungefär 120 000 år sedan, kan utgöra en utgångspunkt för analys av betydelsen av kommande glaciationscykler, även om behov av kompletterande analyser av alternativa klimatutvecklingar och osäkerheter kopplade till klimatutveckling också finns specificerade i de allmänna råden (AR till 5-7 §§; SSMFS 2008:37). Betydelsen av en detaljerad analys av en förväntad kommande glaciationscykel kan kopplas till behov av att kunna bedöma slutförvarets motståndskraft mot förändrade förvarsförhållanden så som höga hydrostatiska tryck, förändrad hydrogeologi och grundvattenkemi samt en möjlig ökning av förekomsten av så kallade post-glaciala jordskalv som kan initieras av avsmältningen av en inlandsis ovanför slutförvaret.

SKB redovisar att den primära säkerhetsfunktionen för KBS-3-konceptet är att helt innesluta det använda kärnbränslet i täta kopparkapslar under säkerhetsanalysens tidsperiod. För det fall då det primära inneslutningskravet inte längre kan upprätthållas definieras barriärernas effektivitet av deras förmåga att bidra med retardation eller fördröjning av utsläpp, vilken utgör den sekundära säkerhetsfunktionen för KBS-3-konceptet (SKB SR-Site huvudrapport, figur 8-3). Liksom för de första 1000 åren utgör säkerhetsfunktionen inneslutning det helt dominerande bidraget till slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet enligt SKB:s redovisning, men bidrag till slutförvarets risk förväntas uppstå under tidsperioden både från kapselbrott från det kombinerade fallet advektion-korrosion och från fallet skjuvlaster i samband med kommande jordskalv. Granskningsfrågor med koppling till säkerhetsfunktionen fördröjning redovisas i kapitel 7 i denna granskningsrapport om SKB:s konsekvensanalys. Frågor kring biosfärens utveckling har relevans i perspektivet av att utsläpp av radioaktiva ämnen från slutförvaret har kommit till stånd och dessa frågor redovisas därför också i kapitel 7. Ett fåtal begränsade frågeställningar med koppling till säkerhetsfunktionen fördröjning kommenteras dock i detta kapitel till exempel bränsleupplösning vid kapselbrott.

I detta kapitel sammanfattas liksom i kapitel 4 kompletterande information om olika aspekter av slutförvarets gradvisa utveckling efter förslutning som SKB har tagit fram under granskningsprocessen. SSM redovisar också vissa slutsatser från externa oberoende experter som SSM har anlitat inom vissa sakområden. Dessa granskningsresultat utgör till viss del en utgångspunkt för SSM:s bedömningar i detta kapitel, men för mera ingående redogörelser av de externa experternas bedömningar hänvisas till SSM:s ”Technical Note”-serie.

SSM gör liksom i kapitel 4 inga bedömningar av SKB:s förutsättningar att uppfylla SSM:s föreskriftskrav eftersom sådana bedömningar utgörs av en sammanvägning av bedömningar av (i) förutsättningar att uppfylla slutförvarets initialtillstånd, (ii) slutförvarets långsiktiga utveckling och skyddsförmåga under de första 1000 åren, (iii) slutförvarets långsiktiga utveckling och skyddsförmåga under perioden 1000 år till och med 100 000 år (iv) slutförvarets långsiktiga utveckling och skyddsförmåga under perioden efter 100 000 år, (v) konsekvensanalysen kopplat till utsläpp av radioaktiva ämnen, samt (vi) metodik för analys av slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. SSM kommenterar ändamålsenligheten av SKB:s redovisning kring referensutveckling, huvudscenariot, mindre sannolika scenarier samt utvalda beräkningsfall i kapitel 9. SSM kommenterar förutsättningarna för SKB att kunna demonstrera kravuppfyllelse i del 1 av denna granskningsrapport. De ämnesområdesvisa bedömningar som redovisas i detta kapitel ger underlag för bedömning av säkerhetsanalysens fullständighet samt förutsättningar att uppfylla föreskriftskraven. I det fall SSM bedömer att det finns brister och svagheter i SKB:s redovisning som kan åtgärdas med rimliga insatser så behöver SKB redovisa ytterligare underlag i kommande steg i sitt program.

5.1 Långsiktig utveckling av använt kärnbränsle och frigörelse av radionuklider vid kontakt med grundvatten

I detta avsnitt granskas frågeställningar relaterade till bränsleutveckling och frigörelse av radionuklider från använt bränsle under de första 100 000 åren.

Efter att en kopparkapsel har fallerat och efter att det använda kärnbränslet har kommit i kontakt med grundvatten påbörjas en frigörelse av radionuklider som beror på inverkan av strålningen och kemiska processer i närheten av fasgränsytan mellan bränsle och grundvatten. Däremot påverkas pulsutsläppsandelen IRF och korrosionsutsläppsandelen CRF inte av de strålkemiska processerna. I jämförelse med de första 1 000 åren efter

slutlig förslutning av förvaret kommer strålningsmiljön invid kapselytan gradvis förändras från att initialt ha dominerats av gammastrålning till att mer och mer domineras av alfastrålning, vilket har betydelse för upplösningen av bränslematrisen. När alfastrålning avges från bränsleytan produceras oxidanter genom vattenradiolys i ett tunt skikt av vatten som är i direkt kontakt med bränsleytan. Denna process, samt dess inverkan på upplösningen av bränslematrisen och betydelse för säkerhetsanalysen, granskas och bedöms i detta avsnitt. Upplösningen av bränslematrisen under dominerande gammastrålning granskas och bedöms däremot i kapitlet om de första tusen åren efter förslutning (avsnitt 4.3.3 i denna granskningsrapport).

De utsända alfapartiklarna samt den ackompanjerande rekylen av moderradionukliden vid alfasönderfallsreaktionerna inom bränslematrisen kan förflytta atomer i matrisen och på lång sikt leda till ”icke-termisk” (athermal) diffusion av atomerna. Processen kan möjligen öka inventariet av vissa långlivade radionuklider i pulsutsläppsandelen. Denna process kan ha betydelse endast efter lång tid efter förslutningen av slutförvaret eftersom processen är mycket långsam. Denna process granskas och bedöms också i detta avsnitt. Alfäsönderfallsreaktionerna producerar även små mängder helium i bränslematrisen. Efter lång tid kan ackumulerat helium bilda små gasbubblor i bränslematrisen, vilket möjligen kan påverka bränslematrisens integritet på lång sikt. Även denna fråga har adresserats i detta avsnitt. Dessutom granskas och bedöms också SKB:s hantering i SR-site av korrosion av andra material i bränsleelementen än själva bränslekutsarna, såsom zircaloyröret, bränsleelementets konstruktionsmaterial av rostfritt stål, Inconel och Incoloy, samt material i PWR-styrstavar i detta avsnitt.

Processer som avser radionuklider som frigjorts från bränslet så som homogena reaktioner i vattenfasen, sorption, möjlig bildning av kolloid av eller med radionuklider i grundvatten samt transport av radionuklider genom de tekniska barriärerna och urberget granskas och bedöms i andra avsnitt i denna granskningsrapport (kapitel 7).

På SSM:s begäran har SKB tagit fram kompletterande information om ett antal frågor kopplade till upplösningen av bränslematrisen utsatt för alfastrålning:

- SKBdoc 1372969. Svar till SSM på begäran om komplettering om inverkan av vätgas på bränsleupplösning
- SKBdoc 1385070. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande vätgastransport i slutförvaret
- SKBdoc 1418271. Svar till SSM på begäran om komplettering avseende metallegeringar i bränsle
- SKBdoc 1415408. Metal alloy particles in spent nuclear fuel
- SKBdoc 1452302. Svar till SSM på begäran om förtydligande angående bränsleupplösning.

5.1.1 Konceptuell förståelse av upplösning av använt kärnbränsle i grundvatten med dominerande alfastrålning

5.1.1.1 Underlag från SKB

SKB redovisar processer för bränsleupplösning efter 1 000 år i bränsleprocessrapporten i SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.5.

SKB:s redovisning anger att merparten av fissionsprodukter respektive tunga aktinider är inbäddade i bränslematrisen. Utsläpp av radionuklider till det omgivande grundvattnet är möjligt först efter att bränslematrisen varit i kontakt med grundvatten och helt eller delvis upplösts, antingen enbart genom upplösning eller genom först oxidation och därefter upplösning (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.5).

Enligt SKB är grundvattnet vid försvarsdjup efter de första tusen åren syrgasfritt och kemiskt reducerande med en redoxpotential runt -200 mV (SKB TR-10-46, sid. 55; SKB TR-10-58, figur 6-17). Under reducerande betingelser är den dominerande komponenten i använt kärnbränsle urandioxid normalt sett mycket stabil, lösligheten (solubility limit) är begränsad och urankoncentrationen vid kemisk jämvikt är i storleksordningen 10^{-8} till 10^{-10} M. Variationen inom detta intervall kan möjligen bero på att en liten mängd syre kan kvarstå i systemet vid de experiment som använts för att fastställa lösligheten. Löslighetsgränsen kan också påverkas av förekomst av den amorfa formen av urandioxid (Parks och Pohl, 1998; Rai m. fl., 1990; Rai m. fl., 2003; SKB TR-04-19, avsnitt 3.2).

SKB redogör för att vatten som tränger in i en fallerad kapsel och når hålrummet mellan bränselement och kapsel blir utsatt för dominerande alfastrålning under förutsättning att kapselbrott har inträffat efter minst cirka ett tusen år efter förslutningen av slutförvaret. Alfapartiklarna har en hög LET-strålning (Linear Energy Transfer) och en mycket kort räckvidd på cirka 35 mikrometer. Partiklarna kan orsaka vattenradiolys och producera molekyllära ämnen som väteperoxid och väte inom ett tunt skikt av vatten som omger bränseletorna (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.5).

SKB påpekar att det idag inte finns något använt kärnbränsle som avger dominerande alfastrålning eftersom inget använt kärnbränsle idag är över hundra år gammalt. Det är därför omöjligt att direkt mäta upplösningshastigheten för använt kärnbränsle under de förhållanden som förväntas vid tiden för kapselbrott många tusentals år efter slutlig förslutning av ett förvar (SKB TR-05-07, kapitel 1). Indirekta mätningar har istället använts för att få den information som behövs med avseende på kvantifiering av bränsleupplösning i slutförvaret (t.ex. SKB TR-03-13; TR-05-07; TR-05-09). SKB anser att korrosion av segjärnsinsatsen producerar en avsevärd mängd av väte som kommer att lösas i vattnet som står i kontakt med det använda bränselet (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.5; SKBdoc 1372969, SKBdoc 1385070). Korrosionen resulterar även i tillförsel av tvåvärt järn som även kan reagera med oxidanter. SKB anser att det är aktivering av annars kemiskt inaktivt väte via olika kemiska mekanismer som främst inhiberar alfastrålningens inverkan på bränsleupplösning (se nedan). Koncentrationen av löst väte inuti kapseln förväntas vara cirka $1,7 \times 10^{-4}$ M och SKB anser att detta är en betydligt högre nivå än den som erfordras för att motverka oxidativ bränsleupplösning (SKBdoc 1385070).

5.1.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har presenterat en godtagbar konceptuell förståelse för långsiktig bränsleupplösning i samband med att grundvattnet kommer i kontakt med använt bränsle efter att en kapsel har fallerat. Grunden för denna bedömning utgörs av att SKB har redovisat möjliga mekanismer som ligger bakom bränsleupplösning när alfastrålning dominerar efter några tusen år efter förslutning av slutförvaret som anses vara teoretiskt trovärdig. SSM instämmer med SKB att den viktigaste frågan med avseende på upplösningshastigheten är inverkan av radiolytiskt producerade oxidanter. I avsaknad av oxidanter är upplösning av uran(IV)-faser sannolikt mycket långsam beroende på låg löslighet i kombination med långsam transport av lösta ämnen inuti en fallerad kopparkapsel, i deponeringshål omgivna av en förhållandevis tät berggrund samt med vissa undantag i en tät bentonitbuffert.

SSM anser att det är rimligt att som SKB har gjort i SR-Site förutsätta närvaro av ett överskott av väte i närområdet av slutförvaret till följd av korrosion av segjärnsinsatsen samt i mindre utsträckning från radiolysprocessen i sig. Segjärn förväntas korrodera fortlöpande som ett resultat av kontakt med grundvattnet och under mycket lång tid generera vätgas vilket beror på mängden segjärn, insatsens dimensioner och intervallet för korrosionshastighet i slutförvarsmiljön. Den viktigaste frågan enligt SSM:s bedömning är

dock att vätemolekyler vanligtvis inte är kemiskt aktiva som reduktanter. För att vätet i slutförvaret ska motverka oxidationen av bränslet och bidra till begränsning av bränsleupplösning måste det bli aktiverat. Strålning med låg-LET (Linear Energy Transfer) såsom beta- och gammastrålning kan producera OH-radikaler som sprider sig i vatten och som kan aktivera väte till H-radikaler (Allen, 1961, kapitel 4; Spinks och Woods, kapitel 7). En H-radikal kan i sin tur reducera en väteperoxidmolekyl till vatten samt ge upphov till bildning av en ny OH-radikal. Detta förlopp utgör en reaktionskedja som bidrar till minskning av mängden väteperoxid i systemet och därmed minskning av bränsleupplösningen. Denna princip kan anses vara särskilt väletablerad eftersom den utnyttjas i PWR-reaktorer för att minska korrosion med oxidanter i vattnet i det primära cirkulationssystemet. Mekanismen återopas av SKB till stöd för långsam bränsleupplösning under förhållanden med dominerande gammastrålning. Så som SSM konstaterat i kapitel 4 i denna granskningsrapport anses mekanismen vara vetenskapligt välgrundad (avsnitt 4.3 i denna granskningsrapport).

SSM konstaterar dock att strålning med hög-LET, såsom alfastrålning, främst producerar molekyllära oxidanter så som syre och väteperoxid, efter en snabb kombination av intermediära radikaler som bildas inom spåret av en alfapartikel. Om denna strålningstyp dominerar kan därför inte väte aktiveras på ett effektivt sätt genom radikalinteraktion i lösningen (Allen, 1961, kapitel 5). Detta beror på en brist av radikaler som skulle kunna fortplanta de ovan nämnda kedjareaktionerna som sker under gamma- eller betastrålning. Direkt bestrålning av vattenlösning med elektriskt laddade heliumpartiklar med flera MeV energi från van der Graafs accelerator, vilket motsvarar ren alfastrålning, har också visat att tillsats av molekyllärt väte har en försumbar effekt på bildningen eller förbrukning av väteperoxid som bildats vid vattenradiolys av tunga joner med hög LET (Pastina och LaVerne, 2001). SSM konstaterar liksom SKB att väte inte kan aktiveras genom radikalinteraktion av alfaradiolys i homogen vattenlösning (Protokoll Avstämningsmöte mellan SSM och SKB avseende bränsleupplösningsspörsmål, SSM2011-1137-69). Det finns dock flera skäl och alternativa förklaringar till att väte kan aktiveras i fasgränsytan mellan bränsle och vattenfas trots avsaknad av betydande låg-LET strålning. Dessa frågor adresseras i kommande avsnitt.

Gränsen mellan låg- och hög-LET-strålning i aktivering av väte ligger kring 20 keV/ μm (Pastina och LaVerne, 2001). Med en blandning av låg- och hög-LET-strålning, beror aktivering av väte och vätets förmåga att minska bränsleupplösning på förhållandet mellan radioaktivt sönderfall med låg- respektive hög-LET strålning. Ju högre andel av låg-LET-strålning (så som beta/gammastrålning) i blandningen, desto större mängd väte kan bli aktiverat (Pastina m.fl., 1999).

5.1.2 Mekanismer för konsumtion av radiolytiska oxidanter

5.1.2.1 Underlag från SKB

SKB:s hantering av bränsleupplösningshastigheten i säkerhetsanalysen har två huvudkomponenter. Den första komponenten utgör en sammanställning och värdering av förståelsen för processer och deras bakomliggande mekanismer. Den andra komponenten består i att kvantifiera upplösningens omfattning som funktion av tiden för tillämpning i säkerhetsanalysen (SKBdoc 1372969). SKB har undersökt ett antal mekanismer och processer som underbygger förståelsen för bränslematrisens långsiktiga utveckling (SKBdoc 1372969). SKB förklarar den relativt låga bränsleupplösningshastigheten som uppmäts vid olika typer av försök med ett antal alternativa potentiella mekanismer som aktiverar vätegas löst i fasgränsytan mellan vattenfasen och det använda bränslet (SKBdoc 1372969):

- Ädelmetallpartiklar bestående av metallegeringar Mo-Tc-Ru-Rh-Pd, så kallade ϵ -faser, aktiverar molekylärt väte.
- Väteperoxid som bildas vid radiolys dissocieras katalytiskt på oxidtytor och i bulklösning.
- Syre- och Frenkel-defekter som genereras av atomisk rekyl vid alfastrålning bidrar till bildning av atomärt väte (Stulz m.fl., 2004).
- Reduktion av oxiderade ytskikt i UO_2 -matrisen i närvaro av vätgas under gammabestrålning (SKB TR-99-27) och/eller alfabestrålning (Sunder m.fl., 1990).

SKB redogör för att det i bränslet finns ädelmetallpartiklar som innehåller palladium, platina och andra platinametaller (SKBdoc 1372969). Det är känt att denna typ av metaller aktiverar molekylärt väte. Enligt bland andra Eriksen m.fl. (2012), Trummer och Jonsson (2010) och Broczkowski m.fl. (2010) är det den primära mekanismen med vilken vätgas inhiberar oxidativ bränsleupplösning. Ädelmetallpartiklarna är galvaniskt kopplade till bränslematrisen och på dessa sker en konkurrerande oxidation av molekylärt väte som förbrukar de oxidanter som bildats genom radiolys.

En annan möjlig mekanism kan vara att väteperoxid dissocieras katalytiskt på oxidtytor och i bulklösning med slutprodukterna syre och vatten (SKBdoc 1372969). Första steget är splittring av väteperoxidmolekylen i två OH-radikaler (Hiroki och LaVerne, 2005). Nilsson och Jonsson (2011) har uppmätt halterna av väteperoxid och uran i lösning som funktion av tid i ett försök med Simfuel i argonatmosfär. Resultaten visar att 99,8 % av väteperoxiden dissocieras vid ytan av Simfuel och bara 0,2 % orsakar oxidation av uran uppmätt som U(VI) i lösning. Den väteperoxid som splittras vid ytan till två OH-radikaler, men som inte ger upphov till oxidation av uran till U(VI), anses reagera med molekylärt vätgas för att bilda vatten och två H-radikaler. Denna tolkning ger en möjlig förklaring till produktion av H-radikaler nära ytor som producerar väteperoxid, med åtföljande reduktion av t.ex. U(VI) eller Cr(VI).

SKB anser vidare att när alfapartiklar avges från använt bränsle orsakar motsvarande skada av atomisk rekyl i UO_2 -matrisen i form av Frenkel-defekter (SKBdoc 1372969). Vid ett försök simulerades inverkan av sådana defekter genom bombardemang med argonjoner. Resultaten visade att atomärt väte bildades invid fasgränsen mellan den skadade ytan och små mängder vatten (Stultz m.fl., 2004). Det är svårt att entydligt verifiera denna effekt i en vattenlösning, men om den sker, skulle den bidra till neutralisation av radiolytiska oxidanter så som väteperoxid, genom att oxidanterna reagerar med det bildade atomära vätet. Denna typ av effekt kan alltså minska nettoproduktion av väteperoxid per alfapartikel. Den kan också förklara varför ingen mätbar oxidativ upplösning påvisas även då en extern vätgaskälla saknas vid intensiteter av alfastrålning från bränsle som är mindre än cirka 33 MBq/g.

SKB noterar även en betydelse av att oxiderade ytskikt av urandioxid blir reducerade under gammabestrålning i närvaro av vätgas (SKBdoc 1372969; SKB TR-99-27) och detsamma gäller även för UO_2 -ytor under alfabestrålning (Sunder m.fl. 1990). Eftersom det mesta av strålningsenergin deponeras i UO_2 -pelleten, är det möjligt att processer som de som beskrivs i Petrik m.fl. (2001), dvs. effektiv energiöverföring på oxid/vatten-gränssnittet, orsakar dissociation av adsorberade vattenmolekyler (SKB TR-05-09, avsnitt 3.2.4).

SKB har baserat sin uppskattning av långsiktig bränsleupplösning på resultat från ett antal experiment som anses vara tillförlitliga och rimligt relevanta för den aktuella slutförvarsmiljön. Detta har skett antingen genom att hänvisa till egna tekniska rapporter eller citera publikationer i den vetenskapliga litteraturen (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.5;



SKBdoc 1372969; SKBdoc 1452302). SKB diskuterar i sin redovisning i första hand följande upplösningsexperiment:

- med använt bränsle (Grambow m.fl., 2000)
- med UO_2 -prov som dopats med alfastrålare nuklider såsom U-233 (SKB TR-03-13; SKB TR-05-09) eller Pu-238 (Muzeau m.fl., 2009)
- med Simfuel som innehåller ädelmetallregeringen av Mo-Tc-Ru-Rh-Pd (SKBdoc 1418271; Broczkowski m.fl., 2005; SKB TR-04-20).

SKB:s sannolikhetsfördelning för bränsleupplösningshastigheten som tillämpas i SR-Site har i första hand baserats på resultat från de sista två typerna av experiment i punktlistan ovan. Detta beror på att försöksresultaten anses vara mest tillämpliga på tidsskalor långt efter de första 1 000 åren efter slutlig förslutning. För den första typen av försök med använt kärnbränsle domineras strålfältet av gammastrålning och resultaten från sådana försök är därför mest relevanta för tiden fram till 1 000 år (avsnitt 4.3 i denna granskningsrapport).

SKB har som en del av kompletteringsförfarandet lämnat en litteratursammanställning med ytterligare information om ädelmetallegeringar och deras betydelse för bränsleupplösningen (SKBdoc 1418271; SKBdoc 1415408). Partiklarna är jämnt fördelade i bränslet med mycket små partikelstorlekar på några nanometer i bränslekutsarnas perifera delar, men i de centrala delarna som har exponerats för högre temperaturer kan storleken istället vara 0,1 -1 μm . Enligt SKB är metallpartiklarna generellt motståndskraftiga mot korrosion under både oxiderande och reducerande kemiska betingelser, men kan reagera med sulfider som når bränsleytorna. Metallsulfiderna som bildas är dock så extremt svårösliga att någon betydande metallförlust inte kan förväntas.

Bildning av sulfider kan ha en betydelse så till vida att detta är en möjlig mekanism för katalysatorförgiftning. SKB anser dock att om oxidanter så som väteperoxid bildas invid bränsleytorna, det vill säga förhållanden som är nödvändiga för en betydande oxidativ upplösning av använt bränsle, kommer oxidanterna och de lösta sulfidjonerna att reagera med varandra och därmed förhindra katalysatorförgiftning. Sulfider som kommer från bufferten och omgivande grundvatten kan också i första hand förväntas reagera med kvarvarande kapselmateriale av koppar och segjärn. För mycket gammalt använt bränsle som inte längre genererar oxidanter kan dock ädelmetallpartiklarna reagera med sulfid vilket bland annat har visats vid Oklo (SKBdoc 1418271). Avsaknad av oxidantproduktion medför dock att någon katalyserande förmåga hos ädelmetallpartiklarna sannolikt inte behövs för att aktivera väte i detta skede av slutförvarets långsiktiga utveckling. SKB anför slutligen att om oxidanter trots allt skulle bildas i en miljö där ädelmetallpartiklarna skulle ha påverkas av katalysatorförgiftning med sulfid, så skulle sulfidjoner i sig invid bränslets fasgränssyta reagera med bildade oxidanter.

5.1.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att de första två mekanismerna, som beskrivs i punktlistan i avsnitt 5.1.2.1 är trovärdiga och rimligt väl underbyggda, dvs. att ädelmetallpartiklar aktiverar molekylärt väte, samt att väteperoxid sonderdelas katalytiskt på oxidator. SSM anser i likhet med SKB att mekanismerna har en betydelse för bränsleupplösning vid förhållanden med dominerande alfastrålning och närvaro av väte (SKBdoc 1372969).

SSM bedömer i likhet med SKB att det är allmänt väl känt att metaller i de s.k. epsilonfaserna eller ädelmetallpartiklarna kan aktivera vätemolekyler genom katalys. Dessa kan sedan reagera med oxidanter producerade från vattenradiolys, och därför inhibera vattenradiolysens inverkan på upplösning av bränslematrisen. Det har även



konstaterats i internationella sammanhang så som EU-forskningsprojektet MICADO att vätemolekylernas aktivering och bidrag till konsumtion av radiolytiska oxidanter primärt är beroende av denna mekanism (Grambow m.fl., 2010, avsnitt 2.3.1). SSM anser att SKB har visat att ädelmetallpartiklarna sannolikt finns tillgängliga vid exponerade bränsleytor och kommer minska risken för en oxidativ bränsleupplösning. Inom MICADO konstaterades att förgiftning av ädelmetallpartiklarnas katalysförmåga behöver undersökas ytterligare (Grambow m.fl., 2010, avsnitt 2.3.1). SSM anser dock att SKB:s kompletteringar om frågan ger ett rimligt underlag för bedömning av risken för och betydelsen av en katalysatorförgiftning. Även om processen på mycket lång sikt kan inträffa ger SKB en rimlig förklaring till varför betydelsen sannolikt är liten under den tid som risken för oxidativ bränsleupplösning är som störst. SSM anser dock att SKB, beroende på vilken betydelse som processen kommer att tillägnas inom kommande säkerhetsanalyser, behöver komplettera sin litteratursammanställning med egna verifierande experiment.

SSM anser att den mekanism som innefattar att väteperoxid dissocieras katalytiskt på oxidtytor och i buklösning kan betraktas som en alternativ rimlig förklaring till vätemolekylernas inhiberande effekt. Förståelsen av mekanismen har dock baserats i huvudsak på resultat från experimentella försök med Simfuel under gammabestrålning (Nilsson och Jonsson, 2011). Det finns därför ett behov av ytterligare underlag för bedömning av mekanismens betydelse för använt kärnbränsle under förhållanden med dominerande alfastrålning.

SKB föreslår även ytterligare tänkbara mekanismer som är involverade vid aktivering av vätgas och inhibering av oxidativ bränsleupplösning, så som att syre- och Frenkel-defekter hos urandioxidmatrisen bidrar till att neutralisera radiolytiska oxidanter genom bildning av atomärt väte (Stultz m.fl., 2004). Dessutom kan aktivering av vätgas inte bara resultera i konsumtion av radiolytiska oxidanter men även reduktion av oxiderade ytskikt i UO_2 -matrisen i närvaro av vätgas under gammabestrålning (SKB TR-99-27) och/eller alfabestrålning (Sunder m.fl., 1990). Dessa mekanismer kan anses vara teoretiskt rimliga, men samtidigt otillräckligt underbyggda för att för närvarande utgöra tillförlitliga underlag. SSM anser att dessa mekanismer i första hand kan avse förstärkt produktion av väte på ytor av olika metalloxider till följd av förstärkt sönderdelning av vattenmolekyler (LaVerne, 2005; LaVerne och Tandon, 2002; LaVerne och Tandon, 2003). Det krävs mer omfattande studier för att de ska kunna användas till stöd för kvantifiering av bränsleupplösningen för förhållanden med dominerande alfastrålning och under närvaro av väte (SSM Technical Note Pimblott, 2015).

SKB anser att det finns ett tröskelvärde för mätbar effekt av alfaradiolys på oxidativ bränsleupplösning (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.5). SSM konstaterar att litteraturen som SKB refererar till tyder på att det möjligen finns en viss nivå av alfaaktivitet under vilken bränsleupplösningens beroende av alfaaktivitet minskar (Poinssot m.fl., 2007, figur 2). SSM anser dock att en analys av bränsleupplösning baserat på förekomst av ett förmodat tröskelvärde för närvarande inte kan anses välgrundad. Frågan har dock mindre betydelse eftersom SKB i SR-Site förutsätter en konstant bränsleupplösningshastighet under hela säkerhetsanalysens tidsskala snarare än en bränsleupplösning som vid en specifik tidpunkt övergår från att vara styrd av bildning av radiolytiska oxidanter till att vara styrd av löslighet under reducerande förhållanden (SKBdoc 1452302).

5.1.3 Experiment med alfadopade material för studier av bränsleupplösning

5.1.3.1 Underlag från SKB

SKB har genomfört försök med alfadopade prover i experimentella uppställningar med antingen ett överskott av väte eller med metalliskt järn (SKB TR-03-13; SKB TR-05-07). Den dopande radionukliden är ²³³U och dopningsnivåerna är 10 respektive 5 %, som motsvarar alfastrålning i ca 3000 respektive 10 000 år gammalt bränsle. Överskottet av väte eller metalliskt järn har använts i försöken för att efterlikna slutförvarsmiljön med korrosion av gjutjärninsatsen under bildning av väte. Ingen förhöjd upplösning som ett resultat av alfaradiolys noterades under dessa experiment. Upplösningen varierade ungefär i intervallet 10^{-7} till och med 10^{-6} andelar per år beroende på tidpunkt för provtagning och om partikulärt material räknades med eller inte. (SKB TR-04-19; avsnitt 3.4).

5.1.3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att försöken med alfadopade material för studier av bränsleupplösning har bidragit till en betydande förståelse kring grundläggande strålningskemiska mekanismer som är relevanta för analysen av bränsleupplösning i slutförvarsmiljö. Det finns dock vissa frågetecken kring tillämpbarhet av kvantitativa mått på bränsleupplösning som har erhållits från denna typ av experiment. Enligt SSM:s bedömning är den viktigaste osäkerheten i detta sammanhang representativitet hos de alfadopade materialens strålfält. Det är svårt att på basis av nuvarande kunskapsläge helt utesluta att den observerade relativt låga bränsleupplösningen i försök med alfadopade prov har påverkats av en aktivering av väte som ett resultat av en i sammanhanget för omfattande kvarvarande beta/gammastrålning. SSM anser därför att SKB i kommande steg av sitt program behöver genomföra mera detaljerade undersökningar kring denna fråga. SSM har också identifierat andra osäkerheter som redovisas senare i detta avsnitt, men dessa bedöms dock vara mindre betydelsefulla i jämförelse med frågan kring strålfältets representativitet.

SSM konstaterar att alfadopade prov som har använts i upplösningsexperiment har noggrant kontrollerade mängder av alfastrålare och nivåer av alfastrålning som är representativa vid olika relevanta tidpunkter i slutförvarets långsiktiga utveckling (SKB TR-03-13; SKB TR-05-07; SKB TR-05-09). I ett flertal försök, som har åberopats i SR-Site, saknas dock tydlig information av den relativa styrkan av alfa- respektive beta/gammastrålning (SKB TR-03-13; TR-05-07; Rondinella m.fl., 2004). Information om t.ex. tillverkningsprocess respektive kvarvarande nivå av beta/gammastrålning i proven är oftast begränsad (SKB TR-03-13; TR-05-07). SSM anser att denna fråga är betydelsefull eftersom provernas representativitet är avhängig inte bara alfastrålningen i sig utan även förhållandet mellan alfa- respektive beta/gammastrålning. Dessutom bör proven ha en så lik ytstruktur och sammansättning som möjligt, för att experimentellt bestämda upplösningshastigheter ska vara så representativa för den förväntade slutförvarsmiljön som möjligt.

För att exemplifiera frågan kring strålningsnivåernas representativitet kan nämnas att för ett flera tusen år gammalt kärnbränsle förväntas ett dosratförhållande med alfastrålning som är över tusen gånger starkare än beta/gammastrålning (Poinssot m.fl., 2004, figur 9). För det använda kärnbränsle som finns idag dominerar däremot låg-LET strålning stort. Å andra sidan har icke-bestrålad urandioxid en för låg alfaaktivitet jämfört med slutligt deponerat använt kärnbränsle i en tidsskala upp till hundratusen år i framtiden (SKB TR-04-19, avsnitt 3.1). Det bör dock nämnas att även om inget av dessa material har ett helt representativt strålfält tillämpligt för använt kärnbränsle efter tusen till hundratusen år i slutförvaret, så kan experimentella försök ändå ge värdefull information så länge dessa skillnader beaktas.



Det finns dock för vissa experiment mer information om isotopsammansättningar som ger värdefull information med avseende på provernas representativitet. I försök med U-233 dopad urandioxid finns till exempel materialets isotopsammansättning angiven (SKB TR-05-09, tabell 2-2). SKB har på uppmaning av SSM förtydligat att informationen i tabellen består av delvis uppmätta värden och delvis beräknade värden som grundar sig på sönderfallsberäkningar (SKBdoc 1452302). SSM anser att dessa angivelser är trovärdiga, men konstaterar samtidigt att den kvarvarande aktiviteten från låg-LET-strålningen i proven är i storleksordningen 20 - 25 %, vilket är betydligt högre än cirka 1 % för använt kärnbränsle som varit inplacerat i ett slutförvar efter 1 000-tals år.

SKB har nyligen tagit fram en rapport som redovisar jämförelse mellan strålningsegenskaper hos U-233-dopade prover och använt kärnbränsle med olika avklingningstider, dvs. 1 000, 3 000 och 10 000 år (SKB R-17-08). I rapporten beräknades energin (per enhet massa) från elektron- plus gammastrålning och energin från alfastrålning i respektive dopade prover och i använt kärnbränsle. Även dosraterna i ett tunt skikt (34 μm) utanför prover respektive använt kärnbränsle har beräknats. SKB drar slutsatser att förhållandet mellan energin från elektron- plus gammastrålning och energin från alfastrålning är jämförbart för dopade prover och för använt kärnbränsle vid avklingningstider längre än några tusen år. Även förhållandet mellan dosraten från elektron- plus gammastrålning och från alfastrålning är också jämförbart för dopade prover och för använt kärnbränsle.

SSM ser positivt på att SKB tagit fram ovannämnda beräkningar och kan konstatera att angreppssättet i redovisningen är vetenskapligt välgrundad. Det är ett viktigt steg framåt för en fördjupad förståelse av olika strålningstypers påverkan på aktivering av väte samt på bränslets upplösning. SSM anser dock att SKB i kommande steg av sitt program fortsatt behöver belysa frågan genom att jämföra olika strålningstypers direkta inverkan på att aktivera väte, genom att ytterligare ta hänsyn till strålningens energispektrum och räckvidd, samt transport av vätemolekyler, radikaler m.m. i hela det relevanta systemet. En relativt fullständigt kopplad modell för strålning, väteaktivering och transport bör eftersträvas.

Förutom frågan kring strålfältets inverkan finns andra experimentella svårigheter kopplade till kvantifiering av upplösningshastighet vid försök med alfadopade prover. Ett exempel är svårigheten att mäta primär upplösning vid fasgränsyterna och inte bara tillförsel av uran till vattenfasen. Under försökens gång skapas möjligen en oxiderande miljö invid provets yta, men bulklösningen längre ifrån ytan kan ändå vara reducerande vid tillräckligt höga koncentrationer av reducerande ämnen. Uran som primärt löses upp från urandioxidmatrisen kan därför sedan fällas ut från lösningen som sekundära mineraler istället för att tillföras vattenfasen. Detta förhållande innebär en experimentell utmaning. SSM konstaterar därför att beräkning av upplösningshastighet med utgångspunkt från experimentella data därför behöver ta hänsyn till den totala mängden av uran som frigörs från urandioxidmatrisen och denna mängd behöver återvinnas under försöket vilket inte nödvändigtvis uppnås genom att enbart mäta urankoncentrationen i vattenfasen. Detta innebär att bränsleupplösningshastigheter som har erhållits från försök med alfadopade material behöver tolkas med försiktighet (SKB TR-04-19, avsnitt 3.4).

En metod för att adressera ovanstående problematik är att tillsätta uranisotoper i lösningen med ett annat isotopförhållande i jämförelse med förhållandet i det alfadopade provet (SKB TR-03-13; SKB TR-05-07). Denna metod gör det möjligt att på ett säkrare sätt bestämma andelen återvunnet uran och provets primära upplösning. Efter en försiktig övervägning av olika osäkerheter under dessa försök uppskattas att upplösningshastigheten ligger mellan 1×10^{-7} till $1,43 \times 10^{-7}$ andelar per år (SKB TR-05-07, avsnitt 4).



Ytterligare frågeställningar kopplade till tolkning av försök med alfadopade material är till exempel huruvida den specifika arean hos alfadopade prover överensstämmer med den specifika arean hos använt kärnbränsle. Detta har en koppling till struktur och ytreaktivitet hos materialen och kan ha en betydelse för bedömning av upplösningshastigheten (Grambow m.fl., 2010, avsnitt 2.2.1.2). SKB:s svar på SSM:s begäran om komplettering av denna fråga antyder att detta är ett område som SKB behöver genomföra ytterligare undersökningar kring (SKBdoc 1452302). En annan frågeställning avser betydelsen av vissa avvikande resultat med avseende på mätning av korrosionspotentialen under försök med alfadopade prover (SKB TR-04-20, figur 2-4 och 4-1).

5.1.4 Elektrokemiska mätningar som stöd till SKB:s val av bränsleupplösningshastighet

5.1.4.1 Underlag från SKB

Den andra typen av försök som SKB har använt som stöd till val av bränsleupplösningshastigheten är elektrokemiska försök genomförda för olika partialtryck av vätgas och för olika redox-förhållanden (SKB TR-04-20; SKB TR-04-19, avsnitt 3.3; SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.5). Vid denna typ av försök kan dock inte bränsleupplösningshastigheten mätas direkt utan användning av extrapolation och teoretiska antaganden (SKB TR-04-20, kapitel 4). Strömtätheten som anses vara proportionell mot bränsleupplösningshastigheten har bestämts vid hög korrosionspotential på UO₂-elektroder under oxiderande förhållanden. SKB har även gjort experiment under relativt lågt vätepartialtryck på upp till 14 kPa med en Simfuel-elektrod. Eftersom bränsleupplösning är mycket långsam under dessa förhållanden kan strömtätheten inte mätas tillräckligt noggrant. Upplösningshastigheter extrapoleras dock fram med hjälp av uppmätta korrosionspotentialer (Shoesmith m.fl., 1998).

För försök med tidigare obestrålade UO₂-prov som exponerades för gammastrålning och upptill 5 MPa partialtryck av väte i systemet innefattade denna metod extrapolation på upp till 1 V lägre korrosionspotential (SKB TR-99-27). Extrapolationen baserades på antagandet av en Tafel-lutning med cirka 60 mV ökning av korrosionspotentialen per en tiofaldig ökning av strömtätheten. För materialets specifika area förutsattes ett värde på 2 cm² g⁻¹ när upplösningshastighet per ytenhet omvandlades till enheten andelar per år (SKB TR-04-20, kapitel 4). Baserat på extrapolationen av resultaten till lägre vätepartialtryck erhöles upplösningshastigheter på 10⁻⁶ till 10⁻⁷ andelar per år (SKB TR-04-20). För extrapolationen upp till de korrosionspotentialer som observerades i försök med obestrålad urandioxid (SKB TR-99-27) konstaterar SKB att upplösningshastigheten kan vara så låg som 10⁻¹¹ till 10⁻¹⁸ andel per år (SKB TR-04-20, kapitel 4).

5.1.4.2 SSM:s bedömning

SSM anser att befintliga elektrokemiska mätningar av bränsleupplösningshastighet kan betraktas som väl genomförda försök med stor omsorg kring mätmetoder och experimentella betingelser. De är värdefullt att det finns alternativa angreppssätt för kvantifiering av bränsleupplösning med användning av parallella experimentella metoder. SSM kan dock konstatera att det finns två källor av osäkerheter kopplade till befintliga försök, dels med avseende på strålfältets representativitet, dels med avseende på noggrannheten vid extrapolation av strömtätheten bestämd vid hög korrosionspotential under oxiderande förhållanden till den vid låg korrosionspotential under reducerande förhållanden (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.5; SKB TR-04-20). Befintliga försök avser mätningar av korrosionspotentialen för tre typer av material: (i) upplösning av urandioxid med gammabestrålning i närvaro av väte (SKB TR-99-27), (ii) upplösning av Simfuel i närvaro av väte (Broczkowski m.fl., 2004) samt (iii) upplösning av alfadopade prov i närvaro

av väte (Stroes-Gascoyne, m.fl. 2005). SSM anser att SKB inför kommande steg av sitt program behöver genomföra ytterligare insatser för att kvantifiera betydelsen av kvarvarande osäkerheter.

SSM anser att extrapolationen till upplösningen av Simfuel (Broczkowski m.fl. 2004; 2005) är teoretiskt och kvalitativt korrekt, eftersom Simfuel har tillräckligt mycket elektriskt ledande hål i uranets 5f-band av den elektroniska strukturen, som liknar ett delvis oxiderat urandioxid som också bidrar till hålen i det 5f-bandet (Shoesmith m.fl. 1994, avsnitt 6.4). Osäkerheten vid extrapolationen ligger snarare i att Simfuel inte har lika stark alfastrålning som framtida använt kärnbränsle, och därför kan ha en lägre radiolysstyrd upplösningshastighet än gammalt använt kärnbränsle med dominerande alfastrålning.

Enligt SSM:s bedömning föreligger också viss osäkerhet vid extrapolation som har baserats på den relativt låga potentialen uppmätt med icke-bestrålade urandioxidprov under gammastrålning i närvaro av väte med höga partialtryck (SKB TR-99-27). Liksom Simfuel är denna typ av material förknippad med betydligt lägre nivåer av alfastrålning än använt kärnbränsle efter några tusen till hundratusen år efter inplacering i ett slutförvar. Gammastrålningen kan aktivera väte och minska mängden av radiolytiska oxidanter som produceras vid en lägre nivå av alfastrålning (avsnitt 4.3 i denna granskningsrapport). Det kan därför konstateras att försöken med obestrålad urandioxid (SKB TR-99-27) inte helt representerar använt kärnbränsle flera tusen år till hundra tusen år efter deponering. Korrosionspotentialen i försöket kan vara betydligt lägre än den för använt kärnbränsle vilken kan leda till en underskattning av bränsleupplösningshastigheten. Även det faktum att de elektrokemiska försöken (SKB TR-99-27; SKB TR-04-20) har genomförts i 0,1 M natrium- respektive kaliumkloridlösning utan vätekarbonat kan påverka resultaten och skulle kunna innebära en underskattning av upplösningen (Jonsson m.fl., 2007).

SSM påpekar att osäkerheter även finns vid extrapolationer. SKB:s extrapolation baserar sig på en lutning av Tafel-kurvan på cirka 60 mV per 10 gånger strömtäthet som har observerats vid korrosionspotentialen mellan 0,1 till 0,3 V SCE (Saturated Calomel Electrode) (Shoesmith m.fl., 1994, figur 6.15). SSM känner dock inte till något definitivt bevis varken på teoretiskt grund eller baserat på experimentella resultat att samma lutning råder när kurvan extrapoleras till korrosionspotentialer runt -0,8 V (SCE) (SKB TR-04-20, figur 2-4). Liknande synpunkter har även framförts av forskare inom EU-forskningsprojektet MICADO (Grambow m.fl., 2010, avsnitt 2.3.5.2).

5.1.5 Sammanfattande bedömning av bränsleutveckling

5.1.5.1 Underlag från SKB

SKB har tagit fram en sannolikhetsfördelning för bränsleupplösningshastighet inom den tidigare säkerhetsanalysen SR-Can och samma sannolikhetsfördelning används även i den nuvarande säkerhetsanalysen SR-Site (SKBdoc 1372969). Fördelningen antas vara triangulär i det logaritmiska rummet med undre gräns, typvärde och övre gräns av 10^{-8} , 10^{-7} respektive 10^{-6} andel av den totala massan per år (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.5.5).

5.1.5.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s föreslagna upplösningshastigheter för bränslematrisen, dvs. med en fördelning mellan 10^{-8} och 10^{-6} andelar per år, kan betraktas som försvarbar i detta steg av SKB:s program. Det finns dock enligt SSM ett antal osäkerheter både beträffande experimentella undersökningar och teoretiska förklaringsmodeller som SKB behöver adressera i kommande steg av programmet. SSM har sammanställt och analyserat dessa osäkerheter i detta avsnitt. Vid bedömning av dessa osäkerheter bör det beaktas att SKB

föreslår ett flertal mekanismer och förklaringar till aktivering av väte i slutförvarsmiljön och konsumtion av radiolytiska oxidanter liksom flera typer av experimentella försök. Samtliga mekanismer för aktivering av väte verkar i samma riktning dvs. de tenderar att minska risken för oxidativ bränsleupplösning. Var och en av dessa förklaringar och experimentella försök har sina begränsningar, men sammantaget gör SSM bedömningen att SKB:s experimentella underlag och teoretiska förklaringar är tillräckligt omfattande för detta steg i SKB:s slutförvarsprogram.

SSM anser även att SKB:s snabbaste föreslagna bränsleupplösningshastighet på 10^{-6} andelar per år kan jämföras med ett förenklat förfarande som innebär att omfattningen av bränsleupplösning styrs av den ackumulerade mängden oxidanter som kan bildas via alfaradiolys för en viss tidpunkt för kapselbrott. Vid de tidigaste förväntade kapselbrotten enligt SR-Site uppnås en bränsleupplösningshastighet på en storleksordning av 10^{-5} andelar bränsle per år (SKI report 96:36, vol. 2, tabell 11.8.1). Med tanke på att den sistnämnda hastigheten har tagits fram med ett renodlat konservativt angreppssätt som helt bortser från aktivering av väte i slutförvarsmiljön samt att bränsleupplösningshastigheten gradvis skulle minska med dessa antaganden, anser SSM att detta är en godtagbar överensstämmelse. SSM konstaterar också att SKB har adresserat frågan kring en snabbare än förväntad bränsleupplösningshastighet med känslighetsanalyser (SKB TR-10-50, avsnitt 6.5).

5.1.6 Långsiktig utveckling av bränslematrisen

5.1.6.1 Underlag från SKB

SKB redovisar att utsända alfapartiklar samt den ackompanjerande rekylen av modernukliden vid alfasönderfall inom bränslematrisen kan förflytta atomer i matrisen och på lång sikt leda till icke-termisk diffusion av atomerna ("athermal diffusion") (SKB TR-10-46, avsnitt 2.4.2). Processen har främst diskuterats på grund av dess potential att öka inventariet av vissa långlivade radionuklider i pulsutsläppsandelen. Denna process kan endast börja få betydelse efter lång tid efter förslutningen av slutförvaret eftersom processen är mycket långsam. Processen av pulsutsläpp hanteras i avsnitt 4.3.1 i denna granskningsrapport.

SKB citerar slutsatser från det franska forskningsprojektet PRECCI (Ferry m.fl., 2005), resultat från experimentella försök (Ferry m.fl., 2008), samt modelleringsresultat (van Brutzel och Crocombette, 2007; Martin m.fl., 2009) för att stödja sin redovisning. SKB drar baserat på denna forskning slutsatsen att ett konservativt värde på 10^{-26} m²/s för icke-termisk diffusivitet kan motiveras. Vid detta värde är atomförflyttningen inom bränslematrisen försumbar till och med inom tidsskalan en miljon år.

SKB beskriver även betydelsen av helium som produceras inuti bränslematrisen som ett resultat av alfasönderfall. Under heliumproduktionen kan ackumulation ge upphov till små gasbubblor, vilket möjligen även kan påverka bränslematrisens mekaniska integritet på lång sikt. SKB uppskattar heliumkoncentrationen till cirka 6.4×10^{19} atomer/gram för bränsle med en utbränning på 60 MWd/kgU (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.8). Baserat på resultat från vetenskapliga publikationer om experimentella försök med heliuminplantering (Desgranges m.fl., 2003; Roudil m.fl., 2004; Guilbert m.fl., 2003), konstaterar SKB att med den utbränningsgrad som tillämpas i det svenska kärnkraftsprogrammet, förväntas ingen skadlig påverkan på bränslets mekaniska stabilitet som ett resultat av heliumackumulation. Inte heller förväntas bränslekutsarnas mer känsliga randzon att påverkas i någon betydelsefull omfattning.



SKB anser dessutom att det maximalt möjliga ackumulerade trycket i kapseln under en miljon år kan bli mellan cirka 0,4 till 0,5 MPa, vilket är betydligt lägre än det externa trycket som kapseln utsätts för som ett resultat av buffertens svälltryck (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.8).

5.1.6.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning av icke-termisk diffusion samt dess möjliga inverkan på pulsutsläppsandelen är väl underbyggd och trovärdig. SSM:s bedömning har baserats på att experimentella undersökningar kring frågan har genomförts framförallt inom det franska slutförvarsprogrammet vilka anses vara utförliga och välgrundade.

SSM bedömer också att SKB:s redovisning av heliumproduktion är vetenskapligt välgrundad och trovärdig. Det finns sannolikt mycket små osäkerheter kring SKB:s uppskattning av heliumkoncentration i bränsle under olika tider. SKB:s slutsats att den mekaniska stabiliteten av bränslematrisen inte påverkas negativt har baserats på experimentella undersökningar som anses trovärdiga. SKB:s analys av bildningen av det interna trycket inom kapseln har baserats på en enkel massbalans och enkla sönderfallsberäkningar, och är därför också trovärdig.

5.1.7 Korrosion av bränslestavsrör och andra konstruktionsmaterial i bränsleelement

5.1.7.1 Underlag från SKB

SKB redovisar hanteringen i SR-Site av neutroninducerad aktivitet i samt korrosion av bränslekapslingsrör och konstruktionsmaterial i bränsleelement i SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.4.

Enligt SKB:s redovisning utgörs kapslingsrören av Zircaloy. Andra konstruktionsmaterial i bränsleelementen kan vara rostfritt stål, legeringarna Inconel, Incoloy och Zircaloy. PWR-styrstavar kommer att kapslas in i kopparkapseln tillsammans med PWR-bränsle. Styrstavarna innehåller 80 % silver, 15 % indium och 5 % kadmium och har ett Zircaloy-kapslingsrör.

Tillgängliga data från olika studier tyder på att kapslingsrören har ett mycket högt motstånd mot allmän korrosion och deras livslängd kan vara minst 100 000 år ur detta perspektiv (se diskussionen längre ner i detta avsnitt). Trots detta antas i SR-Site-redovisningen att kapslingsrören inte utgör en barriär för utsläpp av radionuklider från bränsle, med beaktande av deras potentiella känslighet för lokal korrosion i grundvatten samt väteinducerad sprickbildning (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.4).

Radionuklider som bidrar till den neutroninducerade aktiviteten i deponat i form av metalloxider på kapslingsmaterial (so kallad "Crud") antas av SKB att släppas ut tillsammans med andra radionuklider i pulsutsläppsandelen. Dessutom antas att 20 % av C-14 som finns i skiktet av korrosionsprodukter från Zircaloy av kapslingsrör att vara en del av pulsutsläppsandelen (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.4; SKB TR-10-52, avsnitt 3.2). Även inventarium för Ag-108m och Cd-113m i Ag-In-Ca-legering i styrstavarna ingår i pulsutsläppsandelen. Resterande av den neutroninducerade aktiviteten i kapslingsrören och i konstruktionsmaterial i bränsleelementen antas av SKB att släppas ut med en hastighet som är lika med korrosionshastigheten av rostfritt stål (SKB TR-10-52, avsnitt 3.2).

Trots att studier av korrosion av Zircaloy i slutförvarsmiljön inte har utförts, finns liknande studier för titan (SKB TR-84-19; Mattsson och Olefjord, 1990; Mattsson m.fl.

1990). SKB anser att korrosionsegenskaper hos zirkonium är mycket lika korrosion av titan, eftersom i båda fallen är materialen skyddad mot allmän korrosion med en vidhäftande och icke lösbar film av metalloxider. Hastigheten med allmän korrosion uppskattas vara cirka 2 nm/år (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.4).

Korrosionshastigheten för rostfritt stål i syrgasfritt vatten vid 24-40 ° C ligger på 0,8 µm/år (White m.fl., 1996). In-situ försök i Boom-leran vid temperaturer mellan 16 och 140 ° C, som genomfördes i EU-projektet Cobecoma, visade en korrosionshastighet mellan 0,003 – 0,15 µm/år. För nickel-baserade legeringar som Inconel och Incoloy är korrosionshastigheten mellan 0,01 till 0,1 µm/år (SKB TR-10-46, avsnitt 2.5.4).

5.1.7.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s hantering i SR-Site av neutroninducerad aktivitet i samt korrosion av bränslekapslingsrör och konstruktionsmaterial i bränsleelement är konservativ och godtagbar. Bedömningen baserar sig på att SKB antar att radionuklider i Crud samt i PWR-styrstavar släpps snabbast ut som pulsutsläppsandelen. Även hastigheten för utsläpp av andra radionuklider som ingår i den neutroninducerade aktiviteten i kapslingsrören eller i konstruktionsmaterial i bränsleelementen antas vara samma som korrosionshastighet av rostfritt stål är konservativt, eftersom rostfritt stål korroderar snabbast bland materialen i kapslingsrören och i konstruktionsmaterial i bränsleelementen.

SSM bedömer att SKB:s redovisning av korrosion av material i kapslingsröret samt i konstruktionsmaterialen i bränsleelementet är trovärdig. Viss osäkerhet kan uppstå på grund av brist på direkt experimentella mätningar, t.ex. för korrosion av Zircaloy i syrgasfritt vatten. Men osäkerheten bedöms ha försumbar säkerhetsbetydelse eftersom konservativa antaganden har tagits fram i hanteringen av frågorna i säkerhetsanalysen.

5.2 Klimatutveckling

Framtida klimatförändringar är den viktigaste externa faktorn som påverkar förhållandena vid Forsmark, både vid markytan och på förvarsdjup. Grundvattnets omsättningstid, flödesmönster, hydrostatiska tryck och kemiska sammansättning kommer att påverkas av bl.a. kommande strandlinjeförskjutningar, utvecklingen av permafrost och kommande inlandsisar. Ett kallare klimat leder till lägre temperaturer på förvarsdjup med en möjlig risk för frysning av buffert och återfyllnad med en efterföljande mekanisk påverkan på kopparkapslar. Av- och pålastning av inlandsis under en glaciationscykel påverkar även bergspänningsfältet. Uppkomna spänningskoncentrationer i berggrunden har en betydelse för risken för postglaciala skalv. Klimatutvecklingen är även avgörande för biosfärens utveckling och betydelsen av utsläpp av radionuklider i tänkbara framtida miljöer. Under en glacial cykel påverkas också berggrundens retardationsförmåga genom ändringar i transmissivitet och grundvattenflöden, vilket har en påverkan på effekten av eventuella utsläpp av radioaktiva ämnen i det fall att kapselns isolerande förmåga förloras. För att förstå förvarssystemets utveckling i ett långt tidsperspektiv ingår därför en detaljerad analys och bedömning av rimliga framtida klimatutvecklingar under de närmaste 100 000 åren.

5.2.1 Allmänt om klimatutvecklingen de kommande 100 000 åren

5.2.1.1 Underlag från SKB

SKB:s redovisning av framtida klimatförändringar i Forsmark beskrivs i klimatrapporten (SKB TR-10-49) med en kort sammanfattning i SR-Site huvudrapport avsnitt 10.4.1 och i avsnitt 12.1.3. Klimatrapporten baseras på ett femtontal underlagsrapporter samt även den tidigare klimatrapporten till SKB:s säkerhetsrapport SR-Can (SKB TR-06-23).

Beskrivningar av klimatutvecklingen de kommande 100 000 åren är behäftat med stora osäkerheter. Dessa osäkerheter hanterar SKB genom att, med utgångspunkt från klimatvariabiliteten under kvartärperioden samt klimatmodelleringar, beskriva inom vilka gränser det framtida klimatet i Forsmark kan komma att variera. Dessa gränser karaktäriseras av en glaciationscykels olika klimattillstånd: tempererat, peri-glacialt och glacialt klimattillstånd, samt övergångarna dem emellan. Klimattillstånden definierar ett flertal fundamentala aspekter av analysen av slutförvarets långsiktiga säkerhet:

- de klimatdrivna processerna som påverkar förvarets inneslutningsförmåga
- förvarsplatsens landskaps- och ytnära ekosystems utveckling
- konsekvenserna av eventuella utsläpp av radioaktiva ämnen, om säkerhetsanalysen visar att det kan förekomma (Näslund m.fl., 2013).

Som utgångspunkt för beskrivningen av den framtida klimatutvecklingen i Forsmark har SKB tagit fram en referensutveckling (SKB TR-10-49, avsnitt 1.2.3) som består av två hypotetiska klimatfall:

- Ett basfall, referensglaciationscykeln, där klimatutvecklingen under de kommande 120 000 åren antas efterlikna den rekonstruerade klimatutvecklingen under den senaste glaciala cykeln kallad Weichsel.
- En variant med global uppvärmning, där naturliga klimatvariationer och klimatförändringar orsakade av antropogena utsläpp av växthusgaser förlänger referensglaciationscykelns inledande period med tempererade klimatförhållanden med 50 000 år.

Analysen av referensutvecklingen är ett viktigt underlag till huvudscenariot och ger de yttre förutsättningarna till två rimliga utvecklingar av förvarssystemet. För att beakta osäkerheten i klimatutvecklingen på 100 000 års tidsskala och hur den påverkar klimatrelaterade förändringar, som strandlinjeförskjutning, utvecklingen av permafrost och förekomsten av inlandsisar, har SKB tagit fram ytterligare fyra klimatfall (SKB TR-10-49, figur 1-3). Dessa är:

- Förlängd global uppvärmning, högre antropogena utsläpp av växthusgaser förlänger referensglaciationscykelns inledande period med tempererade klimatförhållanden med 100 000 år.
- Förlängd inlandsisutbredning, längre period av glaciala förhållanden än referensglaciationscykeln.
- Maximal inlandsisutbredning; tjockare istäcke än referensglaciationscykeln.
- Sträng permafrost, gynnsammare förhållanden för permafrosttillväxt än referensglaciationscykeln.

Dessa klimatfall har potentiellt sett större påverkan på förvarets långsiktiga säkerhet än referensutvecklingen och följande faktorer inom dessa fall har särskilt stor betydelse (SKB TR-10-49 avsnitt. 5; SR-Site huvudrapport avsnitt 12.1.3):

- Det maximala hydrostatiska trycket som kan uppträda på förvarsdjup, vilket särskilt ingår i fallet med maximal inlandsisutbredning och den maximala istjockleken. Detta tryck är relevant för analysen av kapselbrott orsakad av isostatisk last.
- Det maximala permafrostdjupet, vilket kopplar till fallet med sträng permafrost, och är relevant för risken för frysning av buffert och återfyllnad vilket kan påverka kapslens integritet.
- Infiltration av syrerikt grundvatten till förvarsdjup, vilken kopplar till fallet med maximal inlandsisutbredning eftersom betydelsen är som störst för den längsta tiden under vilken grundvattenbildning utgörs av glacialt smältvatten. Detta fall är bland annat relevant för analysen av risken för kapselbrott orsakad av korrosion.

- Utvecklingen av grundvattnets salthalt på försvarsdjup, vilken påverkas av marin transgression respektive saltutfrysning och har en betydelse för fallen med global uppvärmning och permafrost. Fallet är relevant för bland annat analysen av kapselbrott orsakad av korrosion.
- Uppkomst av utspätt grundvatten på försvarsdjup, vilken kopplar till fallen med global uppvärmning och förlängd inlandsisutbredning. I dessa fall dominerar grundvattenbildningen av meteoriskt vatten respektive glacialt smältvatten under lång tid. Fallet är relevant för analysen av buffererosion och advektion i bufferten.

Av särskilt intresse är förhöjda grundvattenflöden under deglaciationen för det fall att isfronten står stilla över ett förvar (SKB-TR-10-49, avsnitt 4.5.1). SKB bedömer att en sådan fas dels minskar geosfärens retardationsförmåga, dels har betydelse för infiltrationen av syrerikt utspätt grundvatten och därmed den kemiska miljön på försvarsdjup. Fallet med en stillastående isfront är dock inte kopplad till ett specifikt klimatfall utan SKB exemplifierar detta med daterade randmoräner från södra Sverige som indikerar perioder under deglaciationen av Weichselistäcket när isfronten ryckt fram eller oscillerat fram och tillbaka (SKB TR-10-49).

5.2.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s hantering av den framtida klimatutvecklingen, med uppställning av flera möjliga klimatscenarier centrerat kring rekonstruktionen av Weichselnedisningen, är ett bra tillvägagångssätt för att belysa inom vilka gränser som framtida klimat kan förväntas variera. Dessa scenarier ger randvillkoren med avseende på externa förhållanden som kan påverka slutförvarets långsiktiga säkerhet. SSM anser även att SKB:s klimatrelaterade studier är omfattande. Flera av resultaten i forskningsrapporterna har publicerats i vetenskapliga tidskrifter exempelvis Whitehouse m.fl. 2006; Helmens m.fl. 2007; Engels m.fl. 2010; Helmens och Engels 2010; Wohlfarth 2010; Helmens 2013. Detta innebär att SKB:s arbete i viss utsträckning har granskats av det internationella forskingssamhället. SSM bedömer generellt att SKB:s klimatrelaterade studier är väl beskrivna och av god kvalitet. Dessa studier bör ha resulterat i rimligt tillförlitlig information om klimatrelaterade processer och de utgör ett lämpligt underlag för säkerhetsanalysen SR-Site. Som framgår av följande avsnitt har SSM:s granskning främst fokuserats på:

- inlandsismodellering
- temperaturkurvan
- modellering av glacialisostatisk förändring
- permafrostmodellering.

5.2.2 Inlandsismodellering

5.2.2.1 Underlag från SKB

Om ett glacialt klimattillstånd skulle förekomma förväntas detta leda till den största klimatrelaterade förändringen under de kommande 100 000 åren. SKB bedömer att relaterade klimatdrivna processer av stor betydelse är de som påverkar inlandsisens mäktighet och den glacialhydrologiska utvecklingen. Dessa processer påverkar vissa glaciala och postglaciala förhållanden av särskild betydelse för de tekniska barriärernas integritet så som:

- höga grundvattenflöden (se avsnitt 5.4 i denna granskningsrapport)
- infiltration av syresatt grundvatten och/eller grundvatten med låg jonstyrka (avsnitt 5.5)
- maximala hydrostatiska tryck på försvarsdjup (avsnitt 5.9)
- glacialt inducerade jordskalv (avsnitt 5.12).

SKB:s ismodellering beskrivs i klimatrapporten (SKB TR-10-49, avsnitt 3.1), vilken till stora delar baseras på SKB:s säkerhetsrapport SR-Can (SKB TR-06-23, avsnitt 3.2) samt på studier av inlandsisens profil över Forsmark (SKB TR-10-49, A2). En kort sammanfattning av SKB:s ismodellering finns i SR-Site huvudrapport (avsnitt 10.4.1). SKB har genomfört flera studier över Weichsels glaciala historia och klimat som ett stöd till ismodellens rekonstruktion av Weichsels glaciala utveckling (SKB TR-13-03; SKB TR-13-02; SKB TR-09-16; SKB TR-09-14; SKB TR-09-12; SKB TR-09-04). SKB har även deltagit i en studie som jämför SKB:s ismodell med två andra ismodeller, vilka har baserats på en annan metodik (se även 5.2.4 i denna granskningsrapport; Schmidt m.fl., 2014).

SKB har på SSM:s begäran om komplettering förtydligt varför den maximala istjockleken i Forsmark är satt till 3 400 m (SKBdoc 1396769) och kompletterat ansökan med en studie om istjocklekar under Saaleglaciationen, vilken är den till ytan mest utbredda glaciationen under kvartär tid (SKB TR-14-21).

SKB:s modellering av inlandsisens utbredning under Weichsel har gjorts med University of Maine Ice Sheet Modell (UMISM; Fastook och Prentice 1994; och referenser däri). Ingående parametrar i modellen avser bland annat randvillkor, isens termodynamiska egenskaper, lufttemperatur och globala havsnivåförändringar under de senaste 120 000 åren. Randvillkoren definieras genom en digital terrängmodell över Fennoskandia, geotermiskt värmefflöde, och en klimatbeskrivning. För att hantera de ingående osäkerheterna i ismodellens indata kalibrerar SKB den simulerade isutbredningen mot Weichsels kända israndlägen. Dessa lägen motsvaras av den troliga isutbredningen vid olika tidpunkter under Weichselglaciationen (SKB TR-06-36). Baserat på fem kalibreringspunkter ändras den simulerade isutbredningen under Weichsel så att den bättre passar med den glacialgeologiska informationen (SKB-10-49, figur 3-12). Den enskilt viktigaste parametern i ismodellen är troligen lufttemperaturen, vilken utgår från temperaturklimatdata som erhållits genom empiriskt framtagna översättningar av syreisotop-sammansättningen ($\delta^{18}\text{O}$) i daterade grönländska iskärnor (GRIP; Johnsen m.fl., 1995). Utveckling av lufttemperatur är förmodligen också den viktigaste osäkerheten i inlandsismodelleringen. Av detta skäl har SKB valt att modifiera lufttemperaturen vid ismodellkalibreringen (SKB TR 10-49, avsnitt 3.1.7). Följden av modellanpassningen är att hela temperaturrekonstruktionen över de senaste 120 000 åren har förskjutits mot kallare klimat; framför allt blir kallperioderna (stadialer) under den senaste glacialcykeln ännu kallare (SKB TR-10-49, avsnitt 3.1.4, figur 3-14). Den kalibrerade inlandsismodellens utdata så som istjocklek, istemperaturer, ishastighet och rörelseriktning, mängd botten smältning/frysning av vatten, och den modifierade lufttemperaturen har sedan använts vid rekonstruktionen av övriga klimatrelaterade förhållandena under den senaste glaciationscykeln så som:

- modellering av strandlinjeförskjutning (avsnitt 5.2.4 i denna granskningsrapport)
- modellering av bergspänningsfältet under en glacial cykel (avsnitt 5.2.4)
- modelleringen av permafrosttillväxt (5.2.5)
- modellering av grundvattenflöden under glaciala förhållanden (avsnitt 5.4).

SKB:s ismodellering för Weichselglaciationen visar på en oscillerande, progressiv inlandsistillväxt med fyra glaciala maximum varav två för ca 60 000 och 18 000 år sedan täckte Forsmark. Den senare tidpunkten representerar det senaste glaciala maximumet LGM ("Last Glacial Maximum") när isutbredning var som störst (SKB TR-10-49, figur 3-15). Denna rekonstruktion innebär att glaciala maximum kommer att uppstå om ca 60 000 respektive 100 000 år i referensglaciationen. Baserat på ismodelleringen samt förståelsen för Weichsel, postulerar SKB att Weichselglaciationens regionala istjockleksmaximum över Forsmarksområdet under dessa glaciala maximum var ca 2 900 m under LGM

respektive 2 000 m för ca 60 000 år sedan (SKB TR-10-49, figur 4-25). En sådan dynamisk pendling mellan interstadiala och stadiala förhållanden under Weichselglaciationen, med successivt kallare klimat med en kulmen för ca 18 000 år sedan stöds av data från terrestriska klimatarkiv vilka även indikerar att stora delar av Skandinavien var isfria under tiden mellan de båda glaciala maximumen (SKB TR-13-02; samt i referenser däri). Även ismodellen utvecklad av Lambeck m.fl. (2010; ANU) visar ett generellt liknande mönster som SKB:s rekonstruktion av Weichsels glaciala utveckling (Schmidt m.fl., 2014). För att täcka osäkerheten gällande hur länge glaciala förhållanden kan råda omkring Forsmarksregionen har SKB tagit fram ett alternativt klimatfall med förlängd inlandsisutbredning, vilket har likheter med ismodellen ICE-5G utvecklad av Peltier (2004). Ur detta klimatfall gör SKB det pessimistiska antagandet att de båda glaciala maximumen över det planerade kärnbränsleförvaret under Weichselglaciationen utgör en del av en sammanhängande ca 60 000 år lång period av istäckta förhållanden, vilket är drygt en dubbling jämfört med referensglaciationens period med glacialt klimattillstånd.

SKB:s ismodellering indikerar att efter en kort inledande period med bottenfrusna förhållanden kan istäcket omkring Forsmark domineras av bottenmältande förhållanden. Denna slutsats har implikationer för både den glaciala erosionen (avsnitt 6.1 i denna granskningsrapport) samt för grundvattenflöden och infiltrationen av syresatt smältvatten (avsnitt 5.4). Av vikt för den glacialhydrologiska utvecklingen är inlandsisens profil och tiden det tar för isfronten att passera över slutförvaret. Baserat på jämförelser mellan teoretiska inlandsisprofiler och den modellerade isprofilen vid olika tidpunkter samt även med beaktande av en isprofil från det nutida grönländska istäcket har SKB tagit fram två gränssättande isprofiler, en brant och en flack. Dessa isprofiler har använts för vidare modellering av exempelvis vattenflöden, hydraulisk spräckning och bergspänningsutvecklingen under glaciala förhållanden (SKB TR-10-49, avsnitt A2). Maximala grundvattenhastigheter nås vid israndläget. Glaciala avsättningar under deglaciationen av Weichselisen indikerar att israndläget vid flera tillfällen, under perioder upp till ca 900 år, tidvis har stått stilla eller ryckt fram. SKB bedömer dock att sannolikheten för att en sådan händelse ska inträffa under en framtida deglaciation i anslutning till Forsmarksområdet med förhöjda grundvattenhastigheter som följd är relativt liten (SKB TR-10-49, avsnitt 4.5.1).

Flera klimatdrivna variabler med en påverkan på ett slutförvars långsiktiga säkerhet är helt beroende av inlandsisens tjocklek, exempelvis det glaciala hydrostatiska trycket och inlandsisens mekaniska belastning på berggrunden. För att undersöka den maximala förväntade istjockleken har SKB tagit fram klimatfallet maximal inlandsisutbredning där istäcket är tjockare än i referensglaciationscykeln. För att kvantifiera vilken maximal istjocklek som ett framtida istäcke kan förväntas nå över det planerade kärnbränsleförvaret utgår SKB från dels känslighetsstudier utförda med hjälp av ismodellen, dels jämförelser med det Antarktiska istäcket, och dels jämförelser med den till ytan mest utbredda glaciationen under kvartär tid, den s.k. Saaleistiden vilken föregick Weichselistiden (SKB TR-10-49, avsnitt 5.4.2). Utförda modelleringsstudier över Saaleglaciationens utbredning och tjocklek ger en förväntad maximal istjocklek över Forsmark på ca 3 400-3 500 m (SKB TR-14-21; Colleoni m.fl. 2009; Lambeck m.fl. 2006). SKB bedömer baserat på känslighetsanalyserna att det är osannolikt att isens tjocklek över Forsmark under några omständigheter kan överstiga 3 700 m (SKB TR-10-49, avsnitt 5.4). En preliminär validering av att modellrekonstruktionen av Saaleglaciationen ger en rimlig övre uppskattning av framtida glaciationers utbredning fås via jämförelser med simuleringar av framtida glaciationer under de närmaste en miljon åren, vilka samtliga förefaller vara mindre omfattande än Saaleglaciationen (SKBdoc1396769; Huybrechts 2010).

5.2.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s ismodellering är tillförlitlig och att valideringen genom rekonstruktion av Weichsels glaciala utveckling med hjälp av bl.a. kvartärgeologiska studier utgör ett lämpligt angreppssätt. SSM håller med om att den största osäkerheten vid ismodelleringen sannolikt är lufttemperaturen som erhållits med hjälp av data från grönländska iskärnor. Denna fråga diskuteras mer utförligt längre fram i denna granskningsrapport (avsnitt 5.2.3). SSM bedömer att SKB genom valet av flera klimatfall hanterar kvarvarande osäkerheter på ett ändamålsenligt sätt. SSM anser dock att det finns vissa oklarheter gällande vilken betydelse en mer dynamisk inlandsis har på ett slutförvar. Enligt SSM:s uppfattning behöver SKB klargöra denna fråga inför kommande steg i slutförvarsprogrammet.

SSM har i granskningen utgått från SKB:s redovisning som sammanfattas ovan. Förutom detta material har SSM tagit del av den vetenskapliga litteraturen inom området och beaktat granskningsresultat från SSM:s externa expert på ismodelleringen som anlåtits vid granskning av säkerhetsanalyserna SR-Can (Holmlund, 2008) och SR-Site (SSM Technical Note 2012:60).

SKB:s ismodellering, vars resultat utgör randvillkor till modellering av glacial isostatisk förändring (GIA) och permafrostmodelleringen, har baserats på en internationellt vedertagen ismodell (UMISM). UMISM har tidigare kalibrerats mot nuvarande istäcken i Antarktis (Fastook and Prentice, 1994) och jämförelser med andra termodynamiskt baserade ismodeller visar på betydande likheter (Payne m.fl., 2000). SSM bedömer därför, liksom sin externa expert (Holmlund, 2008), att SKB:s ismodell har goda förutsättningar att ge en rimlig beskrivning av Weichsels glaciala historia. SSM ser positivt på att SKB har tagit fram två gränssättande isprofiler med hjälp av teoretiska beräkningar av inlandsisens tillväxt respektive avsmältning. De teoretiska beräkningarna, vilka har baserats på att isprofilen når stationära förhållanden, ger dels den brantare isprofilen, dels en rimlig uppskattning av den grönländska isprofilen. SSM bedömer därför att SKB:s val av den branta isprofilen för studier av exempelvis grundvattenflöden under glaciala förhållanden är befogad. Gällande sannolikheten för längre perioder med höga grundvattenhastigheter i samband med att israndläget oscillerar eller ligger stilla över slutförvaret bedömer SSM, i likhet med SKB, att den är relativt liten.

SKB:s ismodellering ger vidare en generell utveckling av Weichselmedisningen som överensstämmer med studier av kvartärgeologiska stratigrafier. SSM noterar dock att andra liknande stratigrafiska studier i vissa fall visar på betydande skillnader från SKB:s rekonstruktion av Weichselglaciationens händelseförlopp. Det första glaciala maximumet i SKB:s ismodell för ca 60 000 år sedan, sammanfaller i tid med isfria förhållanden i Finska Österbotten (Räsänen m.fl., 2015). Vidare har två glaciala framryckningar för ca 50 000 och 30 000 år sedan dokumenterats i Danmark (Houmark-Nielsens, 2010), vilka sammanfaller i tid med huvudsakligen isfria förhållanden i SKB:s ismodell. Dessa exempel kan vara en indikation på att Weichselistäcket var mer dynamiskt än vad SKB:s modellering visar. Vad en mer dynamisk inlandsis har för betydelse för ett slutförvar med avseende på istäckning över Forsmark och dess konsekvenser är för närvarande oklart. SSM anser därför att SKB inför kommande steg i slutförvarsprogrammet behöver beakta vad en mer dynamisk inlandsis kan innebära för slutförvaret med avseende på exempelvis permafrostdjup och grundvattenflöden (se avsnitt 5.2.3.2 i denna granskningsrapport).

SSM har begärt ett förtydligande från SKB för att ytterligare klargöra den maximala istjocklek som kan utvecklas under den kommande glaciala cykeln (kompletteringsbegäran SSM2011-2426-107; SKBdoc 1396769). I SKB:s svar ingår en kompletterande studie kring istjocklekar under Saale-glaciationen (SKB TR-14-21). Resultat från studien antyder en maximal istjocklek under Saale på ca 3 500 m vilket är

likvärdigt med resultat från tidigare oberoende studier (Colleoni m.fl., 2009; Lambeck m.fl., 2006). Eftersom Saale-glaciationen är den största kvartära nedisningen bedömer SSM därför att det är ett rimligt antagande att en framtida istid inte blir tjockare än ca 3 500 m i Forsmarksområdet. Mer sannolikt är att den når en maximal tjocklek liknande den som under LGM, dvs. ca 2 900 m.

5.2.3 Temperaturkurvan

5.2.3.1 Underlag från SKB

SKB:s rekonstruktion av lufttemperaturen under den senaste glaciationen har betydelse för beräkningar inom säkerhetsanalysen eftersom den påverkar flera klimatdrivna variabler så som permafrostdjup och istjocklek. Istjocklekar är i sin tur av vikt vid modellering av strandförskjutningen och glacialt inducerade spänningsförändringar. SKB:s rekonstruktion av Weichsel-glaciationens temperatur redovisas i klimatrapporten (SKB TR-10-49, avsnitt A1). SKB redovisar även både egna samt oberoende paleoklimatologiska studier av Weichsels glaciala historia från Sokli i norra Finland (SKB TR-09-16, Engels m.fl., 2010; Väiliranta m.fl., 2009), vilka har använts för att validera den rekonstruerade temperaturkurvans reliabilitet.

SKB har på SSM:s begäran om komplettering förtydligat hur osäkerheten i den rekonstruerade temperaturkurvan har hanterats (SKBdoc 1396769).

SKB:s temperaturrekonstruktion utgår från syreisotopsammansättningen ($\delta^{18}\text{O}$) i grönländska GRIP iskärnor ("European Greenland Ice Core Project"; Johnsen m.fl., 1995). Denna temperaturrekonstruktion har baserats på nutidens linjära förhållande mellan temperatur och $\delta^{18}\text{O}$ (SKB TR-10-49, avsnitt A1, ekvation A1-1). SKB är medveten om att detta förhållande introducerar avvikelser i temperaturrekonstruktionen eftersom förhållandet gäller för den nuvarande fördelningen av nederbörd under året och $\delta^{18}\text{O}$ i nederbördens källområde (SKB TR-10-49, avsnitt A1). Det är dessutom inte säkert att lufttemperaturförändringar över den Fennoskandiska skölden skulle motsvara förändringarna över de centrala delarna av det grönländska istäcket. Den största avvikelserna från dagens förhållanden har observerats under stadialerna (Huber m.fl., 2006, figur 4). Denna avvikelse medför att användningen av ett konstant $\delta^{18}\text{O}$ /temperaturförhållande över tid underskattar temperaturnedgången under stadialerna (SKB TR-10-49, avsnitt A1.5.1). Genom att mäta isotopsammansättning av exempelvis kväve ($\delta^{15}\text{N}$) i luftbubblor i iskärnor kan relationen mellan $\delta^{18}\text{O}$ och temperaturen under en glacial kalibreras. Detta ger underlag till en justering av det linjära förhållandet mellan $\delta^{18}\text{O}$ och temperaturen under en glaciation (Huber m.fl. 2006 och referenser däri).

En preliminär validering av att paleotemperaturkurvan från GRIP är applicerbar på Fennoskandiska temperaturförhållanden under Weichsel fås genom en jämförelse av den okalibrerade modelleringen av isutbredning och de faktiska israndlägena under stadialen Yngre Dryas (ca 11000 - 10000 f.Kr.) och under det senaste glaciala maximumet LGM ("Last Glacial Maximum"). SKB bedömer att denna jämförelse visar att den okalibrerade ismodellen ger en isutbredningen vid dessa tidpunkter som är rimlig i jämförelse med faktiska israndlägena (SKB TR-10-49, avsnitt 3.1.7). Eftersom det har visats att syreisotoper i iskärnor inte direkt kan användas som proxyparameter för temperaturen (Huber m.fl., 2006; och referenser däri) har SKB jämfört temperaturdata erhållna enligt ekvation A1-1 med temperaturdata erhållna efter kalibrering mot $\delta^{15}\text{N}$ (SKB TR-10-49, tabell A1-1). Jämförelsen indikerar att en temperaturrekonstruktion baserad på nutidens linjära förhållande mellan temperatur och $\delta^{18}\text{O}$ överskattar temperaturen under en stadial med upp till 4°C. Efter SKB:s kalibrering av ismodellen, vilket sker genom att modifiera GRIP-temperaturkurvan, förskjuts hela temperaturkurvan och framför allt stadialerna mot

kallare klimat. SKB bedömer därför att kalibreringen av inlandsismodellen, reducerar felet i samband med användningen av dagens $\delta^{18}\text{O}$ -temperaturförhållande vid rekonstruktionen av Weichselglaciationens paleotemperaturkurva (SKB TR-10-49, figur A1-6).

Ytterligare en utvärdering av den modifierade GRIP-temperaturkurvan kan fås via jämförelser med studier av historiska klimatvariationer från terrestriska klimatarkiv och modellsimuleringar. SKB har låtit genomföra multi-proxyanalyser av sedimentkärnor från Sokli i norra Finland, (SKB TR-09-16), vars temperaturrekonstruktion ligger i linje med eller 3-6°C över den modifierade GRIP-temperaturen (SKB TR-10-49, avsnitt A1.5.2). Baserat på jämförelsen mellan SKB:s framtagna, modifierade paleotemperaturkurva med proxydata och paleotemperaturinformation från den vetenskapliga litteraturen från olika perioder av Weichselistiden, bedömer SKB att osäkerheten är $\pm 4-6^\circ\text{C}$, där den högre felgränsen representerar osäkerheten under stadialerna.

5.2.3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s rekonstruktion av lufttemperaturen under Weichsel har utförts med en godtagbar metod samt att SKB:s hantering och redovisning av osäkerheterna vid temperaturrekonstruktionen är utförlig och tillförlitlig. SSM anser dock att vissa förbättringsbehov fortfarande föreligger och att SKB:s pågående studier av Weichselglaciationens klimat behöver fortsätta.

SSM har i granskningen utgått från SKB:s redovisning som sammanfattas ovan. Förutom detta material har SSM i granskningen tagit del av den vetenskapliga litteraturen inom området och beaktat granskningsresultat från SSM:s externa expert för klimatfrågor som tagits fram vid granskning av säkerhetsanalyserna SR-Can (Holmlund, 2008) och SR-Site (SSM Technical Note 2012:60).

SSM noterar att SKB:s modifierade temperaturrekonstruktion ger liknande resultat som från temperaturrekonstruktionen baserad på NGRIP ("North Greenland Ice core Project"; SKB TR-10-49, figur A1-6). $\delta^{18}\text{O}$ nivåerna i NGRIP är dock mer fraktionerade, framförallt under de kallare perioderna under Weichsel, och ger upp till 4-6°C lägre temperaturuppskattningar jämfört med GRIP (Andersen m.fl., 2004). SSM bedömer därför i likhet med SKB att felet som introduceras genom att basera temperaturberäkningen på nutidens linjära förhållande mellan temperatur och $\delta^{18}\text{O}$ reduceras efter att ismodellen har kalibrerats mot daterade glaciala depositioner. SSM anser, liksom sin externa expert (SSM Technical Note 2012:60), att SKB:s paleotemperaturkurva efter iskalibreringen har förbättrats i jämförelse med ursprungskurvan som är baserad på en relation som inte är giltig för hela glaciationscykeln.

SSM har begärt kompletteringar gällande bl.a. temperaturkurvans felgränser efter ismodellens kalibrering, vilket resulterat i ett förtydligande av den dokumentation som ursprungligen levererats av SKB (kompletteringsbegäran SSM2011-2426-107; SKBdoc 1396769). I förtydligandet understryker SKB betydelsen av jämförelsen mellan temperaturkurvan från inlandsismodellen och oberoende klimatdata, vilka huvudsakligen utgörs av paleodata erhållna från Sokli. SKB:s slutsats från jämförelsen är att den temperaturkurva som har erhållits via simuleringen av inlandsisen under Weichsel är i linje med eller maximalt 3-6°C under paleotemperaturerna från Sokli (SKB TR-10-49, avsnitt A1.5.2). SSM instämmer i denna generella slutsats, men noterar att korrelationen mellan Sokli-stratigrafien och andra klimatarkiv hämmas av att det förekommer stora fel i dateringarna. Flertalet daterade prover ger samma åldrar trots att de tillhör olika interstadiala sekvenser (Alexandersson m.fl., 2008). De överlappande dateringarna i Sokli reducerar även värdet av en validering av temperaturkurvan mot temperaturuppskattningar

erhållna från Sokli. SSM anser därför att SKB inför kommande steg i slutförvarsprogrammet behöver slutföra de pågående ytterligare studierna av klimatförändringar under Weichsel (SKB Fud-program 2013, avsnitt 19.6) samt fortsätta att bevaka kunskapsläget gällande klimatutvecklingen under Weichselnedisningen. Fler och säkrare dateringar av terrestriska klimatarkiv behöver erhållas för att kunna ge en säkrare oberoende bedömning av den rekonstruerade temperaturkurvan samt för att utvärdera vilken påverkan abrupta klimatväxlingar inom millennium och kortare tidskalor (Capron m.fl., 2010; referenser däri) har på slutförvaret med avseende på exempelvis hydrologisk utveckling och permafrostdjup.

5.2.4 Modellering av glacial isostatisk förändring

5.2.4.1 Underlag från SKB

Tyngden från en inlandsis leder till att litosfären i närområdet böjs ner i den underliggande mjukare manteln (astenosfären) vilket leder till en förflyttning av manteln till fjärrområdet, dvs. områden utanför inlandsisens kanter, där litosfären böjs uppåt och bildar en så kallad ”forebulge”. Denna process kallas för glacial isostatisk förändring och är av stor betydelse för strandförskjutningen och den bergmekaniska utvecklingen vid Forsmark under en framtida glaciationscykel. De viktigaste klimatrelaterade egenskaperna och processerna under ett fortsatt tempererat klimattillstånd är grundvattenkemisk utveckling och strandlinjeförskjutningen. Främst gäller det längre perioder när Forsmark befinner sig ovanför havsnivån då infiltrationen av meteoriskt vatten (låg jonstyrka) kan nå försvardjup. I kommande avsnitt i denna granskningsrapport diskuteras vilken effekt detta kan ha på grundvattenkemiska förhållanden och de tekniska barriärernas stabilitet (avsnitt 5.5 och 5.7). Ett annat klimatrelaterat fenomen av stor betydelse för den långsiktiga säkerheten är reaktiveringen av sprickor som en följd av glacialt inducerade jordskalv i samband med avsmältningen av en inlandsis. Detta avsnitt diskuterar den utförda GIA-modelleringen som ligger till grund för analyserna av spänningsvariationer som uppkommer under referensglaciationscykeln. Mer utförliga diskussioner om jordskalv under de kommande 100 000 åren redovisas längre fram i granskningsrapporten (avsnitt 5.12).

SKB:s modellering av glacial isostatisk förändring (GIA) för uppskattning av den framtida strandförskjutningen vid Forsmark beskrivs i klimatrapporten (SKB TR-10-49, avsnitt 3.3). Denna modellering har till stora delar baserats på SKB:s tidigare säkerhetsrapport SR-Can (SKB TR-06-23, avsnitt 3.3) med ett tillägg av ytterligare känslighetsanalyser för att belysa betydelsen av laterala skillnader i litosfären och manteln vid GIA-modelleringen (SKB TR-09-11, avsnitt 4.5.4). SKB har även genomfört GIA-modellering för uppskattning av hur förkastningarnas stabilitet i Forsmarksområdet påverkades under Weichselglaciationen (SKB TR-09-15). En kort sammanfattning av SKB:s GIA-studier finns i SR-Site huvudrapport (avsnitt 10.4.1 och 10.4.4). SKB har även varit delaktiga i en studie som jämför olika ismodellers påverkan på den glacialisostatiska förändringen (Schmidt m.fl., 2014).

Styrande för havets transgression och regression i Forsmark de kommande 100 000 åren är fördelningen av vatten mellan oceanerna och inlandsisarna samt litosfären och den underliggande mantelns respons på av- och pålastning av inlandsisar. GIA-modelleringen av strandlinjeförskjutningen i Forsmark styrs huvudsakligen av islasthistoriken i närområdet samt litosfärens och mantelns egenskaper (SKB TR-09-49, avsnitt 3.3.2). Uppskattning av strandlinjeförskjutningen vid Forsmark under de första 8000 åren efter förslutning av ett slutförvar har baserats på extrapolation av geologiska observationer, exempelvis sjöstjälplning och strandförskjutning (SKB R-01-41). För längre tidsperioder

under referensglaciationscykeln har SKB:s uppskattningar baserats på GIA-modellering utvecklad av Mitrovica och Milne (2003). Den utgår från:

- en global islastmodell modifierad efter eustatiska förändringar (ICE-3G; Tushingham och Peltier, 1991)
- istjocklek och isutbredning erhållen från den ovan beskrivna ismodelleringen
- en förenklad jordmodell bestående av tre lateralt homogena, radiella lager bestående av en elastisk litosfär och en viskoelastisk övre och undre mantel (1D-modellering; SKB TR-10-49, avsnitt 3.3.4)

Den framtagna referensglaciationscykelns strandlinjeutveckling antyder att den isostatiska återhämtningen efter Weichsel planar ut efter ca 30 000 år då Forsmark befinner sig ca 70 m över Östersjöns nuvarande strandlinje (SKB TR-10-49, figur 4-26). Två framtida glaciationer, om ca 60 000 respektive 100 000 år, rubbar det uppkomna isostatiska jämviktsläget med följd att Forsmark är under vatten under totalt ca 19 000 år. Detta inträffar i anslutning till deglaciationerna där Östersjöns utveckling under respektive deglaciation förutsätts likna Östersjöns utveckling under Holocen. I klimatfallen med global uppvärmning visar GIA-modelleringar att strandlinjeförskjutningen domineras av den isostatiska återhämtningen från Weichsel (SKB TR 10-49, figur 5-2). Det innebär att under de första 100 000 åren efter förslutning av slutförvaret kommer Forsmark att befinna sig över Östersjöns nuvarande strandlinje. Av detta skäl kommer utspätt grundvatten av meteoriskt ursprung att dominera grundvattenbildningen i de två fallen med global uppvärmning.

Sett över hela referensglaciationscykeln med varaktigheten 120 000 år, kan den relativa havsnivåförändringen vid Forsmark baserad på en lateralt homogen jordmodell vara överskattad med upp till 45 m (SKB TR-10-49, avsnitt 4.5.2). Beträffande klimatfallen med global uppvärmning tillkommer osäkerhet kring kryosfärens respons på ökade temperaturer samt den termiska expansionen av havsvattnet. En flera tusen år lång period av marin transgression skulle kunna förekomma innan den isostatiska återhämtningen från Weichsel tar överhanden beroende på kollaps av istäckena på Grönland och Västantarktis samt bidrag från den termosteriska volymökningen (SKB TR-10-49, avsnitt 5.2.3).

SKB har undersökt tillförlitligheten av referensglaciationscykelns strandlinjeutveckling genom att jämföra den med observationer av den nutida landhöjningen och den postglaciala strandlinjeförskjutningen. Jämförelsen visar att GIA-modelleringen överskattar den glacial-isostatiska landhöjningen (SKB TR-10-49, figur 3-33 och 3-34). Överskattningen kan orsakas av att istjockleken i ismodellen är för stor och/eller av att litosfärens tjocklek respektive mantelns deformationsegenskaper varierar i sidled. SKB har utfört flera studier för att studera bl.a. vilken effekt alternativa jordmodeller och ismodeller har på GIA-modelleringen (SKB TR-10-49, avsnitt 3.3.4; SKB TR-09-15; Schmidt m.fl., 2014). Resultat från känslighetsanalyserna har sedan utvärderats genom jämförelser med den nuvarande landhöjningen och den historiska strandlinjeutvecklingen under de senaste 10 000 åren i Fennoskandia. 3D GIA-modelleringar med en mer realistisk jordmodell som tar hänsyn till laterala variationer ger en bättre matchning med relativ havsnivåförändring vid Forsmark jämfört med simuleringar gjorda i 1D (SKB TR-10-49, figur 3-48). 3D-modelleringen visar dock att det inte går att urskilja en unik jordmodell. Modelleringar med enbart laterala variationer i litosfärens tjocklek respektive den övre mantelns viskositet ger dels liknande landhöjningsmönster som vid 1D-modelleringen men av mindre magnitud, dels en liknande riktning och magnitud på den horisontala deformationen (SKB TR-10-49, figur 3-45 och 3-46). SKB har även utfört GIA-modelleringar med fokus på litosfärens egenskaper vilka visar att GIA-responsen bäst representeras av antingen en horisontell treskiktstagring av litosfären (T9 modellen) eller en lateralt varierande litosfärstjocklek (T12 modellen; SKB TR-09-15). En jämförelse mellan SKB:s ismodell med två andra ismodeller (ANU; ICE-5G) visar på

betydande skillnader, men båda modellerna kan matcha den nuvarande landhöjningen med olika parameterintervall vid jordmodelleringen (Schmidt m.fl., 2014).

5.2.4.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB på ett ändamålsenligt sätt visat komplexiteten vid GIA-modellering och på ett tillförlitligt sett belyst, via känslighetsstudier på islasthistoriken och olika val av jordmodellparametrar, de befintliga osäkerheterna. SSM bedömer att SKB:s GIA-modelleringar av den framtida strandlinjeförskjutningen och som grund för vidare analyser av den bergmekaniska utvecklingen är tillförlitlig och motsvarar behov av information under det innevarande steget i granskningen av SKB:s program för slutförvaring. SSM anser dock att SKB fortsättningsvis behöver belysa vilken betydelse olika ismodeller har på den glacialt inducerade spänningsförändringen. Detta avser exempelvis GIA-modelleringens betydelse för förkastningarnas stabilitet i Forsmarksområdet under kommande glaciationer.

SKB:s val av ismodell och modelleringen av istjocklek har vissa fördelar eftersom den till skillnad från ANU och ICE-5G inte är beroende av antaganden kring jordens struktur och egenskaper. Givet osäkerheterna gällande litosfärens och mantelns egenskaper är det i nuläget dock svårt att avgöra vilken ismodell som kan rekonstruera Weichselistäckets utveckling bäst både gällande anpassningen till den glacialisostatiska responsen, vilket SKB förtjänstfullt visar (Schmidt m.fl., 2014), och gällande jämförelser med studier på kvartärgeologiska stratigrafier (avsnitt 5.2.2.2 i denna granskningsrapport). SSM ser därför positivt på att SKB utöver känslighetsanalyser med avseende på ismodellen även har använt sig av ANU-ismodellen vid modelleringen av strandförskjutningen (Lambeck m.fl., 1998). Denna ismodell har använts vid jämförelser av 1D- och 3D-jordmodelleringen av GIA-responsen. SSM noterar dock att modelleringarna överlag leder till en överskattning av den tid som Forsmark befinner sig ovanför havsnivån. SSM bedömer därför att tiden under vilken infiltration av meteoriskt vatten kan påverka de tekniska barriärerna är konservativt vald. SSM bedömer vidare att SKB har hanterat osäkerheten i den framtida havsnivåökningen i samband med klimatfallen global uppvärmning på ett adekvat sätt genom att använda ett randvillkor under 10 000 år som förutsätter havstäckning. Detta leder till en flera tusen år lång period under vilken salthalten på förvaringsdjup ökar. SSM analyserar betydelsen av denna fråga längre fram i denna granskningsrapport (avsnitt 5.5 och 5.7).

SKB:s GIA-modellering för uppskattning av glacialt inducerade spänningsförändringar har fokuserats på jordmodellen och främst på litosfärens egenskaper (SKB TR-09-15). Resultaten visar att valet av jordmodell påverkar magnituden av spänningsförändringen under en glacial cykel, men inte det generella spänningsmönstret över tid. Av stor betydelse för uppskattningen av den glacialt inducerade spänningsförändringen är även ismodellen. SSM bedömer, i likhet med SKB (SKB TR-09-15, avsnitt 10), att den nuvarande uppskattningen av spänningsförändringen hämmas av att dessa modelleringar enbart har baserats på referensglaciationens utveckling. SKB framhåller att referensglaciationen inte utgör den förväntade klimatutvecklingen utan ett relevant exempel på hur klimatet kan komma att utvecklas de kommande 100 000 åren (SR-Site, sid. 451). SSM bedömer därför att fortsatta studier av den glacialt inducerade spänningsförändringen behöver genomföras där hänsyn tas till olika islasthistoriker av referensglaciationen. Sådana analyser bör lämpligen belysa vilken betydelse varierande istjocklekar och/eller utbredningar samt glaciationens längd har på den glacialt inducerade spänningsförändringen.



5.2.5 Permafrostmodelleringen

5.2.5.1 Underlag från SKB

Den för slutförvaret mest relevanta fysikaliska markprocessen i en periglacial miljö är utvecklingen av permafrost och ständigt fryst mark. En djup omfattande permafrosttillväxt kan leda till att bufferten och återfyllningen i deponeringstunnlarna fryser, vilket ger en mekanisk påverkan på kopparkapslarna. Dessutom påverkar frysning av berggrunden grundvattnets salinitet samt dess flödesmönster.

SKB:s permafrostmodellering beskrivs i klimatrapporten (SKB TR-10-49, avsnitt 3.4). Denna baseras i stor utsträckning på SKB:s klimatrapport (SKB TR-06-23, avsnitt 3.4) till säkerhetsrapporten SR-Can med tillägg av känslighetsanalyser och permafrostmodelleringar längs med en profil tvärs över slutförvaret (SKB TR-09-17).

Till säkerhetsanalysen SR-Can (SKB TR-06-09) genomförde SKB endimensionella (1D) modelleringar av slutförvaret med syfte att analysera de primära faktorerna av vikt för utveckling av permafrost och ständigt fryst mark vid förvarsplatsen under hela referensglaciationscykeln (SKB TR-06-23). Viktiga indata för simulering av permafrostutvecklingen är:

- informationen från den kalibrerade ismodellen så som istjocklek, lufttemperatur, och basal istemperatur
- förekomst av jordtäckte, vegetation och snötäckte
- information från GIA modelleringen rörande strandförskjutning
- värmeutvecklingen från det använda kärnbränslet
- berggrundens termiska egenskaper och det geotermiska värmeflödet.

SKB:s analys visar att drivande för permafrosttillväxten är framförallt lufttemperaturen och markförhållandena. Förhållandena under markytan, inklusive värmeutvecklingen från det använda kärnbränslet är sekundära faktorer som antingen försvagar eller förstärker den modellerade permafrostutvecklingen. Resultat från 1D-modelleringen visar att det rekonstruerade permafrostdjupet med hänsyn taget till värmeutvecklingen från det använda kärnbränslet når maximalt ca 250 meters djup drygt 50 000 år in i referensglaciationscykeln. Beräkningen av detta djup bortser dock från osäkerheterna relaterade till förhållandena vid och under markytan (SKB TR-06-23, se tabell 3-10). SKB:s 1D-modellering inkluderade även simuleringar med olika konstanta temperatursänkningar vid markytan under en hel glacial cykel, dvs. ca 120 000 år. Resultaten visar att när värmebidraget från det använda bränslet inkluderas krävs en medeltemperatur lägre än -8°C , dvs. en konstant sänkning av lufttemperaturen med mer än 13°C , för att permafrosten ska nå förvarsdjupet under den första 120 000-årsperioden.

Som ett komplement till 1D-modelleringen har SKB även utfört tvådimensionella (2D) permafrostmodelleringar för att undersöka den rumsliga permafrostutvecklingen över tid längs med en 15 km lång och 10 km djup profil tvärs över slutförvaret (SKB TR-09-17). 2D modellen inkluderar bildningen av framtida talikar (områden med ofrusen mark), saltutfrysning och ändrade grundvattenflöden längs med profilen. Baserat på referensglaciationscykelns maximala permafrostdjup erhållen från 1D-modelleringen, rekonstruerar SKB med hjälp av 2D-modelleringarna referensglaciationens första 50 000 år. I likhet med 1D-simuleringen visar 2D-simuleringen, med hänsyn tagen till värmebidraget från det använda bränslet, ett maximalt permafrostdjup på ca 260 m 50 000 år in i referensglaciationen. Genom att sätta alla ingångsdata maximalt gynnsamma för permafrosttillväxt, dvs. alla ingående parameterosäkerheter inklusive lufttemperaturens osäkerhet samverkar för att maximera djupet, erhåller SKB ett maximalt permafrostdjup för referensglaciationscykeln på drygt 460 m och -4°C isotermin når ett maximalt djup av ca 320 m (SKB TR-10-49, tabell 4-3). SKB har även genomfört 2D-känslighetsanalyser



av hur mycket den rekonstruerade lufttemperaturkurvan måste sjunka för att -4°C isotermen ska nå förvarsdjupet på 450 m. Dessa analyser visar att lufttemperaturkurvan behöver sänkas med ca -14°C , vilket är betydligt lägre än lufttemperaturkurvans uppskattade maximala osäkerhet på -6°C . SKB:s analys av -4°C isotermen har en betydelse eftersom buffert och återfyllnad förväntas frysa vid denna temperatur snarare än vid 0°C (se avsnitt 5.7 i denna granskningsrapport).

SKB:s 2D-modellering av klimatfallet sträng permafrost rekonstruerar hela glaciationscykeln på 120 000 år och syftar framför allt till att hantera osäkerheter gällande isutbredningen under referensglaciationen. Klimatfallet sträng permafrost utgår från förhållanden ovan markytan, förutom lufttemperaturen, som är mer gynnsam för permafrosttillväxt så som ett torrt, kallt peri-glacialt klimat utan ett isolerande snö- eller vegetationstäckes i vilket inlandsisen aldrig når Forsmark samt att ingen period med transgression inträffar under den första glaciala cykeln. Baserat på dessa antaganden, samt med beaktande av värmeutvecklingen från det använda kärnbränslet, når permafrostdjupet ner till drygt 390 m. Om osäkerheter med avseende på berggrundens termiska egenskaper dessutom beaktas når permafrostdjupet maximalt ner till drygt 460 m (SKB TR-10-49, tabell 5-11). Således, med stöd av utförda permafrostmodelleringar hävdar SKB att -4°C isotermen inte når ner till ett förvarsdjup under den första glaciala cykeln.

SKB:s 2D-modellering av saltutfrysningens påverkan på grundvattnets salinitet begränsas av att modellen inte tar hänsyn till grundvattnets tredimensionella transport av salter. Dock, eftersom topografin i området är relativt flack uppskattar SKB att 2D-modelleringen ger tillräckligt tillförlitliga resultat. Modelleringen visar att effekterna av frysning på salthalten är liten (SKB TR-09-17, figur 5-31 - 5-35). Denna förändring är dock inte omfattande. Detta beror enligt SKB på att grundvattnet i de övre delarna av berget har en låg salinitet. SKB har även inom GAP ("Greenland Analog Project") utfört grundvattenprovtagningar för att undersöka om utfrysningsprocesser kan ha påverkat den nuvarande grundvattenkemin. De utförda undersökningarna har inte kunnat påvisa att saltutfrysning har påverkat grundvattenkemin. SKB planerar dock att fortsätta grundvattenprovtagningen från borrhål i Grönland (SKB Fud-program 2013, avsnitt 26.23).

5.2.5.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s permafrostmodelleringar är tillräckligt omfattande och tillförlitliga vid detta steg i granskningen av SKB:s program för slutförvaring. SSM anser dock att en utvärdering av permafrostmodellen mot faktiska data behöver göras i ett senare skede av SKB:s program för att ytterligare underbygga dess tillförlitlighet. SSM ser därför positivt på SKB:s planer att utvärdera permafrostmodellering inom ramen för GAP ("Greenland Analog Project").

SSM har i granskningen utgått från SKB:s redovisning som sammanfattas ovan. Förutom detta material har SSM tagit del av den vetenskapliga litteraturen inom området och beaktat synpunkter från SSM:s externa expert inom området vid granskning av SKB:s säkerhetsanalyser SR-Can (Holmlund, 2008) och SR-Site (SSM Technical Note 2012:60).

I områden av en inlandis som domineras av vertikala rörelser (t.ex. Dahl – Jensen, 1998) kan flera hundra meter tjock permafrost bildas (Majorowicz, 2012). Beträffande den Fennoskandiska inlandsisen förefaller de subglaciala förhållandena i Forsmark inte ha gynnat permafrosttillväxt under LGM (Kleman och Hättestrand, 1999), vilket även SKB:s ismodellering visar (SKB TR-10-49, figur 4-34). Tidpunkten när Forsmark täcktes av en inlandis är därför viktig eftersom permafrosten under den framryckande inlandsisen troligen minskade i omfattning jämfört med omgivande isfria områden där periglaciala förhållanden rådde. Osäkerheten med avseende på inlandsisens utbredning under LGM

hanterar SKB med det pessimistiska antagandet att isen aldrig täcker Forsmark, vilket omfattas av klimatfallet strängt permafrost. I ett strängt permafrostscenario når permafrostdjupet ca 390-460 m, vilket är jämförbart med resultaten från borrhålsstudier utförda i nordöstra Polen (Safanda m. fl., 2004). Dessa studier omfattar temperaturmätningar i ett område med lågt geotermiskt flöde, där en inverterad temperaturgradient indikerar ett permafrostdjup under LGM på >500 m med yttemperaturer på ca -10°C. Med ett geotermiskt flöde strax under SKB:s referensvärde på 59 mW/m² erhöll Safanda m fl. (2004) ett permafrostdjup på drygt 400 m i den omkringliggande berggrunden under LGM. SKB:s känslighetsanalyser av temperaturens inverknings på permafrostdjupet antyder att det krävs en sänkning på ca -14°C för att -4°C-isotermen ska nå förvaret under de första 50 000 åren. Detta är en sänkning med 8°C mer än temperaturkurvans maximala osäkerhet på -6°C. SSM bedömer därför att det är ett rimligt antagande att isotermen -4°C aldrig når ner till förvarsdjupet. Denna bedömning förutsätter dock att SKB:s permafrostmodellering ger tillförlitliga resultat. Med anledning av detta anser SSM att en utvärdering av permafrostmodellens tillförlitlighet för prognoser av den framtida permafrostutvecklingen är värdefull för tilltron till SKB:s modellering. Permafrostmodellen bör användas för att reproducera nutida kända permafrostdjup. SSM anser därför att SKB bör slutföra den planerade studien i GAP-projektet beträffande valideringen av permafrostmodellen mot de grönländska förhållandena för utvärdering av förutsättningarna att reproducera det faktiska permafrostdjupet i ett fall där övriga parametrar är kända (SKB Fud-program 2013, avsnitt 19.5).

5.3 Bergmekanisk utveckling

Detta avsnitt behandlar den bergmekaniska utvecklingen av slutförvaret under perioden från 1 000 år till 100 000 år efter slutlig förslutning av slutförvaret. Tidsperioden innefattar den senare delen av slutförvarets termiska utveckling med gradvis sjunkande temperaturer med anledning av bränslets avtagande resteffekt, och omfattar den större delen av den första glaciationscykelns olika klimattillstånd med tempererat, periglaciala och glaciala förhållanden. De olika klimattillstånden, och övergångarna däremellan, påverkar laster och grundvattentryck, vilket påverkar stabiliteten hos bergmassan särskilt med hänsyn till dess bergmekaniska sprickegenskaper och dess sprickpropagering. SKB:s bergmekaniska modellering utgår från referensglaciationens klimatutveckling.

5.3.1 Bergmekaniska modelleringar av första glaciationscykeln

5.3.1.1 Underlag från SKB

SKB antar i sina beräkningar den tidsmässiga utvecklingen av spänningar som induceras av inlandsisen enligt modellen MT9 (SKB TR-09-15; SKB TR-10-23). Tidsutveckling av de glacialt inducerade spänningarna i Forsmark används på alla djup och tillkommer dagens in situ spänningar. Vattentrycket under denna utveckling har modellerats som en kvot av den vertikala belastningsökning som ska läggas till det befintliga hydrostatiska vattentrycket. SKB har utvärderat två grundvattentrycksmodeller. Den första modellen beaktar tiden när Forsmark är täckt av ett 3 km tjockt istäcke under vilket porvattentrycket höjs med 98 procent på grund av den glacialt inducerade lasten. Den andra modellen beaktar förhöjda porvattentryck i samband med avsmältning av istäcket genom att kombinera ett kvarstående glacialt trycktillskott med ett permafrost-inducerat trycktillskott (SKB TR-10-23, avsnitt 7.3.2).

5.3.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s redovisning av den bergmekaniska utvecklingen mellan 1 000 och 100 000 år på en övergripande nivå har en tillräcklig tillförlitlighet för detta skede i den stegvisa processen för ett slutförvar för använt kärnbränsle. SSM bedömer att SKB:s redovisning av området utgör ett lämpligt underlag för säkerhetsanalysarbetet som har genomförts i SR-Site. I likhet med de tidigare bergmekaniska avsnitten i denna rapport (avsnitten 3.4 och 4.4) ligger granskningens fokus på:

- utveckling av spjälkning
- utveckling av bergskadezonen
- påverkan på sprickor i slutförvaret
- slutförvaret som svaghetsplan
- krypning, spricktillväxt och tidsrelaterade deformationer.

5.3.2 Glaciationscykelns påverkan på spjälkning

5.3.2.1 Underlag från SKB

SKB har använt en kombination av den numeriska koden 3DEC och linjär-elastiska analytiska lösningar för bedömning av spjälkning under referensglaciationscykeln (SKB TR-10-23). Risken för spjälkning har utvärderats för byggtiden, för den termiska och tempererade fasen, samt för den glaciala fasen genom småskaliga modeller som representerar olika positioner i slutförvaret (SKB TR-10-23, figur 9-1). Under den glaciala fasen bedömer SKB att utveckling av spjälkning är osannolik eftersom de glacialt inducerade spänningarna är i samma storleksordning som de termiskt inducerade spänningarna. Enligt beräkningarna kommer spjälkningen antingen redan ha inträffat under den termiska fasen som föregår första glaciationscykeln, eller så kommer den att motverkas av svälltryck från buffert och återfyllnad under glaciationscykeln.

5.3.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning av spjälkningsförekomst under referensglaciationscykeln är ändamålsenlig. SSM har med hjälp av egna beräkningar kommit till samma slutsats som SKB att de maximala tangentiella spänningar som förekommer runt deponeringshålen blir lika stora som de spänningar som induceras under den termiska fasen (SSM Technical Note 2013:35; SSM Technical Note 2014:10). Emellertid varierar spänningarna beroende på vilken modell för jordskorpan som används för att analysera glaciationens påverkan (SKB TR-09-15), den initiala bergspänningsmodellen (avsnitt 3.5.2 i denna granskningsrapport) och värdet på buffertens svälltryck (SSM Technical Note 2014:10). Förhöjt grundvattentryck under istäcket begränsar utbredningen av spjälkning genom att reducera de effektiva bergspänningarna. De flesta glaciala spänningstilläggen är näst intill isostatiska. Därmed bör vinkelbegränsningen på $\pm 30^\circ$ mellan deponeringstunnlarna och den största horisontella huvudspänningen i berget utgöra en lämplig konstruktionsförutsättning för att minimera en vidareutveckling av spjälkning under den glaciala fasen efter den termiska fasen av slutförvaret. I samstämmighet med SKB:s redovisning bedömer SSM att spjälkningsdjupet samt skadezonen inte heller bör utvecklas efter den termiska fasen, vilket innebär att den faktiska transmissiviteten längs med deponeringshålens väggar sannolikt kommer att bli oförändrad under den glaciala fasen för slutförvaret (SSM Technical Note 2013:37, SSM Technical Note 2014:10).

5.3.3 Glaciationscykelns påverkan på bergskadezonen

5.3.3.1 Underlag från SKB

Utvecklingen av bergskadezonen pga. glaciationscykelns laster tas inte upp i SKB:s bergmekaniska modelleringar av första glaciationscykeln (SKB TR-10-23). SKB redovisar den konceptuella beskrivningen, det experimentella underlaget och de potentiella konsekvenserna för grundvattenflöde i närområdet i samband med utförande av bergarbeten i datarapporten (SKB TR-10-52, avsnitt 6.5). SKB redovisar att vid den maximala istjockleken kommer spänningskoncentrationerna i anfanget för deponeringstunnlarna att bli ca 130 MPa (SKB TR-10-23, avsnitt 9.3.2). Detta är mindre än den genomsnittliga enaxliga tryckhållfastheten för berget i bergdomän RFM029, vilken ligger på 226 MPa, varför den glaciala fasen inte bör medföra ytterligare skador i berget.

5.3.3.2 SSM:s bedömning

Den glaciala lastens påverkan på bergskadezonen runt deponeringstunnlarna beror på vinkeln mellan deponeringstunnlarna och den största horisontella huvudspänningen i berget. Påverkan skulle kunna bestå av nysprickbildning, tillväxt av befintliga sprickor samt ändring av sprickornas hydrauliska egenskaper. SSM bedömer dock att valet av en maximal vinkel på $\pm 30^\circ$ mellan deponeringstunnlarna och den största horisontella huvudspänningen i berget är en lämplig åtgärd för att minimera uppkomsten av ytterligare skador i berget under den glaciala fasen (SSM Technical Note 2013:35). SKB anser att de uppskattade spänningsnivåerna under referensglaciationscykeln inte bör ge upphov till vidare utveckling av bergskadezonen eller till dragspänningar i deponeringstunnlarnas väggar. Denna slutsats stämmer dock inte helt överens med resultat för vissa lastkombinationer som har tagits fram av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:10). Närvaro av befintliga sprickor eller variationer av bergspänningsfältet samt tunnelgeometrin bör dock motverka uppkomst av spänningskoncentrationer i tunnelväggarna. SSM:s oberoende analyser visar att den effektiva konnekterade transmissiviteten under tunnelsulan inte bör påverkas ytterligare under den glaciala fasen, jämfört med den påverkan som redan bör ha skett under den termiska fasen av slutförvarets långsiktiga utveckling (SSM Report 2011:26; SSM Technical Note 2013:35; SSM Technical Note 2013:37).

5.3.4 Glaciationscykelns påverkan på sprickor runt slutförvaret

5.3.4.1 Underlag från SKB

Den bergmekaniska stabiliteten hos sprickor i berget runt slutförvaret under referensglaciationscykeln har utvärderats genom kännedom om de skjuvrörelser som kritiska sprickplan kan hysa pga. glacialt inducerade spänningar (SKB TR-10-23). Modelleringar visar att en spricka som mäter 200 meter i diameter, vid 460 m djup, kan omfattas av en maximal statisk skjuvrörelse på 12 mm vid det maximala istäcket efter 58 000 år (SKB TR-20-23). Detta gäller om sprickan är kritiskt orienterad mot spänningsfältet med 27° stupning och strykning vinkelrätt mot den största horisontella huvudspänningen. Baserat på dessa resultat drar SKB slutsatsen att mycket få flackliggande sprickor i sprickdomänerna FFM01 och FFM06 i Forsmark kan hysa stora statiska skjuvrörelser under referensglaciationscykeln, bortsett ifrån fallet där skjuvrörelser genereras av stora jordskalv. Den maximalt beräknade skjuvrörelsen ligger med marginal under tröskelgränsen för kapselskada på 50 mm. Dessa statiska analyser ska inte förväxlas med de dynamiska analyserna av jordskalv kopplande till glaciationscykeln som redovisas i avsnitt 5.12 i denna granskningsrapport.

SKB har även uppskattat transmissivetsförändringar hos sprickor till följd av utvecklingen av normal- och skjuvspänningen under den glaciala fasen (SKB TR-10-23, avsnitt 3.4). Spänningsinducerade transmissivetsförändringar uppskattas analytiskt för



hypotetiska sprickplan. Två transmissivitetsmodeller, modell A och B, valdes ut av SKB för att uppskatta förändringar i den relativa transmissiviteten pga. normalspänningsvariationer. Den relativa transmissiviteten definieras som kvoten mellan aktuell transmissivitet och dess initiala värde. Modell A kan betraktas som ”värsta fall” och bygger på minimigränsen för en sprickans normalstyvhet i Forsmark. Modell B använder det genomsnittliga värdet för sprickornas normalstyvhet, och är därför mindre känslig för ändringar av normalspänningen. Den största ökningen i relativ transmissivitet på 460 m beräknas bli en faktor på 2 till 2,5, och kan öka något till mellan 2,5 och 3 om hänsyn tas till termo-mekaniska effekter pga. permafrost. Ökningarna av den relativa transmissiviteten på ett grundare djup än 250 m blir generellt större. Inga kopplade termo-hydro-mekaniska eller hydro-mekaniska analyser utfördes av SKB för att simulera den glaciala fasen. SKB anger uttryckligen att realistiska spricknätverk (DFN) inte har använts för simuleringar av transmissivitetsförändringar hos sprickor i anslutning till slutförvaret.

5.3.4.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s kvantifiering av transmissivitetsförändringar i sprickor vid slutförvarsdjup under referensglaciationscykeln är välgrundad och stämmer bra överens med resultat från SSM:s oberoende analyser som har utförts med utgångspunkt från realistiska spricknätverk (SSM Technical Note 2013:37). SKB:s analys av två olika modeller för grundvattentryckökning och permafrostperioder under en glacial cykel styrker på ett tillräckligt sätt SSM:s bedömning kring betydelsen av transmissivitetsförändringar i sprickor på slutförvarsdjup. De resulterande sprickrörelserna är försumbara även för sprickor med NW-strykning på grund av den nästintill isotatiska ökningen av glacialt inducerade spänningar. SKB:s beräkningar visar vidare att transmissivitetsförändringar som uppstår under perioder med de maximala istjocklekarna bör vara reversibla och återgå till sina ursprungliga tillstånd när istäcket smälter. Sprickor i de översta 300 m ovanför slutförvaret genomgår större transmissivitetsförändringar under referensglaciationscykeln än sprickor på slutförvarsdjup (SKB TR-10-23, avsnitt 7.4). Relativa transmissivitetsförändringar på upp till 7,5 gånger redovisas av SKB kunna förekomma för branta sprickor i samband med forebulge och permafrost vid ca 200 m djup. SSM bedömer att detta har redovisats på ett tillfredställande sätt av SKB. Från en hydrogeologisk synpunkt förväntas F-värdena i bergets översta 200 m dock samtidigt minska. SSM bedömer att en något ökad transmissivitet i sprickor i vissa riktningar i bergets översta 300 m inte bör ha någon stor betydelse för grundvattenflöden på förvarsdjup. Flödena på förvarsdjup begränsas av de relativt få sprickor som förekommer på dessa djup. F-värdena i översta delen av bergmassan är även i nuvarande tillstånd relativt små och för vissa flödesberäkningar bortser SKB från dem helt. SSM bedömer därför att fallet med referensglaciationscykeln och forebulge samt permafrost inte kan förväntas ha en stor påverkan på F-värden eller flödes hastigheter på förvarsdjup och effekten bör därför heller inte ha en stor betydelse för säkerhetsanalysberäkningarna.

SSM:s externa experter har kommit fram till att ökningen av konnektering i spricknätverket på grund av islaster har liten betydelse i jämförelse med den ökning som sker under den termiska fasen (avsnitt 4.4.2 i denna granskningsrapport). SSM konstaterar dessutom baserat på oberoende analyser att en utveckling av spricknätverket omfattande möjliga transmissivitetsförändringar bör ha skett redan vid tidigare Kvartära glaciationer (SSM Technical Note 2015:30).

5.3.5 Glaciationscykelns påverkan på deformationszoner nära slutförvaret

5.3.5.1 Underlag från SKB

SKB har utvärderat deformationszonernas stabilitet under referensglaciationscykeln (SKB TR-08-11). SKB beräknar differensen mellan skjuvspänningen i berget och Coulombs brottkriterium och redovisar de så kallade CFS-värden (”Coulomb Failure Stress”) för tre

spänningstillstånd för det omgivande berget; (i) den mest sannolika bergspänningsmodellen för Forsmark, (ii) reversmodellen och (iii) revers-strike-slip-modellen. Friktionskoefficienten för deformationszonerna väljs så att bergmassan ligger på gränsen för instabilitet under reversbakgrundsspänningen. CFS-värdena beräknas sedan med glacialt inducerade tillskottsspänningar till bakgrundsspänningsfältet vid tidpunkten för maximal instabilitet. Om CFS-värdet för en viss orientering av en deformationszon blir så stor som -10 MPa bedöms zonen vara instabil. Huruvida en deformationszon blir instabil beror starkt på bakgrundsspänningsfältet. Dessutom analyserar SKB även ett ”mest ogynnsamma scenario” där den differentiella bergspänningen ökas genom att lägga till 5 MPa till den största horisontalspänningen. Den minsta horisontalspänningen ökas också proportionellt. SKB förutsätter i detta fall också portryck som överstiger det hydrostatiska portrycket. Slutsatsen från SKB:s beräkningar är att revers-strike-slip-spänningsmodellen är den mest konservativa eftersom flest deformationszoner blir instabila. SKB rekommenderar med utgångspunkt från dessa analyser att fem deformationszoner behöver klassas som instabila, och att dessa potentiellt kan hysa ett jordskalv. Dessa zoner har en spårlängd vid markytan större än 3 km och ligger närmast inom 600 meters avstånd från den närmast belägna kapseln i slutförvaret. De zoner som SKB betraktar som instabila är ZFMWNW0809A, ZFMNW1200, ZFMNW0017, ZFMWNW0123 och ZFMA2 (SKB TR-08-11, figur 2.6). SKB noterar att det finns stora osäkerheter rörande de glaciala spänningstillskotten, bakgrundsspänningarna, portrycksutvecklingen och hållfasthetsegenskaperna hos deformationszoner under och efter en istid (SKB TR-08-11). Osäkerheter beträffande huvudriktningar för bergspänningarna är dock betydligt mindre.

Storskalig stabilitet för deformationszoner och övriga sprickor i anslutning till slutförvaret i samband med glaciala laster redovisas även i SKB TR-10-23 (kapitel 6 och 7) och liknande slutsatser dras även i denna rapport.

5.3.5.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s uppskattningar av stabilitet hos deformationszonerna i Forsmarksområdet är lämplig med utgångspunkt från hanteringen av randvillkor, geometrier och beräkningsmetoder. Referensglaciationscykeln påverkar deformationszonerna på olika sätt beroende på deras orientering i förhållande till de antagna initiala bergspänningarna. Under avsmältning av istäcket kommer horisontella spänningstillskott inte att motsvaras av några vertikala spänningstillskott. När isen drar sig tillbaka över Forsmarksområdet kan det leda till att flacka deformationszoner destabiliseras. Exempel på detta är zon ZFMA2, vilken kan aktiveras under en kommande avsmältning av istäcket. Detta exempel motiverar den geometri som SKB har valt ut för modellering av seismiskt aktiva förkastningar (SKB TR-08-11).

SSM anser att SKB inför kommande steg i prövningsprocessen behöver komplettera analyserna av deformationszonstabilitet med belastningsfall som inkluderar ”forebulge” framför isfronten. Framför isfronten sker en markhöjning i jordskorpan (”forebulge”) som påverkar bergspänningarna. För branta deformationszoner i Forsmark är denna tid precis innan isfronten rycker fram den mest kritiska för stabiliteten då de horisontella spänningarna reduceras (SSM Technical Note 2014:58). Fenomenet kan påverka deformationszonerna med VNV- och NV-strykning mest, exempelvis zonerna ZFMWNW0809A, ZFMNW0017 och ZFMWNW0123 i direkt anslutning till slutförvaret. SKB tar i sin nuvarande redovisning inte hänsyn till mekanismen med forebulge framför isfronten som kan leda till uppkomst av jordskalv i närområdet för slutförvaret vid Forsmark. Mekanismerna för seismisk aktivering av dessa zoner verkar bekräftas av SSM:s oberoende modellering (SSM Technical Note 2014:59) och behandlas i avsnitt 5.12 i denna granskningsrapport.



Även de regionala deformationszonerna Forsmark, Singö och Eckarfjärden kan påverkas av inlandisens framryckning. Delar av dessa zoner kan komma att aktiveras vid djup större än 1 000 m om det initiala bergspänningstillståndet är av transform-typ ("strike-slip"), vilket verkar sannolikt för Forsmarksområdet vid större djup (se avsnitt 3.5.2 och 5.12 i denna granskningsrapport).

SSM anser att SKB i kommande redovisningar behöver redovisa potentialen för propagering av deformationszoner baserat på tillkommen information insamlad under en eventuell kommande konstruktionsfas. SSM:s oberoende modelleringar visar dock att potentialen för propagering av deformationszonerna under referensglaciationscykeln är försumbar (SSM Technical Note 2014:58) eftersom de flesta zoner redan terminerar mot andra zoner och därför uppträder stabilt med liten potential för propagering (SSM Technical Note 2014:58). Frågan behöver adresseras i SKB:s program.

5.3.6 Övriga bergmekaniska aspekter

5.3.6.1 Underlag från SKB

SKB har hanterat slutförvaret som ett svaghetsplan under referensglaciationscykeln i sina analyser. Fallet med framryckning av isfronten över permafrost ger det mest pessimistiska utfallet med hydraulisk spräckning av befintliga sprickor ner till ett djup på ca 350 m vilket är ca 120 m ovanför slutförvarsdjupet (SKB R-09-35). Tillbakadragning av isfronten sker sannolikt utan permafrosttillväxt vilket leder till att risk för spräckning i SKB:s avsmältningsscenario endast förekommer på grundare djup (SKB TR-10-49). Sjöar och diskontinuiteter i permafrosten, så kallade talikar, kan också bidra till att reducera förhöjda porvattentryck och medverka till att hydraulisk spräckning endast förekommer i de ytliga delarna av berggrunden. Inom SKB:s redovisning bortses från draghållfastheten hos bergmassans sprickor. Detta antagande leder till att den hydrauliska spräckningen lokaliseras till befintliga flacka sprickor, som i sin tur kan ha genererats av tidigare glaciationscykler. Observationer som är konsistenta med denna tolkning finns från sprickdomänen FFM02 i Forsmark, vilken har ett maximalt djup på 200 m (SKB R-07-45). Propagering av flacka sprickor har högre sannolikhet att inträffa på grundare djup, vilket resulterar i kortslutning till ytan som bidrar till en minskning av grundvattentrycket i dessa sprickor. Enligt SKB:s bedömning är det därför osannolikt att hydraulisk spräckning leder till att nya sprickor bildas på slutförvarsdjup vid Forsmark.

SKB har studerat stabiliteten hos slutförvaret, dels gällande risken för hydraulisk spräckning genom slutförvarsplanet pga. glacialt inducerade vattentrycktillskott (SKB R-09-35), dels gällande skjuv- och dragbelastning av berget på grund av olika belastningsfall (SKB R-10-36). Inget av fallen är förknippad med någon risk för att hela slutförvaret kan utgöra ett svaghetsplan i berget, särskilt om avståndet mellan deponeringstunnlarna är längre än 20 m.

SKB anger följande skäl för att inte beakta spänningskorrosion, underkritiska samt tidsrelaterade deformationer och propagering av befintliga sprickor (SKB TR-10-23, avsnitt 3.2):

- tidsrelaterad sprickpropagering hämmas av tryckförhållanden
- spänningskorrosion i kanten av sprickan hämmas av tryckförhållanden
- tryckförhållanden i berget kommer att förbättras efter utvecklingen av svälltrycket från bentonitleran i buffert och återfyllnad.

Stöd för dessa antaganden finns i litteraturreferensen Damjanac och Fairhurst (2010) om förhållanden i berg i samband med dragspänningar, men artikeln beaktar dock inte inverkan av tryck- eller skjuvspänningar.



5.3.6.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s hantering av slutförvaret som ett svaghetsplan under referensglaciationscykeln är trovärdig och att ett lämpligt underlag för analys av slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet har tagits fram inom den aktuella tillståndsprövningen. SKB har enligt SSM:s uppfattning tagit hänsyn till rimliga konfigurationer av smältvattnets fria vattenyta inom istäcket och i berggrunden framför isfronten, samt även rimliga konfigurationer för fallen med förekomst av permafrost (SKB R-09-35). SSM:s externa experter har beräknat stabiliteten för ett horisontellt plan på slutförvarsdjup under referensglaciationscykeln baserat på antagandet av ett grundvattentrycktillskott på 15 MPa, vilket kan jämföras med en vertikal total bergspänning på ca 25 MPa i samband med den maximala istjockleken. Skjuv- och dragspänningarna i slutförvarsplanet visade sig vara försumbara under referensglaciationscykeln (SSM Technical Note 2014:58), under förutsättning att den maximala horisontella huvudspänningen inte avviker för mycket från deponeringstunnlarnas horisontella riktning. Tunnelarean i slutförvarssystemet utgör endast ca 5 procent av bergvolymens horisontella tvärsnitt på slutförvarsdjupet, vilket är en för liten andel för att motivera att slutförvaret kan utgöra ett svaghetsplan. SSM:s oberoende beräkningar bekräftar även SKB:s slutsats att slutförvarsplanet inte skulle kunna hysa betydande skjuvspänningar samt vara stabilt i samband med ett större jordskalv på momentmagnitud större än 7 på en av de regionala deformationszonerna närmast slutförvaret (SSM Technical Note 2014:58).

SSM:s bedömning av underkritiska och tidsrelaterade deformationer i bergmatrisen samt sprickpropagering återfinns i avsnitt 4.4.6 i denna granskningsrapport. SSM understryker dock att processer som kan visas vara obetydliga inom en tidsram på 1 000 år kan komma att få en större betydelse för den långsiktiga strålsäkerheten av slutförvaret när tidsramen utökas till 100 000 år eller ännu längre. SSM anser därför att SKB inför kommande steg i slutförvarsprogrammet behöver ta fram en utökad redovisning av den tidsrelaterade utvecklingen av bergmatris, spricknätverk och deformationszoner genom att ta hänsyn till alla möjliga lastmekanismer (dvs. dragspänningar i Mode I och skjuvspänningar i Mode II och III) samt fysiska och kemiska processer i bergmassan.

5.4 Hydrogeologisk utveckling

I detta avsnitt granskas SKB:s redovisning av hydrogeologiska förhållanden i och omkring slutförvaret efter att återmättnadsfasen har avslutats. Varaktigheten av återmättnadsfasen är inte med säkerhet känd, men huvuddelen av slutförvaret kan förväntas bli återmättad efter betydligt kortare tid än 1 000 år. För bedömning av hydrogeologiska förhållanden i vissa områden i slutförvaret som fortfarande kan vara omättade efter de första 1 000 åren, främst vissa deponeringshålspositioner belägna i bergvolymen som saknar vattenförande sprickor, samt betydelsen av dessa förhållanden för en eventuell påverkan på de tekniska barriärerna hänvisas till kapitel 4 i denna granskningsrapport (avsnitten 4.5 och 4.8).

De hydrogeologiska betingelserna och dess utveckling kopplar till säkerhetsfunktionerna R2 a) och b) dvs. att transportmotståndet, uttryckt som F-värdet, i sprickor ska vara högt och att den ekvivalenta flödes hastigheten Q_{eq} i gränsytan mellan buffert och berg ska vara lågt (SKB SR-Site huvudrapport, figur 8-2 och 8-3). Dessa storheter är kopplade till bergets förmåga att fördröja utsläpp av radionuklider. Den hydrogeologiska utvecklingen kopplar också starkt till den hydrokemiska utvecklingen. Flödena är särskilt betydelsefulla för den rumsliga fördelningen av icke-reaktiva lösta ämnen och måttligt reaktiva lösta ämnen så som Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , och Cl^- . Grundvatten med för låg eller hög salinitet kan inverka negativt på bufferten och återfyllnadens förmåga att upprätthålla ett flertal säkerhetsfunktioner (SR-Site huvudrapport, figur 8-2). Flödet och F-värdena styr till viss del även den rumsliga fördelningen av i vattnet lösta reaktiva ämnen som påverkar



säkerhetsfunktionen R1 tillhandahålla kemiskt gynnsamma förhållanden (huvudrapporten figur 8-2: R1a-f; figur 8-3 R1a-e). Denna säkerhetsfunktion är i sin tur kopplad till kapselns säkerhetsfunktion Can1 att utgöra korrosionsbarriär.

5.4.1 Hydrogeologisk utveckling under den tempererade fasen samt för vissa aspekter av permafrost, glaciala och periglaciala faserna

Detta avsnitt behandlar SKB:s redovisning av de hydrogeologiska förhållandena under den tempererade fasen. SKB hanterar hydrogeologiska beräkningar för radionuklidtransport och nedträngning av utspädda och syrehaltiga vatten till förvarsdjup under periglaciala förhållanden som en variant inom modelleringen för den tempererade fasen (SKB R-09-20, avsnitt 5.7). Denna variant baseras på beräkningar genomförda för preglaciala förhållanden (avsnitt 5.4.2). Av praktiska skäl har SSM följt denna hantering och bedömer dessa beräkningar inom ramen för detta avsnitt som fokuserar på utvecklingen under den tempererade fasen. Det kan också noteras att de hydrogeologiska resultaten för den tempererade fasen tillämpas för beräkningar av buffererosion och kopparkorrosion under hela glaciationscykeln.

5.4.1.1 Underlag från SKB

SKB:s redovisning av de hydrogeologiska betingelserna under den tempererade fasen behandlas kortfattat i SR-Site huvudrapport (avsnitt 10.3.6), baserad på mer detaljerad information i relevanta underlagsrapporter (SKB R-09-20, SKB R-09-22). SKB har också tagit fram en allmän beskrivning av processer relevanta för grundvattenflöden som bildar en grund för detaljerade modellstudier (SKB TR-10-48). Modellstudierna som redovisas i ovanstående rapporter bygger i väsentlig utsträckning på den platsbeskrivande modellen för Forsmark (SDM-Site, SKB TR-08-05, kapitel 8) med tillhörande underlagsrapporter. För en ingående beskrivning och granskning av SDM-Site hänvisas till avsnitt 3.1.5 i denna granskningsrapport. SKB har på SSM:s begäran tillfört ansökan flera förtydliganden och kompletteringar som i huvudsak avser det hydrogeologiska området:

- klarlägganden avseende hydromodellering i SKB R-09-19 och SKB R-09-20, SKBdoc 1319608
- svar på ytterligare frågor avseende SKB R-09-19 och SKB R-09-20, SKBdoc 1372883
- svar till SSM:s begäran om komplettering rörande osäkerheter i hydrogeologiska beräkningar, SKBdoc 1396324 med bilagor SKBdoc 1396325 och SKBdoc 1416510
- svar till SSM:s begäran om förtydligande om nedträngning av utspädda vatten, SKBdoc 1448717.

Inom ramen för OECD/NEA:s granskning av SR-Site svarade SKB på en rad frågor som delvis relaterar till hydrogeologi och utförde även ytterligare modelleringsinsatser (SKBdoc 1292468, SKBdoc 1314716, SKBdoc 1323497 och SKBdoc 1343309). SKB analyserade exempelvis effekten av ett utökat antal hydrogeologiska realiseringar på antalet deponeringshål med höga flöden (SKBdoc 1343309).

SKB anger i SR-Site huvudrapport (avsnitt 10.3.6) att det övergripande syftet med de hydrogeologiska simuleringarna är att analysera platsrelaterade hydrogeologiska och hydrogeokemiska förhållanden under ett tempererat klimat sedan förvaret återfyllts och förslutits (säkerhetsfunktionerna R1 och R2; SR-Site huvudrapport, figur 10-2).

SKB tillämpar samma konceptuella modell för utredningarna kopplade till grundvattenflöde som den som använts för den platsbeskrivande modellen för Forsmark SDM-Site ("Site Descriptive Model", SKB TR-08-05, avsnitt 8.1.1). För den tempererade fasen har SKB representerat denna konceptuella modell med olika metoder, rumsliga



domäner och upplösningar. De matematiska modellerna har implementerats i beräkningsverktyget Connectflow (Serco, 2008). SKB har skapat modeller för:

- den regionala skalan
- platskalan
- förvarsskalan.

Modellerna för förvarsskalan och platskalan kopplas för vissa beräkningar ihop, exempelvis för att beräkna partikelspår från kapslarna till biosfären.

SR-Site modellen för den regionala skalan är i stort sett samma som ECPM/CPM modellen ("Equivalent Continuous Porous Medium"/ "Continuous Porous Medium") som togs fram inom den platsbeskrivande modelleringen (SKB R-09-20, avsnitt 4.1) och som beskrivs i avsnitt 3.1.5 i denna granskningsrapport. Skillnader mellan modellerna är att för SR-Site-modellen har (i) vissa parametrar för den paleo-hydrogeologiska simuleringen modifierats, (ii) slutförvarstunnlarna beaktats vid beräkningen av konnektivitet för det stokastiska spricknätverket, (iii) randvillkoren för landhöjningen ändrats för att tillgodose tiden mellan 2000 e.Kr. till 12000 e.Kr. och (iv) ändringar i matrisdiffusionsberäkningsalgoritmen genomförts (SKB R-09-20, appendix C). Slutförvaret representeras inte explicit i SKB:s modell för den regionala skalan.

Modellen för platskalan täcker samma rumsliga domän som modellen för den regionala skalan (SKB R-09-20, avsnitt 4.2) och har samma rumsliga uppdelning mellan CPM- och ECPM-delarna. Till skillnad från den regionala modellen så representeras delar av områdena som utgör sprickdomänerna FFM01 till FFM06 (SKB R-07-45, avsnitt 6.1) närmast slutförvaret med en stokastisk spricknätverksmodell DFN ("Discrete Fracture Network"). Denna är baserad på hydro-DFN modellen från SDM-Site. Till skillnad från hydro-DFN modellen i SDM-Site genereras sprickstorlekar ned till 0,4 m i slutförvarets närhet och ned till 5,6 m för övriga bergvolymen. Slutförvarstunnlarna representeras med sprickor med motsvarande hydrauliska parametrar (SKB R-09-20, tabell 4-2 och figur 4-11). En sprängskadezon EDZ ("Excavation Damage Zone") återges i modellen av sprickor med motsvarande hydrauliska egenskaper. Deponeringshålen representeras dock inte i modellen.

Modellen för förvarsskalan består av tre separata modeller. De tre modellerna omfattar var sin del av slutförvarsvolymen eftersom den sammantagna volymen inte har varit beräkningsmässigt numeriskt hanterbar. Volymerna överlappar varandra något, men deponeringshål representeras endast i de delar som inte överlappar. De tre delarna når inte upp till ytan och jordlagren HSD ("Hydraulic Soil Domain"), som således inte innefattas i modellerna. De återfyllda slutförvarstunnlarna och deponeringshålen modelleras som ett poröst kontinuum (CPM-modell) som omges av en DFN-modell. DFN-modellen har baserats på de parametrar som togs fram i SDM-Site. Till skillnad från hydro-DFN-modellen i SDM-Site genereras sprickstorlekar ned till 0,4 m i slutförvarets närhet och ned till 5,6 m för övriga volymer på samma sätt som inom modellen för platskalan. Sprängskadezonen (EDZ) modelleras på samma sätt som inom modellen för platskalan.

SKB har parametriserat alla modellerna med data som har tagits fram inom den platsbeskrivande modelleringen, och som i datarapporten har bedömts tillämpbara (SKB TR-10-52, avsnitt 6.6). Detta innefattar parametreringar för tre olika samband mellan sprickstorlek och transmissivitet; (i) ett korrelerat fall, (ii) ett semi-korrelerat fall och (iii) ett okorrelerat fall. SKB tillämpar i stort samma begynnelse- och randvillkor för den regionala modellen som för SDM-Site-modellen (SKB R-09-20, avsnitt 4.1.2). Begynnelse- och randvillkoren för modellerna i platskala och förvarsskala har importerats från den regionala modellens resultat för relevanta tidssteg (SKB R-09-20, avsnitt 4.2.2). För DFN-delen av platskalemodellen samt för modellen i förvarsskala har



begynnelsevärdena för tryck och salthalt interpolerats från den regionala modellens resultat. SKB har inte modellerat densitetsutvecklingen i DFN-modellerna utan den rumsligt variabla densitetsfördelningen antas vara konstant i tiden.

SKB har genomfört simuleringar med den regionala modellen från 8000 f.Kr. till 12000 e.Kr. med 20 års tidssteg. Resultaten från den regionala modellen i form av rumsliga densitets- och tryckfördelningar har av SKB tillämpats som rand- och begynnelsevillkor för modellen i platsskala och förvarsskala för givna tidpunkter (SKB R-09-20, avsnitt 4.2.2). Resultat från uppskalningen i form av hydrauliska konduktivitetsvärden har tillämpats som indata till ECPM-delarna av modellen för platsskalan.

SKB har genomfört simuleringar med modellen för platsskalan med konstanta stationära grundvattentryck för vart tusende år från 0 e.Kr. till 12000 e. Kr (SKB R-09-20, avsnitt 4.2.3). Beräkningarna för 2000 e.Kr. har baserats på 10 realiseringar av hydrauliska bergdomänen HRD ("Hydraulic Rock Domain"), dvs. bergmassan, och hydrauliska ledardomänen HCD ("Hydraulic Conductor Domain"), dvs. deformationszonerna. SKB har beräknat utsläppspunkter i biosfären, vattnets uppehållstider samt flödesvätt yta och F-värden för de delar av partikelspårerna som har förts vidare från modellen för förvarsskalan.

SKB har använt modellen för förvarsskalan med konstanta stationära grundvattentryck för att få information om förhållanden vid vissa bestämda tidpunkter nämligen år 2000 e.Kr., 3000 e.Kr., 5000 e.Kr. och 9000 e. Kr (SKB R-09-20, avsnitt 4.3.3). Beräkningarna för 2000 e.Kr. har baserats på 10 realiseringar av HRD och HCD. Beräkningarna för de andra tidpunkterna har genomförts för en realisering av HRD och med tillämpning av deterministiska HCD. Modellen används för att beräkna partikelbanor från tre utsläppspunkter per deponeringshål (Q1, Q2 och Q3) fram till modellränderna samt för de hydrogeologiska prestandamått som är kopplade till dessa partikelbanor:

- Darcyflux U_r
- flödesrelaterat transportmotstånd F_r
- vattnets uppehållstider t_r
- diffusiv transport ekvivalent flöde Q_{eq}
- spårlängd L_r .

Q1 motsvarar flödet genom en spricka som skär deponeringshålet, Q2 flödet genom EDZ och Q3 flödet genom återfyllnaden till närmaste spricka som skär deponeringstunneln. SKB använder slutpunkterna för partikelbanorna i modellen för förvarsskalan som startpunkter för partikelspårningen i modellen för platsskalan. Dessa startpunkter kan ligga i antingen DFN- eller ECPM-delarna av modellen beroende på var partikeln lämnar förvarsskalamodellen. SKB simulerar med modellen för det okorrelerade fallet totalt sett 20 realiseringar för beräkningar av buffererosion och kapselkorrosion. OECD/NEA:s internationella granskningsgrupp efterfrågade ytterligare realiseringar utöver de ursprungliga 10 för att bedöma vikten av antalet realiseringar (SKBdoc 1343309). SKB:s kompletterande beräkningar pekar på att medelvärdena för resultaten knappt påverkas medan variansen avtar betydligt. SKB har även modellerat ett antal ytterligare varianter (SKB R-09-20, avsnitt 5) som analyserar effekten av möjliga deformationszoner, olika sprickstorlek-transmissivitet-samband, förändrad vertikal hydraulisk konduktivitet, utökad rumslig variabilitet baserat på området kring SFR, bristfällig återfyllnad, inverkan av platsundersökningens undersökningsborrhål samt effekter av en inlandsis för olika isfrontslägen.

SKB listar i SR-Site huvudrapport (avsnitt 7.5 och 10.3.6) och SKB R-09-22 (avsnitt 7.4) de ändamål som resultaten från beräkningarna med de olika modellerna används för.



Resultaten från den regionala modellen i form av salthalter och fördelningar av andelar av olika typvatten har använts för en utförligare analys av den långsiktiga hydrogeokemiska utvecklingen vid Forsmark (SKB TR-10-58, avsnitt 3.4 och appendix 1).

SKB har med platsskalemodellen beräknat partikelbanor från deponeringshålspositionerna till ytan. De resulterande utsläppspunkterna har använts i konsekvensanalysens biosfärsberäkningar (SKB TR-10-09, avsnitt 7.1).

SKB tillämpar resultaten från modellen för förvarsskalan för följande ändamål:

- indata för buffererosionsberäkningar Ur även benämnt Uo i delar av redovisningen (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.11, SKB TR-10-66, avsnitt 5.3.5)
- indata för korrosionsberäkningar Qeq, Ur (SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.6)
- analys av korrelation mellan deponeringshålsflöden under öppet respektive återmättat förvar för återkoppling till konstruktionsförutsättningarna (SKB R-09-22, avsnitt 7.1)
- indata för beräkning av syrenedträngning till förvaret, F-värden (SKB TR-10-57 avsnitt 8.1 och 8.2; SR-Site huvudrapporten, avsnitt 10.4.7; SKB TR-10-66, avsnitt 5.2.3)
- indata för att beräkna tidsåtgång för att uppnå utspädda förhållanden i anslutning till deponeringshålen under tempererade respektive periglaciala förhållanden (tempererade förhållanden, SKB R-09-20, appendix F, SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.6; periglaciala förhållanden SKB R-09-20, avsnitt 5, SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.6).

SKB tillämpar resultat från den kombinerade förvars- och platsskalemodellen för två ändamål kopplade till radionuklidtransportberäkningar:

- prestandamåtten beräknade för basfallet baserat på 10 realiseringar för tiden 2000 e.Kr. och tre skilda sprickstorleks-transmissivitetssamband; Qeq1, Qeq2, Qeq3, Ur1, Fr1, Fr2, Fr3, tr1, tr2, tr, Lr3, Darcyhastighet i deponeringstunneln (SKB TR-10-50, tabell 3-1 och 3-2).
- parametrering av en alternativ konceptuell modell för flöde och radionuklidtransport genom ett nätverk av kanaler (SKB R-10-69, avsnitt 1).

SKB redovisar betydelsefulla antaganden, förenklingar och osäkerheter som kopplar till den hydrogeologiska modelleringen för den tempererade fasen (SKB R-09-22, avsnitt 5.5). SKB anger exempelvis att modelleringen med CHAN3D baserad på en representation av kanaliserat flöde är att betrakta som en alternativ konceptuell modell, som ger likartade resultat för prestandamåtten som Connectflow-koden. SKB framhåller vidare att osäkerheter i apertur-transmissivitetfördelningen är försumbar för analysen av spårämnestransport och att den inte nämnvärt påverkar den hydrogeokemiska utvecklingen.

5.4.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s redovisning av den hydrogeologiska utvecklingen under den tempererade fasen bygger på väl utförda utredningar som grundar sig i en vetenskapligt förankrad förståelse för det hydrogeologiska systemet på platsen. SSM anser att SKB:s hydrogeologiska utredningar är baserade på relevanta data, vilka bedöms utgöra en lämplig utgångspunkt för säkerhetsanalysarbetet (avsnitt 3.1.5 i denna granskningsrapport). SSM anser att SKB:s hydrogeologiska utredningar beaktar de aspekter av hydrogeologin som är viktiga för konsekvensanalysen och analysen av de tekniska barriärernas långsiktiga beständighet. SSM konstaterar att SKB:s modelleringsarbete har varit mycket omfattande och har adresserat osäkerheter dels genom att tillämpa olika typer av modeller i olika rumsliga skalor, dels genom att undersöka ett flertal varianter och stokastiska realiseringar av spricknätverkets geometri.

SSM bedömer dessutom att SKB har tillämpat en lämplig kvalitetssäkring i modelleringsarbetet. Det är också positivt att SKB har publicerat vissa resultat från de hydrogeologiska utredningarna i vetenskapliga tidsskrifter (Selroos och Follin, 2014; Joyce m.fl., 2014). SSM anser att det finns betydelsefulla kvarstående osäkerheter som förväntas påverka resultat från hydrogeologisk modellering av den tempererade fasen och som därför behöver belysas ytterligare i kommande steg av SKB:s program. SSM bedömer att de viktigaste av dessa osäkerheter är (se även avsnitt 3.1.5):

- konceptuella osäkerheter när det gäller spricknätverkets geometri och förekomst av glesa kanalnätverk vilket kan påverka antalet deponeringshål som skärs av vattenförande sprickor och flödesfördelningen till deponeringshålen
- osäkerheter i sambandet mellan intensitet och storlek för vattenförande sprickor
- osäkerheter med hänsyn till en heterogen fördelning av sprickornas intensitet
- osäkerheter i deformationszonernas hydrauliska egenskaper
- osäkerheter i sambandet mellan sprickapertur och transmissivitet.

SSM har i granskningen förutom SKB:s redovisning beaktat resultat från SSM:s externa experter som på SSM:s uppdrag har genomfört utredningar kring väl avgränsade hydrogeologiska frågor. SSM:s externa experter har bidragit med granskning av SKB:s dataunderlag, förståelse för hydrogeologiska processer samt bedömning av konceptuella modeller (SSM Technical Note 2012:37; SSM Technical Note 2012:41). Därutöver har SSM för att bedöma rimligheten i SKB:s resultat, låtit en extern expert med hjälp av oberoende modeller modellera uppskalning av hydrogeologiska parametrar och flöden till simulerade tunnlar och deponeringshål (SSM Technical Note 2012:67). Ytterligare ett uppdrag har syftat till bedömning av osäkerheter i beräkningar av flöden till deponeringshål (SSM Technical Note 2014:05). SSM anser att kvalitetssäkring är en viktig aspekt av hydrogeologisk modellering med tanke på områdets stora omfattning och komplexitet. SKB:s kvalitetssäkring har av detta skäl undersökts av en extern expert (SSM Technical Note 2014:46). SKB:s så kallade Qeq-koncept för att modellera diffusiv transport i slutförvarets närområde har också varit föremål för en expertgranskning (SSM Technical Note 2013:36). Kopplingen mellan den bergmekaniska utvecklingen av slutförvaret och transmissiviteten i sprickor har också modellerats av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2013:37). Slutligen har SKB:s resultat för de flödesrelaterade transportparametrarna granskats genom att jämföra med resultat från användning av en förenklad modell för uppskattning av dessa parametrar (SSM Technical Note 2015:40).

SSM:s granskning har haft som målsättning att ta fram bedömningsunderlag för delar av säkerhetsanalysen som tillämpar de hydrogeologiska resultaten. Eftersom de efterföljande beräkningarna i säkerhetsanalysen är känsliga för olika aspekter av den hydrogeologiska modelleringen, så krävs en bedömning av SKB:s resultat utifrån samtliga typer av betydelsefulla efterföljande beräkningar. De efterföljande beräkningarna som är mest känsliga för de hydrogeologiska resultaten blir styrande för vilka krav som behöver ställas på modellernas tillförlitlighet. Så som påpekats ovan är synpunkter på SKB:s platsbeskrivande modell samt spricknätverkets geometri och egenskaper betydelsefulla även för de efterföljande beräkningarna. I SSM:s redovisning nedan bedöms följande aspekter av SKB:s redovisning:

- omfattning och kvalitet på hydrogeologiska utredningar för den tempererade fasen
- konceptuella modeller och hantering av osäkerheter inom hydrogeologisk modellering
- resultaten från den regionala modellen i form av fördelning av salthalter och andelar av olika typvatten
- platsskalemodellens partikelbanor från berörda kapselpositioner till markytan som används i konsekvensanalysens biosfärsberäkningar



- förvarsskalemodellens resultat som tillämpas som indata för bufferterosionsberäkningar (Ur)
- förvarsskalemodellens resultat som tillämpas som indata för korrosionsberäkningar (Qeq och Ur)
- förvarsskalemodellens resultat som tillämpas för bedömning av korrelationen mellan deponeringshålsflöden under öppet respektive förslutet och återmättat förvar, vilken används för att ge återkoppling till konstruktionsförutsättningarna
- förvarsskalemodellens resultat som används som indata för att beräkna syrenedträngning till förvaret under periglaciala förhållanden (F-värden)
- förvarsskalemodellens resultat som tillämpas som indata för att beräkna tider tills utspädda vatten når ned till deponeringshålen både under tempererade och under periglaciala förhållanden
- prestandamått från den kombinerade förvars- och platsskalemodellen av relevans för radionuklidtransport (Qeq1, Qeq2, Qeq3, Ur1, Fr1, Fr2, Fr3, tr1, tr2, tr3)
- modellering av flöde genom ett nätverk av kanaler baserad på den s.k. CHAN3D-modellen, vilken bygger på parametrering av den kombinerade förvars- och platsskalemodellen och som används för radionuklidtransportberäkningar.

Vissa frågeställningar kopplade till glaciala och periglaciala förhållanden kommenteras i detta avsnitt eftersom SKB efter vissa justeringar har baserat sin analys av dessa frågeställningar på basis av sin modellering av tempererade förhållanden. Dessa frågeställningar avser syrenedträngning i samband med avsmältning av en inlandsis respektive nedträngning av mycket utspädda grundvatten som kan orsaka bufferterosion.

SSM anser att SKB har genomfört ett mycket omfattande arbete för att prediktera hydrogeologiska storheter som behövs i de efterföljande stegen i säkerhetsanalysen. SSM bedömer att SKB:s redovisning och kompletteringar bygger på väl utförda utredningar, vilka grundar sig i en vetenskapligt förankrad förståelse för det hydrogeologiska systemet vid Forsmark samt beaktande av relevanta hydrogeologiska processer (SSM Technical Note 2012:41). SSM bedömer att SKB har tagit fram resultat som är ändamålsenliga för de efterföljande beräkningarna. För efterföljande säkerhetsanalysberäkningar har SKB haft ett behov av att ta fram hydrogeologiska storheter från en meter-skala vid deponeringshålen till en regional skala för att beräkna utsläppspunkter för tiotusentals år framåt. För att kunna ta fram sådana resultat har SKB tillämpat stokastiska modeller som kännetecknas av en hög grad av komplexitet. SSM bedömer att den komplexa modelleringen rättfärdigas av SKB:s syfte att kunna uppskatta hydrogeologiska storheter i de olika skalorna, att kunna illustrera betydelsen av osäkerheter, och för att resultaten på ett lämpligt sätt ska kunna tillämpas i de efterföljande stegen i säkerhetsanalysberäkningarna.

SSM har låtit en extern expert granska kvalitetssäkringen av SKB:s hydrogeologiska modellering (SSM Technical Note 2014:46). En av slutsatserna är att kvalitetssäkringen är av lämplig omfattning och inriktning för ändamålet. SSM:s externa expert bedömer att SKB:s dokumenthanteringssystem skapar en godtagbar spårbarhet med avseende på detaljerad information om beräkningarna. Samtidigt konstateras att spårbarheten i SKB:s sammanfattande rapporter inom ansökansunderlaget kan förbättras för att underlätta för läsare och granskare, exempelvis genom mer specifika referenser till andra delar av ansökansunderlaget och till detaljerade SKB-dokument. SSM delar denna bedömning. SKB:s generella kvalitetssäkringssystem behandlas i avsnitt 2.5 och SSM:s generella bedömningar av hanteringen av data och modeller redovisas i avsnitt 2.4 i denna rapport.

SSM konstaterar att prediktioner av flöden i stora modellområden och med hög rumslig upplösning i slutförvarets närområde på en tidsskala på tiotusentals år oundvikligen är behäftade med osäkerheter. SKB baserar modellernas konceptualisering och parametrering på den platsbeskrivande modelleringen. Så som har påpekats ovan

påverkar de osäkerheter som SSM har bedömt vara betydelsefulla för platsbeskrivande modelleringen även modellerna för den tempererade fasen. SSM bedömer nedan hur de hydrogeologiska resultaten kan förväntas påverka efterföljande säkerhetsanalyssteg och hur det påverkar kraven på de hydrogeologiska resultatens tillförlitlighet.

SSM noterar att SKB:s bedömning av alternativa konceptualiseringar och parametreringar kan bli mycket resurskrävande i och med tillämpningen av komplexa modeller. SSM anser därför att SKB behöver överväga att även parallellt tillämpa förenklade modeller i kommande steg av sitt program för att undersöka konceptuella och parameterosäkerheter.

SKB:s tillämpning av komplexa modeller har även föranlett SSM att låta externa experter genomföra flera förhållandevis komplexa modellstudier som bedömer SKB:s resultat. I dessa studier utförs oberoende modelleringar med alternativa koder som tillämpar data från SKB:s platsbeskrivande modell (SSM Technical Note 2012:67, SSM Technical Note 2015:40). Resultaten pekar på att SKB:s beräkningar i huvudsak är korrekta och att resultaten verkar vara rimliga. När det gäller vissa av SKB:s hydrogeologiska prestandamått har en rimlig överensstämmelse även kunnat uppnås med oberoende resultat som baseras på en förenklad modell (SSM Technical Note 2015:40). Även simuleringar på en 100 m blockskala med en annan alternativ modell ger F-värden som överlag är lika SKB:s resultat (SSM Technical Note 2012:67). SSM:s externa expert har också erhållit en överensstämmelse mellan de uppskalade transmissivitetvärden som SKB tillämpar i ECPM- och ECDM-beräkningarna ("Equivalent Discontinuous Porous Medium") och resultat från alternativa oberoende metoder (SSM Technical Note 2012:67). Beräkningar med en alternativ metod som tillämpar fluxviktade uppskattningar av porositet och flödesvätt yta, vilka kan anses representera preferentiella flödesvägar i sprickplanen på ett bättre sätt än de av SKB tillämpade metoderna, ger dock betydligt mindre värden än SKB:s uppskattningar. Betydelsen av detta bedöms emellertid inte vara så stor då SKB inte använder de uppskalade värdena för porositet och flödesvätt yta utan räknar direkt med resultat från DFN-beräkningarna. Detta gäller dock inte i syrenedträngningsberäkningarna. Sammantaget bedömer SSM att SKB:s modellberäkningar är rimligt tillförlitliga givet den tillämpade konceptuella modellen och SKB:s platsundersökningsdata (kommenteras närmare i avsnitt 3.1.5 i denna rapport).

SSM bedömer att den regionala modellens resultat med avseende på fördelning av salthalter och andelar av olika typvatten i Forsmark är lämpliga som indata till studien av den hydrogeokemiska utvecklingen (SKB TR-10-58, avsnitt 3.4 och appendix 1).

SSM bedömer att de med platsskalemodellen beräknade utsläppspunkterna som används i konsekvensanalysens biosfärsberäkningar (SKB TR-10-09, avsnitt 7.1) kan påverkas av de inte fullt ut analyserade och beaktade osäkerheter som beskrivs i SSM:s bedömning av det hydrogeologiska initialtillståndet. Främst handlar det om osäkerheter i parametrering av HCD (avsnitt 3.1.5.2 i denna granskningsrapport). SSM bedömer dock att dessa osäkerheter har begränsad betydelse för konsekvensanalysen eftersom SKB väljer de faktorer som ger högst dos bland biosfärsobjekten och över deras utveckling i tiden (SKB TR-10-50, avsnitt 3.5). Eftersom det handlar om ett stort antal utsläppspunkter som beaktas i analysen (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.2.2) och läget av större deformationszoner i landskapet kan antas vara relativt väl karakteriserat anser SSM att en ytterligare analys av utsläppspunkterna sannolikt inte skulle leda till en maximal doskonverteringsfaktor som skiljer sig väsentligt från de beräknade värdena (avsnitt 7.2.2.2 i denna granskningsrapport).

Resultat från modellen för förvarsskalan har använts som indata för beräkningar av buffererosion, kopparkorrosion och syrenedträngning till förvaret. Därutöver har tider för

nedträngning av utspädda vatten till förvarsdjup beräknats baserat på resultat från modellen för förvarsskalan. Nedan följer bedömningar av de olika resultaten i förhållande till deras tillämpningsområden. Korrelation mellan flöden i öppet och förslutet förvar bedöms däremot i avsnitt 3.2.5.2 i denna granskningsrapport.

Det centrala hydrogeologiska resultatet för buffererosionsberäkningarna är Darcy-flödet (Ur, SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.11; SKB TR-10-66, avsnitt 5.3.5.) och den därur beräknade grundvattenflödeshastigheten. SSM bedömer att förhållandet mellan sprickapertur och transmissivitet som har tillämpats för att beräkna grundvattenflödeshastigheterna också är betydelsefullt för buffererosionsberäkningarna. Dessutom är antalet deponeringspositioner som är kopplade till det flödande spricknätverket genom sprickor som skär deponeringspositionerna säkerhetsmässigt betydelsefull.

Såsom redovisas i kapitel 3 i denna granskningsrapport anser SSM att det finns kvarstående parameterosäkerheter och konceptuella osäkerheter, främst rörande spricknätverkets geometri och sambandet mellan sprickapertur och transmissivitet (avsnitt 3.1.5.2). Fördelningen av Darcy-flödet, Ur, och därmed grundvattenflödeshastigheterna vid deponeringshålspositionerna påverkas av dessa osäkerheter. Ett alternativt grundvattenflödessystem med glesa kanaler skulle möjligtvis leda till betydande skillnader i antalet deponeringshålspositioner som skärs av flödande sprickor. SSM bedömer att denna typ av osäkerhet är betydelsefull för buffererosionsberäkningarna och antalet deponeringshålspositioner som skulle kunna utsättas för advektiva förhållanden under förvarets långsiktiga utveckling. SSM noterar att eftersom det sannolikt endast är i ett fåtal deponeringshålspositioner som grundvattenflödena leder till advektiva förhållanden så är svansarna i fördelningsfunktioner för grundvattenflöden och prestandamåtten av stor betydelse. Fördelningarnas yttersta percentiler kan vara svårare att förutsäga än statistiska mått så som medelvärde och varians. SSM anser med tanke på de förväntade sprickfattiga förhållandena att ytterligare insatser för förbättrad kvantifiering av osäkerheterna i grundvattenflödesberäkningarna behöver genomföras under ett kommande detaljundersökningsskede. SKB behöver redovisa betydelsen av eventuella kvarstående osäkerheter i sammanhanget buffererosionsberäkningar med beaktande av nya kunskaper och ytterligare analyser av grundvattenflödessystemet (avsnitt 3.1.5.2 i denna rapport).

Sambandet mellan sprickapertur och transmissivitet har en betydande påverkan på det möjliga antalet advektiva deponeringshålspositioner (SSM Technical Note 2015:49). SKB:s egna beräkningar visar att basfallet efter en miljon år ger 19 advektiva positioner medan det fall som SKB kallar pessimistisk sprickapertur ger 575 advektiva positioner (SR-Site huvudrapport, figur 12-3). SKB förkastar fallet med pessimistisk sprickapertur för buffererosionsberäkningarna med hänvisning till att sprickaperturerna för detta fall är större än vad som kan antas baserat på resistivitetmätningar (SKB TR-10-50, appendix A). SKB beräkningar för basfallet är baserade på data från experiment vid Äspölaboratoriet (SKB IPR-03-13). SSM håller med om att fallet med pessimistisk sprickapertur måste anses osannolikt, men samtidigt noterar myndigheten att även fördelningen av de så kallade volymetriska aperturerna som har tagits fram med resistivitetmätningarna är större än de som SKB tillämpar för basfallet. SSM anser därför att det inte baserat på tillgängligt underlag går att utesluta förekomst av större sprickaperturer som kan medföra mer omfattande buffererosion. SSM anser att SKB behöver ytterligare undersöka sambandet mellan sprickapertur och transmissivitet i syfte att bättre underbygga nuvarande samband alternativt modifiera buffererosionsberäkningarna. Med beaktande av att SKB utvärderat fallet advektiva förhållanden i samtliga deponeringshåll har dessa osäkerheter mindre betydelse i perspektivet riskberäkningar, men SSM anser ändå att dessa frågor är viktiga ur betydelsen fenomenologisk förståelse för buffertens långsiktiga utveckling och bedömning



av buffertens långsiktiga skyddsförmåga. En bedömning av bufferterrosionsberäkningarna ur andra perspektiv än sprickapertur återfinns i avsnitt 5.8 och 5.13 om bufferterrosionstider i denna granskningsrapport.

Hydrogeologiska beräkningsresultat används som indata för korrosionsberäkningarna, varav de två viktigaste parametererna är det så kallade ekvivalenta flödet (Qeq) och Darcy-flödet (Ur; SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.6). SSM:s externa experter anser att SKB:s redovisning av Qeq-konceptet är svärgenomtränglig på grund av att tillgänglig information är spridd över ett antal rapporter och att ett stort antal specialfall för olika geometrier har redovisats parallellt, och dessutom används en för SKB specifik terminologi (SSM Technical Note 2013:36). Experterna drar dock också slutsatsen att konceptet utgår från ett konsekvent och logiskt spårbart ramverk som grundar sig på ett angreppssätt för diffusiv transport som ofta tillämpas även i andra discipliner. De externa experterna bedömer att SKB har använt lämpliga metoder för att uppskatta transport längs olika diffusiva transportvägar i och omkring slutförvaret. SSM anser liksom SSM:s externa experter att SKB:s beräkningsmetoder kopplade till Qeq-konceptet utgör lämpliga verktyg för att förutsäga diffusiv transport i närområdet av ett slutförvar.

SKB har i samband med de hydrogeologiska beräkningarna tagit fram ekvivalenta flöden (Qeq-värden) för materieöverföring mellan bufferten i ett deponeringshål och grundvattnet i en spricka som skär deponeringshålet (SKB R-09-20, avsnitt 3.2.6, ekvation 3-7). Qeq-värdet är proportionellt med volymflödet i sprickan. SSM anser därför att osäkerheter rörande spricknätverkets geometri (avsnitt 3.1.5.2 i denna granskningsrapport) också bidrar till osäkerheter för SKB:s redovisade Qeq-värden, men eftersom diffusionsmotståndet genom bufferten ger en långsam transport i anslutning till kapseln och resulterande korrosion är mycket begränsad (SKB TR-10-66, figur 5-5) bedömer SSM att osäkerheter i Qeq-värdena som resulterar från osäkerheten i spricknätverkets geometri har en liten betydelse för detta fall.

SKB använder Darcy-flödet, Ur, för att beräkna korrosion under förutsättningen advektiva förhållanden i bufferten (SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.2). Eftersom beräkningarna av Ur har en betydelse för kopparkapslarnas korrosionshastigheter anser SSM att SKB behöver ytterligare analysera implikationerna på kopparkorrosionsberäkningarna av de hydrogeologiska osäkerheterna avseende spricknätverkets geometri och den hydrogeologiska platsbeskrivande modellen (avsnitt 3.1.5.2 i denna granskningsrapport).

För att beräkna syrenedträngning till förvaret under den periglaciala perioden har SKB använt F-värden som har beräknats med förvarsskalemодellen för den tempererade fasen (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.7; SKB TR-10-57, avsnitt 8.1 och 8.2; SKB TR-10-66, avsnitt 5.2.3). SSM:s externa expert bedömer i sin granskning av denna fråga att uppskalning av porositet och flödesväta ytor som direkt kopplar till F-värdena kan för situationer med preferentiella flöden leda till underskattningar (SSM Technical Note 2012:67). SSM bedömer sammantaget att SKB inför kommande steg i sitt program behöver redogöra för hur den tillämpade uppskalningsmetoden påverkar resultat som används i säkerhetsanalysen med beaktande av de osäkerheter i de hydrogeologiska beräkningarna som SSM har påpekat (avsnitt 3.1.5 i denna granskningsrapport).

SSM bedömer att SKB:s användning av hydrogeologiska indata för beräkning av tider tills utspädda vatten når ned till deponeringshålen är ändamålsenliga, vilket avser både den tempererade fasen (SR-Site huvudrapport avsnitt 10.3.6; SKB R-09-20, appendix F) och den periglaciala fasen (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.6; SKB R-09-20, avsnitt 5.7). SSM konstaterar att F-värdet i en spricka är omvänt proportionellt till volymsflödet i sprickan (SKB R-09-20 avsnitt 3.2.6), samt att F-värden används för att beräkna nedträngning av utspädda vatten till förvarsdjup. Därmed har osäkerheter i beräknade



volymflöden också betydelse för F-värden, under förutsättning att den flödesvättan ytan förblir densamma. SSM konstaterar att om flödet skulle vara kanaliserat i sprickan blir den flödesvättan mindre i förhållande till en situation där hela sprickan deltar i flödet. Samtidigt kan man argumentera att det finns stagnant vatten i delar av sprickorna som är belägna utanför flödeskanalen. Diffusion från flödeskanalen till den stagnanta vattenfasen kompenserar då för de reducerade F-värdena i flödeskanalen. SSM konstaterar att frågan kring en möjlig kanalisering av flödet har en betydelse i sammanhanget beräkning av tider för utspädda vatten att nå ner till förvarsdjup, men effekten av ett kanaliserat flöde är samtidigt avhängig hur beräkningarna har genomförts och vilka antaganden som har tillämpats. SKB behöver i kommande steg i programmet beakta olika möjliga antaganden och utvärdera deras konsekvenser för beräkningarna.

I en kompettering till ansökan redovisar SKB hur osäkerheter i F-värdena påverkar tiderna för nedträngning av utspädda grundvatten till förvarsdjup och olika deponeringshålspositioner (SKBdoc1448717). För ett fall där F-värdena har reducerats med en faktor fem blir två till tre gånger fler hål exponerade för utspädda grundvatten inom en tidsperiod av 10 000 år till 60 000 år med tempererade förhållanden. Detta motsvarar ca 120 respektive 300 deponeringshål. SKB antar dock konservativt i dessa beräkningsfall att det inflödande vattnet vid ytan är helt utan salt och att inga reaktioner sker med berget. Från dessa beräkningar kan slutsatsen dras att de första deponeringspositionerna utsätts för utspädda förhållanden redan efter ett tiotal år. SSM anser att det finns betydande kvarstående osäkerheter kopplade till analys av flödesförhållanden för enskilda deponeringshål med de högsta grundvattenflödena. Samtidigt så kan den geokemiska grunden för dessa beräkningar, nämligen att det inflödande vattnet vid ytan är helt utan salt och att inga reaktioner sker med berget, betraktas som så konservativt att det även är orealistiskt (se avsnitt 5.5 i denna rapport).

Resultat från den kombinerade förvars- och platskalemodellen används som prestandamått och indata för radionuklidtransportberäkningarna. SSM bedömer att prestandamått beräknade inom basfallet med 10 realiseringar för tiden 2000 e.Kr. och för tre alternativa samband mellan sprickstorlek och transmissivitet kan anses vara lämpliga och rimligt tillförlitliga som indata till radionuklidtransportberäkningar och konsekvensanalysdelen av SR-Site (Qeq1, Qeq2, Qeq3, Ur1, F1, F2, F3, tr1, tr2, tr3; SKB TR-10-50, tabell 3-1 och 3-2). Denna slutsats är underbyggd av det faktum att oberoende beräkningar av motsvarande prestandamått med en förenklad alternativ hydrogeologisk modell baserad på delvis mer konservativa antaganden ger värden som är i rimlig överensstämmelse med SKB:s resultat (SSM Technical Note 2015:40). SSM bedömer dock att osäkerheter med avseende på F-värdena har stor påverkan på resultaten från radionuklidtransportberäkningarna, samt att F-värdena och övriga prestandamått påverkas av osäkerheter med avseende på spricknätverkets egenskaper och geometri (avsnitt 3.1.5.2 i denna granskningsrapport). SSM bedömer därför att SKB i kommande steg av sitt program behöver genomföra ytterligare osäkerhetsanalyser för beräkningar av F-värden som ligger till grund för radionuklidtransportberäkningar. SSM noterar att SKB inom jordskalvsscenarioet helt har försummat retardation i geosfären (SKB TR-10-50, avsnitt 5.2).

SKB har även använt hydro-DFN-modellens parameteruppsättningar som indata till modellering av flöde och radionuklidtransport med en alternativ konceptuell modell som har baserats på ett nätverk av kanaler den så kallade CHAN3D-modellen (SKB R-10-69, kapitel 1). Syftet med CHAN3D-modellering är att undersöka betydelsen av konceptuella osäkerheter i spricknätverkets geometri. SSM anser dock att CHAN3D-modellen har begränsade möjligheter att bidra till förståelsen av hur nätverk som är glesa skulle påverka säkerhetsanalysens resultat. En central fråga som SSM:s externa expert har berört är att kanalerna i bergvolymen i fråga kan förväntas vara konnekterade i ett glest nätverk (SSM



Technical Note 2012:37). Ett sådant glest nätverk kan inte förväntas uppstå om kanalerna antas ligga på de sprickplan som hydro-DFN-modellen definierar. SSM anser därför att SKB:s beräkningar med CHAN3D-modellen inte fullt ut analyserar effekterna av en alternativ konceptuell modell som uppvisar ett glest nätverk av kanaler.

5.4.2 Hydrogeologisk utveckling under permafrost, glaciala och periglaciala fasen

Detta avsnitt behandlar SKB:s redovisning av de hydrogeologiska förhållandena under permafrost, de glaciala och de periglaciala faserna. Beräkningar för kalla klimat som har genomförts med modellerna för den tempererade fasen redovisas dock i föregående avsnitt.

5.4.2.1 Underlag från SKB

SKB sammanfattar sin redovisning av den hydrogeologiska utvecklingen under permafrost, glaciala och periglaciala förhållanden i SR-Site huvudrapporten (avsnitt 10.4.6). Denna sammanfattning är baserad på mera detaljerad information i SKB:s underlagsrapporter (SKB R-09-21; SKB R-09-20, avsnitt 5.7, 6.4 och 7.2). I SKB R-09-22 sätts modelleringarna av permafrost och den glaciala fasen in i sammanhaget av övriga hydroberäkningar som har genomförts inför SR-Site. Den modellering som har redovisats är i hög grad baserad på den platsbeskrivande modellen för Forsmark SDM-Site (SKB TR-08-05, kapitel 8) samt information från andra underlagsrapporter. För en ingående diskussion av SDM-Site hänvisas till kapitel 3 i denna granskningsrapport (avsnitt 3.1.5). SKB har utfört litteraturstudier för att sammanställa kunskapsläget om hydrologi under permafrost och glaciala förhållanden och utfört ett flertal studier för att utröna specifika frågor kopplade till dessa klimattillstånd (SKB TR-10-68, SKB R-06-101, SKB TR-03-06, SKB R-10-74). SKB har på SSM:s begäran tillfört ansökan ett antal förtydliganden och kompletteringar:

- förtydligande rörande SKB:s hydrogeologiska redovisning (SKBdoc 1372883)
- komplettering rörande hydrogeologiska förhållanden under glacial påverkan (SKBdoc 1418702)
- förtydligande om nedträngning av utspädda vatten (SKBdoc 1448717).

SKB:s syfte med detaljerade utredningar och tillhörande modelleringstudier av hydrogeologiska förhållanden under glaciation och permafrost är att få indikatorer och kvantitativa mått på hydrogeologiska osäkerheter som inverkar på säkerhetsanalysberäkningarna. SKB vill med utredningarna kring flöden under permafrost och glaciala förhållanden även stärka länken mellan klimatmodelleringen och säkerhetsanalysen, något som tidigare efterlysts i samband med granskning av den tidigare säkerhetsanalysen SR-Can (SKI Rapport 2008:19).

SKB använder samma konceptuella modell för flödet genom bergvolymen i Forsmark som den som definieras i den platsbeskrivande modellen (SKB TR-08-05, avsnitt 8.1.1). För beräkningarna som avser permafrost, samt de glaciala och periglaciala perioderna har SKB representerat denna konceptuella modell med en ekvivalent poröst kontinuum medium modell ECPM ("Equivalent Continuum Porous Medium"; SKB R-09-21, avsnitt 3). Modellen utgår ifrån hydro-DFN-data som har skalats upp för att representera ett kontinuerligt poröst medium med hydrauliska egenskaper som är ekvivalenta med hydro-DFN-modellen. Modellen har implementerats med beräkningsverktyget DarcyTools (SKB R-10-72). Med DarcyTools beräknas även permafrostens utbredning i djupled för olika fall för att uppskatta den rumsligt variabla förändringen av permeabiliteten pga. permafrost (SKB R-09-21, appendix A). SKB anger att det finns få fältdata för hydrauliska egenskaper i uppsprucket berg under permafrostförhållanden.



Den matematiska modellen i DarcyTools har parametriserats med data från den platsbeskrivande modellen (avsnitt 3.1.5 i denna granskningsrapport). De stokastiska hydrauliska egenskaperna är identiska med de i modellen för uppförande- och driftsfasen (avsnitt 4.5.1). De termiska egenskaperna är baserade på uppskattningar av medelvärden från mer detaljerad modellering av temperatur- och permafrostutveckling (SKB R-09-21 avsnitt 5.5). Utöver dessa data har de hydrauliska egenskaperna erhållits genom en kalibrering av modellen mot grundvattennivåerna i den ostörda modellen (SKB R-09-21, tabell 5-12; SKB R-09-19; SKBdoc 1319608). De hydrauliska egenskaperna för jordlagren HSD ("Hydraulic Soil Domain") har baserats på data från SDM-Site (SKB R-09-21, tabell 3-5 och 3-6).

SKB har med DarcyTools-koden modellerat en rad olika fall som representerar (SKB R-09-21, avsnitt 5):

- tempererade förhållanden
- ett glacialt fall utan permafrost
- det glaciala maximumet
- vattentäckta förhållanden
- permafrost
- glaciala förhållanden med permafrost med en permafrosttunga som sträcker sig under isen
- glaciala förhållanden med permafrost utan en permafrosttunga som sträcker sig under isen.

SKB modellerar för de glaciala fallen flera isfrontslägen (SKB R-09-21, tabell 5-10 och 5-11). Isprofilerna för olika isfrontslägen är baserade på teoretiska och empiriska samband mellan inlandsisens storlek och tjocklek (SKB R-09-21, avsnitt 2.4). Utifrån isprofil och isfrontslägen utvecklar SKB uppsättningar med rand- och begynnelsevillkor (SKB R-09-21, avsnitt 5.2.3, tabell 5-2 till 5-7).

SKB modellerar de olika fallen och presenterar utvecklingen av Darcy-flöden och salthalt under den klimatutveckling som representeras av de olika modellerna. In- och utflödespunkter för partikelspår som går genom ett tänkt slutförvar presenteras för olika isfrontslägen. Darcy-flöden och hydrogeologiska prestandamått för olika isfrontslägen redovisas för fem valda punkter för förvarsdjupet i modellen (SKB R-09-21, avsnitt 6.4). Slutligen jämför SKB Darcy-flödena under de olika modellerade förhållandena (SKB R-09-21, figur 6-17) och Darcy-flödena för de fem punkterna medelvärdesbildade över glaciationscykelns varaktighet (SKB SR-Site huvudrapport, figur 10-147).

I DarcyTools-modellen är slutförvaret inte explicit representerat. För att genomföra partikelspårning och beräkna tillhörande prestandamått för alla deponeringshål i SR-Site har randvillkoren och densitetsfördelningarna från de olika simuleringarna överförts till Connectflow-modellen för den kombinerade förvars- och platsskalan (avsnitt 5.4.1). Med Connectflow-modellen beräknas sedan storheter och prestandamått för fallet med glaciation utan permafrost för isfrontslägena II och III (SKB R-09-21, avsnitt 6.3; SKB R-09-20, avsnitt 5.7). SKB framhåller att resulterande F-värden troligen är underskattade eftersom DarcyTools-modellen visar på längre flödesvägar än den tillämpade Connectflow-modellen. De erhållna modelleringsresultaten används sedan för beräkningar av syrenedträngning till förvaret (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2 underrubrik F-faktorer; SKB TR-10-57, avsnitt 8.1, SKB TR-10-66) och för analytiska beräkningar av nedträngning av utspädda vatten till förvarsdjup (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.6; SKB R-09-20, appendix F, avsnitt F.2).

SKB tillämpar vid beräkningar kopplade till radionuklidtransport en pessimistisk förenkling som innebär att samma partikelspår från Connectflow-modellen under

tempererade fasen utnyttjas. Detta angreppssätt motiveras med argumentet att dessa partikelspår generellt sett överskattar flödets vertikala komponent, och ger kortare och mer pessimistiska partikelspår än under glaciala och permafrostförhållanden i jämförelse med DarcyTools-modellen (SKB TR-10-50). SKB skalar sedan flödes hastigheter på basis av resultat från jämförelser av Darcy-flödena under de olika modellerade klimatfaserna (SKB TR-10-50, avsnitt 2.1.2; SKB R-09-21, avsnitt 6.4.4).

För beräkningar av bufferterosion och kopparkorrosion med sulfid tillämpas inte resultaten från modellering av permafrost och glaciala fasen utan SKB argumenterar för att flödesvärdena kopplade till den tempererade fasen kan tillämpas. Dessa värden anses vara pessimistiska eftersom medelvärdet för flödet är ca 80 procent av värdet för den tempererade fasen (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.6; SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.6; SKBdoc1448717).

För SKB:s geokemiska beräkningar med avseende på långsiktig utveckling av salthalt tillämpas dock resultat från modelleringen med DarcyTools (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.6; SKB TR-10-58, avsnitt 3.4).

SKB har sammanfattat viktiga antaganden, förenklingar och osäkerheter i samband med modelleringen (SKB R-09-22, avsnitt 6.5). Exempelvis tillämpas ett rumsligt konstant randvillkor vid inlandsisens botten, vilket är vanligt förekommande i liknande studier, men vilket är en förenkling av de rumsligt variabla betingelser som sannolikt kan förväntas förekomma under en inlandsis. SKB förenklar partikelspårningsberäkningarna genom att anta stationära förhållanden, oavsett att förändringar hos randvillkoren kan förväntas ske snabbare än de beräknade uppehållstiderna. SKB noterar att för modellering av en situation när isen drar sig tillbaka är antagandet att använda det teoretiska maximumet för inlandsisens profil under det senaste glaciala maximumet troligvis en överskattning.

SKB listar de huvudsakliga slutsatserna från studien av grundvatten under glaciala och permafrostförhållanden i SKB R-09-22 (avsnitt 8.2). Exempelvis noterar SKB att Darcy-hastigheterna ökar markant när en inlandsis passerar över slutförvaret, medan medelvärdet för Darcy-hastigheten över en glaciationscykel bara beräknas vara ca 80 procent av beräknade Darcy-hastigheter för den tempererade fasen. Passagen av den växande inlandsisens front över slutförvaret leder inledningsvis till uppträning av saltare vatten till slutförvaret, men detta följs dock sedan av minskande salthalter som blir lägre än under den tempererade fasen. Salthalterna ökar sedan igen när hela området är täckt av inlandsisen. När inlandsisen drar sig tillbaka över slutförvaret tränger salta vatten också upp från djupet. Detta sker dock i mindre omfattning än under fasen för den växande inlandsisen, bl.a. därför att området framför den tillbakadragande inlandsisen förväntas vara täckt av vatten. För simuleringar som innefattar permafrost och talikar i det periglaciala området sker en stor del av utströmningen till talikarna.

5.4.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s redovisning av den hydrogeologiska utvecklingen under permafrost, den glaciala och den periglaciala fasen bygger på väl utförda utredningar. Utredningarna omfattar de viktigaste frågorna som behövs för det efterföljande säkerhetsanalyset och de kan anses vara baserade på en vetenskapligt förankrad förståelse för relevanta processer. SSM anser att det stiliserade angreppssättet med modellering av olika tänkbara isfrontslägen är ett lämpligt angreppssätt givet oundvikliga osäkerheter i förutsägelser kring framtida klimatutveckling. SSM bedömer på samma sätt som för modelleringen av den tempererade fasen att SKB har tillämpat en lämplig kvalitetssäkring i modelleringsarbetet, men att vissa förbättringar kopplade till spårbarhet vid rapportering behöver genomföras (avsnitt 5.4.1.2 ovan; SSM Technical



Note 2014:46). Osäkerheter kopplade till spricknätverkets geometri och egenskaper (avsnitt 3.1.5 i denna rapport) kan förväntas ha en betydande påverkan på resultaten från modelleringen av permafrost, glaciala och periglaciala faser. SSM anser att SKB i kommande steg i sitt program behöver redovisa hur kvarvarande osäkerheter påverkar resultaten från den hydrogeologiska modelleringen för kalla klimatförhållanden.

SSM har utöver SKB:s ansökansunderlag utgått ifrån synpunkter från SSM:s externa experter. I bedömningen av SKB:s redovisning kring hydrogeologiska frågeställningar under permafrost och den glaciala fasen har SSM låtit en extern expert genomföra en litteraturstudie om grundvattenflöden under kalla förhållanden som permafrost och glaciala betingelser (SSM Technical Note 2012:43). Som del av den inledande granskningen genomfördes även en övergripande granskning av SKB:s redovisning av hydrogeologiska förhållanden under kalla klimatperioder (SSM Technical Note 2012:41). SSM har även låtit genomföra en granskning av SKB:s kvalitetssäkring i samband med hydrogeologisk modellering (SSM Technical Note 2014:46).

I det följande redovisas SSM:s bedömning av

- omfattning av och kvalitet på SKB:s redovisning
- SKB:s förståelse och hantering av relevanta processer
- isfrontens mekaniska inverkan på parametrisering av berggrunden
- SKB:s hantering av talikar
- rand- och begynnelsevillkor i modelleringen
- skalning av flöden för de olika klimatfaserna och
- användning av resultat som utgör indata till buffererosions- och kopparkorrosionsberäkningar, radionuklidtransportberäkningar, beräkningar av nedträngning av utspädd vatten till förvarsdjup, och beräkningar av syrenedträngning till förvarsdjup.

SSM bedömer att SKB:s analyser av de hydrogeologiska betingelserna under permafrost och glaciationsfaser inbegriper de viktigaste frågeställningarna kopplade till analysen av slutförvarets långsiktiga säkerhet så som påverkan på tekniska barriärer och radionuklidtransport. De viktigaste frågorna för barriärernas långsiktiga integritet avser flöden under permafrost och glaciala förhållanden som möjliggör förändringar hos grundvattnets salthalt samt om flödessituationen möjliggör för syresatt smältvatten att nå förvarsdjup och i så fall i vilken omfattning. Därutöver behöver det förändrade flödesfältets påverkan på flödena i sprickor som skär deponeringspositioner beaktas i beräkningar av omfattning av buffererosion och kopparkorrosion under olika tidsperioder. För att ta fram ett tillräckligt underlag för radionuklidtransportberäkningarna behöver förändringarna i flödesfältet och flödes hastigheterna beaktas.

SSM bedömer att SKB:s angreppssätt med modellering av sex olika varianter för isfrontslägena och förekomsten av permafrost är godtagbart med tanke på oundvikliga osäkerheter kopplade till framtida klimatförhållandena (SKB R-09-21, tabell 1-1, figur 5-1 till 5-3). De valda varianterna kan anses vara giltiga även för de mest konservativa situationerna med inlandsisens front direkt över slutförvaret. SSM bedömer dessutom att SKB:s angreppssätt med modelleringar först med beräkningsverktyget DarcyTools och därefter överföring av erhållna rand- och begynnelsevillkor till Connectflow är godtagbart med tanke på modellernas olika funktionaliteter och begränsningar. DarcyTools kan hantera variabel densitet och saltransport i en förhållandevis stor modellomän. Connectflow kan representera enskilda sprickor och den återfyllda slutförvarsanläggningen och därmed göra prediktioner på skalor som omfattar delar av slutförvarsanläggningen ner till enskilda deponeringshål. SSM:s förtroende för att modellerna är numeriskt rimligt tillförlitliga stärks genom de jämförelser som visar att de båda modelleringsverktygen ger likartade resultat (SKB R-09-21, avsnitt 6.2).



SSM bedömer att SKB har beaktat de för vattenflöden och salttransport mest centrala processerna under perioder med permafrost och glaciala förhållanden (SKB R-09-21), vilka redovisas i geofärsprocessrapporten (SKB TR-10-48). I SSM:s litteraturstudie om grundvattenflöden under permafrost dras slutsatsen att det generellt sett finns en bra förståelse i litteraturen för flödesprocesserna i porösa medier, men att vissa osäkerheter föreligger vid tillämpningen på flöden i sprickigt berg (SSM Technical Note 2012:43). Enligt SSM:s externa expert finns vissa resultat som pekar på att flöde genom sprickor skulle kunna förekomma även under permafrostförhållanden. En fördjupad förståelse för dessa observationer kräver fortsatt forskning kring samspelet mellan termiska och hydrauliska processer. SSM bedömer dock att dessa ännu ej väl undersökta frågor inte är av central betydelse för slutförvarets långsiktiga säkerhet.

SKB har inte beaktat saltutfrysning i hydrogeologiska modelleringar för permafrostperioder. SKB har dock gjort en analys av hur uppkomna densitetsskillnader påverkar grundvattenflödet (SKB R-06-101). SSM bedömer att denna analys för närvarande ger ett tillräckligt underlag och att processen inte bör ha stor betydelse för densitetdrivet grundvattenflöde under permafrostförhållanden.

SSM:s externa expert pekar på att inlandsisens mekaniska pålastning av berggrunden kan förväntas ha en betydande inverkan på bergets och främst bankningsplanens hydrauliska egenskaper (SSM Technical Note 2012:41). I en komplettering till ansökan har SKB beräknat effekterna av att inlandsisens tyngd skulle kunna leda till en minskning av bankningssprickornas transmissivitet (SKBdoc 1418702, SKBdoc 1416954). Beräkningarna visar att bankningssprickorna i det glaciala fallet har en mycket begränsad effekt på flödena genom förvaret. SSM bedömer att bankningssprickornas påverkan på grundvattenflödet bör vara begränsad och att de ursprungliga beräkningarna i ansökan som försummar inlandsisens mekaniska effekter på spricktransmissiviteter kan anses vara rimliga.

I fallet med glaciation och permafrost beräknar SKB endast en landskapsdoskonverteringsfaktor (LDF) för ett objekt som innefattar talikar (SKB TR-10-06, avsnitt 5.1.1). Fokuseringen på beräkningsfall med talikar förklaras med att SKB antar att det i delar av landskapet där det inte förekommer talikar inte heller finns några exponeringsvägar. Det finns mycket begränsade förutsättningar för växtlighet under permafrostförhållanden och betydande risk för exponering av radioaktiva ämnen från slutförvaret är således kopplad till förekomst av talikar. SSM konstaterar att om flödena genom permafrostlagret skulle öka skulle radionuklidernas utträdespunkter på markytan fördela sig mer jämt mellan olika landskapsobjekt. Därmed skulle LDF-värdet för objektet med talikar minska. Det är enligt SSM:s uppfattning rimligt att fokusera beräkning av landskapsdoskonverteringsfaktor (LDF) på objekt som innefattar talikar.

SSM anser att SKB:s stiliserade antaganden kring klimatutvecklingsförloppet samt kring den kvantitativa inverkan på förvarets långsiktiga säkerhet är välmotiverade respektive underbyggda med i allmänhet konservativa analyser och ansatser, vilket exempelvis avser:

- antaganden om isprofilens kvantitativa mått (SKB R-09-21, ekvation 2-9)
- användning av randvillkoret en vattenpelarhöjd som är 92 procent av isens tjocklek för området täckt av inlandsis
- antagandet att det finns obegränsad tillgång till vatten vid botten av en inlandsis
- beräkningar av permafrostdjup med DarcyTools (se även SSM:s bedömning av SKB:s beräknade permafrostdjup i avsnitt 5.2.2 i denna rapport)
- de hydrauliska egenskaperna i permafrostlagret
- SKB:s lokalisering av talikarna utifrån topografin.



SSM bedömer att SKB:s beräkningar och tillämpning av relativa skillnader i flöden under de olika klimattfaserna är rimliga. Förändringar av grundvattenflöden styrs framförallt av de påtagligt förändrade randvillkoren, vilka har bedömts vara godtagbara (se ovan). Eftersom de relativa skillnaderna i flödena kan anses rimliga följer även att användning av grundvattenflödes hastigheter som ursprungligen enbart avsett den tempererade fasen kan anses vara godtagbara för bufferterosions- och korrosionsberäkningar (se nedan).

Bufferterosions- och kopparkorrosionsberäkningar har baserats på grundvattenflödes hastigheter och Darcy-hastigheter för sprickor som skär deponeringshål. För att motivera sitt val av flödes hastigheter för dessa beräkningar jämför SKB medelvärdet för beräknade Darcy-flöden över en hel glaciationscykel för att argumentera för att det är skäligt att uteslutande använda beräkningsresultat som har baserats på flöden under den tempererade fasen. SKB har med sina analyser visat att medelvärdet för flödena under hela glaciationscykeln är mindre än flödena under den tempererade fasen. SSM bedömer att denna förenkling av flödes situationen i grunden är acceptabel eftersom relevans av både bufferterosions- och kopparkorrosionsberäkningar avser den ackumulerade omfattningen av dessa processer snarare än deras momentana hastighet. SSM har dock vissa synpunkter kring beräkningarna av tiderna då bufferterosion skapar advektiva förhållanden i deponeringshålen (avsnitt 5.13 i denna rapport). Enligt SSM:s uppfattning finns därför behov av att SKB ytterligare hanterar konceptuella och parametriska osäkerheter i form av insatser kopplade till osäkerheterna i samband med hydrogeologiska situationen under den tempererade fasen (avsnitt 5.4.2 i denna granskningsrapport).

För radionuklidtransportberäkningarna tillämpar SKB det förenklade antagandet att partikelspår som har beräknats för tempererade förhållanden också kan användas för andra klimattillstånd tillsammans med en skalning av flödes hastigheterna. SSM bedömer att skalningen av Darcy-flödena under olika klimattfaser är mindre avhängig de osäkerheter som har identifierats i samband med bedömningen av den platsbeskrivande modellen (avsnitt 3.1.5 i denna rapport). Det är de starkt förändrade randvillkoren under den glaciala fasen och de förändrade hydrauliska egenskaperna under permafrost som ger upphov till skillnaderna i resultaten mellan de olika klimattfaserna. Alla faser kan förväntas påverkas av osäkerheter kopplade till den platsbeskrivande modellen på ett likartat sätt även om förändringar i salthaltsutvecklingen och därmed vattnets densitetsfördelning kan antas ha viss påverkan på resultaten. SSM anser således att SKB:s ansats att skala flöden är godtagbar och att osäkerheterna i den platsbeskrivande modelleringen sannolikt har mindre betydelse för skalningsfaktorerna. SSM anser vidare att SKB:s argument för att tillämpa partikelspår för tempererade förhållanden är godtagbart. Liksom för tempererade förhållanden konstaterar SSM att osäkerheter med avseende på F-värdena har stor påverkan på radionuklidtransportberäkningarna. SSM bedömer därför att SKB i kommande steg av sitt program behöver beakta hur osäkerheterna i spricknätverkets geometri påverkar beräkningarna av F-värden som ligger till grund för radionuklidtransportberäkningar.

SKB tillämpar resultaten från modelleringen med DarcyTools i beräkningarna av salthaltsutvecklingen (SKB TR-10-58). SSM anser att dessa resultat är lämpliga som utgångspunkt för beräkningen av salthaltsutveckling under förutsättning att de givna hydrogeologiska osäkerheterna beaktas.

För syrenedträngningsberäkningarna tillämpar SKB resultat från modellen för den kombinerade förvars- och platsskalan. SKB beaktar i detta fall retardationen längs hela flödesvägen från ytan ned till förvaret, dvs. även genom ECPM-delarna av flödesvägarna, vilket inte är fallet för radionuklidtransportberäkningar och beräkningar kring hur utspätt vatten tränger ned till förvaret. SSM:s externa expert anser att uppskalningen av porositet och flödesvätt yta kan ha överskattats med SKB:s beräkningar eftersom skalningsmetoden



inte beaktar risken för att en stor del av vattenflödet endast kommer i kontakt med en liten del av porvolymen och ytorna i sprickorna (SSM Technical Note 2012:67). SSM anser därför att SKB kan ha uppskattat uppehållstider och F-värden på ett icke-konservativt sätt och att syrenedträngningen kan vara mer omfattande än vad SKB:s beräkningar antyder. SSM bedömer att SKB i kommande steg i slutförvarsprogram bör fördjupa redovisningen kring osäkerheter i uppehållstider och F-värden.

5.5 Grundvattenkemisk utveckling från 1 000 år till 100 000 år

Den grundvattenkemiska situationen i berggrunden kan mot bakgrund av omfattande provtagning i samband med platsundersökningar vid Forsmark betraktas som ett väl undersökt område, med förhållandevis små osäkerheter kopplade till de grundvattenkemiska variabler som har störst betydelse för ett slutförvars långsiktiga säkerhet. Resultat från provtagning i samband med platsundersökningar på andra platser så som Laxemar, Äspö och SKB:s tidigare typområdesundersökningar visar att resultaten passar in i ett rimligt förutsägbart mönster med bland annat skillnader för grundvattnets salthalt beroende på avståndet från Östersjön. Med tanke på generellt små grundvattenflöden på stora djup i berggrunden förväntas de mest betydelsefulla grundvattenkemiska variablerna förbli relativt stabila även i långa tidsskalor.

För tider upp emot 100 000 år bortom vilka dagens tempererade förhållanden inte kan förutsättas bli bestående kan dock ändringar hos grundvattenkemin förväntas även på flera 100 m djup. Kommande perioder med peri-glaciala och glaciala förhållanden kan ha en betydande påverkan på viktiga grundvattenkemiska variabler som redoxstillstånd och salthalt. SKB är därför för dessa längre perioder mer hänvisade till att genom matematisk modellering bilda sig en uppfattning och den förväntade grundvattenkemiska utvecklingen och dess påverkan på slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. I detta avsnitt sammanfattas och granskas SKB:s matematiska modellering av långsiktig grundvattenkemisk utveckling.

På begäran av SSM har SKB tagit fram följande kompletterande information inom detta granskningsområde:

- SKBdoc1396703. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande långsiktig utveckling av grundvattenkemi på förvarsdjup.
- SKBdoc 1396704. Betydelsen av mikrobiell sulfatreduktion med organiskt upplöst material.
- SKBdoc 1396705. Jämförelser av beräknade haltintervall som funktion av djup i berget med koncentrationer som uppmätts under platsundersökningarna.
- SKBdoc 1416882. Why components that have been measured during the site investigations have been excluded from the SR-Site calculations.
- SKBdoc 1417006. Effects of weathering of silicate minerals and cation exchange on the geochemical safety indicators during the hydrogeochemical evolution at Forsmark.
- SKBdoc 1416908. Future evolution of groundwater composition at Forsmark during an extended temperate period.

5.5.1 Konceptuell beskrivning och matematisk modellering av grundvattenkemisk utveckling

5.5.1.1 Underlag från SKB

SKB beskriver den grundvattenkemiska utvecklingen vid Forsmark samt hur denna fråga har hanterats modelleringsmässigt i den platsbeskrivande modellen (SKB TR-08-05, kapitel 3 och 9).

Som en utgångspunkt för att kunna förutsäga den grundvattenkemiska situationen i Forsmark under perioder med betydande landhöjning och storskaliga klimatförändringar anför SKB en konceptuell modell som har sin grund i klimatutvecklingen i Östersjöområdet under kvartärperioden. För drygt 10 000 år sedan i samband med att sista inlandsisen försvann pågick en infiltration av utspädda glaciala smältvatten i berggrunden driven av höga hydrauliska gradienter. Sådana vatten verkar ha nått ner till ett djup av cirka 600 m. Förekomsten av vatten av sådant ursprung från ett kallt klimat har bekräftats av SKB genom uppmätning av den utarmning av syre-18 som är signifikativ för nederbörd i områden med låg temperatur. Efter att inlandsisen hade försvunnit var markytan nedpressad och berggrunden runt nuvarande Östersjökusten låg under vattenytan i den s.k. Ancylussjön. På grund av avsaknaden av densitetsskillnader och en betydande gradient för grundvattenflöde skedde förmodligen inget större utbyte med djupare grundvatten under denna period. En pågående havsnivåhöjning medförde att Littorinahavet etablerades för cirka 8000 år sedan med en betydligt högre salthalt även jämfört med dagens Östersjön eftersom en förbindelse med världshaven då upprättades. Littorinavatten hade en salthalt på cirka 1,5 % jämfört med dagens Östersjövatten på 0,5 % salthalt. Dagens kustområden runt Östersjön låg fortfarande under vatten men eftersom havsvattnet hade högre densitet än vattnet i spricksystemen infiltrerade Littorinavatten till stora djup. Allt eftersom landhöjningen fortsatte blev förbindelsen med världshaven mindre betydelsefull och vattnet i det nuvarande Östersjöområdet fick en gradvis minskande salthalt. För några tusen år sedan kom Forsmark liksom andra platser runt kusten så som Laxemar och Äspö under den pågående landhöjningen upp från havsbotten. Fram till idag pågår en infiltration av meteoriska vatten som i viss utsträckning påverkar grundvattnet i berggrunden.

SKB resonerar i allmänna ordalag kring grundvattenkemisk påverkan under de perioder av permafrost som troligen föregick den senaste stora nedisningen i Skandinavien. Saltexklusion har diskuterats som en process, men troligtvis finns inga bevis kvar för hur grundvattnet utvecklades under denna fas. SKB bedömer ändå att påverkan på de av permafrost isolerade djupa grundvattnen varit liten. Borrhålsundersökningar vid permafrostområden bl.a. på Grönland kan möjligen ge underlag för bedömning av denna fråga (SKB R-10-34). Ett annat område som har varit under stark utveckling under platsundersökningarna är provtagning och analys av så kallat matrisvatten som finns i bergmatrisens porer snarare än i bergets spricksystem. Porvatten från lite större djup har generellt en något lägre kloridhalt än omgivande grundvatten och stabila isotopanalyser visar att utbytet med omgivande vatten varierar men har varit begränsat särskilt på stora djup och långt från vattenförande sprickor (SKB R-08-105).

SKB har använt den konceptuella förståelsen av grundvattensystemets kemiska och hydrogeologiska egenskaper från bl.a. platsundersökningarna för att modellera Forsmarksplatsens grundvattenkemiska utveckling inom ramen för referensutvecklingen i SR-Site (SKB TR-10-58). En detaljerad modellering har genomförts dels av en fortsatt tempererad fas under cirka 7000 år efter förslutning av förvaret, dels på förenklat vis av en hel glaciationscykel som innefattar inlandsisens bildning och tillbakadragande samt en period då förvaret ligger under havsbotten. Som ett resultat av en begäran om komplettering av SSM har SKB också genomfört en fördjupad analys av inverkan av en extremt lång tempererad fas på ca 60 000 år (SKBdoc 1416908). De variabler som har simulerats innefattar grundvattnets pH och redoxillstånd (Eh), huvudkomponenter i grundvattnet, samt de reaktiva komponenterna löst järn och löst sulfid. För ett antal grundvattenkomponenter som har mindre direkt påverkan på den långsiktiga strålsäkerheten har SKB inte genomfört några simuleringar, utan analysen har baserats på befintliga mätdata och resonemang om den framtida utvecklingen (SKB TR-10-58).



SKB:s geokemiska modellering innefattar vissa simuleringar som enbart har använts för att tolka och visualisera platsundersökningsdata. Exempelvis har programmet PHREEQEC använts för att undersöka betydelsen av särskilt reaktiva mineral i berggrunden. SKB har på grundval av allmän förståelse samt PHREEQEC modellering av grundvattensystemet antagit att grundvatten står i kemisk jämvikt med mineralen kalcit, kvarts och hydroxiapatit, samt antingen amorft järnsulfid eller järn(III)oxihydroxid. Då erfarenheten visar att kemisk jämvikt inte spontant uppstår mellan löst sulfat och löst sulfid i grundvatten så har S(-II) och S(+IV) modellerats som två separata komponenter utan koppling via jämviktssamband. Tolkning av platsundersökningsdata har även gjorts med M3-koden som är baserad på principalkomponentanalys. SKB anger att metoden har begränsad precision men de anser ändå att den är användbar för att få en ungefärlig förståelse till blandningsförhållanden mellan grundvattentyper av olika ursprung. SKB utgår från renodlade grundvattensammansättningar eller så kallade typvatten vilka kategoriseras som djupt salint grundvatten, gammalt meteoriskt vatten, Littorinavatten och sentida meteoriskt vatten. Sammansättningar av typvatten presenteras i den platsbeskrivande modellen för Forsmark (SKB TR-08-05).

SKB har genomfört simuleringar av grundvattenkemisk variabilitet och långsiktig kemisk utveckling med utgångspunkt från hydrogeologiska simuleringar med koderna CONNECTFLOW och Darcy Tools. Grundvattenflöde simuleras i den heterogena berggrunden med beräkning av blandningsförhållanden mellan olika typvatten i de olika delar av berggrunden som täcks in av modelldomänen (SKB TR-10-58). Ett analytiskt uttryck har använts för att beräkna hur matrisdiffusion och närvaron av så kallat matrisvatten påverkar grundvattnets salthalt, vilket har särskild betydelse för analysen av buffertens långsiktiga erosionsbenägenhet. Blandningsförhållanden mellan typvatten och förutsatt kemisk jämvikt med en viss uppsättning reaktiva fasta faser bildar sedan indata till den geokemiska koden PHREEQEC som beräknar den kemiska sammansättningen av grundvatten och förekomstformer för de komponenter som har inkluderats. För modellering av den tempererade fasen efter förslutning av förvaret beräknas med utgångspunkt från hydrogeologiska simuleringar blandningsförhållanden mellan fem olika typvatten; i) nutida meteoriskt vatten, ii) Littorinavatten, iii) glacialt smältvatten, iv) djupt salint grundvatten, och v) gammalt meteoriskt vatten. Grundvattensammansättningen i olika delar av berggrunden har utvärderats vid nutid, efter 1000 år, efter 2000 år, efter 4000 år samt efter 7000 år. För modellering av den fortsatta glaciationscykeln använder SKB ett något förenklat förfarande där enbart grundvattnets salinitet beaktas i den hydrogeologiska beräkningsmodellen. Detta kan sägas innefatta ett fall där berggrunden bara består av två typvatten i olika proportioner varav det ena består av ett salt grundvatten och det andra av ett utspätt vatten. Först beräknas grundvattnets salthalt för periglaciala betingelser i utkanten av en glaciär. Sedan beräknas rumsliga variationer för grundvattnets salthalt, jonstyrka och några andra grundvattenkemiska variabler för fem stadier av en glaciärs utbredning och för fyra stadier av en glaciärs tillbakadragande. I ett sista moment beräknas den grundvattenkemiska situationen för cirka 5000 år sedan då Littorinahavet täckte Forsmarksplatsen för att visa situationen när Forsmarksplatsen ligger under havsytan.

SKB presenterar resultaten dels som statistiska fördelningar av koncentrationer i förvarets bergvolym ("box-and-whisker plots"), dels koncentrationsfördelningar i ett 2-D tvärsnitt av berggrunden ner till 800 m djup. Presentationen av resultat fokuserar på grundvattenvariabler som har störst betydelse för den långsiktiga säkerheten. För att bilda sig en uppfattning av modellens förmåga att reproducera befintliga geokemiska betingelser i berggrunden finns för några element jämförelser av modelleringsresultat med faktiska mätningar som funktion av djupet (Ca, Mg, pH, PO₄). Som ett resultat av en begäran om komplettering från SSM har även SKB redovisat motsvarande jämförelser för TDS, alkalinitet, Al, Br, Cl, Eh, F, Fe, Li, Mn, K, Si, Na, Sr, sulfat och sulfid (SKBdoc



1396705). Generellt visar modellresultat relativt god överensstämmelse med mätdata. För vissa element som Ca, Mg och Mn finns dock betydande avvikelser vilka SKB förklarar med att modellen har förenklats så till vida att vissa geokemiska processer så som jonbytesprocesser och vittring av primära silikater inte har beaktats inom modelleringsarbetet.

5.5.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s konceptuella beskrivning av den grundvattenkemiska utvecklingen under kvartärperioden är rimlig och att den till stor del bygger på etablerad kunskap. Enligt SSM:s bedömning behöver SKB dock utveckla sin kunskapsbas inom kommande steg av sitt program beträffande betydelsen av utbyte med matrisvatten, nedträngningsdjup för glaciala smältvatten i olika förvarsdelar samt inverkan av saltexklusion under permafrostförhållanden.

SSM anser att SKB har tagit fram lämpliga om än utvecklingsbara verktyg för att simulera långsiktig hydrogeokemisk och hydrologisk påverkan på grundvattnets sammansättning. Simulering av flödesvägarnas varierande egenskaper ger en uppfattning om kemisk variabilitet grundat på både blandningsförhållanden och grundvattenkemiska processer. Kapacitet att representera grundvattenkemisk heterogenitet i deponeringshållsskala medför att variationer för individuella deponeringshållspositioner kan undersökas. Konceptuella osäkerheter och svårigheter att kvantifiera geokemiska processer har fått till följd att SKB inom detta område i hög utsträckning förlitat sig på förenklade antaganden. Vissa geokemiska processer har exempelvis helt utelämnats. Inom hydrologiområdet använder SKB mer komplexa och utförliga modelleringsmetoder, men även inom detta område finns vissa konceptuella osäkerheter (avsnitt 5.4 i denna granskningsrapport). SSM anser att konceptuella osäkerheter kopplade till både grundvattenkemiska processer och hydrologi behöver undersökas ytterligare och att det fortfarande finns en betydande potential att utveckla förbättrade verktyg för kopplad hydrogeologisk och geokemisk modellering. SSM konstaterar att en eventuell framtida byggnation av ett slutförvar och fortsatt optimering av förvarssystemet behöver baseras på en vidareutvecklad bild av grundvattenkemiska förhållanden och dess utveckling vid Forsmarksplatsen. I ett sådant sammanhang kommer ytterligare modelleringsinsatser att behövas.

SKB har för de tre aspekter som anses ha störst betydelse för de tekniska barriärernas långsiktiga beständighet valt att inte förlita sig på resultat från avancerade kopplade modeller utan använder istället i huvudsak resultat från förenklade antaganden eller mer förenklade modeller som endast beaktar ett fåtal fenomen kopplat till den relevanta grundvattenkemiska variabeln. Dessa tre aspekter omfattar sulfidhalter respektive utveckling av grundvattnets salthalt och syrehalt. En utförlig beskrivning av dessa frågeställningar redovisas senare i detta avsnitt. SSM anser att det finns berättigade skäl för SKB:s angreppssätt eftersom de förenklade modellerna undviker vissa svår bemästrade konceptuella osäkerheter med konservativa antaganden samt möjliggör kvantifiering av vissa typer av parameterosäkerheter. Ett problem är dock även om ett angreppssätt i grunden är konservativt är det svårt att bedöma betydelsen av vissa begränsade aspekter som kan misstänkas vara icke-konservativa. SSM anser att SKB inför kommande steg av sitt program behöver ta fram en konsekvent och tydligt redovisad strategi för modellering av grundvattenkemisk utveckling där förhållanden mellan olika modellinsatser, både komplexa och förenklade, redovisas utförligt.

5.5.2 Långsiktig utveckling av grundvattnets salthalt

5.5.2.1 Underlag från SKB

Den sammanfattande bedömningen av grundvattenkemi och den formella avstämningen av säkerhetsindikatorer relaterade till grundvattenkemi redovisas efter följande tidsperioder i slutförvarets långsiktiga utveckling (SKB SR-Site huvudrapport):

- en tempererad fas som förväntas bestå till ca 10 000 år efter förvarets förslutning
- det alternativa scenariot med global uppvärmning
- den återstående delen av den första glaciationscykeln.

För den återstående delen av den första glaciationscykeln räknar SKB med att grundvattnets salthalt överstiger det kriterium som innebär risk för menlig påverkan på återfyllnadens svälltryck, men salthalten ökar dock i viss utstäckning under inverkan av permafrost, under isfrontens tillbakadragande samt vid havsövertäckning. SKB:s beräkningar antyder dock att grundvattnets jonstyrka underskrider aktuellt gränsvärde för buffererosion för ett par procent av deponeringshålen under en glaciationscykel. Detta orsakas av inflöde av glaciala smältvatten som mest påverkar deponeringshål i anslutning till större vattenledande sprickor i berget. Konsekvenserna av detta är att buffertens stabilitet inte kan garanteras. SKB förväntar sig att grundvattnets jonstyrka periodvis återhämtar sig så att förekomst av grundvatten med lägre jonstyrka än gränsvärdet främst är kopplat till de förhållanden som råder när isfronten passerar förvaret. Det är med andra ord fråga om en relativt kort period i förhållande till längden av en hel glaciationscykel.

SKB:s analys fokuseras mest på själva utspädningsförloppet eftersom denna fas medför betydande påverkan på förvarets långsiktiga säkerhet, men återhämtning av salthalt kan ske efter en period med utspädning som ett resultat av uppåtriktat flöde av djupt salint grundvatten i samband med passagen av en isfront, inträngning av havsvatten samt i viss omfattning saltexklusion i samband med frysning av berggrunden. Den nuvarande grundvattenkemiska situationen vid Forsmark illustrerar betydelsen av havsövertäckning eftersom Littorinavatten har visats ha en stor påverkan på grundvattnets nuvarande sammansättning. SKB förväntar sig, baserat på modelleringsresultat, att ökning av salthalt som ett resultat av saltexklusion vid permafrost är liten (SKB TR-09-17, 2010).

SKB rapporterar också utveckling av grundvattnets jonstyrka med en metod som inkluderar blandningsförhållanden mellan olika typvatten samt iterationer mellan en detaljerad representation av hydrogeologi och kemisk jämvikt med ett begränsat antal särskilt reaktiva mineraler i berggrunden (SKB TR-10-58). Denna studie indikerar att grundvatten på förvarsdjup i genomsnitt halverar sin jonstyrka under en infiltrationsperiod av 7000 år. Variabiliteten ökar dock väsentligt och för vissa positioner i berget blir jonstyrkan för katjoner runt 10 mM. I inget fall blir jonstyrkan dock lägre än 5 mM, det vill säga salthalten kommer att hållas ovan den nivå vid vilken buffererosion kan förväntas.

SKB anser dock att ovanstående beräkningar kan underskatta den rumsliga spridningen av katjonkoncentrationer. För att undersöka denna fråga har en mycket förenklad modell för saltvattenutveckling tagits fram. Denna tar enbart hänsyn till utdiffusion av salt matrisvatten för att motverka utspädning av meteoriska vatten eller glaciala smältvatten (SKB R-09-20). Dessa infiltrerande vatten antas vara helt utan lösta ämnen. I detta modellkoncept försummas mineralreaktioner som kan tillföra lösta ämnen helt. Simuleringarna beaktar transportvägar genom berget som genererats i ett DFN-nätverk. För varje deponeringshål beräknas tiden det tar för salthalten att minska till 10 % av ursprunglig nivå, det vill säga från 10 g/l till 1 g/l. SKB drar, baserat på modelleringsresultat, slutsatsen att jonstyrkan faller till den av SKB definierade erosionsgränsen för ca 1 % av deponeringshålen efter 10 000 år av infiltration under en

tempererad fas, vilket motsvarar ett grundvatten med en jonstryka för katjoner på cirka 15 mM. SKB har använt en säkerhetsfaktor på tre för utvärdering av buffererosion just för detta fall eftersom det härledda gränsvärdet är cirka 0,3 g/l. Analysen utesluter inte att erosion kan aktualiseras i ett begränsat antal deponeringshål under denna period. Detta är ett exempel på en säkerhetsindikator som inte är uppfylld under den initiala tempererade fasen efter förslutning av förvaret.

SKB:s analys i SR-Site visar att en lång tempererad fas upp till 60 000 år kopplad till scenariot med växthusgaser medför en fördubbling av antalet deponeringshål med utspädda grundvatten i förhållande till huvudscenariot med en tempererad fas under 10 000 år. Andelen påverkade deponeringshål stiger från 1 % till ca 2 %. För ännu längre extrema tidsperspektiv stiger andelen påverkade deponeringshål ytterligare till upp till maximalt ca 10 %.

Som ett resultat av en kompletteringsbegäran från SSM har SKB också genomfört en mer utförlig analys av en lång tempererad fas med en modell som förutom grundvattenflöde också involverar vissa kemiska processer (SKBdoc 1416908). Alla beräkningar är inte fullständigt slutförda men tillgängliga resultat visar att den gradvisa utspädning som förutsågs under de första 7000 åren efter förslutning gradvis avstannar och ingen ytterligare utspädning äger rum efter ungefär 20 000 år. Detta innebär att endast en liten andel av deponeringshålen har grundvattenkemiska betingelser som möjliggör buffererosion. Utvecklingen innefattar också en viss minskning av pH och en viss höjning av grundvattnets redox (Eh). Den sistnämnda frågan kan dock inte sägas vara helt utredd av den anledningen att SKB förutsätter närvaro av amorfa järnsulfider i ett beräkningsfall, medan andra fall som involverar andra reaktiva järnmineral som järn(III)oxihydroxider har inte slutförts. En skillnad från grundmodellen är att detta fall inkluderar infiltrationen av ett "omvandlat meteoriskt vatten" snarare än ett helt utspätt vatten utan joner.

SKB har som del av ett svar på en kompletteringsbegäran tagit fram en redovisning kring betydelsen av vittring av silikatmineral (SKBdoc1417006). Denna redovisning består dels av simuleringar som involverar flera fasta faser, dels en analys av den grundvattenkemiska situationen på några få platser som blivit påverkade av infiltration av meteoriskt vatten men sannolikt inte av havsvatten. SKB:s slutsats är att silikater inte ger något signifikant bidrag till grundvattnets salthalt samt att alla vittringsreaktioner sammantaget inte förmår att öka salthalten tillräckligt för att undvika erosionsrisk.

För glaciationsperioden analyseras flödessituationen i Forsmarksberget med en storskalig regional grundvattenströmningsmodell (SKB R-09-25). Eftersom denna modell inte kan användas för att utvärdera salthaltsutveckling i deponeringshålskala används dock en modifierad version av modellen för tempererade betingelser (SKB R-09-20) men med randvillkor från den storskaliga modellen. Salthaltsutvecklingen vid infiltration av glaciala smältvatten modelleras med i stort sätt samma metod som för infiltration av meteoriska vatten under den tempererade fasen med fokusering på tillförsel av lösta ämnen från matrisvatten via matrisdiffusion. Justeringar har dock gjorts för att ett utspädningsförlopp redan har påbörjats under den tempererade fasen så den ursprungliga salthalten i vattenpelaren har i detta fall satts till 3 g/L. SKB:s modelleringsresultat visar att 2 % av deponeringshålen når så låg jonstyrka att buffererosion kan påbörjas. Detta motsvarar en utspädning med en faktor 10, en salthalt ner till 0,3 g/L eller en ungefärlig jonstryka för katjoner på 4 mM. Resultatet gäller för en passage av isfronten nära förvaret samt för en mycket längre period när inlandsisen täcker hela förvarsområdet.

Även i SKB TR-10-58 finns en analys av salthaltsutvecklingen under glaciala betingelser. Resultaten visar att en betydande utspädning sker under perioder med smältvatteninfiltration men endast en liten andel av grundvattnet i förvarsvolymen får en

jonstyrka för katjoner som understiger gränsvärdet (< 4 mM). Infiltration antas här ske med ett mycket utspätt glacialt vatten. Resultaten visar att om inlandsisen rör sig över en frusen berggrund blir utspädningen mindre omfattande.

5.5.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s analyser samantaget pekar på att risken för en så omfattande utspädning så att erosionsprocesser kan påbörjas är liten under den första tempererade fasen för slutförvarets långsiktiga utveckling. En liknande bedömning har även gjorts av en av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:47). SKB:s modellering med representation av den heterogena flödessituationen i berget och en begränsad uppsättning av kemiska och fysikaliska processer pekar på att betydande koncentrationskillnader kommer att uppstå på förvarsdjup med en heterogen grundvattensammansättning. Angreppssättet kan delvis motiveras med tanke på att redan befintliga modeller på hydrovidan har kunnat utnyttjas. En svårbedömd fråga är dock om modelleringen bibehåller balansen mellan processer som skapar respektive jämnar ut koncentrationskillnader i berggrunden. Denna fråga behöver belysas ytterligare i kommande steg av SKB:s program. SSM anser att även om angreppssättet i sina huvuddrag förmodligen är konservativt finns ändå vissa osäkerheter som behöver lyftas fram, så som penetrationsdjupet för matrisdiffusion (SSM Technical Note 2012:44; SSM Technical Note 2014:47) och kontaktytan mellan berget och det strömmande grundvattnet (SSM Technical Note 2014:47). Det finns också en begränsad informationsmängd om matrisvattnets sammansättning och analysmetoderna är förmodligen utvecklingsbara.

Det finns spår från infiltration av glaciala smältvatten ner till förvarsdjupet 500 m på olika platser med en berggrund som påminner om den vid Forsmark (SKI Report 2006:12; Mathurin m.fl. 2012). Förekomsten av vatten av sådant ursprung från ett kallt klimat har bekräftats av SKB genom uppmätning av den utarmning av syre-18 som är signifikativ för nederbörd i områden med låg temperatur. Även om det inte är känt vilken grad av utspädning och blandning som infiltrationen har orsakat utgör detta fall i motsats till den långsamma infiltrationen av meteoriska vatten en förhållandevis snabb och mer betydande påverkan även på grundvatten på så stora djup som 500 m. Enligt SSM:s bedömning innebär detta också att risken för att utspädningen av grundvattnet orsakar buffererosion blir betydligt större. Den komplexa flödessituationen och dess representation i modelleringen medför att noggrannheten hos SKB:s resultat är svårbedömd (SSM Technical Note 2014:47; avsnitt 5.4 i denna granskningsrapport). Å andra sidan anser SSM att osäkerheter kopplade till hydrogeologi möjligen är mer hypotetiska än verkliga eftersom ingen hänsyn har tagits till tillförseln av lösta ämnen från kemiska reaktioner i berggrunden och i den yt nära miljön. SSM:s externa expert framhåller vidare att observationer kopplade till avsaknad av lakningsepisoder för kalcit är potentiellt betydande och antyder ingen eller mycket begränsad förekomst av utspädda grundvatten på förvarsdjup (SSM Technical Note 2014:47). Sammantaget finner SSM att SKB:s övergripande slutsats är rimlig, nämligen att grundvattenkemi som gynnar buffererosion inte kan uteslutas men att uppkomsten sannolikt begränsas till vissa positioner i berget med höga grundvattenflöden. Denna slutsats är möjlig att dra mot bakgrund av grundläggande kunskap om Forsmarkslinsen från platsundersökningsprogrammet beträffande få vattenförande sprickor på förvarsdjup. Slutsatsen gäller eventuellt inte för mer normalsprickig berggrund i vilken uppkomsten av utspädda förhållanden på förvarsdjup kan vara mer utbredd.

SSM anser att risken för buffererosion medför att positioner i berget nära deformationszoner och sprickor med stora grundvattenflöden behöver undvikas i samband med konstruktion av förvaret. Risken för att kopparkapslar kommer att placeras nära betydande grundvattenflöden kan förmodligen inte helt elimineras, men en lämplig strategi för selektiv placering av deponeringshål utgör enligt SSM:s bedömning den mest

effektiva metoden att minimera riskbidrag för fallet med buffererosion och utspädda glaciala smältvatten. SKB har angivit att ytterligare arbete för att ta fram en mer optimal strategi för placering av deponeringshåll utgör ett prioriterat område. Ett ökat förvarsdjup skulle också minska risken för buffererosion eftersom motståndet mot utspädning ökar som funktion av djupet samt att förekomst av glaciala smältvatten minskar med djupet. SSM inser dock att lämpligheten hos en sådan åtgärd behöver övervägas från flera olika perspektiv.

Beträffande inverkan av en extremt lång period med tempererade förhållanden konstaterar SSM att i vissa simuleringar har det infiltrerande vattnet redan en jonstyrka från katjoner på cirka 15 mM eller ca tre gånger högre koncentration av lösta joner än vad som krävs för att överstiga 4 mM. Detta kallas omvandlat meteoriskt vatten med en sammansättning som skiljer sig väsentligt från nederbördsvattnet. Definitionen av denna komponent förklarar delvis SKB:s resultat från modelleringsarbetet beträffande risk för buffererosion samt slutsatsen att kemiska processer i berggrunden är mindre betydelsefulla. I detta fall finns det uppenbarligen andra kemiska processer som resulterar i en sammansättning för omvandlat meteoriskt vatten som skiljer sig väsentligt från nederbördsvattnet. Slutsatsen är att jonstyrkan för katjoner inte sjunker överhuvudtaget efter 20 000 år. Vissa modellresultat innebär dock ett överskridande av gränsen för buffererosion. Detta avser när ett alternativt infiltrerande vatten har använts benämnt utspätt meteoriskt vatten. SSM anser att för att skapa större förståelse för parameterkänsligheten i modellerings-sammanhanget behöver SKB undersöka antaganden kring sammansättningar av infiltrerande vatten i berggrunden för långa perioder med tempererade förhållanden samt undersöka vilka processer som påverkar sammansättningen hos sådana vatten.

Beträffande inverkan av vittringen av silikatmineral i berggrunden anser SSM att jämförelser med inlandsplatser kan utgöra ett värdefullt inslag för att förbättra förståelsen för Forsmarksplatsens utveckling under en utdragen tempererad fas. SSM konstaterar att detaljer kring provtagningsdjup, samt beskrivningar av eventuell förekomst av lösa avlagringar i vilka vittringsprocesser kan ske saknas i den befintliga studien (SKBdoc 1417006). SSM konstaterar också att data från inlandsplatserna inte helt verkar överensstämma med resultaten från ovan omnämnda kompletteringsbegäran som avser konsekvenser av en extremt utdragen tempererad fas (SKBdoc 1416908). SKB konstaterar i detta sammanhang att infiltration av omvandlade meteoriska vatten inte medför någon betydande erosionsrisk under en extremt utdragen meteorisk fas. Å andra sidan har flera av inlandsplatserna jonstyrka i närheten av gränsen för buffererosion. Beträffande modelleringen av silikatmineral konstaterar SSM att SKB har undersökt betydelsen av sekundära silikatmineral med ett modelleringskoncept baserat på kemisk jämvikt. Även om detta ger en viss förståelse av betydelsen av ett antal mineral som identifierats i Forsmarks spricksystem kvarstår frågor om betydelsen av silikater vars vittringsprocesser i ytligare lager styrs av andra förutsättningar än kemisk jämvikt, så som oxiderande betingelser, lägre pH, finfördelat material med stora exponerade mineralytor, samt närvaro av komplexbildare och biologiska processer. SSM drar dock slutsatsen att dessa processer har begränsad betydelse eftersom de bara i viss utsträckning kan öka säkerhetsmarginalerna mot buffererosion.

SSM:s sammanfattande bedömning är att utveckling av grundvattnets salthalt vid Forsmark behöver vara ett fortsatt prioriterat forskningsområde. Det är en naturlig och gradvis process i slutförvarsmiljön som främst påverkas av den långsiktiga klimatutvecklingen och kommande glaciationscykler. Betydelsen i SR-Site är dock stor med tanke på kopplingen till buffererosion och indirekt sulfidkorrosion av kopparkapslar i eroderade deponeringshåll, vilka är processer som dominerar riskanalysen i SR-Site. SKB argumenterar visserligen för att de har använt ett i detta avseende försiktigt fall i demonstration av kravuppfyllelse där erosion antas ha skett initialt i alla deponeringshåll. I

SR-Site finns också ett annat fall med erosion under 100 % av tiden som eliminerar osäkerheter kopplad till prediktion av grundvattnets salthaltutveckling. Denna eliminering sker dock till priset av en tiofaldig ökning av antalet påverkade deponeringshål. Det gränssättande fallet erosion 100 % av tiden förskjuter också säkerhetsbetydelsen från att grundvattnets salthalt är lämplig för barriärernas beständighet till att erosionsmodellen för bufferten och modellen för att beräkna kapselkorrosion är korrekt. Enligt SSM:s bedömning behöver SKB inför kommande steg i sitt program fortsätta att utvärdera olika typer av osäkerheter kopplade till utvecklingen av grundvattnets salthalt, t.ex. de som avser framtida klimatutveckling, grundvattenkemiska processer respektive plats specifika egenskaper.

SSM anser liksom en av SSM:s externa expert att en mer sammanhållen och tydlig dokumentation av analysen av långsiktig salthaltsutveckling hade varit önskvärd (SSM Technical Note 2014:47). Det finns för närvarande vissa otydligheter och inkonsekvenser beträffande bland annat definition av modeller, definition av typvatten och antaganden kring hydromodellering som försvårar granskningsarbetet. SSM anser att förhållandet mellan de olika modelleringsstudierna är något oklar. SKB anför visserligen skäl för att välja den modellering som bäst representerar extrema transportvägar och den rumsliga spridningen av katjonkoncentrationer. Denna förklaring adresserar dock inte helt de konceptuella skillnaderna mellan olika modelleringsmetoder.

5.5.3 Intrång av syre på försvarsdjup

5.5.3.1 Underlag från SKB

SKB redovisar risken för syreinträngning i berggrunden ner till slutförsvarsdjup i en särskild modelleringsstudie (SKB TR-10-57). SKB har även genom fältmätningar gjort omfattande undersökningar under det s.k. REX-försöket som genomfördes vid byggandet av Äspölaboratoriet (SKB TR-01-05). REX-försöket omfattade också till viss del laboratorieundersökningar av bergets syreförbrukningsförmåga.

SKB räknar med att syreinträngning förväntas ske under tempererade betingelser genom infiltration av meteoriska vatten. Studier har dock visat att syret konsumeras under rådande förhållanden redan i ytligt beläget berg genom mikrobiella processer och reaktion med organiskt löst material. SKB:s resultat från REX-försöket visar att ett ökat inflöde av grundvatten från ytan via en sprickzon inte bara orsakar ökat inflöde av syre utan också ökat inflöde av organiskt material från ytskiktet. Tillförseln av organiskt material från ytskiktet kan aktivera mikrobiella processer i berggrunden som förbrukar syre. SKB föreslår att även metan och vätgas från djupt ner i berggrunden aktiverar mikrobiell förbrukning av syre. SKB:s slutsats är att de mikrobiella processerna dominerar över andra abiotiska processer som kan konsumera syre under tempererade betingelser.

För den återstående delen av den första glaciationscykeln räknar SKB med fortsatt reducerande kemiska betingelser, med undantag av att oxiderande smältvatten i vattenledande deformationszoner kan tränga ner till försvarsdjup innan mineralreaktioner i sprickväggarna kan förbruka löst syre. I anslutning till en istid kan tillgång till organiskt material i det yttnära skiktet förväntas vara mycket liten eller obetydlig. SKB förutsätter därför att syret istället förbrukas av mineral i berggrunden som vid vittring ger ifrån sig järn(II) som i sin tur reagerar med syre. Förekomst av spår av oxiderade järn(III)oxider i anslutning till sprickzoner visar att syre tidigare kan ha förekommit på djup ner till cirka 100 m på flera platser i Sverige. I anslutning till Forsmark finns dock inga tydliga observationer som styrker att oxidation av järn(II) har förekommit långt ner i berggrunden vid låg temperatur. SKB antar hypotetiskt att allt järn(II) förekommer i form av mineralet biotit som frigör järn(II) genom vittringsprocesser. Järn(II) förekommer dock i



verkligheten i mindre mängder i en rad andra mineral som pyrit och magnetit. Biotit finns antingen direkt exponerad för grundvatten i anslutning till den spricka i berget genom vilken syre tillförs eller så finns mineralet tillgängligt i bergmatrisen som kan göras tillgänglig via matrisdiffusion i bergmatrisens porer. Om perioden med syretillförsel blir långvarig kan lättillgängliga källor för frigörelse av järn(II) möjligen utarmas och fortsatt syrekonsumtion kommer då att styras av matrisdiffusion. SKB har till grund för de detaljerade studierna av syrekonsumtion med prover från Forsmark karakteriserat förekomst av järn(II) både i bergmatrisen och i sprickfyllnadsmineral. Kornstorlekar av biotit har även uppmätts.

SKB har genomfört olika typer av simuleringar för att studera syreförbrukning i berget, dels baserat på analytiska uttryck för materieöverföringsstyrd respektive reaktionshastighetsstyrd kinetik, dels baserat på numeriska simuleringar som möjliggör mer detaljerad representation av kemiska reaktioner (SKB TR-10-57). Känslighetsanalyser har genomförts med avseende på pH, syrehalt i smältvattnet samt effektiv diffusivitet. De mest långtgående slutsatserna dras dock från hydrogeologiska simuleringar som simulerar bergets transportmotstånd. Transportmotståndet är styrande för hur stor mineralyta som kan kopplas samman med strömbanan för en viss kapselposition vilket därför också blir styrande för bergets syrekonsumtion. För att få en upplösning som möjliggör en analys av hela ensemblen av deponeringshålspositioner har SKB använt en DFN-modell baserad på koden CONNECTFLOW. Resultaten visar att endast när isfronten skulle förbli stationär ovan förvaret i en ogynnsam position under en längre tid skulle ett fåtal kapselpositioner exponeras för syrehalter kring 0,3 mM. Detta förutsätter också en teoretisk maximal syrehalt i smältvatten på ca 1,5 mM. SKB konstaterar i SR-Site att syrenedträngning trots en rad konservativa antaganden endast är aktuell i något enstaka deponeringshål och de bedömer därför att fallet ger ett försumbart bidrag till kopparkorrosion (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2).

5.5.3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB bedrivit ett långsiktigt och ändamålsenligt forskningsarbete för att förstå faktorer som påverkar redoxbetingelser på förvarsdjup av betydelse för slutförvarets långsiktiga säkerhet. SKB:s kunskap har dock delvis baserats på mätningar som gjorts vid Äspö och Laxemar. Även om det inte finns några särskilda skäl varför situationen skulle vara väsentligt annorlunda vid Forsmark anser SSM att SKB inför kommande steg av sitt program behöver verifiera den konceptuella bilden av redoxpåverkande processer vid Forsmark. Så som påpekas av SSM:s externa experter är observationerna vid Forsmark kring redox-känsliga sprickmineral likaratade jämfört med andra platser i Sverige och Kanada (SSM Technical Note 2014:08).

SSM konstaterar att befintliga redoxbetingelser vid Forsmark demonstreras av att alla grundvattenprover som är tagna på mer än några 10-tals meters djup är stabilt reducerande med en total frånvaro av syre. Av mättekniska skäl är det svårt att direkt påvisa total avsaknad av löst syre men närvaro av reducerande species som löst sulfid och järn(II) är en tydlig indikation på att allt syre har förbrukats i berggrunden.

SKB:s fältstudier visar att sprickfyllnadsmineral som är förknippade med oxiderande betingelser vid låg temperatur, så som götit, förekommer i sprickzoner ner till ett par hundra meters djup. Sprickfyllnadsmineral innehållande oxiderat järn(III) blir bestående i reducerande grundvatten på grund av kinetiska faktorer. SSM anser därför att det är troligt att oxiderande grundvatten har nått djupare än i dag under vissa faser av platsens tidigare utveckling. Redoxbetingelser på dessa djup måste ha varierat som funktion av tiden eftersom även pyrit bildats på motsvarande djup vilket bara kan ske under reducerande betingelser. SSM bedömer att de mest illustrativa observationerna kommer ifrån Laxemarplatsen snarare än Forsmark där mikroskopundersökningar av borrhävar

illustrerar omvandling av pyrit till götit av olika omfattning beroende på avståndet till en vattenförande spricka (Drake m.fl., 2009). Dessa observationer utgör en värdefull grund för förståelse av ett antal redoxpåverkande processer i berggrunden. SKB anger att motsvarande prov inte har tagits vid Forsmarkplatsen beroende på en avsaknad av borrhålskärnor från bergets ytskikt. SKB:s undersökningar visar också att viss kloritisering av biotit förekommer. SSM anser att observationer med avseende på omvandlingar av biotit i fältskala är betydelsefulla eftersom SKB:s analys av den framtida utvecklingen av redoxbetingelser och eventuell inträngning av syre på förvarsdjup till stor del har baserats på mineralet biotit.

SSM konstaterar att i samband med avsmältningen av en inlandsis skiljer situationen avsevärt från tempererade förhållanden. Det finns till att börja med sannolikt inte samma tillgång till organiskt material vid ytskiktet eftersom jordlager och på förekommande platser flora och fauna har försvunnit som ett resultat av inlandsisens rörelser. SKB har därför i sina mest omfattande modelleringsstudier kring möjlig syreinträngning (SKB TR-10-57) valt att enbart fokusera på abiotisk syreförbrukning kopplat till reaktion med järn(II) som frigörs främst via vittring av mineralet biotit. Högre syrekoncentrationer än de som motsvaras med jämvikt med atmosfäriskt syre kan också förekomma i smältvatten eftersom snö och is komprimeras under bildningen av istäcket. SKB räknar med att syrekoncentrationen kan vara maximalt cirka 1,5 mM i jämförelse med den vanliga jämviktsskoncentrationen på 0,3 mM. Slutligen är de hydrauliska betingelserna under delar av avsmältningsfasen då isfronten parkerar nära slutförvaret långt mindre gynnsamma än under en tempererad fas eftersom det utvecklas en hög hydraulisk gradient med stora inflöden av smältvatten.

Vid beaktande av dessa förutsättningar kan det enligt SSM:s bedömning inte helt uteslutas att löst syre kan förekomma på förvarsdjup under vissa tidsperioder under en glaciationscykel. SSM anser dock att SKB genom sina modellstudier på ett tillfredställande sätt har visat att eventuell förekomst av syre är begränsad till positioner i berget med höga grundvattenflöden och förhållandevis liten kontakt mellan grundvatten och flödesvätt bergyta (låga F-tal). Det är med andra ord positioner i berget nära deformationszoner och sprickor med stora grundvattenflöden som även av andra skäl bör undvikas i samband med konstruktion av förvaret. Även om risken för att kopparkapslar kommer placeras nära betydande grundvattenflöden inte helt kan elimineras, utgör en strategi med ett selektivt urval av deponeringshållspositioner sannolikt den mest effektiva metoden att minimera riskbidrag även för fallet med syresatta glaciala smältvatten.

SSM anser att frågan kring ett eventuellt riskbidrag från syresatta glaciala smältvatten i många avseenden är analog med frågan kring mer betydande riskbidrag kopplat till förekomst av mycket utspädda grundvatten och erosion av bufferten. Det är i grunden samma naturfenomen som ligger bakom den störning av slutförvarsmiljön som potentiellt resulterar i en mer omfattande degradering av de tekniska barriärerna än för tempererade betingelser. Enligt SSM:s bedömning finns dock skäl att anta att SKB:s kvantitativa analys är mer konservativt formulerad i jämförelse med fallet glaciala syresatta smältvatten. Det är till exempel sannolikt att syre också konsumeras av sulfidmineral snarare än enbart biotit som dels förekommer i berget, dels i buffert och återfyllda tunnlrar. Dessutom är det möjligt att en betydande förbrukning av syre sker via mikrobiella processer eller mineralreaktioner redan i kontaktzonen mellan berget och en inlandsis och innan infiltrationsfasen. Höga grundvattenflöden är också förknippade med pessimistiska antaganden kopplade till inlandsisens rörelser så som att isfronten förblir stationär under lång tid i närheten av slutförvaret. Slutligen och kanske viktigast visar de hittills genomförda mineralogiska studierna vid Forsmark inga tydliga spår av en betydande inträngning av syre ner till stora djup. Mot bakgrund av detta är SSM:s bedömning att



fallet ger ett om inte försumbart riskbidrag i alla fall ett riskbidrag som är betydligt mindre än det gränssättande riskbidraget för fallet kopplad bufferterosion och sulfidkorrosion.

SSM anser trots att SKB:s modelleringsarbeten kring frågan i många avseenden kan ses som konservativt finns det vissa frågetecken kring hur väl modellerna representerar vad som faktiskt händer i berggrunden i samband med kraftigt förhöjda inflöden av syresatta vatten. SKB antar i modelleringen att den minst gynnsamma situationen uppstår om biotit har förbrukats i anslutning till vattenförande sprickor och att syre måste transporteras in i berget via matrisdiffusion där det kommer i kontakt med järn(II) som frigjorts från biotit inne i bergmatrisen. Någon sådan utarmning av biotit inuti bergmatrisen har dock inte observerats och det är därför troligt att syre som infiltrerats i samband med avsmältning av inlandsisar förbrukas på annat sätt. Modelleringsinsatserna har därför möjligen fokuserats på processer som har liten betydelse för förvarets långsiktiga skyddsförmåga. Om så är fallet kan kunskap om sådana processer inte heller förbättra förutsättningarna för att optimera förvarets säkerhetsfunktioner. SSM rekommenderar liksom sina externa experter (SSM Technical Note 2014:08) att SKB inför kommande steg i sitt program genomför ytterligare mineralogiska undersökningar av ytliga lager av Forsmarksberget för att säkrare avgöra betydelsen av olika syreförbrukande processer. Särskilt observationer kring syreförbrukande kemiska processer i ytliga lager kan öka kunskap och förståelse för kemiska processer som har betydelse för stabilitet hos djupa grundvatten med avseende på eventuell syreinträngning.

SSM anser att SKB på ett godtagbart sätt har dokumenterat analysen av risken för påverkan från syresatta glaciala smältvatten (SKB TR-10-57). Frågan har belysts från olika perspektiv med olika angreppssätt och vissa känslighetsanalyser har genomförts. En motsvarande rapport som på ett likartat sätt hade belyst olika aspekter av inträngning av mycket utspädda smältvatten hade varit användbar. SSM:s externa experter har noterat vissa brister vad gäller presentationen av resultat samt att viss bakgrundsinformation och dokumentation om vissa simuleringar saknas (SSM Technical Note 2014:08). I granskningen efterfrågas också känslighetsanalyser för frigörelsehastigheten av järn(II) från biotit.

5.5.4 Sulfidhalter och vissa övriga grundvattenkemiska variabler

5.5.4.1 Underlag från SKB

Under den resterande delen av den första glaciationscykeln efter förslutning förväntar sig SKB en minskning av sulfidhalterna främst på grund av lägre temperaturer men också eftersom tillförseln av organiskt material minskar (SKB TR-10-58, avsnitt 7.6.3). Det saknas dock tillräcklig data för att kvantifiera dessa förändringar och särskilt den rumsliga fördelningen. SKB anser även att tidberoende effekter kan visa sig vara försumbara och har därför valt att vid beräkningar relaterade till kapselkorrosion enbart använda en fördelning av uppmätta värden baserad på en särskild studie (SKB TR-10-39). SKB anser att dagens data är konservativa eftersom de har påverkats av en period under vilken infiltration av marina vatten har ägt rum.

Episoder med förhöjd mikrobiell aktivitet och förhöjd sulfidhalt kan dock inte uteslutas t.ex. vid perioder med ökad tillförsel av sulfat och organiska ämnen från ytan. Eftersom korrosionsskador på kapseln orsakas av ett ackumulerat flöde av korroderande ämnen har dock inte sådana faser av förhöjd mikrobiell aktivitet någon stor betydelse så länge de balanseras av faser med lägre. Under vissa faser av en kommande glaciationscykel så som permafrost är det troligt att lägre temperaturer i berggrunden ytterligare begränsar mikrobiell sulfatreduktion.



Kemisk sammansättning av grundvatten på förvarsdjup har också betydelse för buffertens och återfyllnadens långsiktiga stabilitet. En möjlig långsam degradering av bufferten orsakad av illitiserings av smektitlera påverkas av grundvattnets innehåll av kalium. Det har också visats att degradering av bentonit kan orsakas av järn. SKB har följaktligen angivit koncentrationer av kalium och järn som funktionsindikatorer utan gränsvärde.

5.5.4.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s analys baserad på sulfidhalter som är rumsligt fördelade men som är konstanta i tiden är en rimlig förenkling eftersom resultaten från platsundersökningarna kan utnyttjas samt att inga perioder med stora ökningar är att vänta. SSM håller visserligen med SKB om att sulfidhalterna periodvis kan öka men sådana episoder behöver vara långvariga eller mycket kraftiga för att ha någon inverkan på korrosionsmodelleringen. SSM vill dock inte utesluta att behov av ytterligare analyser av tidsberoende processer som kan påverka de långsiktiga sulfidhalterna i berggrunden kan komma att uppstå. Detta som ett resultat av ytterligare karaktärisering av löst organiskt material i djupa grundvatten.

SSM anser generellt att SKB har presenterat ett tillräckligt dataunderlag för bedömning av grundvattenkemiska variabler med en inverkan på bufferten och återfyllnaden. Det finns sannolikt inga tidsberoende processer som kan påverka koncentrationerna av kalium och järn som har så stor effekt att det skulle påverka bedömningen av buffertens långsiktiga stabilitet (avsnitt 5.6 i denna granskningsrapport).

Generellt för ett flertal av säkerhetsindikatorerna som är relaterade till sammansättning av grundvatten och dess påverkan på de tekniska barriärernas integritet är att det saknas tydliga gränsvärden (HS^- , H_2 , CH_4 , organiskt kol, K^+ , Fe). Detta förfarande medför att säkerhetsindikatorerna blir otydliga och mindre användbara för att bedöma giltighet och tilltro till de säkerhetsfunktioner som berörs. SSM anser därför att SKB inför kommande steg i sitt program behöver definiera gränsvärden eftersom en konsekvent uppföljning av indikatorerna annars inte kan genomföras. SKB har i processrapporterna demonstrerat en grundläggande förståelse för de processer och egenskaper som är relaterade till säkerhetsindikatorerna. På grundval av experiment och modelleringsstudier behöver gränsvärden definieras som anger i vilket koncentrationsintervall som en komponent i grundvatten medför att en specifik säkerhetsfunktion inte med säkerhet kan upprätthållas och därför behöver analyseras mer utförligt och eventuellt integreras i riskanalysen.

5.6 Kemisk utveckling av buffert och återfyllnad

Den långsiktiga kemiska utvecklingen av buffert och återfyllnad avser långsamma kemiska mineralomvandlingar för bentonit i kontakt med kapselmaterialet och omgivande grundvatten. Det omgivande grundvattnet är i ett 100 000 års perspektiv också förändligt med förväntade perioder av såväl högre som lägre salthalt (avsnitt 5.5 i denna rapport), vilket har betydelse för buffertens och återfyllnadens kemiska utveckling. Växelverkan mellan grundvatten och buffert/återfyllnadsmaterialet leder till en omfördelning av upplösta komponenter i porvattnet såväl som till en omfördelning av accessoriska mineraler och av utbytbara katjoner. Vissa förändringar av bentonitens huvudkomponent, smektit-mineralet montmorillonit, kan också möjligen förekomma.

Mineralomvandlingar i bentoniten kan ha negativ inverkan på buffertens och återfyllnadens säkerhetsfunktion att begränsa advektiv transport (SKB SR-Site huvudrapport, figurer 8-2 och 8-3, Buff1 och respektive BF2). Dessutom kan även buffertens säkerhetsfunktion att dämpa bergets skjuvrörelse (Buff3) påverkas negativt.



Den långsiktiga kemiska utvecklingen är starkt kopplad till och är en fortsättning av den tidigare utvecklingen under de första 1000 åren, men skiljer sig åt så till vida att vissa långsamma mineralomvandlingar behöver ägnas uppmärksamhet som saknar betydelse i ett kortare årsperspektiv (avsnitt 4.7 i denna granskningsrapport). Vissa processer är dock av mindre betydelse i ett längre tidsperspektiv än 1000 år nämligen de som kopplar till bränslets resteffekt och den termiska gradienten i bufferten, omättade förhållanden i buffert och återfyllnad, en initial period av oxiderande kemiska betingelser samt det initialt förekommande strålfältet runt på kapselns utsida. Det finns även processer som påbörjas under de första 1000 åren som är av vikt även i längre tidsperspektiv, exempelvis illitiserings.

I detta avsnitt granskar SSM SKB:s redovisning av kemiska processer i bufferten som huvudsakligen har sin betydelse efter att den initialt höga temperaturen har sjunkit, och efter att buffert och återfyllnad har blivit vattenmättade. Exempel på processer är osmos, interaktion mellan bentonit och kapselmaterialet koppar och järn, samt redoxreaktioner för järn i det oktaedriska skiktet av montmorillonitflaken. SKB:s redovisning av kemisk utveckling för återfyllnaden granskas också i detta avsnitt. Det bör påpekas att processer som kommenteras i detta kapitel också kan ha en betydelse för den kortare tidsskalan på 1000 år (avsnitt 4.7 i denna rapport). Osmos har exempelvis en betydelse för buffert och återfyllnad redan under återmättnadprocessen genom att påverka sugkraften i leran för transport av grundvatten. Osmos har även en stor inverkan på frigörelse av montmorillonitkolloider vid kemisk erosion som granskas och bedöms i avsnitt 5.8 i denna rapport.

5.6.1 Underlag från SKB

SKB redovisar en sammanfattande beskrivning av kemiska processer i buffert och återfyllnad i SR-Site huvudrapport (avsnitt 10.3.10). En mer detaljerad redovisning återfinns i processrapporten för buffert och återfyllnad (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5 och 4.4). Nedan sammanfattas SKB:s redovisning kring följande processer:

- processen osmos i bufferten respektive återfyllnaden
- interaktion mellan järn och bentonit i bufferten
- redoxreaktioner för järn i det oktaedriska skiktet av montmorillonitflaken.

På SSM:s begäran har SKB tagit fram kompletterande information om ett antal frågor kopplade till kemisk utveckling av buffert och återfyllnad. Följande svar från SKB har inkommit till SSM:

- interaktion av kopparkorrosionsprodukter och bentonit (SKBdoc 1416862).

SKB karakteriserar osmos som en grundläggande process som påverkar andra processer:

- Sugkraften ("Suction") hos omättad bentonit som leder till buffertens återmättnad är delvis baserad på osmos (SKB TR-10-47, avsnitt 4.8.1).
- Förlust av svälltryck vid hög salinitet är kopplad till en osmotisk process (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.8).
- Den repulsiva kraften mellan montmorillonitflak som leder till kemisk erosion av bentonit kan också delvis förklaras med osmotiskt tryck (SKB TR-09-35, avsnitt 6.7).
- Begränsning av anjontransport i bentoniten eller anjonexklusion ("anion exclusion") är relaterad till Donnan-effekt som är ett fenomen orsakat av osmos.

Alla dessa relaterade processer påverkar svälltryck och densitet hos bentonit och har därför en betydelse för buffertens och återfyllnadens säkerhetsfunktioner.

SKB:s beskrivning av osmos innefattar jämförelse av processen i bentonit-vatten-systemet och processen i det klassiska osmotiska systemet. Den sistnämnda processen avser den

spontana nettorörelsen av lösningsmedelsmolekyler i en lösning genom ett semipermeabelt membran som släpper igenom lösningsmedelsmolekyler men inte molekyler av upplösta ämnen. Molekylerna rör sig från ett område med lägre koncentration av upplösta ämnen till ett område med högre koncentration. Det vill säga i den riktning som tenderar att utjämna kemisk potential och därmed koncentrationen av de upplösta ämnena på båda sidorna. Ett hydrostatiskt tryck behövs på den sidan av membranet med högre koncentration för att motverka en nettorörelse, detta tryck brukar benämnas osmotisk potential (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.8; SKB TR-10-35, avsnitt 6.7; Karnland m.fl., 2005; Shaw, 1992, kapitel 2).

I SKB:s fall finns dock inget semipermeabelt membran och förståelsen av osmos har istället baserats på att montmorillonitflaken har en permanent negativ laddning. Katjonerna i porvattnet attraheras av flaken och bildar ett diffusivt skikt ut från flakets laddade yta. En koncentrationsgradient av upplösta ämnen uppstår i detta system liknande det som diskuterats ovan, medan gradienten bibehålls av elektrostatiske kraft istället för av ett semipermeabelt membran (SKB TR-09-35, avsnitt 6.7; Hunter, 2001, avsnitt 7.3). Förutom kationer så har även vattenmolekyler en tendens att spontant transporteras och lokaliseras till flakytorna. Tillsammans med kapillärkrafterna ger denna effekt upphov till bentonitens negativa portryck och drivkraften för återmättnadsprocessen (SKB TR-10-47, avsnitt 3.3.1). Mekanismen leder även till uppbyggnad av ett svälltryck om bentoniten befinner sig i en begränsad volym under återmättnadsprocessen (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.8). En högre koncentration av upplösta ämnen i det omgivande grundvattnet som står i kontakt med bentoniten ökar vattnets ledningsförmåga vilket minskar det diffusiva skiktets räckvidd. Detta minskar i sin tur bentonitens förmåga att binda vattenmolekyler och därför minskar även svälltrycket (Karnland m.fl., 2005).

SKB fäster stort avseende vid Donnans jämvikt som är ett annat fenomen direkt relaterat till osmos (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.8; Hiemenz och Rajagopalan, 1997, avsnitt 3.5a). Detta samband innebär att produkten av jonaktiviteter för upplösta ämnen i bentonitens porvatten överensstämmer med produkten av jonaktiviteter i det omgivande grundvattnet i kontakt med bentoniten. Sambandet gäller trots att aktivitet för kationer och anjoner i porvattnet även påverkas av att montmorillonitens flakladdning bidrar till elektrisk neutralitet. Detta jämviktsförhållande har använts av SKB för att beräkna hur bentonitens svälltryck påverkas av grundvattnets jonstyrka. SKB har med hjälp av beräkningar baserade på Donnans jämvikt erhållit en god överensstämmelse mellan teoretiska och experimentella resultat (Karnland m.fl., 2005; SKB TR-10-47, figur 3-21).

Korrosion av segjärnsinsatsen under anaeroba förhållanden förväntas producera magnetit som under vissa förutsättningar passiverar metallytan vilket leder till en avsevärt minskad korrosionshastighet. Specifikt för denna korrosionsform är att den endast påbörjas efter att kopparhöljet har fallerat och efter att insatsen kommit i kontakt med vattenfasen. Beträffande interaktionen mellan järn och bentonit konstaterar dock SKB att passivering av metallytan inte verkar vara så effektiv när korrosion av järn sker i närvaro av bentonit. Anledningen till detta är möjligen att det finns tillgänglig katjonutbyteskapacitet hos lermineralen som möjliggör att löst järn åtminstone inledningsvis i huvudsak absorberas på lermineralens yta, vilket minskar bildningen av passiverande korrosionsprodukter på metallytan (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.10). Interaktion mellan korrosionsprodukter och bentonit kan möjligen ha flera konsekvenser av relevans för slutförvarets långsiktiga säkerhet (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.10):

- upplösning och/eller omvandling av montmorillonit
- bildning av Fe-montmorillonit med ursprungliga katjonerna utbytta mot järnjoner
- reduktion av strukturellt trevårt järn i montmorillonitens oktaederskikt
- cementering av bentonit till följd av bildningen av korrosionsprodukter.

SKB citerar flera publikationer i litteraturen för att belysa att inverkan av järn-bentonit interaktion på smektitens stabilitet är beroende av flera faktorer (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.10). Vid sura till neutrala pH-betingelser korroderar metalliskt järn under bildning av magnetit utan att smektiten blir instabil. Under basiska pH-betingelser kan smektit delvis destabiliseras under bildning av magnetit och 1:1 fyllosilikatfaser (odinit och crondstedtit). Systematisk destabilisering har endast observerats för dioktaedrisk smektit, till vilken montmorillonit tillhör, men inte för trioktaedrisk smektit (saponite och hectorit). Reaktivitet hos smektitfasen ökar med ökat innehåll av trevärt järn i det oktaedriska skiktet och med natriumjoner på jonbytesplatserna (Lantenois m.fl., 2005). Mekanismen för destabilisering är komplex och involverar reduktion av trevärt järn i de dioktaedriska skikten och följaktligen en ökning av strukturladdningen (Lantenois m.fl., 2005; Perronnet m.fl., 2008) och minskning av jonbytesförmågan hos smektiten (Khaled och Stucki, 1991).

SKB påpekar även att reduktion av strukturellt järn har en viss negativ inverkan på bentonitens hydrauliska konduktivitet och svälltryck (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.10). Destabilisering av dioktaedrisk montmorillonit har förutsatts vara kontrollerad av reaktionskinetik och temperatur, vattenkvot samt mängden järn (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.10; Mosser-Ruck m.fl., 2010). I de flesta studier i vilka destabilisering av dioktaedrisk smektit har påvisats har en blandning av järnpulver och lerpulver använts för att påskynda processen och förkorta försökstiderna (Lantenois m.fl., 2005; Perronnet m.fl., 2008). Det kan noteras att när kompakterad MX-80-bentonit har använts istället för bentonitpulver har ingen destabilisering av dioktaedrisk smektit genom reduktion av trevärt järn kunnat observeras, och järn-bentonit-interaktionen sker endast genom att de ursprungliga katjonerna på jonbytesplatser byts ut mot järn(II)-joner, vilket får till följd att den hydrauliska konduktiviteten hos bentoniten ökar kraftigt vid låg densitet (Carlson m.fl., 2007).

Beträffande den delvis analoga interaktionen mellan koppar och bentonit belyser SKB denna process med hjälp av fältförsöksobservationer från LOT- och Prototypförvaret i Äspölaboratoriet (SKBdoc 1416862). Denna process skiljer sig från bentonit-järn-interaktionen så till vida att den påbörjas redan när kapslarna har inplacerats i slutförvaret. SKB bedömer att denna typ av interaktion är betydligt mindre omfattande och påverkar bentoniten i mindre omfattning med tanke på att mängden av kopparjoner som kommer i kontakt med bentonit under en viss tid är betydligt mindre, vilket i sin tur beror på låg löslighet av kopparkorrosionsprodukter som kan bildas i såväl kemiskt reducerande som oxiderande miljö.

SKB:s analys av fältförsöken visade att koppar i bentonit lokaliserats till området i direkt anslutning till kopparvärmaren i LOT-försöket eller närmast kopparkapslarna i prototypförvaret. Kopparn befanns i huvudsak vara i en olöslig form otillgänglig för jonbytesprocesser förmodligen som Cu(0), Cu(I) eller som kopparsulfid (SKBdoc1416862). Omkring en tredjedel av den totalt tillgängliga mängden koppar i bentonit fanns dock på jonbytesplatser, vilket motsvarar mindre än 0,5 procent av den totala jonbyteskapaciteten. SKB har inte kunnat påvisa någon skillnad mellan referensprover och fältexponerat material från prototypförvaret med avseende på faktorer som har bäring på långsiktig säkerhet som svälltryck och hydraulisk konduktivitet. Inte heller skjuvhållfasthet hos bentonit verkar ha påverkats av koppar-bentonit-interaktionen. Experiment med bentonitprover i vilka kalcium har blivit jonbytt mot koppar uppvisar likartade egenskaper. Under SKB:s studier av koppar-bentonit-interaktionen har ingen strukturförändring kunnat observeras vare sig med FTIR ("Fourier Transform Infrared Spectroscopy") eller med röntgendiffraktion XRD ("X-Ray Diffraction") hos partikelstorleksfraktionen mindre än 0,5 µm. Data från XANES-spektra ("X-ray



Absorption Near Edge Structure”) tyder dock på att Cu(0) eller Cu(I) i viss utsträckning kan ha bidragit till att reducera strukturellt järn i leran (SKBdoc 1416862).

5.6.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning kring buffertens och återfyllnadens långsiktiga kemiska utveckling i huvudsak är trovärdig och välmotiverad. Det finns ett förhållandevis gott kunskapsläge kring betydelsefulla långsiktiga kemiska processer som involverar bentonitlera. Detta baserat på teoretisk förståelse, data från SKB:s försök samt fältobservationer.

SSM är positiv till att SKB har använt osmos och Donnan-jämvikt som en utgångspunkt för beskrivning och modellering av processer i bentonit av betydelse för buffertens och återfyllnadens funktioner, såsom utveckling av svälltryck vid olika jonstyrka och transport av anjoner genom bufferten. SKB:s förståelse är baserad på egna experiment och erfarenheter, men även på etablerad kunskap från angränsande områden med koppling till geokemi, lösningskemi och slutligen från kolloidkemi vid bedömning av kolloidal stabilitet (se avsnitt 5.8 i denna rapport). SSM instämmer med SKB att en lagom mängd permanent laddning hos skiktstrukturen i montmorillonit och det därtill associerade fenomenet osmos bidrar till unika egenskaper hos montmorillonit, såsom utveckling av förhållandevis höga svälltryck, och en mycket låg hydraulisk konduktivitet i förhållande till en relativt hög porositet.

SSM bedömer övergripande att SKB:s redovisning av interaktionen mellan järn och bentonit samt mellan koppar och bentonit är vetenskapligt välgrundad. Det finns från SKB:s verksamhet en godtagbar mängd experimentella observationer och rimliga tolkningar av data baserat på teoretiska resonemang. Interaktionen mellan löst järn och bentonit har dessutom varit föremål för betydande forskning i samband med andra slutförvarsprogram och SKB:s bedömningar har förutom den egna verksamheten baserats på resultat från denna internationella forskning.

Beträffande järn-bentonit-interaktionen så anser SSM att den säkerhetsmässiga betydelsen av processen naturligt begränsas av att processen inte förekommer innan kapselns kopparhölje har fallerat. Enligt vissa försök leder dock processen till viss cementering och en ökning av bentonitens hydrauliska konduktivitet, vilket kan ha betydelse för transport av läckande radionuklider genom bufferten efter att kapseln har fallerat och efter en ytterligare tid tills bentoniten eventuellt har hunnit påverkas i betydande omfattning. Analys av exponerade bentonitprover med röntgendiffraction samt spektroskopiska metoder visar dock inte på någon cementering (SKB R-08-28). SSM anser att omfattande strukturförändringar och cementering i kompakterad bentonit som en följd av järn-bentonit-interaktionen verkar vara osannolika baserat på de forskningsresultat som hittills har presenterats. Det bör dock observeras att det för närvarande finns få dokumenterade experimentella studier som avser interaktion mellan järn och kompakterad bentonit. Användning av kompakterad bentonit snarare än bentonitpulver i järn-bentonit-interaktionstester ger sannolikt upphov till mer begränsad påverkan beroende på materieöverföringsbegränsningar. Försök baserade på kompakterad bentonit, som är relativt få, bedöms vara mest relevant för KBS-3-konceptet. SSM anser därför att ett visst behov av ytterligare studier av järn-bentonit-interaktionen med kompakterad bentonit med hög montmorillonithalt eventuellt kan motiveras med informationsbehov kopplat till buffertens säkerhetsfunktioner för tiden efter kapselbrott. SSM anser dessutom att SKB behöver studera mikrobers roll vid reduktion av strukturellt järn i montmorillonit (Stucki och Kostka, 2006).

SSM instämmer med SKB att koppar-bentonit-interaktion är av mer begränsad omfattning än järn-bentonit-interaktion för förväntade slutförvarsförhållanden beroende på koppars lägre löslighet. Denna typ av interaktion är dock inte i den mycket långa tidsskalan 100 000 år nödvändigtvis av mindre betydelse eftersom processen påbörjas direkt efter deponering av kapslar och installation av tekniska barriärer, och förväntas fortgå om än i långsam takt. Detta är inte fallet för järn-bentonit-interaktion som endast påbörjas efter att kopparhöljet har fallerat. Det kan förutom påverkan på buffertens materialegenskaper också finnas en påverkan på korrosionsförloppet företrädesvis initialt innan koppar har ackumulerats i buffertmaterial närmast kopparytorna, vilket på sikt leder till förhöjda kopparkoncentrationer i lösning närmast kapseln. Det framgår av SKB:s redovisning att vissa osäkerheter kvarstår med avseende på förekomstformer för koppar i bentonit och att förekomst bara delvis kan förklaras av reaktioner under den tidiga fasen med oxiderande förhållanden (SKBdoc 1416862). Det finns för närvarande inga klara bevis som helt förklarar den uppmätta förekomsten av koppar i bentonitleran, även om SKB förväntar sig att kopparsulfider kommer att dominera på lång sikt. SKB nämner också nötning som tänkbar process vilket möjligen kan förklara förekomst av koppar med oxidationstalet noll (SKBdoc 1416862). SSM anser att SKB inför kommande steg i SKB:s program behöver förbättra underlaget så att mer information om förekomstformer av koppar i bentonit som har exponerats i slutförvarsmiljö finns tillgängligt. Sådana uppgifter skulle ge ett förbättrat underlag för att bedöma betydelsen av olika initialt förekommande processer i gränssytan mellan kapsel och buffert. Dessutom finns en osäkerhet kring påverkan av reduktion av strukturellt järn i montmorillonit med koppar(0) och koppar(I), vilket kan ha en långsiktig betydelse för bentonitens egenskaper. Illitiserings och andra omvandlingsprocesser har bedömts i avsnitt 4.7.1.2 i denna rapport.

5.7 Frysning av buffert och återfyllnad

Under vissa perioder av kommande glaciationscykler kommer sannolikt permafrost att utvecklas. Betydelsen av tillräcklig kunskap och förståelse för möjliga permafrostdjup under en glaciationscykel är kopplad till en bedömning av risken för att bufferten och/eller återfyllnaden fryser. SKB har därför i ansökansunderlaget adresserat dels bestämning av fryspunkten hos buffert respektive återfyllnad, dels analys av vilka konsekvenser en eventuell frysning har på buffertens och återfyllnadens egenskaper. SSM granskar därför i detta avsnitt SKB:s redovisning kring frysning av buffert och återfyllnad under de första 100 000 åren. SSM:s granskning och bedömning av SKB:s redovisning kring permafrostutveckling och permafrostdjup redovisas på annan plats i denna rapport under rubriken klimatutveckling (avsnitt 5.2).

5.7.1 Underlag från SKB

SKB:s studier av frysning av buffert och återfyllnad sammanfattas i SR-Site huvudrapport (avsnitt 10.4.8 och 12.3) med ett mer utförligt underlag i SKB TR-10-47 (avsnitt 3.2.2). SKB:s analys har baserats på experiment samt teoretisk förståelse av frysning som process i ett poröst medium (SKB TR-10-40).

Den termiska utvecklingen är kopplad till en kommande glaciationscykel och dess påverkan på temperaturutvecklingen i berget på förvarsdjupet, vilket kan påverka bergets säkerhetsfunktioner (SR-Site huvudrapport, R4, figur 10-2).

Säkerhetsfunktionsindikatorerna innebär att temperaturen på förvarsdjup skall vara högre än -4°C för att undvika buffertfrysning. Dessutom finns en temperaturrelaterad säkerhetsfunktion för retention som avser återfyllnaden. Temperaturen ska här vara högre än -2°C (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.3).

SKB anser att islinsbildning i en tidigare eroderad buffert kan leda till ett ökat tryck på kapseln och sidoberget samt till en omfördelning av material (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.8). En temperatursänkning kan dock även innebära en minskning av trycket eftersom buffertens svälltryck sjunker under den kritiska temperaturen.

Med stöd av flera publikationer i litteraturen (t.ex. Anderson, 1966), anser SKB att isbildning i ett poröst material kännetecknas av att allt porvatten inte fryser vid en specifik temperatur (SKB TR-10-47, avsnitt 3.2.2). Det finns ett temperaturområde under fryspunkten där jämvikt föreligger mellan vatten i fast och flytande form. Den maximala mängden ofruset vatten minskar med temperaturen (SKB TR-10-47, figur 3-2). Fryspunkten i ett jordprov definieras av SKB som den temperatur vid vilken is börjar bildas i materialet (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.8). Fryspunkten av ett lermaterial påverkas av flera faktorer såsom mekanisk spänning i materialet, porvattenkemi, detaljerad fördelning av porvolym, kemiska och fysikaliska egenskaper av materialets yta samt vattenmättnadsgrad (SKB TR-10-47, avsnitt 3.2.2).

Bentonitens fryspunkt definieras som den temperatur när is börjar bildas i materialet, dvs. den temperatur där den bestämda ofrusna vattenmängden är mindre än den totala mängden vatten i bentoniten. Denna mängd ofruset vatten erhålls genom att använda ett empiriskt förhållande från litteraturen (Anderson och Tice, 1972) mellan ofrusen vattenkvot i lermaterialet med olika specifika areor och temperatur vid konstant tryck och konstant koncentration för lösta ämnen. SKB konstaterar att den vattenmättade bufferten har en fryspunkt som är lägre än -5°C vid ett medelvärde för densiteten på $2\,000\text{ kg/m}^3$ och svälltrycket ca 7 MPa (SKB TR-10-47, avsnitt 3.2.2). Fryspunkten kan variera mellan -4 och -11°C för det densitetsintervall som har specificerats i initialtillståndet (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.8; SKB TR-10-40, avsnitt 5.1).

Baserat på observationer av hur svälltrycket förändras med temperaturen redogör SKB för hur olika typer av kompakterad bentonit beter sig vid temperaturer under 0°C , nämligen MX-80, Deponi-Can, Milos-återfyllnad och Kutch-återfyllnad. Med dessa observationer som grund bedömer SKB att isbildning inte förekommer i en kompakterad buffert om temperaturen är högre än -6°C och om svälltrycket i den vattenmättade ofrusna bentoniten är högre än 4 MPa . Vid lägre svälltryck ökar dock fryspunkten från dessa låga värden. För MX-80-bentonit med ett svälltryck på 1 MPa uppskattar SKB att fryspunkten är ca -1°C . För kompakterad Milos-återfyllnad med ett svälltryck på 2 MPa uppskattar SKB att fryspunkten är ca $-1,5^{\circ}\text{C}$ (SKB TR-10-40, tabell 4-2).

Med stöd av de ovan angivna analyserna, samt på grundval av studierna kring permafrostutvecklingen (SKB TR-10-49, avsnitt 3.4), anser SKB att bufferten i deponeringshålen inte kommer att frysa under en kommande glaciationscykel. Slutsatsen bygger på att fryspunkten för kompakterad bufferten ligger mellan -4 och -11°C , där variationsbredden är beroende av svälltrycket i den vattenmättade ofrusna bentoniten (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.8; SKB TR-10-40, avsnitt 5.1). Enligt SKB:s redovisning om permafrostutvecklingen kommer så låga temperaturer inte att nå ner till förvarsdjup (SKB SR-Site huvudrapport, figur 10-109).

För återfyllnaden är svälltrycket cirka 3 MPa för den genomsnittliga densitet som har specificerats i initialtillståndet (SKB SR-Site huvudrapport, figur 5-19). Detta svälltryck motsvarar enligt ovanstående analys en fryspunkt på cirka $-2,5^{\circ}\text{C}$. I vissa delar av förvarsområdet bedömer dock SKB att densitet och svälltryck kommer att vara lägre med följd att återfyllnaden börjar frysa vid en högre temperatur på cirka $-0,8^{\circ}\text{C}$. Dessutom sträcker sig återfyllnaden i ramperna och schakten upp mot markytan, vilket innebär att delar av återfyllnaden kommer att exponeras för lägre temperaturer än de som råder omkring förvarsdjup. Frysning kommer sannolikt att ske i dessa delar. SKB anser dock att

frysning av bentonitleran i delar av återfyllnaden inte utgör något problem i sig eftersom processen har visat sig vara reversibel (SKB TR-10-40).

SKB har även uppskattat med vilken hastighet som islinnsbildning sker i den övre delen av förvaret med återfyllda tunnlar och slutlig förslutning. SKB uppskattar att islinser på högst 10 cm kan förekomma under en kommande glaciationscykel, baserat på etablerad teori för tjällyftning och islinnsbildning (SKB R-07-60). SKB bedömer att islinser med denna tjocklek inte har någon påverkan på återfyllnadens eller den slutliga förslutningens säkerhetsfunktion.

5.7.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning av frysning av bentonitbuffert och återfyllnad är vetenskapligt väl underbyggd och slutsatserna är tillräckligt tillförlitliga i detta steg av SKB:s program. Baserat på SKB:s ovanstående underlag bedömer SSM att bentonitbufferten sannolikt inte kommer att frysa under de första 100 000 åren. SSM anser dock liksom SKB att delar av återfyllnaden och andra förvarsdelar som befinner sig närmare markytan kommer att frysa under en kommande glaciationscykel, vilket dock inte förväntas ha någon avgörande säkerhetsbetydelse eftersom processen har visats vara nära reversibel. Detta innebär att materialet efter tining till stor del återfår sina förutvarande egenskaper i ofruset tillstånd.

SSM anser att SKB:s uppskattning av fryspunkten i bufferten är tillförlitlig och SSM bedömer därför att det är ett rimligt antagande att bentonitbufferten fryser vid -4°C . När det gäller temperaturutvecklingen på förvarsdjup under en kommande glaciationscykel gör SSM bedömningen att det är ett rimligt antagande att -4°C isotermen inte når förvarsdjup under de första 100 000 åren (se avsnitt 5.2 i denna granskningsrapport). SKB:s redovisning för frysning av återfyllnaden följer samma resonemang som för frysning av bufferten. Skillnader mellan de båda materialkategorierna avser endast en förutsägbar inverkan av densitet och svälltryck, och SKB:s redovisning bedöms därför vara rimlig och trovärdig.

SSM anser i likhet med SKB att frysning av återfyllnadsmaterial i ramper, schakt samt den slutliga förslutningen nära markytan inte har några betydande negativa effekter på förvarets funktion dels tack vare att frysningsprocessen är reversibel, dels därför att förväntad islinnsbildning är mycket begränsad. Eftersom SKB har visat att frysningsprocessen är reversibel, anser SSM att även en eventuell hypotetisk frysning av återfyllnaden och förvarets förslutning på förvarsdjup inte kommer att påverka barriärernas säkerhetsfunktioner negativt. Detta gäller sannolikt även för bufferten.

5.8 Kemisk erosion av buffert och återfyllnad

Med benämningen kemisk erosion avses en process där montmorillonitlera spontant förloras från ett deponeringshål till det omgivande grundvattnet i en spricka som skär deponeringshålet. Processen sker endast när montmorillonit kommer i kontakt med ett mycket utspädd grundvatten. Skillnaden mellan kemisk erosion och så kallad kanalbildningserosion är att kemisk erosion är en kolloidkemisk process, medan kanalbildningserosion är en mekanisk process då montmorillonitlera förloras som små partiklar eller pulver till grundvattnet innan buffertens svälltryck och sammanhållning ("cohesion") har fullt utvecklats (avsnitt 4.9 i denna granskningsrapport).

En av buffertens centrala säkerhetsfunktioner är att förhindra advektiv transport av lösta ämnen mellan grundvatten och kopparkapslarna (säkerhetsfunktioner Buffla och b) och därigenom säkerställa att diffusion är den dominerande transportmekanismen (SKB SR-

Site huvudrapport, avsnitt 12.2). För detta krävs att svälltrycket och därmed densiteten är tillräckligt hög. Kravet på en tillräckligt hög densitet är även kopplat till buffertens säkerhetsfunktioner att reducera mikrobiell tillväxt (SKB SR-Site huvudrapport, figur 8-2 och 8-3, Buff2), att förhindra kapselnedsjunkning (Buff5) och att filtrera kolloider (Buff7). Motsvarande krav för återfyllnad är att den ska motverka att bufferten expanderar för mycket uppåt och in i deponeringstunneln. Även för denna säkerhetsfunktion krävs att lermaterialets densitet är tillräcklig (säkerhetsfunktion Bf1). Om kemisk erosion uppstår och fortgår i betydande omfattning kan det leda till att buffertens och/eller återfyllnadens säkerhetsfunktioner inte upprätthålls.

Kemisk erosion till dess att advektion uppnås samt åtföljande snabbare kopparkorrosion har av SKB i SR-Site identifierats som ett av de två scenarier som kan leda till kapselbrott och spridning av radioaktiva ämnen inom en miljon år.

I detta avsnitt granskar SSM SKB:s redovisning kring kemisk erosion av buffert och återfyllnad och efterföljande frigörelse och transport av kolloidpartiklar med grundvattenflödet. Andra geokemiska processer som sker i buffert och återfyllnad under den senare perioden mellan 1 000 till 100 000 år efter slutlig förslutning granskas och bedöms i avsnitt 5.6 i denna granskningsrapport.

5.8.1 Underlag från SKB

SKB sammanfattar redovisningen kring kemisk erosion och frigörelse av kolloider från buffert och återfyllnad i SR-Site huvudrapport (avsnitt 10.3.11). En mer detaljerad redovisning återfinns i processrapporten för buffert och återfyllnad (SKB TR-10-47, avsnitt 3.5.11 och 4.4.7).

På begäran av SSM har SKB tagit fram kompletterande information:

- SKBdoc 1385068. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kemisk erosion av buffert.
- SKBdoc 1385747. BELBaR D4.2. Protocol for rheological measurements within the BELBaR project.
- SKBdoc 1448717. Svar till SSM på begäran om förtydligande om nedträngning av utspädda vatten.
- SKBdoc 1396324. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande osäkerheter i hydrogeologiska beräkningar, med hänvisning till en promemoria som beskriver beräkningen av bufferterrosionstider utifrån hydrogeologiska resultat (SKBdoc 1396325) och till en Excel-fil med beräkningar av bufferterrosionstider (SKBdoc 1396328).

Omfattande forskning med experimentella och teoretiska studier av processen kemisk erosion med efterföljande frigörelse av kolloider har genomförts av SKB i ett särskilt erosionsprojekt som pågick mellan 2006-2008 (SKB TR-09-34, TR-09-35). En fortsättning på detta arbete pågår fortfarande inom ramen för EU-forskningsprojekt BELBaR ("Bentonite Erosion: Effects on the Long term performance of the engineered Barrier and Radionuclide Transport") som SKB samordnar och deltar i.

I det följande ges en sammanfattande redovisning av SKB:s analys och förståelse av mekanismer för bentonitens kemiska erosion. Montmorillonits molekylära struktur består av tre skikt där de individuella montmorillonitflaken kan förekomma som negativt laddade kolloidpartiklar under en pågående erosionsprocess. I kompakterad form förekommer dock bentonit som flak med många lager tätt staplade mot varandra. Eftersom bentonit förhindras att expandera av deponeringshålets väggar leder upptag av vatten till att ett svälltryck utvecklas i bufferten. Expanderande bentonit kan i förekommande fall tränga in



i sprickor runt deponeringshållet. Bentonitmaterial vid fronten i sådan spricka som kommer i kontakt med fritt grundvatten kan med tiden få lägre densitet och en ökad vattenkvot. Beroende på grundvattnets jonstyrka och koncentrationerna av katjoner kan de staplade flaken närmast fronten expandera avsevärt och antingen bilda en gel eller en sol. En sol utgörs av enskilda flak av montmorillonit som kan röra sig fritt i vattnet, medan en gel består av koagulerade och korslänkade flak av montmorillonit. Flaken i en gel kan inte röra sig oberoende på varandra (SKB TR-09-35, kapitel 2; Shaw, 1992, kapitel 1). Individuella flak av montmorillonit i en sol kan dock transporteras direkt av vattenflödet. Även den del av en gel som har uppnått en tillräckligt låg viskositet efter att ha varit i kontakt med utspätt grundvatten kan transporteras bort om vattenflödet är tillräckligt snabbt. Gelen måste då vara så mjuk att flödet kan ge en skjuspänning som är högre än gelens sträckgräns (SKB TR-09-35, avsnitt 3.2). För frigörelsen av enskilda flak av montmorillonit i en sol samt erosion av den mjuka delen av en gel använder SKB benämningen kemisk erosion av bentonit.

SKB:s förståelse av mekanismen utgår från DLVO-teorin (SKB TR-09-35, avsnitt 2.4). Detta är en klassisk teori inom området kolloidvetenskap, som beskriver stabilitet av kolloidpartiklar i lösning samt omvandling mellan gel- och solstatus i ett kolloidsystem, baserat på arbeten av Derjaguin, Landau, Verwey och Overbeck (t.ex. Myers, 1999, avsnitt 10.8.4). Inom ramen för denna teori söks balanspunkten då de repulsiva krafterna och de attraktiva krafterna mellan kolloidpartiklarna är lika stora, vilket benämns CCC ("Critical Coagulation Concentration"). CCC anses vara den koncentration i porvattnet då gränsen mellan gel- och solstabilitet passeras. Den repulsiva kraften är den elektrostatiske interaktionen mellan diffusiva skikt runt de kringliggande negativt laddade flaken. Den attraktiva kraften är en van der Waals kraft som består av tre olika typer; (i) Keesom-kraften mellan permanenta dipoler, (ii) Debye-kraften mellan permanenta och inducerade dipoler, samt (iii) London-kraften mellan inducerade dipoler. London-kraften kallas även dispersionskraft och beskrivs av kvantmekanik.

SKB redogör att för enkla modellsystem som exempelvis laddade sfärer eller långsträckt parallella plana laddade ytor så kan CCC konceptet enkelt definieras inom ramen för DLVO-teorin. Ett CCC-värde kan entydigt bestämmas för system med envärda katjoner som ren natriumrik montmorillonit och sedan användas som en pessimistisk koncentrationsgräns för spontan bildning av sol (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.11). För system med endast tvåvärda motjoner, såsom ren kalciumbentonit (kalciumrik montmorillonit), kan dock inte CCC-konceptet tillämpas i strikt mening. På grund av komplexiteten av ett verkligt bentonit-grundvattensystem, som beskrivs nedan, finns betydande begränsningar för DLVO-teorin vilka medför att också den praktiska betydelsen för att bestämma stabilitet för bentonit i slutförvaret är begränsad.

I fallet med endast tvåvärda motjoner i systemet tillkommer ytterligare en attraktionskraft, vilken har visats vara signifikant både från en teoretisk utgångspunkt (Kjellander m.fl., 1988) och en experimentell (SKB TR-09-34, figur 2-1). Den teoretiska förklaringen utgår från användning av en så kallad anisotropisk HNC-approximation ("HyperNetted Chain") (Kjellander m.fl., 1992; SKB TR-09-35, avsnitt 4.1). De experimentella resultaten visar att bentonit i vilken minst 90 procent av jonbytesplatserna upptas av kalcium inte kan bilda en sol eller ostabil gel och därför inte eroderas. Dessutom har upptag respektive avgivande av protoner på kanten av bentonitflak en betydelse och kanterna har visats bli positivt laddade vid sura till neutrala pH-förhållanden. Interaktionen mellan positivt laddade kanter och negativt laddade ytor av bentonitflaken brukar kallas kant-yta-interaktion ("edge-face-interaction"). Denna typ av interaktion stabiliserar gelförhållanden och förhindrar därmed solbildning från bentonit (SKB TR-09-34, avsnitt 5.4.1). Ett experimentellt bevis för betydelsen av denna interaktion är att bentonit med högre andel av tetraedrisk laddning såsom Kutch-bentonit blir sol vid betydligt lägre saltkoncentration

än bentonit med lägre andel av tetraedrisk laddning såsom Wyoming-bentonit. Bentonit med högre tetraedrisk laddning anses ha en starkare kant-yta-interaktion (SKB TR-09-34, avsnitt 5.4.1; Hetzel och Doner, 1993). Även jonbytesreaktioner kan komplicera tolkningen av stabilitetsgränsen mellan gel och sol. Om porvattnets sammansättning av katjoner initialt inte är i jämvikt med bentoniten kommer jonbytesreaktioner successivt att fortgå som förändrar den ursprungliga fördelningen av katjoner både i porvattnet och på jonbytesplatserna i bentoniten (SKB TR-09-34, kapitel 16). För bentonit som står i kemisk jämvikt med ett grundvatten vars sammansättning är typisk för Forsmark förväntas jonbytespositionerna vara ockuperade av ungefär lika stor mängd kalcium- och natriumjoner (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.11).

Med hänsyn tagen till ovanstående komplexiteter har SKB istället för användningen av ett CCC-värde definierat en teoretisk zon för solstabilitet som bestäms för olika typer av montmorillonit, exempelvis Wyoming och Kutch montmorillonit (SKB TR-09-34, figur 7-3 och 7-4). Erosionsförsök med kompakterade bentonitprover visar att grundvatten vars katjoninnehåll motsvarar en laddningsekvivalent som är större än 2-4 mM kan förhindra förekomsten av solbildning och därför kemisk erosion oberoende av montmorillonittyp (SKB TR-09-34, avsnitt 7.5). Detta gäller dock endast förutsatt att kalciuminnehållet på jonbytesplatser i montmorilloniten är högre än 20 procent. I SR-Site har den övre gränsen på 4 mM valts som en pessimistisk gräns för buffererosion (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.11).

För att kvantifiera erosionshastighet för det fall att grundvattnets innehåll av katjoner underskrider kravet för solstabilitet har SKB definierat ett matematiskt uttryck som kvantifierar hastigheten av kemisk erosion av montmorillonit i en spricka som skär ett deponeringshål. Detta uttryck har baserats på tre kopplade modeller; (i) en dynamisk kraftbalansmodell, (ii) Darcys lag för flöde i sprickan och massöverföringen av katjoner genom advektion och diffusion, samt (iii) en modell av montmorillonitgelens viskositet som en funktion av porvattnets jonstyrka och gelens volymandel (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.11; SKB TR-09-35, avsnitt 7.10; SKB TR-10-64, kapitel 2).

Den dynamiska kraftbalansmodellen beskrivs genom en transportekvation för montmorillonitflaken (SKB TR-09-35, avsnitt 6.11, ekvation 6-57). Uttransport av montmorillonitflak drivs primärt av den vanliga svällningen/expansionen av bufferten. Ekvationen härleds genom balans av följande krafter på de parallellt orienterade montmorillonitflaken; (i) dragkraften eller friktionskraften av flaken i grundvatten, (ii) tyngdkraften, (iii) flytkraften, (iv) gradienten av den kemiska potentialen, (v) den elektrostatiske kraften och van der Waals-kraften (SKB TR-09-35, kapitel 6; Liu m.fl., 2009). De två sistnämnda krafterna behandlas i ekvationen på ett liknande sätt som i den klassiska DLVO-teorin. Den resulterande transportekvationen är en icke-linjär partiell differentialekvation med volymandelen av montmorillonitflak som en funktion av tid och avstånd från deponeringshålet längs med den skärande sprickan.

SKB använder ett uttryck för Darcys lag i sin allmänna form (SKB TR-10-64, avsnitt 2.1), medan viskositet för montmorillonitgel antas vara beroende av porvattnets jonstyrka och volymandelen av montmorillonitflak. En relation mellan viskositet och volymandel av montmorillonitflak har tagits fram genom en empirisk anpassning av experimentella data publicerade i den vetenskapliga litteraturen (SKB TR-09-35, figur 5-4 och 5-5). Materieöverföring av katjoner, främst natrium, beskrivs genom den allmänna formen av Ficks lag i vilken diffusiviteten antas vara beroende av volymandelen av montmorillonitflak (SKB TR-10-64, avsnitt 2.2).

I de kopplade modellerna ger materieöverföring av natriumkatjoner en rumslig och tidsmässig fördelning av natriumhalten i buffertens porvatten, vilken bestämmer den så



kallade Debye-längden (Myers, 1999, avsnitt 5.2.2). Debye-längden påverkar i sin tur kraftbalansen och därmed volymandelen av montmorillonit (SKB TR-10-64, avsnitt 2.2). Den påverkar även grundvattnets viskositet genom att påverka ”ko-volymer” (SKB TR-10-64, avsnitt 2.4), som är det sfäriska utrymme i vilket en smektitpartikel rör sig med Brownska rörelser. Kraftbalansen påverkar grundvattnets viskositet genom att påverka volymandelen av montmorillonit (SKT TR-10-64, avsnitt 2.3 och 2.4). Frigörelse av kolloidpartiklar bestäms i hög grad av Darcy-flödet som är direkt kopplat med grundvattnets viskositet (SKB TR-10-64, avsnitt 2.1). De kopplade modellerna har lösts numeriskt och resultaten visar att en relativt enkel relation kan etableras mellan hastigheten för bentoniterosion, samt sprickans apertur och grundvattenflödes hastigheten (SKB TR-10-64, ekvation 5.1). SKB använder denna relation vid beräkning av buffertens erosionshastighet för fallet exponering för utspädda grundvatten i säkerhetsanalysen SR-Site. Eftersom både grundvattenflödes hastighet och sprickaperturer kan variera inom tämligen vida gränser mellan deponeringshål av olika karaktär så kommer också erosionshastigheterna variera inom slutförvarsområdet.

SKB har utvärderat ovanstående kraftbalansmodell genom jämförelser med resultat från experimentella försök av fri svällning av bentonit baserat på magnetisk resonanstomografi MRI (”Magnetic Resonance Imaging”) (Dvinskikh m.fl., 2009). För natriumdominerande bentonit har en god överensstämmelse mellan modelleringsresultat med experimentella mätningar erhållits (SKB TR-09-35, avsnitt 6-11).

SKB:s grundmodell för bufftererosion förutsätter förenklat att montmorillonit förekommer i en ren natriumform och att buffertens porvatten har utarmats på Ca^{2+} -joner vid gränssytan mellan spricka och buffert. Denna förenkling motiveras med att det är pessimistiskt att kvantifiera omfattningen av erosionsprocessen med hjälp av en natriumbentonit eftersom det är känt att kalciumbentonit har en lägre erosionstakt än natriumbentonit (SKBdoc 1385068). Det behöver dock beaktas att natriumbentonit har gynnsammare svällningsegenskaper vid låga densiteter, vilket medför en högre tolererad massförlust än för kalciumbentonit (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.11). Tolererad massförlust hanteras i säkerhetsanalysen genom ett kriterium för när advektiv transport kan förekomma.

SKB anser att det kan finnas en självdämpande effekt för bufftererosion till följd av att sprickorna som sker deponeringshålen sätts igen av accessoriska mineraler i bentonit med varierande partikelstorlekar och bildar en slags filterkaka (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.11). Denna effekt har dock inte beaktats i samband med säkerhetsanalysen SR-Site, eftersom det saknas starka belägg för att effektiva filter verkligen bildas.

Om massförlust av buffertmaterial på grund av kemisk erosion blir för hög kan ett permanent hålrum eller en permanent region med låg buffertdensitet skapas i deponeringshålet i vilken transport med advektion blir möjlig. Vid advektion så kan transport av upplösta korroderande ämnen från det omgivande grundvattnet till kapselns yta ske betydligt snabbare i jämförelse med om den enda transportmekanismen är diffusion genom en intakt buffert. För fallet när kopparhöljet har fallerat sker också utsläpp av läckande radionuklider snabbare om advektion är möjlig.

Det krävs en tillräckligt hög densitet och ett visst svälltryck hos bufferten för att säkerställa buffertens självläkande förmåga och för att förhindra att kanaler eller andra tomrum kan bildas. För torrdensiteten krävs enligt SKB minst $1\ 000\ \text{kg/m}^3$ och för svälltrycket krävs minst 100 kPa (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.9). SKB har visat att dessa båda krav kan uppfyllas även om två bentonitringar skulle utlämnas helt vid installation av bufferten. Detta fall skulle motsvara en förlust av cirka 2400 kg torrmasa (SKB TR-10-11, figur 6-7). Med tanke på att massförlust vid den kemiska

buffererosionen kan vara mer lokalt förekommande jämfört med det fall i vilket hela två bentonitringar utlämnas vid installationen, så har SKB utgått från en gräns för massförlusten som omfattar två ringar med erosion i cirka halva omkretsen, det vill säga en total erosionsförlust på 1 200 kg. Detta värde innehåller enligt SKB ett visst mått av pessimism eftersom homogenisering i den horisontella riktningen har försumrats (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.9). SKB har också inom ramen för känslighetsanalyser studerat ett fall när advektion kan förekomma vid en massförlust på upp till 2400 kg (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.2). SKB beräknar baserat på erosionshastighet och erforderlig massförlust tiden som det tar för buffert i enskilda deponeringshål att nå advektiva förhållanden. Den resulterande fördelningen av erosionstider används som underlag för kopparkorrosionsberäkningar och analysen av kapselns långsiktiga beständighet.

Efter en begäran från SSM om kompletterande information har SKB tagit fram en utförligare motivering för antagandet av hålrumsgemetri i bufferten efter erosionen (SKBdoc 1385068). SKB anser att den geometriska formen av borteroberat buffertmaterial i ett deponeringshål bestäms, dels av mängden borteroberat material, dels av buffertens förmåga att självlåka. Egenskaperna hos natriumbentonit används vid beräkning av den maximalt tillåtna massförlusten med ett viktigt undantag: den extra svällning som natriumbentonit ger för portal över 1,5 beaktas inte i analysen. Detta innebär att svällning vid högre portal av bentonit antas vara liknande den för kalciumbentonit och materialmodellen är därför pessimistisk trots att den inte är helt konsekvent. SKB anser dock att en fullständig förståelse för erosionsprocessens påverkan på ett eventuellt hålrum i bufferten för närvarande saknas. Befintlig modellering innehåller ingen friktionsterm vilket leder till fallet att medeldensiteten i bufferten gradvis avtar utan hålrumsbildning. Detta fall bedöms dock leda till lägre korrosionshastigheter. SKB påpekar att man också beaktat och räknat på det mycket pessimistiska fallet för hålrumsbildning som innebär att erosionen fortgår till dess att kontakt med kapsel uppstår och därefter upphör erosionen. I detta fall blir den effektiva ytan för korrosionsangreppet mycket begränsad och korrosionshastigheten därför högre.

SKB:s analys av betydelsen av kemisk erosion av återfyllnadsmaterial har baserats på samma modeller som SKB har använt för analys av buffererosion. Vid beräkningarna har dock erosionshastigheten för återfyllnaden antagits vara två gånger snabbare än för bufferten, för att ta hänsyn till den större diametern på gränssytan mellan sprickan och tunneln jämfört med mellan sprickan och deponeringshålet. SKB:s beräkningsresultat visar att för normalfallet är omfattningen av erosion av återfyllnadsmaterial inte tillräcklig för att påverka återfyllnadens säkerhetsfunktioner. Gränsvärdet har beräknats till en förlust om 220 ton för en deponeringstunnel över vilken återfyllnadens funktion att förhindra en ogynnsam expansion av bufferten in i en deponeringstunnel inte kan säkerställas. För det mest pessimistiska fallet att erosionen fortskrider utan avbrott under en hel glaciationscykel uppnås dock advektiva förhållanden i ett fåtal av deponeringshålen (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.11). SKB framhåller dock att antagandet av 100 procents erosionstid är orealistiskt och att kapselkorrosionstiden är flera hundra tusen år och att effekten av erosion av återfyllnad därför kan betraktas som försumbar.

Sammanfattningsvis bestäms förekomst av kemisk buffererosion i SKB:s analys med utgångspunkt från halter för de dominerande katjonerna i det grundvatten som kommer i kontakt med bufferten eller med andra ord den grundvattenkemiska utvecklingen av framförallt salthalt. Erosionen förutsätts starta när katjonernas sammanlagda laddningsekvivalent blir lägre än 4 mM. När väl erosion har påbörjats så beror erosionshastigheten på aperturen hos sprickor som skär ett deponeringshål och grundvattenflödes hastigheten i sprickan, dvs. de lokala hydrogeologiska förhållandena runt deponeringshålen.

5.8.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning kring frågan om buffertens kemiska erosion är ändamålsenlig och att SKB genom en omfattande egen forskning inom bland annat erosionsprojektet har byggt upp en godtagbar teoretisk förståelse kring frågan. SKB:s egen forskning har också på ett bra sätt kunnat kompletteras med internationella erfarenheter inom det pågående EU-projektet BELBaR, vilket bidrar till en bredare kunskapsbas för bedömning av buffererosion. SSM anser att man inom SKB:s säkerhetsanalys SR-Site har tillgodogjort sig utvunnen kunskap i den internationella forskningsfronten och även om vissa osäkerheter kvarstår har dessa kunnat adresseras med konservativa antaganden och alternativa beräkningsfall.

SSM är positiv till att SKB har redovisat en fördjupad förståelse kring flera avancerade forskningsfrågor kring bentoniterosion, såsom (i) att jon-jon-interaktion leder till slutsatsen att ren kalciumbentonit inte eroderas, (ii) att giltighetsområdet för den klassiska DLVO-teorin endast är tillämpbar när porvattens upplösta ämnen är monovalenta, och (iii) att kant-yta-interaktion ("edge-face interaction") leder till koagulering av montmorillonitflaken. Förståelsen av dessa aspekter har bidragit till SSM:s bedömning att de flesta av SKB:s antaganden kopplade till buffererosion är konservativa ur perspektivet långsiktig säkerhet.

SSM anser att det av SKB tillämpade gränsvärdet för förekomst av buffererosion, nämligen att laddningsekvivalenter för lösta katjoner skall vara lägre än 4 mM, har baserats på bra teoretisk motivering och ett flertal experimentella bevis. Det bedöms vara tillräckligt konservativ för tillämpning i säkerhetsanalysen. SSM anser dock att vissa osäkerheter föreligger eftersom gränsvärdet delvis har erhållits från försök med kompakterade bentonitprover och att SKB kan inför kommande steg i sitt program behöva utreda huruvida gränsen påverkas av provernas densitet.

SSM bedömer dessutom att SKB:s beräkningar kring omfattningen av bentoniterosion till stor del bygger på pessimistiska antaganden eftersom man har utgått från ren natriumbentonit som referensmaterial. Erhållna modelleringsresultat anses därför ha gett gränssättande erosionshastigheter. SSM anser dock att SKB behöver ytterligare utreda inverkan av kant-yta-interaktionen på koagulation av bentonitflak samt dess inverkan på sedimentationsegenskaper hos bentonitkolloidpartiklarna. Även kring den gängse uppfattningen att upptag respektive avgivande av protoner på kanten till ett montmorillonitflak sker vid pH-värden runt 6,5 till 7 finns vissa osäkerheter (SKB TR-09-35, avsnitt 5.1; SKB TR-09-34, avsnitt 5.4.1). Dessa pH-värden är dock lägre än vad som förväntas dominera slutförvarsmiljön.

SSM anser att en snabbare sedimentation möjligen kan öka erosionshastigheten i vissa deponeringshål vilka korsas av brant stupande sprickor med betydande apertur (Schatz, 2014). Detta fenomen kan möjligen minska säkerhetsmarginalen i SKB:s redovisning. Även om SKB själva har identifierat problematiken kring en eventuellt förhöjd erosionshastighet i brant stupande sprickor, så argumenterar SKB för att storleken hos de koagulerade partiklarna, vilka har bestämts med utgångspunkt från sedimentationshastigheter vid experimentella försök, är av storleksordningen 100 µm. Partiklar av denna storlek bedöms ha låg erosionsbenägenhet med tanke på att storleken ungefärligen sammanfaller med vanligt förekommande sprickaperturer. SSM instämmer i grova drag med SKB:s resonemang i detta sammanhang, men anser dock att SKB:s förhållningssätt har baserats på resultat från relativt få experimentella försök. De mest representativa försöken har också påverkats av komplexa fenomen som inverkan av slampartiklar och accessoriska mineral. SSM anser att SKB inför kommande steg i sitt program behöver göra ytterligare studier kring denna fråga.



SSM bedömer att SKB har tillhandahållit en godtagbar motivering av kriteriet för en massförlust på 1 200 kg buffertmaterial som leder till advektiva förhållanden i deponeringshålet. Det finns i dagsläget inte tillräckligt kunskap och modelleringsverktyg för framtagande av tillförlitliga förutsägelser kring erosionsgeometrier. SSM instämmer dock med SKB att den av SKB antagna erosionsgeometrin innehåller konservativa inslag och att den sannolikt ger ett pessimistiskt utfall vid beräkning av tiden för när advektiva förhållanden uppstår i bufferten (SKBdoc 1385068). SKB har dessutom med alternativa beräkningsfall undersökt betydelsen av ett halverat kriterium och betydelsen av pessimistiska erosionsgeometrier. SKB:s befintliga numeriska modellering av homogeniseringsprocesser innehåller vissa brister, men bedöms av SSM som acceptabel för detta steg i SKB:s program (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.9). SSM anser dock att det inför kommande steg i SKB:s program behövs kompletterande analyser av tänkbara erosionsgeometrier som involverar en konsekvent tillämpning av buffertens materialegenskaper. SSM instämmer med SSM:s externa expert att erosionsgeometrin hade kunnat underbyggas genom konkreta insatser inom modellering med finita elementmetoden (FEM) eller experimentella försök (SSM Technical Note 2015:08). SSM är positiv till att SKB prioriterar frågan om erosionsgeometrin i framtida forskningsprogram kring buffererosion.

SSM är positiv till att SKB har planerat att vidare undersöka reologiska egenskaper hos bentonit med mycket låg densitet (SKBdoc 1385747). SSM instämmer med SSM:s externa expert att SKB behöver studera de reologiska egenskaperna hos bentonit vid en hög vattenkvot/portal, det vill säga vid ett högt massförhållande mellan vatten och fastfasmaterial (SSM Technical Note 2015:08). Ett stort antal experimentella försök har rapporterats i litteraturen men hittills har ingen modell presenterats som kan omfatta hela skalan av experimentella observationer. SKB behöver eftersträva att ta fram en sådan modell för att öka tillämplighet och tillförlitlighet för den experimentellt anpassade relationen mellan montmorillonitgelens viskositet av och volymandelen av montmorillonitflak. Utfallet av ett sådant arbete har betydelse för analysen av svällning och eventuell erosion för bentonit med mycket låg densitet som har trängt ut i sprickorna i berget.

SSM noterar att det finns en skillnad på cirka en faktor tio mellan de redovisade resultaten i figur 9-6 i SKB TR-09-35 och i andra figurer och tabeller (tabell 9-2 i SKB TR-09-35; tabell 5-1 och figur 5-3 i SKB TR-10-64). SSM:s externa experters beräkningar tyder på att den lägre erosionshastighet som visas i figur 9-6 i SKB TR-09-35 verkar mer rimlig (SSM Technical Note 2015:49). SSM kan konstatera att SKB i säkerhetsredovisningen har använt den högre erosionshastigheten som visas i tabell 9-2 i SKB TR-09-35; tabell 5-1 och figur 5-3 i SKB TR-10-64 och därför bedömer SSM att redovisningen är konservativ. SSM anser att SKB behöver se över vilket samband som bör användas i kommande steg av sitt program.

SKB:s beräkningar kring fördelningen av buffererosionshastigheter för olika deponeringshål är kopplade till analysen av Forsmarksplatsens hydrologiska och grundvattenkemiska utveckling. SSM kommenterar frågor kring hydrogeologi i avsnitt 5.4 i denna granskningsrapport och frågor kring grundvattenkemisk utveckling i avsnitt 5.5.

Beträffande processen av kemisk erosion av återfyllnadsmaterial instämmer SSM med SKB att omfattningen av erosion av återfyllnadsmaterial inte är tillräcklig stor för att påverka återfyllnadens säkerhetsfunktioner. Bedömningen baserar sig på att mängden av material i återfyllnaden är betydligt större i förhållande till mängden av material som möjligen kan eroderas bort.

5.9 Mekanisk deformation av kopparkapseln utsatt för isostatisk last

I SKB:s säkerhetsanalys SR-Site förutsätts att kapselns integritet efter slutlig förslutning av slutförvaret inte äventyras på grund av isostatiska laster som orsakas av buffertens svälltryck och det omgivande hydrostatiska vattentrycket på ungefär 500 m djup. Det innebär att det behöver finnas tillräckliga marginaler mot att:

- kapseln havererar på grund av plastisk kollaps av den gjutna insatsen
- kapselinsatsen spricker sönder på grund av spricktillväxt från oupptäckta defekter på ett sådant sätt att dess bärförmåga går förlorad
- kopparkapseln brister på grund av för stora töjningar.

Det högsta hydrostatiska trycket som kan uppstå på förvarsdjupet sammanfaller med tidpunkten för framtida glaciationer. Ett förhöjt hydrostatiskt tryck från grundvatten och isens tryck samt det ytterligare tillägget från buffertens svälltryck ger en isostatisk last på kapseln som SKB anger till maximalt 45 MPa. En grund för formulering av detta gränsvärde är uppskattningen av vad som kan betraktas som den största möjliga tjockleken av en inlandsis ovanför Forsmark. SKB har formulerat detta krav som en konstruktionsförutsättning enligt (SKB TR-09-22):

- ”Kapseln ska tåla en isostatisk last på 45 MPa som utgör summan av det maximala svälltrycket och maximalt grundvattentryck.”

5.9.1 Tålighet mot plastisk kollaps

Tålighet mot plastisk kollaps innebär att kapseln ska kunna tåla en isostatisk last under en glaciation inklusive de svälltryckslastfall som kan uppstå då bentoniten sväller, utan att kapseln havererar på grund av plastisk kollaps.

5.9.1.1 Underlag från SKB

SKB definierar i säkerhetsanalysen SR-Site isostatlastfallet (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.7) och som i sin tur hänvisar vidare analyser av kopparkapselns design (SKB TR-10-28) respektive framtagning av acceptanskriterier respektive skadetålighetsanalys för insatsen (SKB R-10-11). SKB har bedömt istjockleken till maximalt 3 400 m vilket tillsammans med hydrostatiskt tryck från grundvattnet samt svälltrycket från bufferten ger en maximal isostatisk last på 45 MPa.

SKB har genomfört elastiskt-plastiska spänningsanalyser med finita element-programmet ANSYS för den cylindriska delen av insatsen både för BWR- och PWR-kapseln (SKB R-10-11). För designtrycket 45 MPa erhålls endast elastiska spänningar. SKB har även analyserat hypotetiska fall med högre tryck och resultatet för den nominella BWR-geometrin är att kapseln kollapsar globalt vid ett tryck på 99 MPa. Motsvarande resultat för den nominella PWR-geometrin är ett kollapstryck på 128 MPa. Global kollaps innebär att kapseln erhåller stora synliga deformationer och att bärförmågan för insatsen förloras helt. SKB har för bestämning av kollapslasten använt sig av en metodik som går ut på att visa att den dimensionerande lasten på 45 MPa inte överskrider 2/3 av kollapslasten där denna bestäms då avvikelser från en rät linje i last-förskjutningskurvan är tillräckligt stor (SKB R-10-11). Detta sätt att bestämma kollapslasten beskrivs av det amerikanska ingenjörssällskapet ASME (ASME III, Div. 1, avsnitt NB-3228.3 med detaljer i ASME III, Appendix II, avsnitt 1430 samt även i ASME VIII, Div. 2, avsnitt 4-136.5). ASME III gäller för tillämpningar i kärntekniska anläggningar medan ASME VIII gäller för tryckkärl i icke-nukleära sammanhang.

Analyserna i (SKB R-10-11) har baserats på en två-dimensionell finita elementanalys. På SSM:s begäran om komplettering har SKB genomfört elastiskt-plastiska spänningsanalyser baserade på en tre-dimensionell finita elementanalys samt även vissa tillhörande känslighetsanalyser (SKBdoc 1454226). Resultatet för den nominella BWR-



geometrin är att kapseln når globalt kollapstryck vid 97 MPa. Motsvarande resultat för den nominella PWR-geometrin är ett kollapstryck på 116 MPa. För en stelkroppsförflyttning av kanälrören på 10 mm, vilket motsvarar vad som tillåts i tillverknings toleranserna, blir kollapslasten för BWR-kapseln 98 MPa. En känslighetsanalys med avseende på inverkan av en lägre sträckgräns på 240 MPa i jämförelse med den nominella sträckgränsen 270 MPa resulterade i en kollapslast på 88 MPa för BWR-kapseln.

SKB har även genomfört en kollapsanalys av bottenregionen av insatsen med finita element-programmet ANSYS. Resultaten pekar på en kollapslast på 99 MPa och 84 MPa för BWR- respektive PWR-kapseln (SKBdoc 1207429). En motsvarande kollapsanalys har även genomförts för stållocket som är fastskruvad i den cylindriska insatsen (SKBdoc 1177857). Dessa analyser pekar på en kollapslast på mer än 100 MPa och mer än 162 MPa för BWR- respektive PWR-kapseln.

SKB har genomfört känslighetsanalyser med avseende på betydelse av olika kaviteter i insatsen (SKB R-10-11, SKBdoc 1454226). Tabell 5.9.1 nedan sammanfattar dessa känslighetsanalyser som har baserats på både två-dimensionella (2D) och tre-dimensionella (3D) finita element beräkningar. Analyserna har genomförts med syftet att ta reda på kollapstryck för olika fall med ändringar i geometri och materialdata. SKB har i synnerhet studerat stållocket och bottenregionen av insatsen.



Tabell 5.9.1, Sammanställning av SKB:s känslighetsanalyser för kollapstryck

Fall	Kollapstryck	Kommentar	Referens
Referensfall, kapsel, cylindrisk del	99 MPa, BWR 128 MPa, PWR	Nominell sträckgräns, $R_{p0,2} = 270$ MPa	R-10-11 (2D-analys)
Referensfall, kapsel, cylindrisk del	97 MPa, BWR 116 MPa, PWR	Nominell sträckgräns, $R_{p0,2} = 270$ MPa	SKBdoc 1454226 (3D-analys)
Bottenregion av insatsen	99 MPa, BWR 84 MPa, PWR		SKBdoc 1207429 (3D-analys)
Stållock till insatsen	>100 MPa, BWR 162 MPa, PWR		SKBdoc 1177857 (3D-analys)
10 mm stelkroppsförflyttning av kanalrör i BWR-insats	98 MPa, BWR		SKBdoc 1454226 (3D-analys)
BWR-insats, $R_{p0,2} = 240$ MPa Känslighetsanalys, lägre sträckgräns	88 MPa, BWR		SKBdoc 1454226 (3D-analys)
BWR-insats, kavitet R = 20 mm, Håltyp 12	68 MPa, BWR		R-10-11 (2D-analys)
BWR-insats, kavitet R = 20 mm, höjd = 50 mm	102 MPa, BWR		SKBdoc 1454226 (3D-analys)
PWR-insats, kavitet R = 40 mm, Håltyp 7	71 MPa, PWR		R-10-11 (2D-analys)
PWR-insats, kavitet R = 40 mm, höjd = 50 mm	111 MPa, PWR		SKBdoc 1454226 (3D-analys)

SKB har tidigare ett genomfört en tryckprovning av två testkapslar i nära fullskala med ett tvärsnitt som efterliknar de nuvarande BWR-kapslarna (SKB TR-05-18). Testkapslarna hade den korrekta diametern, men längden var reducerad till 700 mm vilket kan jämföras med 4 835 mm för verkliga BWR-kapslar. Vid tryckprovningen noterades för den ena testkapseln en global kollaps med stora deformationer vid ett tryck på 139 MPa. För den andra testkapseln stoppades tryckprovningen vid 130 MPa utan att den strukturella integriteten hade gått förlorad. Parallellt med tryckprovningen genomfördes finita elementanalyser som visade en relativt god överensstämmelse med resultaten från provtryckningen. Analyserna förutsåg att global plastisk kollaps skulle inträffa vid 130 MPa.

För kopparhöljet med cylinder och fastsvetsat lock har SKB beskrivit analyser (SKB TR-10-34) som visar på att töjningarna når maximalt 16 procent vid ett yttre tryck på 45 MPa. De högsta värdena erhålls lokalt där kopparlocket är svetsat till flänsen. I övrigt redovisas endast små töjningar i kopparhöljet. För att tillförsäkra tillräcklig säkerhet mot plastisk kollaps av kopparhöljet anger SKB att brottförlängningen inte får överskrida 40 procent (SKBdoc 1471283), vilket även är i överensstämmelse med uppgifter i (SKB TR-10-14).



5.9.1.2 SSM:s bedömning

SSM har bedömt SKB:s underlag för tålighet mot plastisk kollaps vid en isostatisk last i följande avseenden:

- värdering av SKB:s hållfasthetskriterier för tålighet mot plastisk kollaps
- värdering av SKB:s hållfasthetsanalyser för yttre tryck inklusive de känslighetsanalyser och kompletterande analyser som SKB utfört samt kvarstående osäkerheter
- bedömning om det finns förutsättningar för att kapslarna har tillräcklig tålighet mot plastisk kollaps inklusive tålighet mot stora deformationer av kopparhöljet vid en isostatisk last.

Med plastisk kollaps avser SSM global plastisk kollaps med stora synliga deformationer av kapseln och att dess bärförmåga går förlorad. Innan global plastisk kollaps kan lokal genomplastisering erhållas av vissa ligament i segjärnsinsatsen vilket innebär att flytleder bildas och detta tillstånd brukar kallas lokal kollaps. Det betyder dock inte att bärförmågan förloras, utan snarare att spänningarna omfördelas till andra delar av skalkonstruktionen under en ökande yttre last. För att global kollaps ska inträffa i en skalkonstruktion krävs i allmänhet att flera flytleder bildas under en ökande last. Till slut kan inte konstruktionen hålla emot den yttre lasten, bärförmågan förloras och global kollaps inträffar. SSM bedömer att det är global kollaps som är mest relevant i detta sammanhang eftersom det är först då som kapseln riskerar att helt förlora sin isolerande förmåga.

SSM gör bedömningen att SKB:s metod att bestämma kollapslasten vid en isostatisk last är att betrakta som en rimlig ingenjörsmässig metodik. Det är också som rimligt att i detta fall använda en säkerhetsfaktor 1,5 mot plastisk kollaps (ASME III, Div. 1, NB-3228.3). Vissa svagheter i SKB:s designfilosofi är emellertid att:

- Det inte är självklart att det aktuella segjärns materialet uppfyller ASME:s generella krav så som seghetskrav och krav på oförstörande provning (ASME III, Div. 1, NB-3200 eller ASME VIII, Div. 2) vilka erfordras för att få använda detta sätt att bestämma kollapslasten. SSM gör dock bedömningen att SKB:s sätt att bestämma kollapslasten vid en isostatisk last utgör en rimlig ingenjörsmässig metodik.
- SKB:s metod att genom elastisk-plastiska finita elementanalyser bestämma kollapslasten innebär att materialets plastiska egenskaper utnyttjas relativt hårt. Detta kan vara problematiskt eftersom det saknas liknande erfarenheter från andra industriella tillämpningar för det aktuella segjärns materialet. Dock noterar SSM att vid konstruktionstrycket 45 MPa erhålls i huvudsak linjär-elastiska förhållanden i kapseln. Det innebär att de plastiska egenskaperna inte behöver beaktas vid detta tryck och för detta lastfall är segjärnets angivna brottöjning inte avgörande för SSM:s bedömning.

SSM bedömer att SKB:s hållfasthetsanalyser med avseende på yttre tryck i huvudsak är genomförda på ett korrekt sätt enligt goda ingenjörsmässiga principer. Det använda finita elementprogrammet ANSYS är ett väl beprövat dataprogram för strukturmekaniska analyser. I bedömningen av SKB:s analyser av isostatlastfallet för kopparhöljet jämförs den plastiska töjningens storlek och fördelning med kopparmaterialets brottöjning. Från resultaten av de genomförda känslighetsanalyserna i tabell 5.9.1 noterar SSM att i alla genomförda analyser erhålls minst en säkerhetsfaktor 1,5 för designtrycket gentemot kollapstrycket. Detta kan också uttryckas som att insatserna i både BWR- och PWR-kapseln tål relativt stora kaviteter och avvikelser i kanalrörens placering utan att säkerhetsfaktorn understiger 1,5 för konstruktionstrycket 45 MPa. Enligt SSM:s bedömning är de tredimensionella analyserna mest tillförlitliga (tabell 5.9.1).



I kopparhöljet erhålls töjningar på maximalt 16 procent vid konstruktionstrycket 45 MPa. De största töjningarna uppstår där kopparlocket är svetsat mot kopparflänsen och är mycket lokalt utbredda. SSM bedömer att dessa lokala töjningar inte utgör något hot mot integriteten för kopparhöljet under en isostatisk last eftersom de med marginal understiger kopparhöljets brotttöjning som ska vara minst 40 procent.

SKB har uppskattat en förväntad istjocklek under en framtida glaciation över Forsmark till maximalt 3 400-3 500 m. SSM anser att det för närvarande är rimligt att förutsätta att en framtida inlandsis inte blir tjockare än 3 500 m i Forsmarksområdet och att ett mer sannolikt maximalt värde är cirka 2 900 m (avsnitt 5.2 i denna granskningsrapport).

SSM bedömer sammanfattningsvis att kapslarna, insats och kopparhölje inklusive lock och botten för både BWR och PWR, har tillräcklig integritet mot plastisk kollaps inklusive tålighet mot stora deformationer av kopparhöljet vid konstruktionstrycket 45 MPa. De känslighetsanalyser och kompletterande analyser som utförts visar även att det fortfarande finns förhållandevis goda marginaler mot plastisk kollaps. Det faktum att realistiska tryckprov har genomförts i nära fullskala och att dessa givit god överensstämmelse med numeriska analyser ger även ökad tilltro till denna bedömning. Om istjockleken närmar sig mycket extrema värden upp emot 4,5 km samtidigt som det finns stora tillverkningsfel i kapslarna, erhålls dock betydligt mindre marginaler. SSM anser dock att detta fall utgör en osannolik kombination.

5.9.2 Skadetålighet

En analys av skadetåligheten innebär att man hypotetiskt förutsätter förekomst av vissa sprickor i olika positioner av kapseln och därefter bestämmer de acceptabla sprickstorlekarna. SKB anger att dessa värden ska ligga till grund för hur stora defekter som SKB behöver detektera i kapseln med oförstörande provning (OFP) vid tillverkningen. SKB postulerar sprickor i ett plan vinkelrätt mot de största dragspänningarna. Kompressiva spänningar kan inte öppna sprickor och anses därför inte utgöra något hot mot kapselns brottmekaniska integritet.

SKB har inte genomfört skadetålighetsanalyser för kopparhöljet som antas vara så segt att eventuella sprickor inte har någon brottmekanisk påverkan för den strukturella integriteten.

5.9.2.1 Underlag från SKB

SKB sammanfattar resultaten för skadetålighetsanalyserna för en isostatisk last i kopparkapselns designanalysrapport (SKB TR-10-28) baserad på detaljerade beräkningar redovisade i (SKB R-10-11).

SKB:s arbetsgång för bestämning av acceptabla sprickstorlekar i segjärnsinsatsen för en isostatisk last består av följande steg:

- Bestäm förekommande spänningar i kapseln vid ett yttre tryck på 45 MPa genom finita elementanalyser av en modell av kapseln.
- Postulera defekter vinkelrätt mot de största dragspänningarna. SKB använder ytsprickor med halvelliptisk form och ett djup-längd förhållande 1:6.
- Bestäm de minsta accepterbara sprickstorlekarna genom att använda den brittiska brottmekaniska proceduren R6-metoden (Milne m.fl., 1988). Denna metod bygger på en interpolation mellan haverimekanismerna sprött brott och plastisk kollaps.

I detta sammanhang har SKB använt sig av materialets brottseghet K_{Ic} . Denna divideras med säkerhetsfaktorn $\sqrt{10}$. Denna säkerhetsfaktor har specificerats i den amerikanska tryckkärlsstandarden för normala lasthändelser (ASME XI, IWB-3600), dvs. för laster



som anses vara frekvent förekommande, till skillnad från laster med en mycket låg årlig sannolikhet som exempelvis jordskalvsfallet. För de brottmekaniska analyserna med R6-metoden har SKB använt sig av en brottmekanisk handbok (Dillström m.fl., 2008) med tillhörande datorkod Pro-SACC.

SKB har redovisat brottmekaniska analyser för segjärnsinsatsen för en isostatisk last på 45 MPa och postulerat axiellt orienterade ytsprickor i ett stort antal positioner i högt påkända tvärsnitt av både BWR- och PWR-kapseln (SKB R-10-11). En brottseghet på $79,4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ har använts i dessa analyser, vilken härrör från brottmekaniska prov med BWR-kapslar.

För BWR-kapseln kan stora sprickstorlekar accepteras framförallt beroende på att man väsentligen erhåller kompressiva spänningar vid ett yttre tryck. En plan spricka har två riktningar, spricklängd och sprickdjup. I det följande avses med spricklängd en axiell riktning och med sprickdjup avses en riktning i ett tvärsnitt vinkelrätt mot kapselns längdriktning. De acceptabla sprickdjupen varierar mellan 32 mm och 65 mm utgående från ett perifert beläget kanälrör närmast ytterytan. Motsvarande acceptabla sprickdjup för en axiell ytspricka mellan två kanälrör är 24 mm. Den acceptabla spricklängden i axiell riktning erhålls genom att multiplicera de acceptabla sprickdjupen med en faktor 6 (eftersom SKB förutsatt ett djup-längd förhållande för defekterna på 1:6). För en PWR-kapsel erhålls motsvarande acceptabla sprickdjup varierande mellan 31 mm och 112 mm utgående från ett kanälrör vid ytterytan och 104 mm för en axiell ytspricka mellan två kanälrör.

Som ett led i SKB:s kompletteringar har vissa ytterligare brottmekaniska analyser genomförts för en isostatisk last. SKB har genomfört följande ytterligare analyser:

- analys av segjärnsinsatsen för PWR med materialdata bestämd från PWR (SKBdoc 1288288)
- analys av inverkan av restspänning efter gjutningen (SKBdoc 1416697)
- analys av skadetåligheten för bottenplattan av segjärn med ingjutna ståldetaljer (SKBdoc 1207429).

SKB har redovisat en skadetålighetsanalys för segjärnsinsatsen för PWR med brottseghetsdata bestämd från PWR-provstavar (SKBdoc 1288288). Resultat från J_{Ic} -provning med 6 giltiga prov kunde översättas till en brottseghet på $K_{Ic} = 70,6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ vid $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Detta värde användes i analyserna och befanns svara mot ett undre gränsvärde för medelvärdet med 90 % konfidensgrad. SKB har funnit att detta lägre värde på brottsegheten inte påverkar de acceptabla sprickstorlekarna för PWR-kapseln, jämfört med de som bestämdes i (SKB R-10-11). K_{Ic} och J_{Ic} är två materialparametrar som används inom brottmekaniken som ett mått på materials förmåga att motstå spricktillväxt och brott utgående ifrån sprickor. K_{Ic} används inom linjär brottmekanik med tillämpning på spröda brott, och J_{Ic} används inom icke-linjär brottmekanik med tillämpning på sega brott.

SKB har också redovisat kompletterande skadetålighetsanalyser för både BWR- och PWR-kapseln med hänsyn tagen till uppmätta restspänningar efter gjutningen (SKBdoc 1416697). I många fall var restspänningarna kompressiva. I ett fåtal fall uppmättes dock positiva restspänningar i omkretsled, maximalt av storleksordningen 60 MPa för BWR-kapseln och 90 MPa i PWR-kapseln. I de kompletterande skadetålighetsanalyserna har SKB adderat dessa positiva dragspänningar till de spänningar som har erhållits från den isostatiska lasten. Resultaten pekar på att egenspänningarna inte påverkar de acceptabla sprickstorlekarna för vare sig BWR- eller PWR-kapseln, i jämförelse med sprickstorlekar från tidigare analyser (SKB R-10-11). Detta beror i huvudsak på att den isostatiska lasten vid en glaciation ger stora tryckspänningar.



SKB har redovisat en skadetålighetsanalys av bottenplattan som tillverkas av segjärn och som utgör en integrerad del av insatsen (SKBdoc 1207429). I denna analys postuleras en halvelliptisk ytspricka med ett djup-längd förhållande på 1:6 vinkelrätt mot de största spänningarna vid en isostatisk last på 45 MPa. Brottsegheten har satts till $K_{Ic} = 78 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Resultaten visar att väsentligen endast tryckspänningar erhålls i bottenplattan och att de acceptabla sprickdjupen blir stora, minst 80 % av bottenplattans tjocklek.

5.9.2.2 SSM:s bedömning

SSM har bedömt SKB:s underlag för skadetålighet vid en isostatisk last i följande avseenden:

- värdering av SKB:s hållfasthetskriterier för bestämning av acceptabla sprickstorlekar
- värdering av SKB:s brottmekaniska analyser för en isostatisk last inklusive ingångsdata, känslighetsanalyser och kompletterande analyser
- bedömning om det finns förutsättningar för tillräcklig skadetålighet vid isostatisk last.

SSM bedömer att R6-metoden är en väl beprövad procedur för brottmekaniska analyser och som vanligen ger konservativa resultat jämfört med mer rigorösa analyser som t.ex. baserar sig på J-integralen. SSM bedömer även att den använda säkerhetsfaktorn $\sqrt{10}$ för brottsegheten K_{Ic} är rimlig för tillämpningen i isostatlastfallet. Detta förväntas vara det dominerande lastfallet för förhållanden i deponeringshål under långa tider under kommande glaciationscykel.

För de flesta brottmekaniska beräkningarna har SKB antagit halvelliptiska axiella defekter vinkelrätt mot de största spänningarna med ett minsta djup-längd förhållande för defekterna på 1:6. SSM anser att detta är ett rimligt konservativt antagande då inga speciella förhållanden råder som gör att man skulle behöva förutsätta att defekterna kan bli ännu mer långsträckta.

SKB har i sina analyser använt en brottseghet på $79,4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, vilken härrör från brottmekaniska prov från BWR-kapslar (SKB R-10-11). Samma brottseghet har använts för utvärdering av skadetåligheten i PWR-kapslar (SKB R-10-11). Denna brottseghet är dock något högre än vad som använts i SKBdoc 1288288 där brottseghetsdata har bestämts från PWR-provstavar. Denna skillnad bedömer dock SSM vara av mindre betydelse. Anledningen är att man väsentligen erhåller tryckspänningar i de snitt där defekter postuleras (SKB R-10-11, Appendix B). Det är endast i ett litet område nära kanalrören som man får mindre dragspänningar, men dessa är inte avgörande för skadetåligheten. Tryckspänningar förmår dock inte öppna en spricka och sådana tvärsnitt tål därför vanligen stora sprickor. Den acceptabla sprickstorleken för isostatisk last kommer därför inte att begränsas av brottsegheten utan den bestäms snarare av giltigheten av de KI-lösningar som ansatts för den aktuella sprickgeometrin, vilken utgör maximalt 80 procent av tvärsnittets tjocklek.

SKB har inte genomfört skadetålighetsanalyser för kopparhöljet som antas vara så segt att eventuella sprickor inte har någon brottmekanisk påverkan på den strukturella integriteten. SSM instämmer i denna bedömning. Stöd för denna bedömning anser SSM finns i SKBdoc 1187725, där SKB rapporterar utförd brottmekanisk provning av kopparmaterialet med hjälp av provstavar med en tjocklek på 45 mm. Provningsresultatet visade att den förutväntade sprickan vid pålastning trubbades av under stor plastisk deformation. Någon egentlig spricktillväxt erhöles inte vid provningen. Detta är karaktäristiskt för mycket sega material där brottmekanismen styrs av plastisk kollaps snarare än spricktillväxt. En granskning av risken för krypbrott i kopparhöljet redovisas i avsnitt 4.10.5 i denna granskningsrapport.



För segjärnsinsatsen bedömer SSM att skadetåligheten får anses som god i de tvärsnitt som SKB ansatt defekter för både BWR- och PWR-kapslar. Att tvärsnitten tål så stora defekter beror på att segjärnsinsatsen främst erhåller tryckspänningar vid isostatisk last. Det gör att de acceptabla sprickstorlekarna blir i det närmaste oberoende av segjärnets brottseghet utom vid vissa områden, bl.a. nära kanälrören och där redovisar SKB något lägre acceptabla sprickstorlekar

SSM bedömer att de nya känslighetsanalyser och kompletterande analyser som utförts med mer specifika materialdata för PWR och som dessutom beaktar restspänningar efter gjutningen fortfarande visar att de acceptabla sprickstorlekarna är stora. Denna slutsats gäller även SKB:s skadetålighetsanalys av bottenplattan.

Beträffande risken för utmattning anser SKB att detta inte behöver utvärderas eftersom lasterna är statiska och inte cykliska till sin natur (SKB TR-10-28, avsnitt 8.2). SSM anser dock att det kan finnas skäl att undersöka risken för utmattning, dels på grund av att kapseln förväntas uppfylla täthetskravet under flera glaciationscykler, men framförallt därför att istjockleken kan variera under en och samma glaciation vilket ger upphov till vissa cykliska påkänningar. SSM bedömer att SKB i kommande steg i sitt program mer utförligt behöver analysera inverkan av cykliska påkänningar till följd av variation av istjockleken under en glaciation samt till följd av upprepade glaciationscykler. SSM:s preliminära bedömning är dock att frågan torde ha en liten betydelse eftersom det sannolikt skulle behövas ett mycket stort antal belastningscykler för att ge någon nämnvärd utmattningstillväxt utgående från en oupptäckt spricka i insatsen.

Även om skadetåligheten får anses som relativt god anser SSM att SKB behöver visa, via en kvalificeringsprocess, på tillgång till oförstörande provning (OFP) vid tillverkningen som förmår att detektera, karaktärisera och storleksbestämma de defektstorlekar som är framtagna i samband med skadetålighetsanalyserna.

SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s skadetålighetsanalyser med avseende på isostatisk last är i huvudsak genomförda på ett korrekt sätt enligt goda ingenjörsmässiga principer. De stora acceptabla defektstorlekar som erhålls är ett resultat av att isostatlastfallet ger väsentliga tryckspänningar i de allra flesta delar av segjärnsinsatsen, både för BWR- och för PWR-insatsen.

5.10 Mekanisk deformation av kopparkapseln utsatt för skjuvlast

I SKB:s säkerhetsanalys SR-Site förutsätts att kapseln konstrueras så att den i allmänhet kan stå emot skjuvlaster som uppstår till följd av begränsade skjuvrörelser till följd av jordskalv i slutförvarets närhet. SKB utesluter dock inte att kapselhaverier kan förekomma i samband med stora jordskalv vid förhållandevis stora skjuvningsbelopp i vissa utsatta positioner i slutförvaret, vilket också beaktas i riskberäkningar i SR-Site. I detta avsnitt granskas SKB:s analys av kapslarnas tålighet mot skjuvlaster i perspektiv av att det ska finnas marginaler mot sådana mekanismer som kan orsaka att kopparkapseln brister. Det innebär att det ska finnas tillräckliga marginaler mot att

- kapseln havererar på grund av plastisk kollaps av den gjutna insatsen
- kapselinsatsen spricker sönder på grund av spricktillväxt från oupptäckta defekter på ett sådant sätt att dess bärförmåga går förlorad
- kopparkapseln brister på grund av för stora töjningar

SKB har för att uppfylla kravet på tillräcklig tålighet definierat en konstruktionsförutsättning för kopparkapseln kopplat till skjuvlaster (SKB TR-09-22):



- ”Kopparhöljet ska förbli intakt efter en skjuvning på 5 cm, med en skjuvhastighet på 1 m/s, med en buffertdensitet på 2 050 kg/m³ (kalciumbentonit), för alla områden och angreppsvinklar av skjuvbrottet i deponeringshålet och ned till temperaturer på 0 °C. Insatsen ska behålla sin tryckbärande förmåga efter en isostatisk last.”

Valet av skjuvningens maximala storlek 5 cm är en anpassning mot främst vilka defektstorlekar i insatsen som behöver kunna detekteras och storleksbestämmas vid tillverkningskontrollen för att säkerställa kapselns långsiktiga integritet. Desto mindre skjuvbelopp som kapslarna anses tåla desto lägre påkänningar och större defekter tål kapslarna och därmed blir det lättare att detektera dessa defekter. Å andra sidan innebär en mindre maximal skjuvning också att sannolikheten ökar för att fler kapslar kommer att utsättas för en skadlig skjuvlast.

5.10.1 Tålighet mot plastisk kollaps

Tålighet mot plastisk kollaps innebär att kapseln ska kunna tåla en skjuvlast utan att kapseln havererar på grund av global plastisk kollaps.

5.10.1.1 Underlag från SKB

SKB sammanfattar resultaten från analyser av risken för plastisk kollaps i SR-Site (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.5) baserade på detaljerade analyser av kapselns påverkan vid skjuvlast (SKB TR-10-34).

SKB har i redovisat elastiskt-plastiska spänningsanalyser med finita elementprogrammet Abaqus för följande fall (SKB TR-10-34):

- skjuvning vinkelrätt mot kapselns axel vid en höjd från botten på 50 % och 75 % av kapselns längd
- skjuvning vid en vinkel 22,5 grader mot kapselns axel vid en höjd från botten på 50 % och 75 % av kapselns längd
- skjuvning vid en vinkel 0 grader mot kapselns axel vid halva kapselns diameter samt vid en fjärdedel av kapselns diameter

För varje skjuvvinkel har SKB i regel genomfört analyser för både 5 och 10 cm skjuvning samt för bentonitdensiteter på 1 950, 2 000 och 2 050 kg/m³. Största påkänningar erhålls vid den högsta bentonitdensiteten på 2 050 kg/m³. De flesta av SKB:s analyser avser BWR-kapseln (SKB TR-10-34). PWR-kapseln har dock analyserats för fallet skjuvning vinkelrätt mot kapselns axel vid en höjd från botten på 75 procent av kapselns längd.

SKB:s beräkningar visar att BWR kapseln erhåller en maximal plastisk töjning i kopparhöljet på 21 % vid en skjuvning på 5 cm och vid bentonitdensiteten 2 050 kg/m³. Den är dock mycket lokal och uppstår endast vid hörnen där kopparhöljet möter insatsens lock och botten. I övrigt erhålls endast plastiska töjningar på ett par procent i kopparmaterialet. För insatsen erhålls för motsvarande fall en maximal plastisk töjning på 0,5 %. Den maximala töjning är här lokaliserad till hörnregionen där ett kanälrör har litet kantavstånd till insatsens periferi och på motsatt sida om kapseln i förhållande till skjuvlastens angreppspunkt. För PWR-kapseln har SKB erhållit likartade maximala plastiska töjningar för kopparhölje och insats.

På SSM:s begäran har SKB tagit fram kompletterande och förtydligande information om ett antal frågor. Det gäller följande punkter:

- Svar på SSM:s begäran om komplettering om inverkan av kanälrörens koppling till insatsen samt excentriskt placerade kanälrör (SKBdoc 1415152).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering om skjuvning invid botten och toppen av kapseln (SKBdoc 1403930).



- Svar på SSM:s begäran om komplettering om inverkan av en reducerad koppar-tjocklek (SKBdoc 1469524).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering om en statistisk analys av brottförlängning och brottseghet för insatsmaterialet (SKBdoc 1464317).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering om skjuvning i kombination med ett ojämnt svälltryck (SKBdoc 1407337).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering om inverkan av treaxlighet (SKBdoc 1339835, SKBdoc 1355674, SKBdoc 1353646 och SKBdoc 1418263).

Som ett led i framtagandet av kompletteringar har SKB genomfört ett antal förfinade strukturmekaniska analyser (SKBdoc 1415152). I det följande ges exempel på sådana mera detaljerade modelleringar av både BWR- och PWR-kapseln i jämförelse med beräkningarna som redovisats i den ursprungliga ansökan (SKB TR-10-34):

- stållocket till insatsen har modellerats inklusive ventilhål och skruv med bricka
- kanalrören har modellerats med kontaktelement till segjärnsinsatsen
- svetsplattorna mellan kanalrören har modellerats

Dessutom har SKB undersökt inverkan av excentriskt placerade kanalrör samt i ett fall där skjuvplanet är lagd vinkelrätt mot kapselns axel precis vid stållocket (SKBdoc 1415152). Följande resultat har erhållits för en skjuvning på 5 cm och bentonitdensitet på 2050 kg/m³:

- Maximal plastisk töjning i insatsen för BWR-kapseln är 1,5 % lokaliserad invid svetsplattorna till kanalrören. För PWR-kapselns insats är motsvarande resultat 0,74 %.
- Maximal plastisk töjning i kopparhöljet för BWR-kapseln är 5,1 % lokaliserad vid kopparcylindern i skjuvplanet. Det är en töjning som uppträder genom hela tjockleken av kopparmaterialet. Vid diskontinuiteter kan lokala högre töjningar förekomma. För PWR-kapselns kopparhölje är motsvarande resultat 5,0 %.
- Vid excentriskt placerade kanalrör med en excentricitet på 20 mm för BWR-kapslar och 10 mm för PWR-kapslar, kommer tjockleken minska vid vissa hörn mellan kanalrör och insatsens periferi. Då ökar också den maximala plastiska töjningen i insatsen till 2,7 % för BWR-kapseln och till 1,4 % för PWR-kapseln.
- I stållocket till insatsen erhålls endast elastiska spänningar utom för det fall då skjuvplanet är lagd vinkelrätt mot kapselns axel precis vid stållocket. Då erhålls för PWR-kapseln lokalt en maximal plastisk töjning på 6,1 % i stållocket och en maximal plastisk töjning på 3,4 % lokalt i skruven. Måttliga plastiska töjningar på mindre än 1 % erhålls för insatsen vid en skjuvning precis vid stållocket. För kopparhöljet erhålls lokalt 9,7 % plastisk töjning vid en skjuvning precis vid stållocket.

SKB har också tagit fram analyser av skjuvning vinkelrätt mot BWR-kapselns axel precis invid botten respektive vid toppen av kapseln (SKBdoc 1403930). I detta fall erhålls endast elastiska förhållanden i insatsen. Plastiska töjningar i kopparhöljet på upp till 23 % erhålls mycket lokalt vid hörnet där kopparhöljet möter insatsens botten.

Tabell 5.10.1 sammanfattar de analyser som SKB har utfört och redovisar resultat för den mest konservativa bentonitdensiteten på 2050 kg/m³. I tabellen presenteras i allmänhet resultat för skjuvvinklar och skjuvpositioner som är mest begränsande resultaten inom varje analysrapport. I flera fall har parallella analyser genomförts för både BWR- och PWR-kapseln och i allmänhet erhålls lägre töjningar i PWR-kapseln.



Tabell 5.10.1: Sammanställning av SKB:s känslighetsanalyser för lastfallet skjuvning 5 cm

Fall	Maximal plastisk töjning	Kommentar	Referens
Referensfall, BWR-kapsel	21 % i kopparhölje	Lokalt i kopparhöljet vid diskontinuiteter	TR-10-34
Referensfall, BWR-kapsel	0,5 % i insatsen	Hörnregion, kanalrör	TR-10-34
Förfinad modell, BWR-kapsel	5,1 % i kopparhölje	Vid skjuvplanet, ej lokalt	SKBdoc 1415152
Förfinad modell, BWR-kapsel	1,5 % i insatsen	Hörnregion, kanalrör, invid svetsplattor	SKBdoc 1415152
Förfinad modell med excentriska kanalrör, BWR-kapsel	2,7 % i insatsen	Hörnregion, kanalrör, invid svetsplattor	SKBdoc 1415152
Stållock till insatsen, PWR	6,1 %	Lokalt i locket	SKBdoc 1415152
Skruv till stållock, PWR	3,4 %	Lokalt i skruven	SKBdoc 1415152
Förfinad modell, BWR-kapsel, skjuvning precis invid botten och locket	23 % i kopparhölje 0 % i insatsen	Lokalt i kopparhöljet vid diskontinuiteter	SKBdoc 1403930
Skjuvning 5 cm följt av ett isostatiskt tryck på 30 MPa, BWR-kapsel	23 % i kopparhölje (lokalt) 1,0 % i insatsen	Används för bedömning av skjuvlast och efterföljande glaciation	TR-10-34

SKB har även genomfört vissa ytterligare analyser av skjuvlastfallet som ett led i kompletteringsförfarandet:

- SKB redovisar analyser av skjuvning vinkelrätt mot BWR-kapselns axel vid en höjd från botten på 90 % av kapselns längd (SKBdoc 1339902). Inga väsentliga skillnader erhålls jämfört med tidigare analyser för fallet 5 cm skjuvning. Dessa ytterligare beräkningar har främst tagits fram för att användas i en probabilistisk analys och redovisar analysresultat för skjuvningar mellan 1 och 10 cm i steg om 1 cm.
- I SKBdoc 1469524 redovisar SKB nya analyser av skjuvlastfallet för en BWR-kapsel med en halverad koppertjocklek på 25 mm. Motivet för dessa beräkningar är att koppertjockleken efter lång tid kan reduceras till följd av korrosion i slutförvarsmiljön.

I en förfinad modell av skjuvlastfallet (SKBdoc 1415152) har SKB placerat de excentriska kanalrören på ett sådant sätt att det minsta kantavståndet är beläget på samma sida om kapseln där skjuvningen träffar kapseln, dvs. där man får stora tryckspänningar. Som ett led i kompletteringsförfarandet har SKB genomfört ytterligare förfinade tredimensionella finita element analyser där excentriska kanalrör har antagits vara belägna så att minsta kantavståndet är beläget på den sidan om kapseln där man får störst dragspänningar (SKBdoc 1439722 för BWR; SKBdoc 1439730 för PWR). Därvid erhålls snarlika resultat som i SKBdoc 1415152.



SKB har även utfört vissa känslighetsanalyser för en större skjuvning än 5 cm. I SKBdoc 1415152 redovisas resultat för BWR-kapseln för en skjuvning på 8 cm vid en höjd från botten som motsvarar 3/4 av kapselns längd. En största plastisk töjning på 3,8 % erhålls i kanalrörens hörnregion. För kopparhöljet blir den största plastiska töjning 6,0 % (inte lokal utbredning). Baserat på dessa resultat förväntas kapselns inte ens falla vid en skjuvning på 8 cm. Resultat har även tagits fram för en skjuvning på 10 cm men konvergensproblem för den finita element koden Abaqus begränsar användbarheten av dessa resultat.

SKB har använt ett kriterium för tålighet mot plastisk kollaps av segjärnsinsatsen utgående från ett enaxligt dragprov med en sann spännings-töjningskurva (SKB TR-10-28). Brottgränsen 456 MPa svarar i detta fall mot 12,6 % töjning. Det senare värdet ska svara mot den undre gränsen i en statistisk uppskattning av medelvärdet för den procentuella brottförlängningen (brottöjningen) som med 90 % konfidensgrad ska ligga i intervallet $12,6\% < \text{brottöjningen} < 14,8\%$. SKB använder sedan en säkerhetsfaktor 2 för brottöjningens undre gränsvärde för medelvärdet, dvs. 6,3 %. Kriteriet mot plastisk kollaps sätts sedan så att den effektiva von Mises spänningen inte får överstiga den spänning som svarar mot halva brottöjningen 6,3 %, vilket i detta fall är 395 MPa. SKB har i en komplettering sammanställt materialkrav för BWR- och PWR-insatserna vid tillverkning (SKBdoc 1371851). Ett viktigt krav är att brottförlängningen ska vara minst 7 %. SKB avser att ta ut 6 st. prover på insatsens toppskiva för materialprovning. Erforderlig brottförlängning måste vara uppfylld för samtliga prover.

Som ett led i kompletteringsförfarandet har SKB också genomfört en statistisk analys av brottförlängning och brottseghet (SKBdoc 1464317). Resultatet visar sig att även om individuella mätvärden av brottförlängningen ligger över gränsvärdet 7 % så är spridningen så stor att de uppställda kraven inte kan sägas vara uppfyllda med statistisk signifikans. SKB anger att medelvärde eller standardavvikelse behöver förbättras betydligt för att säkerställa en tillräckligt hög sannolikhet för att samtliga områden i insatsen uppfyller kraven (SKBdoc 1464317). SKB anser att ytterligare insatser för att förbättra tillverkningsprocessen och en översikt av nödvändiga gränsvärdesnivåer är lämpliga åtgärder för att säkerställa kravuppfyllelse. För brottsegheten krävs ytterligare undersökningar enligt SKB 1464317.

SKB har även studerat 5 cm skjuvning i samband med ett isostatiskt yttre tryck på 30 MPa. Detta fall ska motsvara en jordskalvbävningsslast i samband med en glaciation. För BWR-kapseln medför denna lastkombination en maximal plastisk töjning i insatsen på 1 procent och lokalt i kopparhöljet är motsvarande töjning 23 % (SKB TR-10-34). Beräkningarna visar att de axiella spänningarna i insatsen minskar jämfört med fallet enbart skjuvlast. Detta resultat innebär att fallet jordskalvslast med en samtidig glaciationslast inte förväntas påverka skadetålighetsanalyserna.

Ytterligare en tänkbar belastningssituation i slutförvarsmiljön som analyserats är om en skjuvlast uppstår i kombination med att bufferten utövar ett ojämnt svälltryck på kopparkapseln (SKBdoc 1407337). Ett ojämnt svälltryck kan exempelvis uppstå på grund av att deponeringshålet för en kapsel är bananformat och/eller att delar av berget kan ha lossnat längs med deponeringshålet genom en spjälkningsprocess i samband med uppförandet. Dessa situationer kan medföra uppkomst av en ojämn buffertdensitet som vid svällning medför en viss böjning av kapseln. SKB:s analyser visar dock att man får lägre plastiska töjningar i kopparhöljet och lägre spänningar i insatsen för fallet skjuvlast i kombination med ett ojämnt svälltryck, jämfört med fallet enbart skjuvlast och homogen buffertdensitet. Det beror på att skjuvlast ger dragspänningar medan svälltryck och



isostatiskt vattentryck, exempelvis från en glaciationslast, i huvudsak ger tryckspänningar. Drag- och tryckspänningar tar i detta fall delvis ut varandra.

SKB har för många år sedan genomfört en experimentell studie för att simulera en horisontell bergskjuvning tvärs över ett deponeringshål (SKB TR-86-26). Modellförsöken bestod av simulerade kapslar bestående av en solid stång av koppar i skala 1:10 omgiven av vattenmättad bentonit. Långt senare genomfördes matematiska simuleringar av dessa experiment med det finita elementprogrammet Abaqus (SKB TR-10-33). Resultat från beräkningar respektive experiment visade på god överensstämmelse med avseende på krafter/spänningar och deformationer/töjningar.

SSM har begärt kompletterande information om hur graden av treaxlighet i kapseln påverkar brotttöjningen och kapselns tålighet. Treaxligheten karaktäriseras av parametern T som definieras av medelvärdet av huvudspänningarna dividerat med effektivspänningen. Vanligtvis erhålls en minskad duktilitet och lägre brotttöjning med ökande värde på T , vilket beror på att olika brottmoder är aktiva som i varierande grad undertrycker plasticeringen vid brott. SKB har genomfört ett relativt stort antal kompletterande analyser och experiment för att belysa denna fråga. I en förstudie av problemställningen föreslås experiment där brotttöjningen bestäms vid olika T -värden (SKBdoc 1339835). Hittills genomförda experiment innefattar dragprov med provstavar med runda tvärsnitt utförda på segjärnsmaterial vid $T = 0,33$ (SKBdoc 1355674), dragprov med provstavar med rektangulära tvärsnitt vid $T = 0,58$ (SKBdoc 1353646) samt rena skjuvprov vid $T = 0$. Utvärdering av dessa resultat och dess betydelse för kapselns haveritålighet finns i SKBdoc 1418263. Störst brotttöjning erhålls som väntat vid ren skjuvning ($T = 0$) varvid brotttöjningen i medeltal blev 52 % vilket kan jämföras med medeltalet 17,3 % vid $T = 0,33$ samt medeltalet 12,4 % vid $T = 0,58$. Den treaxlighet som råder vid skjuvlastfallet får anses vara det mest begränsande lastfallet med avseende på kapselns tålighet mot plastisk kollaps. Genom resultat från simuleringar med Abaqus-koden har SKB studerat spänningstillståndet för den högst påkända delen av insatsen under en skjuvning och det noterades att treaxligheten var av storleksordningen 0,36 (SKB TR-10-34). Det innebär att graden av treaxlighet vid skjuvlastfallet är av samma storleksordning som vid dragproven för bestämning av brotttöjningen, dvs. provstavar med runda tvärsnitt.

SSM har begärt kompletterande information om hur kapseln tål de definierade belastningarna om kopparmaterialet minskar i tjocklek på grund av korrosion. SKB har av detta skäl redovisat analyser av en BWR-kapsel utsatt för en skjuvlast på 5 cm med en reducerad koppartjocklek på 25 mm i jämförelse med ursprungliga 50 mm (SKBdoc 1469524). Resultaten visar att höga töjningar om maximalt cirka 24 % erhöles i hålkälen där den cylindriska delen möter locket. Dessa töjningar i kopparhöljet är dock lokalt utbredda och SKB bedömer därför att kapseln förblir tät även vid en reducerad koppartjocklek. Resultaten kan jämföras med det ursprungliga fallet med en koppartjocklek på 50 mm, för vilket en maximal lokal plastisk töjning på 21 % erhöles (SKB TR-10-34).



5.10.1.2 SSM:s bedömning

SSM har bedömt SKB:s underlag för tålighet mot plastisk kollaps vid skjuvlast i följande avseenden:

- värdering av SKB:s hållfasthetskriterier för tålighet mot plastisk kollaps inklusive bedömning av kriteriet för brottöjningen av insatsen
- värdering av SKB:s hållfasthetsanalyser för skjuvning inklusive de känslighetsanalyser och kompletterande analyser som SKB utfört samt kvarstående osäkerheter
- bedömning av om det finns förutsättningar för att kapslarna kan uppnå tillräcklig tålighet mot plastisk kollaps av insatsen samt tålighet mot stora deformationer av kopparhöljet vid skjuvlast.

Enligt SSM:s bedömning är SKB:s kriterium att effektivspänningen inte får överstiga den spänning som svarar mot halva brottöjningen via en dragprovkurva inte ett naturligt val. Det måste betraktas som en omväg att gå via materialets spännings-töjningskurva för att definiera en maxgräns för effektivspänningen. Det är inte en vedertagen metod inom hållfasthetsläran. I ett deformationsstyrt fall som vid skjuvlast är den plastiska töjningen ett bättre mått på deformationen av insatsen. SSM anser därför att ett bättre val vore att definiera ett krav på en maximal plastisk töjning, som inte får överskrida en definierad brottöjning dividerad med en säkerhetsfaktor.

Det är inte uppenbart för SSM att den av SKB redovisade metodiken för att säkerställa att hela insatsen uppnår tillräckligt bra hållfasthetsegenskaper kan anses vara lämplig, dvs. att ta ut ett fåtal provstavar från insatsens toppskiva vid tillverkningen och att kravställa en brottöjning på 7 % som ett minimivärde för dessa provstavar och att detta gäller för hela insatsen. (SKB TR-10-28). SSM:s slutsats bekräftas i detta fall av den statistiska analys som SKB har låtit genomföra (SKBdoc 1464317). SKB har angett att man fortsättningsvis avser att utnyttja övervakning av processparametrar vid gjutningen och kontroll av mikrostrukturen, som tillsammans med materialprovningen ska visa att insatserna uppnår en tillräcklig brottöjning. SSM kan dock konstatera att SKB ännu inte har redovisat hur kopplingen mellan brottöjning samt övervakade processparametrar vid gjutningen och kontroll av mikrostruktur ska uppnås. SSM bedömer därför att det finns vissa brister i SKB:s nuvarande redovisning kring hur man ska säkerställa tillräcklig brottöjning i insatsen via materialprovning och andra undersökningar som planeras i samband med tillverkningen. Denna slutsats gäller både för BWR- och för PWR-insatserna. Det behöver exempelvis beaktas att stelningsförloppet i en PWR-kapsel är annorlunda än för en BWR-kapsel, t.ex. med avseende på området som stelnar sist i vilket man kan förvänta sig sämre materialegenskaper. SSM bedömer att SKB i kommande steg av sitt program behöver utveckla metodiken för att uppnå och säkerställa insatsens hållfasthetsegenskaper för att SSM ska kunna ta slutlig ställning till säkerheten mot plastisk kollaps för skjuvlastfallet. Mera bedömningar kring tillverkningsaspekter för insatsen finns i avsnitt 3.4.2.2 i denna granskningsrapport.

SSM kan dock konstatera att det finns vissa gynnsamma faktorer i sammanhanget för insatsens hållfasthetsegenskaper. Om man antar att vissa områden i insatsen lokalt har sämre hållfasthetsegenskaper och en lägre brottöjning har det mest ogynnsamma fallet bara en begränsad sannolikhet, dvs. att en skjuvande last som kan orsaka lokalt höga töjningar träffar just dessa områden. Det finns därför möjligen vissa förutsättningar att beakta insatsens varierande materialegenskaper med probabilistiska metoder. Dessutom är förekomst av större skjuvrörelser på 5 cm ett osannolikt lastfall i sig som endast avser ett fåtal kapslar.

Bentonitleran och dess egenskaper har en betydelse för skjuvlastfallet eftersom denna tar upp en stor del av de deformationer som annars skulle överföras direkt till kapseln. SSM



bedömer sammanfattningsvis att SKB:s materialmodell för bentonitleran (SKB TR-10-31, kapitel 2) är trovärdig, liksom det elastisk-plastiska förhållandet mellan spänning och töjning vid skjuvlast som har bestämts experimentellt (SKB TR-10-31, figur 4-1) se avsnitt 4.7 i denna granskningsrapport.

SSM:s bedömning av SKB:s analyser av skjuvlastfallet avser den plastiska töjningens storlek och fördelning för både insats och kopparhölje, i förhållande till insatsens och kopparhöljets brotttöjning. SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s hållfasthetsanalyser med avseende på skjuvlast i huvudsak är genomförda på ett korrekt sätt enligt goda ingenjörsmässiga principer. Det använda finita elementprogrammet Abaqus är ett väl beprövat dataprogram för strukturmekaniska analyser. Rimliga bedömningar har gjorts beträffande inverkan av elementtäteten vid diskontinuiteter.

Maximal plastisk töjning i analyserna (tabell 2) ska jämföras med SKB:s specificerade tillverkningskrav på minst 7 procent för segjärnets brottförlängning och minst 40 procent för kopparmaterialets brottförlängning. SSM bedömer preliminärt att de framräknade töjningarna i segjärnsinsatsen och kopparhöljet för en skjuvning på 5 cm är acceptabla och har förutsättningar att uppfylla SKB:s kriterier för säkerhet mot plastisk kollaps för både BWR- och PWR-kapseln. För en slutlig bedömning från SSM:s sida krävs dock att SKB inför kommande steg i sitt program åtgärdar de brister som SSM har påtalat inom detta avsnitt. Dessa innefattar exempelvis hur SKB med hög tillförlitlighet ska säkerställa tillräcklig brotttöjning i insatsen via materialprovning och andra undersökningar som planeras i samband med tillverkningen.

För skruv och stållock till segjärnsinsatsen erhålls elastiska spänningar utom i vissa lokala områden. Enligt SSM:s bedömning äventyrar dock inte dessa områden kapselns långsiktiga integritet. I vissa områden i kopparhöljet erhålls dock högre töjningar. Det gäller områden där kopparcylindern möter insatsens hörn samt i botten på den smala spalt som bildas mellan kopparcylinder och kopparlock efter svetsning. Dessa områden med högre töjningar är dock mycket lokalt utbredda i ett litet område och går inte genom hela kopparhöljets tjocklek. SSM bedömer därför att dessa områden med lokalt högre töjningar i kopparhöljet inte kan orsaka plastisk kollaps av kopparhöljet. En bedömning av frågeställningar kring kryp av kopparmaterial finns på en annan plats i denna granskningsrapport (avsnitt 4.10.5).

SKB har studerat lastfallet skjuvlast i kombination med ett ojämnt svälltryck på grund av ojämn bentonitdensitet. I detta fall erhålls lägre plastiska töjningar i kopparhöljet och lägre spänningar i insatsen, i jämförelse med enbart skjuvlast och homogen bentonitdensitet. SSM konstaterar att den ojämna bentonitdensiteten och den därav orsakade böjningen av kapseln inte är tillräckligt stor för att kompensera för effekten av det högre svälltrycket vid den högre bentonitdensiteten $2\ 050\ \text{kg/m}^3$. SSM bedömer därför att ett ojämnt svälltryck grund av ojämn bentonitdensitet inte är begränsande för kapselns hållfasthet.

SSM gör även en likande bedömning med avseende på lastfallet 5 cm skjuvning följt av ett isostatiskt tryck på 30 MPa (SKB TR-10-34). Resultaten innebär att detta inte torde vara något svårt lastfall, och kapseln bör därför tåla skjuvlast i kombination med en samtidig eller efterföljande glaciation med bibehållen integritet.

SSM bedömer att SKB:s redovisning av treaxlighet för insatsen är godtagbar. SKB:s metod för bestämning av brotttöjning via dragprov kan anses vara trovärdig och treaxlighet kan inte heller anses vara försvårande för kapselns integritet.

Kopparhöljet inte har någon bärande funktion utan är främst en korrosionsbarriär vilket betyder att kopparhöljets tjocklek inte är av avgörande betydelse för den strukturella



integriteten under de studerade lastfallen. SSM instämmer i SKB:s bedömning och analyser (SKBdoc 1469524), ur vilka det framgår att kapseln tål en skjuvlast på 5 cm med bibehållen strukturell integritet och att kopparhöljet har förutsättningar att förbli tätt även om koppartjockleken reduceras till hälften (25 mm).

SSM bedömer att de av SKB studerade skjuvvinklarna ger en representativ bild av hur en skjuvning av en kapsel kan gå till vid ett jordskalv.

SSM har under granskningen av SKB:s ansökan anlitat en extern expert som har genomlyst ett antal kritiska frågor om kapselns strukturella integritet (SSM Technical Note 2012:15). SSM har beaktat den externa expertens synpunkter och har i flera fall begärt in kompletterande information från SKB kring berörda frågeställningar. Följande områden med koppling till både tålighet mot plastisk kollaps och skadetålighet tas upp i denna externa granskning:

- inflytande från alternativa svälltrycksscenarioer
- betydelse av egenspanningar
- vikten av att använda representativa data från PWR-kapslar för analys av skadetålighet
- betydelse av belastningshastighet
- inflytande från att kanalrören initialt inte modellerats med kontaktelement
- ytterligare studier av duktilitet och brottseghet för insatsen.

SSM bedömer sammanfattningsvis på basis av nuvarande redovisning och detaljutformning för SKB:s slutförvarskapslar, med insats och kopparhölje inklusive lock och botten för både BWR och PWR, att det finns förutsättningar att påvisa tillräcklig tålighet mot plastisk kollaps vid en skjuvlast på 5 cm för samtliga studerade skjuvvinklar. Det är dock betydelsefullt att SKB inför kommande steg i sitt program beaktar och åtgärdar de brister som SSM påtalat, bland annat med avseende på metoder för att säkerställa en tillräcklig brotttöjning av segjärnet. SSM:s bedömning görs med hänsyn till måttliga töjningar och lokal utbredning av dessa töjningar i kapseln i förhållande till materialkraven på kapselns brotttöjning. De känslighetsanalyser och kompletterande analyser som har utförts visar även att det fortfarande finns förhållandevis goda marginaler mot plastisk kollaps. I denna bedömning har även SSM värderat att SKB i analyserna konservativt har ansatt en förhållandevis hög bentonitdensitet på 2 050 kg/m³.

SSM noterar dessutom att skjuvlast som ett resultat av berg rörelser vid jordskalv är deformationsstyrt. Det innebär att om man erhåller lokal plasticering av vissa områden hos kapseln så minskar kapselns styvhet varvid konstruktionen avlastas. Resultat från den experimentella studien i skala 1:10 som SKB har utfört (SKB TR-86-26), liksom den goda överensstämmelsen mellan experiment och resultat från numeriska analyser (SKB TR-10-33) ger även ett visst empiriskt stöd till SSM:s bedömning. Försök och modelleringsarbeten har involverat bentonitens inverkan vilket har betydelse för SSM:s helhetsbedömning. Det bör dock noteras att ett nedskalat modellförsök inte kan ge någon fullständig och helt tillförlitlig information om förväntade verkliga förhållanden.

5.10.2 Skadetålighet

En analys av skadetåligheten innebär att sprickor postuleras i olika positioner av kapseln och att de acceptabla sprickstorlekarna därefter fastställs. Dessa värden ligger sedan till grund för hur stora defekter som behöver kunna detekteras i samband med oförstörande provning (OFP) vid kapseltillverkningen. De defekter som upptäcks i samband med OFP av kapselinsatsen behöver dessutom karaktäriseras och storleksbestämmas. Normalt postuleras sprickor i ett plan vinkelrätt mot de största dragspänningarna eftersom detta är det mest konservativa fallet.



Några skadetålighetsanalyser har dock inte genomförts för kopparhöljet som antas vara så segt att eventuella sprickor inte har någon brottmekanisk påverkan på den strukturella integriteten (se avsnitt 5.9.2.2 i denna granskningsrapport).

5.10.2.1 Underlag från SKB

SKB sammanfattar i SR-Site resultat från analyser av skadetålighet (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.5) baserat på information från SKB TR-10-29. SKB:s arbetsgång för bestämning av acceptabla sprickstorlekar i segjärnsinsatsen för skjuvlastfallet består av följande steg:

- Bestäm förekommande spänningar i kapseln vid en skjuvning på 5 cm i olika vinklar och i olika positioner på kapseln via globala finita elementanalyser.
- Infoga defekter så som ytsprickor och inre sprickor vinkelrätt mot de största dragspänningarna i en undermodell till den globala finita elementanalysen.
- Bestäm de minsta accepterbara sprickstorlekarna genom att bestämma J-integralen i undermodellen med finita elementprogrammet Abaqus, som sedan jämförs med brottseghetsdata (J_R som funktion av stabil spricktillväxt Δa).

J-integralen används i den icke-linjära brottmekaniken som ett mått på risk för spricktillväxt från en spricka i en struktur där plastiska effekter är betydelsefulla. SKB har använt sig av J_R vid 2 mm stabil tillväxt, dividerad med en säkerhetsfaktor 2,0. Det är en säkerhetsfaktor som används i den amerikanska tryckkärlsstandarden ASME XI för sprickor i strukturer som utsätts för osannolika lasthändelser. Acceptabel sprickstorlek erhålls ur sambandet då J är lika med $J_R(\Delta a = 2 \text{ mm})/2,0$. Division med 2 innebär att en säkerhetsfaktor på 2 är tillgodosedd.

SKB har i huvudsak har följt ASTM-standarden E-1820 för bestämning av brottseghetsdata för J_{Ic} och J_R som används i den brottmekaniska provningen. I ASTM E-1820 finns strikta krav på bl.a. storlek på en stabil spricktillväxt och sprickfrontens raket för att erhålla giltiga data. Även om SKB:s brottseghetsprovningar i allmänhet har påvisat ett segt beteende så har vissa prov blivit ogiltiga, ofta på grund av för sned sprickfront eller osäkerheter i spricktillväxtmätningarna. SKB har i skadetålighetsanalyserna använt ett J_R -värde på 88 kJ/m^2 vid 2 mm stabil tillväxt för BWR-insatser och ett J_R -värde på 78 kJ/m^2 vid 2 mm stabil tillväxt för PWR-insatser. Detta ska enligt SKB svara mot ett undre gränsvärde för medelvärdet med 90 % konfidensgrad. Samtliga använda brottseghetsdata är framtagna med provning i vattenmiljö.

SKB redovisar brottmekaniska analyser för segjärnsinsatsen (BWR) där sprickor analyseras för en skjuvning på 5 cm och 10 cm med fall för olika nivåer för bentonitens densitet (SKB TR-10-29). Sprickornas antas förekomma i positioner i närheten av kanälrören och områden mellan dessa, samt vid insatsens ytterperiferi där relativt stora axiella böjspänningar erhålls. Detta innebär den motsatta sidan av insatsen i förhållande till skjuvningens angreppspunkt. En brottseghet på $J_R = 88 \text{ kJ/m}^2$ vid 2 mm stabil tillväxt vid 0 °C har använts i analyserna som sägs svara mot ett undre gränsvärde för medelvärdet med 90 % konfidensgrad. Följande sprickgeometrier har analyserats med en orientering i omkretsled i kapseln:

- inre sprickor av cirkulär eller elliptisk form med djup-längd förhållandet 1:6
- ytsprickor av halv-cirkulär eller halv-elliptisk form med djup-längd förhållandet 1:6

För en skjuvning på 5 cm och en bentonitdensitet på $2\,050 \text{ kg/m}^3$ redovisar SKB acceptabla sprickdjup på 4,5 mm för halv-elliptiska ytsprickor i det mest begränsande området av en BWR-kapsel (SKB TR-10-29). För en skjuvning på 10 cm blir motsvarande acceptabla sprickdjup 1,7 mm. Den acceptabla spricklängden i omkretsriktningen erhålls



genom att multiplicera de acceptabla sprickdjupen med en faktor 6, då djup-längd förhållandet för defekterna antas vara 1:6.

SKB har också redovisat känslighetsanalyser för fall då bentonitdensiteten är lägre än 2050 kg/m^3 samt för fall då ytsprickorna antas vara halvcirkulära i stället för halvelliptiska (SKB TR-10-29). I de flesta av dessa känslighetsanalyser ökar det acceptabla sprickdjupet till mer än 10 mm. Undermodellernas storlek innebär att det inte går att studera större sprickdjup än 10 mm. För antagna inre icke-ytgående sprickor är resultaten gynnsammare. För en skjuvning på 5 cm blir de acceptabla sprickdjupen i det mest begränsande området större än 10 mm oavsett bentonitdensitet och sprickform.

På SSM:s begäran har SKB tagit fram kompletterande och förtydligande information om ett antal frågor. Det gäller följande punkter:

- Svar på SSM:s begäran om komplettering angående skadetålighetsanalyser för PWR-kapslar (SKBdoc 1288288).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering angående belastningshastighetens inverkan på brottsegheten för insatsmaterialet (SKBdoc 1355363).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering angående skadetålighetsanalys av stållocket (SKBdoc 1451358).
- Svar på SSM:s begäran om komplettering angående skadetålighetsanalyser baserade på förfinade spänningsanalyser (SKBdoc 1450913 och SKBdoc 1459222).

SKB har även genomfört vissa ytterligare analyser för skjuvlastfallet och dess betydelse för skadetåligheten. Det gäller:

- brottseghetsprovning för segjärnsinsatsen i vattenmiljö och i luftmiljö vid olika temperaturer
- analys av kapseln med en helt genomsprucken insats och utsatt för en skjuvlast på 5 cm och 10 cm i samband med glaciationslast.

SKB har redovisat brottmekaniska analyser för PWR-kapslar utsatta för en skjuvning på 5 cm och en bentonitdensitet på 2050 kg/m^3 (SKBdoc 1288288). Liknande J-värden fås för halvelliptiska ytsprickor på de mest utsatta kända områdena för både PWR-insatsen och BWR-insatsen. Eftersom det använda brottseghetsvärdet för PWR-insatsen är något lägre, $J_R = 78 \text{ kJ/m}^2$ vid 2 mm stabil tillväxt och vid 0°C , blir dock det acceptabla sprickdjupet något lägre: 4,1 mm för en ytgående halvelliptisk omkretspricka. För alla andra fall som avser lägre bentonitdensitet eller närmare halvcirkulär sprickform blir de acceptabla sprickdjupen större.

SKB har i sin förtydligande information angående belastningshastighetens inverkan på brottsegheten för insatsmaterialet (SKBdoc 1355363). Där visas dels att de töjningsanalyser av kapseln vid en skjuvningshastighet på 1 m/s svarar approximativt mot en töjningshastighet på $0,5 \text{ s}^{-1}$, dels att denna töjningshastighet har uppnåtts i de brottmekaniska prov som skett vid hög belastningshastighet. Brottsegheten uppnåddes efter ca 10-20 ms. Av den brottmekaniska provning som skett vid höga belastningshastigheter framgår att materialets brottseghet med något undantag är av samma storleksordning som den brottseghet som har uppmätts vid långsam pålastning.

SKB som en del av en komplettering genomfört en undersökning av stållockets betydelse (SKBdoc 1451358). En formell skadetålighetsanalys har dock inte genomförts denna komponent. SKB motiverar detta med att stållocket är konstruerat av ett konventionellt konstruktionsmaterial enligt en EN-standard och att konventionella konstruktionsregler kan tillämpas (ASME III, avsnitt WC och NB). Dessa båda avsnitt ger anvisningar om konstruktion, material, tillverkning, kontroll och provning. Om dessa krav är uppfyllda



kan acceptabla defektstorlekar erhållas från ASME XI, IWB-3500 vilka ger maximalt tillåtna defektstorlekar för både ytgående och inneslutna defekter. SKB har gått igenom dessa krav (SKBdoc 1451358) och slutsatsen är att stålloket har förutsättningar att uppfylla kraven i ASME III, avsnitt WC och NB. När SKB under den kommande detaljerade konstruktionsfasen och under tillverkningskedet av kapslarna har visas att kraven kan uppfyllas kan tillåtna defektstorlekar erhållas från ASME XI, IWB-3500.

Vid spänningskoncentrationer nära svetsplattor invid kanälrören samt om ligamenten mellan kanälrör och yttre periferi är mindre på grund av toleranser vid tillverkningen, skulle ännu mindre acceptabla sprickstorlekar kunna förväntas. I SKBdoc 1450913 och SKBdoc 1459222 har som en grund för skadetålighetsanalyserna genomfört en studie av spänningstillståndet för de tidigare spänningsanalyserna av segjärnsinsatserna för BWR och PWR och jämfört dem med nya och mer detaljerade spänningsanalyser (SKBdoc 1459222). Jämförelsen visar att de nya spänningsanalyserna ger lokalt högre påkänningar i vissa områden med spänningskoncentrationer. Enligt SKB:s bedömning beror dock dessa till stor del på distorderade finita element vars spänningar inte kan anses vara pålitliga och som därför inte är lämpade för en skadetålighetsanalys. De omgivande områdena har betydligt lägre påkänningar. Både de tidigare och de mer detaljerade spänningsanalyserna har axiella spänningar av liknande storlek i de mest intressanta områdena för en skadetålighetsanalys. SKB bedömer därför att de nya och mer detaljerade spänningsanalyserna inte föranleder tillräckligt starka skäl att behöva uppdatera skadetålighetsanalyserna.

SKB redovisar även en analys av en helt genomsprucken insats som utsätts för en skjuvlast samt en efterföljande glaciationslast (SKBdoc 1404369). I analysen antas en genomsprucken insats som bildar en vinkel på 5 grader mot en skjuvlast som träffar kapseln vinkelrätt mot kapslens längdaxel på olika ställen utefter kapseln. Även friktionskoefficienten mellan olika kontaktytor har varierats. Resultaten för en skjuvlast på 5 cm visar att man får begränsade töjningar i kopparhöljet, max 6,7 % vid brottstället där insatsen är genomsprucken. Även vid en skjuvlast på 10 cm erhålls begränsade töjningar i kopparhöljet vid brottstället. SKB har även lagt på en glaciationslast med ett yttre tryck 45 MPa efter skjuvningen. Även i detta fall erhålls begränsade töjningar i kopparhöljet.

5.10.2.2 SSM:s bedömning

SSM har bedömt SKB:s underlag för skadetålighet vid en skjuvlast i följande avseenden:

- värdering av SKB:s hållfasthetskriterier för bestämning av acceptabla sprickstorlekar
- värdering av SKB:s brottmekaniska analyser för en skjuvlast inklusive de ingångsdata, känslighetsanalyser och kompletterande analyser som SKB utfört
- bedömning om det finns förutsättningar för att kapslarna har tillräcklig skadetålighet vid en skjuvlast.

SSM anser att J-integralen är ett vedertaget mått på risken för spricktillväxt från en spricka i en struktur där plastiska effekter är betydelsefulla. SKB använder en brottseghet J_R vid 2 mm stabil spricktillväxt, dividerad med en säkerhetsfaktor 2,0. Det är en säkerhetsfaktor som används i den amerikanska tryckkärlsstandarden ASME XI för sprickor i strukturer som utsätts för osannolika lasthändelser. SSM bedömer det som rimligt att använda denna säkerhetsfaktor i sammanhanget skjuvlastfallet eftersom det är ett osannolikt fall. Enligt SKB:s ansökanunderlag är det mindre än en kapsel som kommer att utsättas för en betydande skjuvning och därmed riskerar att skadas. SSM instämmer i denna bedömning och anser att antalet kritiska positioner för skjuvning större än 5 cm är sannolikt mindre än 1. SSM:s redovisning av jordskalvsfrågor för tiden upp till 100 000 år finns i avsnitt 5.12 och kapitel 9 i denna rapport.



SSM bedömer däremot att SKB:s användning av stabil spricktillväxt för brottsegheten J_R som ett problematiskt inslag i skadetålighetsanalyserna. Det görs normalt endast för material som är dokumenterat och erfarenhetsmässigt sega. Till exempel används detta förfarande för obestrålat austenitiskt rostfritt stål och svetsgods samt nickelbaslegeringar i komponenter som förekommer inom kärnkraftindustrin (SSM:s utredningsrapport SSM 2008:232). Motivet är att för sega material motsvarar J_{Ic} initiering av stabil spricktillväxt för en spricka och strukturen kan därefter bära en ökande last varvid brottsegheten J_R ökar under en stabil spricktillväxt. En anledning till att vara försiktig med användningen av stabil spricktillväxt för låglegerade stål är att dessa vanligen har ett omslagsområde vid lägre temperaturer där en övergång sker mellan segt till sprött brott. Det kan finnas viss risk för sprött brott för en stor struktur även om ett segt beteende har påvisats vid försök med små provstavar. För bestrålade material tillkommer effekter från neutronstrålningen vilket även kan vara begränsande inom det duktila området.

Det finns dock i sammanhanget ett antal gynnsamma faktorer. Skjuvlastfallet är förskjutningsstyrt. Det innebär att värdet på J -integralen som belastar sprickan minskar vid en lokal stabil spricktillväxt och därmed torde risken att få en instabil spricktillväxt vara liten för ett material som har en monotont ökande J_R -kurva som funktion av spricktillväxten. Det bör även påpekas att det finns ett ASME "Code Case" (N-749) som tillåter att man i skadetålighetsanalyser får utnyttja stabil spricktillväxt upp till 2,5 mm för brottsegheten J_R . Detta gäller för ferritiska tryckkärilstål som befinner sig i övre plåtområdet.

En annan faktor att värdera vid bedömning av skadetålighetsanalyser i vilka brottseghetsdata för 2 mm stabil tillväxt har utnyttjats, är att SKB inte har subtraherat 2 mm från de acceptabla defektstorlekarna, vilket en strikt tillämpning av metoden borde innefatta. SSM anser dock att detta har en mindre betydelse eftersom SKB tillämpar en säkerhetsfaktor för brottsegheten. Praxis vid skadetålighetsanalyser för sprickor i mekaniska anordningar i kärnkraftsreaktorer är även att inte göra en dylik korrigering av de acceptabla defektstorlekarna då stabil tillväxt utnyttjas för brottsegheten.

SSM bedömer att SKB:s redovisning för användning av brottseghetsdata vid 2 mm stabil spricktillväxt i skadetålighetsanalyserna inte är väl motiverade, framför allt med hänsyn till att det saknas tillräckliga erfarenheter för att det ska kunna anses vara väl beprövat för denna typ av material. Det saknas dessutom andra kända industriella tillämpningar som använder brottseghetsdata i skadetålighetsanalyser för segjärn på det sätt som SKB gör.

För de brottmekaniska analyserna har SKB använt sig av det generella finita elementprogrammet Abaqus för att bestämma J -integralen. SSM bedömer att SKB:s brottmekaniska analyser med avseende på skjuvlast är genomförda på ett korrekt sätt enligt goda ingenjörsmässiga principer. Det använda finita elementprogrammet Abaqus är ett väl beprövat dataprogram för strukturmekaniska analyser.

SKB har baserat sin analys på ett förfarande som innebär att de använda brottseghetsvärdena sägs svara mot ett undre gränsvärde för medelvärde med 90 % konfidensgrad. Enligt SSM:s bedömning är det oklart om denna metod utgör en tillräcklig åtgärd för att tillgodose att spridningen i brottseghetsdata blir omhändertagen. Liksom för brottförlängningen gör SSM bedömningen att principen att krävställa en brottseghet (88 kJ/m² för BWR; 78 kJ/m² för PWR) som ett minimivärde inte är godtagbar med den angivna metodiken. Det går sannolikt inte att säkerställa giltighet för hela insatsen enbart på basis av ett fåtal prov som tas från insatsens toppskiva vid tillverkningen. Denna slutsats bekräftas även av SKB:s statistiska analys (SKBdoc 1464317). SSM gör därför bedömningen att SKB:s redovisning är ofullständig gällande hur tillräcklig brottseghet i insatsen ska säkerställas genom materialprovning och andra undersökningar i samband



med tillverkning. Som diskuteras i den sammanvägda bedömningen kan detta dock uppvägas av andra gynnsamma faktorer.

SKB:s sammanställning av data visar att provning i vatten vid 0°C ger lägre brottseghetsvärden än provning i luft vid samma temperatur (SKBdoc 1371849). De använda brottseghetsvärdena 88 respektive 78 kJ/m² vid skadetålighetsanalyserna är framtagna vid provning i vatten. SSM bedömer därför att det även finns konservativa inslag i SKB:s användning av brottseghetsvärden.

SSM bedömer, på grundval av SKB:s undersökningar av belastningshastighetens inverkan (SKBdoc 1355363) att det är rimligt att i skadetålighetsanalyser använda brottseghetsvärden som bestämts vid kvasistatiska förhållanden.

SSM bedömer att det är rimligt att tillåtna defektstorlekar i stållocket kan bestämmas av ASME XI, IWB-3500.

För segjärnsinsatsen bedömer SSM att skadetåligheten för BWR- och PWR-kapslar i fallet skjuvning är relativt god i de tvärsnitt som SKB ansatt inre icke-ytgående sprickor. Dock kan förekomst av inre sprickor försvåra detekterbarheten med OFP. För ytgående sprickor i de högst påkända områdena visar skadetålighetsanalyserna att minsta acceptabla defektdjup för halvelliptiska ytsprickor, med den högsta bentonitdensiteten 2 050 kg/m³, ligger mellan 4,1 mm (PWR) och 4,5 mm (BWR). SSM bedömer att detta är små defektstorlekar som kommer ställa höga krav på det OFP-system som ska kunna detektera sådana defekter. Så länge som SKB kan visa via en kvalificeringsprocess att man med oförstörande provning (OFP) förmår detektera och i förekommande fall karaktärisera och storleksbestämna de defektstorlekar som är framtagna i samband med skadetålighetsanalyserna, är detta förfarande dock acceptabelt enligt SSM:s bedömning.

SSM bedömer sammanfattningsvis mot bakgrund av SKB:s hittills genomförda skadetålighetsanalyser inklusive kompletterande analyser (SKBdoc 1450913; SKBdoc 1459222), att det är rimligt att det inte för närvarande finns tillräckligt starka skäl för att behöva uppdatera skadetålighetsanalyserna med anledning av vissa nya och mer detaljerade spänningsanalyser.

SSM har även genomfört vissa egna beräkningar som belyser risken för instabil spricktillväxt. Följande två kriterier behöver helst vara uppfyllda samtidigt för att inte erhålla instabil spricktillväxt: (i) $J < J_R$, och (ii) $dJ/da < dJ_R/da$.

J och dJ/da går att få fram från SKB:s brottmekaniska J -analyser som redovisas för skjuvlastfallet (SKB TR-10-29). J_R och dJ_R/da kan erhållas från redovisade J_R -kurvor från den brottmekaniska provningen vid 2 mm stabil spricktillväxt. Det visar sig att för en skjuvning på 5 cm och för den mest konservativa bentonitdensiteten på 2 050 kg/m³, uppfylls kriterierna (i) och (ii) med marginal för angivna acceptabla sprickstorlekar och för samtliga analyserade sprickgeometrier. Marginalerna ökar om lägre bentonitdensiteter än 2 050 kg/m³ skulle komma att användas. SSM bedömer därför att risken för att få instabil spricktillväxt från en skjuvning på 5 cm sannolikt är liten för sprickor av samma storlek eller mindre i jämförelse med de av SKB redovisade maximala sprickstorlekarna som kan accepteras.

SKB har inte tagit någon hänsyn till egenspanningar efter gjutning av insatsen och hur dessa kan påverka skadetåligheten. Det har dock visats att egenspanningarna mestadels är kompressiva och belägna vid insatsens yttre delar (SKBdoc 1416697). För PWR-kapseln uppstår egenspanningar i drag endast vid några få områden längre in nära insatsens centrala delar. För BWR-kapseln visar mätningar av egenspanningen inga entydliga



resultat. I ett fåtal fall har positiva egenspänningar uppmätts utanför kanalrören. SSM bedömer dock att egenspänningarnas inverkan minskar vid plasticering under en skjuvning eftersom egenspänningar till sin natur är sekundära. Omständigheten att SKB försummar inverkan av egenspänningar efter gjutningen är därför enligt SSM inte av avgörande betydelse för bedömningen av kapslens skadetålighet.

SKB har också tagit fram en analys av en helt genomsprucken insats (SKBdoc 1404369). SKB har inte direkt använt analysresultaten från denna rapport i säkerhetanalysen eller ansökan och SKB gör inte heller någon koppling till analysen av skadetålighet och maximalt tillåtna defektstorlekar. SSM:s översiktliga granskning av denna rapport pekar ändå på att kapselns kopparhölje förblir tät även vid användning av mycket pessimistiska antaganden kring insatsens tillstånd. SSM bedömer därför att så länge buffertens materialegenskaper förblir gynnsamma så skyddas sannolikt kapseln mot rimliga skjuvlaster på ett godtagbart sätt. Det bör dock tilläggas att om SKB vill utnyttja denna typ av resultat (SKBdoc 1404369) för att relaxera kraven på defektstorlekar i insatsen behöver SKB genomföra utförliga kompletterande studier av hur kapseln beter sig i situationer med olika defekt förekomst och skadeomfattning under olika belastningsförhållanden.

SKB:s skadetålighetsanalyser för skjuvlastfallet har vissa brister som har diskuterats ovan i SSM:s bedömning. Dessa brister eller osäkerheter kan sammanfattas som:

- Det saknas tillräckliga erfarenheter och dokumenterade andra industriella tillämpningar för att det ska kunna anses vara väl beprövat att använda 2 mm stabil spricktillväxt för brottsegheten J_R i skadetålighetsanalyserna för segjärnsinsatsen. SKB har inte heller subtraherat 2 mm från de acceptabla defektstorlekarna som en strikt tillämpning av metodiken borde innefatta.
- Den provning av brottsegheten som hittills är gjord uppvisar i vissa fall relativt stor spridning. Det är för närvarande oklart hur SKB med den materialprovning som planeras kan anse att spridningen i brottseghetsdata är omhändertagen på ett tillförlitligt sätt.
- SKB har inte tagit hänsyn till egenspänningar efter gjutningen av insatsen och hur detta kan påverka skadetåligheten.

Osäkerheterna enligt ovan kan orsaka att de acceptabla defektstorlekarna skulle kunna bli ännu mindre än vad SKB redovisat i skadetålighetsanalyserna. Mot dessa brister ska emellertid ställas vissa gynnsamma omständigheter. SSM bedömer att dessa är:

- Skjuvlastfallet kan för en individuell kapsel betraktas som ett mindre sannolikt lastfall.
- Om man antar att vissa områden i insatsen lokalt har en lägre brottseghet så är sannolikheten att en skjuvande last träffar just dessa områden begränsad. Dessutom är det mindre sannolikt att det skulle finnas en oupptäckt spricka i just den position på kapseln som vid en skjuvning utsätts för en stor dragspänning och där skadetåligheten är som sämst. Att brottsegheten är låg i vissa områden är bara problematiskt om det samtidigt finns en spricka i den positionen.
- Skjuvlastfallet är förskjutningsstyrt. Det innebär att om man erhåller lokal plasticering eller en lokal spricktillväxt i vissa områden så minskar styvheten varvid konstruktionen avlastas.
- Om ett ligament mellan kanalrör och insatsens periferi skulle resultera i en genomgående spricka lokalt i insatsen via spricktillväxt vid en skjuvning, skulle troligen inget dramatiskt hända med kapslens integritet. Geometrin för insatsen kommer väsentligen att bibehållas och påverkas sannolikt inte heller kopparhöljet nämnvärt. En isostatisk last vid en samtidig glaciation ger väsentligen tryckspänningar i insatsen varvid sprickytorna trycks ihop utan att kapseln förlorar sin bärförmåga. SSM bedömer preliminärt att denna slutsats stöds av vissa av SKB:s utredningar (SKBdoc 1404369).



SKB har dessutom antagit den minst gynnsamma bentonitdensiteten i skadetålighetsanalyserna. Omständighet 1) och 2) ovan innebär att skadlig skjuvbelastning är osannolik för en individuell kapselposition. Omständighet 3) och 4) ovan innebär att det är mindre sannolikt att skjuvbelastning leder till kapselhaverier. SSM anser att de brister som identifierats i SKB:s redovisning delvis kan balanseras mot att det finns gynnsamma omständigheter som motverkar de identifierade bristerna.

SSM bedömer sammanfattningsvis att risken för att en kapsel ska skadas allvarligt av skjuvlaster som ligger inom konstruktionsförutsättningarna är liten. SKB behöver dock i kommande steg av sitt program visa, via en kvalificeringsprocess att man med oförstörande provning vid tillverkningen förmår detektera, karaktärisera och storleksbestämma de acceptabla defektstorlekar som är framtagna i samband med skadetålighetsanalyserna.

De defektstorlekar som behöver detekteras i insatsen, speciellt inre defekter som inte är öppna mot insatsens mantelyta, kan bli hårt styrande och svåra att kvalificera i en kvalificeringsprocess för oförstörande provning efter tillverkningen. SSM anser därför att SKB behöver genomföra ytterligare studier av konsekvensen av yttre laster på kapselns hållfasthet och kopparhöljets täthet om insatsen skulle innehålla större sprickor än vad som SKB hittills postulerat i skadetålighetsanalyserna.

5.11 Korrosionsprocesser för koppar

I detta avsnitt återfinns en beskrivning av SKB:s redovisning kring kopparkorrosion under tiden från 1000 år till 100 000 år efter förslutning samt SSM:s bedömningar kring denna fråga. Processer som kan förmodas ge betydelsefulla bidrag till korrosion under de första 1000 åren beskrivs utförligt i avsnitt 4.10 i denna granskningsrapport. Bidrag till korrosion från dessa processer under de första 1000 åren utgör en förutsättning för analysen av det efterföljande korrosionsförloppet. Korrosionsprocessernas betydelse under de första 100 000 åren efter förslutning kan endast bedömas med utgångspunkt från båda tidsskalorna.

Motståndskraft mot korrosion av kapselns kopparhölje utgör en av de huvudsakliga säkerhetsfunktionerna som definieras i säkerhetsanalysen SR-Site (SKB SR-Site huvudrapport, figur 8-2, Can1 utgöra korrosionsbarriär). I detta avsnitt bedöms SKB:s redovisning av kopparkorrosion orsakad av olika processer och för olika förhållanden i bufferten så som omättad, intakt respektive eroderad. Det förutsedda förloppet för korrosion under förhållanden i en eroderad buffert är att nedträngning av utspädda vatten till deponeringspositioner leder till buffeterosion i en sådan omfattning att advektiva flödesförhållanden uppstår. SKB:s beräkningar syftar till hela perioden för slutförvarets utveckling och det görs ingen skillnad i beräkningarna för de första 1000 åren och tiden därefter. Kapselkorrosionens direkta effekter på slutförvarets skyddsförmåga inträffar enligt SKB:s redovisning under tiden efter 1000 år och de processer som har betydelse i detta sammanhang diskuteras i detta avsnitt. Vissa korrosionsformer som påbörjas tidigare och har sin största betydelse i den tidiga slutförvarsutvecklingen beskrivs dock i avsnitt 4.10 om de första 1000 åren efter slutlig förslutning. Dessa processer ingår därför inte ingående i detta avsnitt. För att få en sammanhållen bedömning av de relevanta korrosionsförloppen kan dock vissa upprepningar i förhållande till avsnitt 4.10 förekomma.

Under den initiala perioden för 1000 år som finns beskriven i kapitel 4 kommer korrosionsprocesser i anslutning till de deponerade kopparkapslarna att främst drivas och påverkas av inre förhållanden under den inledande perioden så som närvaro av



kvarvarande syre från driftfasen, återmättnadsfasen med närvaro av en gasfas, det initiala gammastrålfältet invid kapselytorna, den förhöjda temperaturen på grund av bränslets resteffekt samt korrosion med ämnen som finns eller kan bildas i tillförda konstruktionsmaterial som bentonit och armeringsjärn.

Efter det första 1000-talet åren kommer förhållanden i slutförvaret gradvis närma sig de normala för en av slutförvaret opåverkad berggrund. Andelen deponeringshål som blivit återmättade ökar gradvis, även om ett visst antal deponeringshål fortfarande kan vara omättade även efter 1000 år. Efter att reaktiva komponenter i tillförda material gradvis förbrukas kommer korrosionsprocesserna drivas av det omgivande grundvattenflödet i de sprickor som skär förvarsvolymen och i synnerhet i vissa deponeringshål som skärs av vattenförande sprickor. Utifrån SKB:s platsbeskrivande modell för Forsmark kan dock slutsatsen dras att materietransport i de flesta deponeringshålen styrs av diffusion både i bufferten, i berget samt i återfyllda deponeringstunnlar som ett resultat av avsaknaden av vattenförande sprickor. I andra deponeringshål styrs materietransporten av diffusivt utbyte mellan porvatten i bufferten och komponenter som tillförs eller transporteras bort via grundvattenflöden i sprickor i berget. I en mindre andel av deponeringshålen förväntar sig SKB på sikt att advektiva förhållanden kan uppstå i anslutning till kapselytorna på grund av bufferterosion orsakad av mycket utspädda grundvatten och således advektion både i berget och i deponeringshålen. Korrosionsbetingelserna under perioden efter 1000 år styrs därmed i högre grad av extern påverkan och förändrade omgivningsbetingelser ovan slutförvaret, i jämförelse med inre betingelser och påverkan av bränslet och den ursprungliga driften av slutförvaret. Det finns dock ingen skarp gräns mellan olika typer av processer så korrosion som ett resultat grundvattenflöden sker även för tiden före 1000 år. Eftersom säkerhetsbetydelsen för korrosion orsakad av grundvatten med och utan sulfid är störst för tiden efter 1000 år kommenteras dock denna korrosion enbart i detta kapitel.

I detta kapitel återfinns först en beskrivning av förväntade förhållanden i deponeringshålen som på sikt påverkar förutsättningarna för kapselkorrosion. Därefter följer en beskrivning av betydelsen av sulfidkorrosion för kapselns långsiktiga skyddsförmåga i slutförvarsmiljön. Efter det följer motsvarande redovisning för anoxisk korrosion av koppar i syrgasfritt vatten i olika typer av deponeringshål. Enligt SKB kan kapslar endast korrodera sönder då det utsätts för sulfidinnehållande grundvatten i deponeringshål med advektiva förhållanden. Utsläpp av radionuklider kan enligt SKB endast ske för detta fall och utgör därmed ett underlag för slutförvarets riskanalys. Dessa beräkningar är delvis avhängiga SKB:s kvantifiering av antalet deponeringshål som blir exponerade för advektiva förhållanden, sulfidinnehållet i grundvattnet och grundvattenflöde för dessa deponeringshål (se avsnitt 5.11 i denna granskningsrapport). Kapitlet avslutas med en redovisning och bedömning av kapselkorrosion av syre som orsakas av infiltration av glaciala smältvatten.

SKB har på SSM:s begäran inkommit med flera förtydliganden och kompletteringar relaterade till kapselkorrosion under tiden från 1000 år till 100 000 år efter slutlig förslutning:

- SKBdoc 1339716, Kompletterande information om kopparkorrosion
- SKBdoc 1396568, Lägesrapport om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten
- SKBdoc 1398013, Svar till SSM på begäran om komplettering avseende degraderingsprocesser för kapseln
- SKBdoc 1422182, Sulphide mass-transport limited corrosion
- SKBdoc 1396703, Svar till SSM på begäran om komplettering rörande långsiktig utveckling av grundvattenkemi på förvarsdjup
- SKBdoc 1396704, Betydelsen av mikrobiell sulfatreduktion med organiskt upplöst material (DOC)



- SKBdoc 1418966, Lägesrapport om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten december 2013
- SKBdoc 1448587, Steady state pressures in vials sealed with butyl rubber stoppers
- SKBdoc 1462125, Svar till SSM på begäran om komplettering med samlad redovisning av kopparkorrosion i syrgasfritt vatten
- SKBdoc 1473304, Samlad redovisning om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten
- SKBdoc 1472455, Study of H₂ gas emission in sealed compartments containing copper immersed in O₂-free water
- SKBdoc 1470267, Copper in ultrapure water

5.11.1 Omgivningsbetingelser i olika typer av deponeringshålspositioner samt förvarsutveckling under tiden 1000 år till 100 000 år efter slutlig förslutning

5.11.1.1 Underlag från SKB

SKB har i sin säkerhetsanalys dels sammanfattat tillgänglig kunskap om olika korrosionsprocesser (SKB TR-10-46; SKB TR-10-67), dels genomfört beräkningar för att utvärdera betydelsen av vissa korrosionsformer i perspektivet slutförvarets långsiktiga säkerhet (SKB TR-10-66). SKB:s strategi för att hantera korrosionsfrågor innefattar dels att påvisa att omfattningen av ett flertal korrosionsformer är liten i förhållande till kapselns tjocklek, dels att anföra argument varför vissa korrosionsformer kan uteslutas med hänvisning till de omgivningsbetingelser och transportförhållanden som råder i slutförvarsmiljön. Betydelsen av olika korrosionsprocesser kan därmed delas in i olika klasser av korrosionsprocesser:

- som sker i försumbar omfattning i slutförvarsmiljön
- som sker i sådan liten omfattning att risk för kapselbrott inte föreligger i aktuella tidsskalor
- som innebär risk för att en kapsel kan falla i en viss tidsskala.

Den sistnämnda kategorin beaktas i riskanalysen och kan användas som en utgångspunkt för dimensionering av korrosionsbarriären. SKB utgår från en kapseltjocklek på 50 mm men har även för utvärdering av BAT gjort vissa beräkningar för en kapseltjocklek på 100 mm respektive 25 mm. Eftersom det är ett mycket omfattande arbete att anpassa kapselns tjocklek för dimensionering av korrosionsbarriären diskuterar SKB även användning av acceptanskriterier för deponeringshål som en metod att säkerställa begränsningar i masstransport och därmed begränsningar med avseende på korrosionens omfattning. SKB bedömer att det är så stor skillnad i säkerhetsbetydelsen av olika korrosionsformer att det inte behöver göras någon formell summering av bidrag till korrosion från olika korrosionsformer.

Baserat på SKB:s data från platsundersökningarna vid Forsmark samt från den hydrogeologiska analysen av slutförvarets utveckling efter återmättad kan olika typer av deponeringshål identifieras:

- utan vattenförande sprickor, cirka 70 % av alla deponeringshål vid Forsmark
- med vattenförande sprickor och låga grundvattenflöden
- med vattenförande sprickor och höga grundvattenflöden.

Betydelsen av vattenförande sprickor är ur korrosionssynpunkt hastigheten med vilken korroderande ämnen kan tillföras kopparkapslarna via grundvattenflödet i berget eller alternativt med vilken hastighet som reaktionsprodukter förs bort från kapslarna vilket medför ett upprätthållande av vissa korrosionsprocesser (SKB TR-10-66, avsnitt 5.4). SKB benämner denna typ av transportväg Q1 (SKB TR-10-50, figur 3-1). För deponeringshål utan korsande vattenförande sprickor finns ingen direkt koppling till

grundvattenflödet i berget. Det finns dock möjliga indirekta transportvägar där korroderande ämnen tillförs via först advektion och sedan diffusion i buffertens axiella riktning via den störda zonen eller via sprickor som skär deponeringstunneln ovan deponeringshålen, vilka benämns Q2 respektive Q3. Dessa har dock inte beaktats av SKB i sammanhanget kapselkorrosion. Distinktionen mellan deponeringshål med högre respektive lägre grundvattenflöden har enligt SKB:s analys en signifikans för korrosion eftersom de högre grundvattenflödena innebär risk för att kapslarna fallerar på grund av korrosion i de tidsskalor som behandlas i säkerhetsanalysen. SKB planerar att utveckla metoder för att detektera och undvika deponeringshål med stora flöden och långa sprickor. I SR-Site beaktar SKB för deponeringshålen ett inflödeskriterium och användning av EFPC-kriteriet som i viss utsträckning begränsar förekomsten av deponeringshål med höga flöden. Dessa kriterier har dock definierats i huvudsak med utgångspunkt från andra processer i slutförvarsmiljön förutom korrosion så som kanalbildningserosion av bufferten och skjuvrörelser i berget i samband med jordskalv. SKB tillämpar även det transmissivitetsrelaterade så kallade T/L-kriteriet för att utesluta sprickor med höga flöden. SKB anser att möjlighet att minska riskbidraget från kapselkorrosion finns om positioner i berget med höga flöden kan identifieras med hög tillförlitlighet och beaktas vid inplaceringen av deponeringshål, t.ex. genom analys av pilothål (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 15.3.5). En annan viktig fråga med koppling till kvantifiering av kopparkorrosion avser risk för termisk spjälkning av deponeringshållsväggarna som medför en snabbare transport av korroderande ämnen i buffertens randzon och därmed snabbare kopparkorrosion (SKB TR-10-66, figur 5-5). SKB anser dock att inga särskilda åtgärder inom detta område erfordras eftersom påverkan på risk bedöms vara förhållandevis liten.

SKB:s redovisning av grundvattenflödesberäkningar behandlas utförligt i avsnitt 5.4.1 i denna granskningsrapport. Särskilt relevant för korrosionsberäkningarna är resultaten för parametern Ur från modellen för förvarsskalan som SKB tillämpar för att beräkna det ekvivalenta flödet Q_{eq} för korrosionsberäkningarna (SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.6). SKB tillämpar i korrosionsberäkningarna resultat från ett antal olika hydrogeologiska fall beräknade för den tempererade fasen (SKB TR-10-66, appendix 2). SKB antar i korrosionsberäkningarna grundvattenflöden som motsvarar de som har beräknats för den tempererade fasen och pekar på att flödenas medelvärde för hela glaciationscykeln är ungefär 20 procent lägre än flödena under den tempererade fasen (SKB TR-10-66 avsnitt 4.3.6, SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2). SKB beaktar även en situation där inlandsisens front ligger stilla över slutförvaret i 200 eller 1000 år och beräknar att sannolikheten för att detta ska inträffa är låg och att även inverkan av de högre flödena under en sådan tid är så liten att detta kan försummas (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2).

SKB:s beräkningar visar också att även för tiden efter de första 1000 åren kan omättade betingelser föreligga i vissa deponeringshål (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.8). Detta resultat har en betydelse ur korrosionssynpunkt eftersom korroderande ämnen kan transporteras via en gasfas (SKBdoc 1437441). I en komplettering till ansökan har det visats att den intakta bergmatrisens hydrauliska konduktivitet har en stor inverkan på återmättnadstiden (SKBdoc 1415879). Enligt dessa beräkningar kommer samtliga deponeringshål vara återmättade under de första 1000 åren vid förhållandevis höga värden på matriskonduktiviteten, medan vid låga värden kan en betydande andel av deponeringshålen fortfarande vara omättade även efter de första 1000 åren.

Beträffande kemiska förhållanden som kan påverka kopparkapslarnas korrosionsförlopp förväntas stabila reducerande betingelser ha utvecklats under de första 1000 åren med redoxpotentialer kring -200 mV (SKB TR-10-58). Korrosionsformer under sådana betingelser innefattar sulfidkorrosion och korrosion med rent syrgasfritt vatten. Den enda

identifierade avvikelser från detta tillstånd avser den glaciala fasen då snabb infiltration av smältvatten under ogynnsamma betingelser och för ett fåtal deponeringspositioner kan medföra oxiderande betingelser (SKB TR-10-57). Den viktigaste kemiska variabeln ur korrosionssynpunkt är annars sulfidhalterna i grundvattnet vilka enligt platsundersökningsresultat kan variera mellan ca 0,1 – 100 µM (SKB TR-10-39). Betydelsen av sulfid beror på att den möjliga tillförseln till kapselytan av detta korroderande ämne förväntas vara proportionell mot halten i det omgivande grundvattnet. Övriga grundvattenkemiska komponenter av betydelse för kapselns långsiktiga korrosion är bl.a. löst väte och metan samt upplöst organiskt material som kan bidra till mikrobiell sulfatreduktion och därmed bildning av sulfid i anslutning till slutförvaret (SKB SR-Site huvudrapport, figur 8-2). SKB förväntar sig att grundvattnets pH håller sig inom tämligen väl definierade gränser ($4 < \text{pH} < 11$) vilket bl.a. är av vikt för att undvika korrosion påverkad av klorid. Indirekt med beaktande av risken för buffererosion påverkas kopparkorrosion även av grundvattnets salthalt, men dessa frågor beskrivs i andra delar av denna granskningsrapport. Val av buffertmaterial och återfyllnadsmaterial påverkar också i viss utsträckning kemiska och fysikaliska förhållanden invid kapselytorna av betydelse för kopparkorrosion bl.a. eftersom dessa material innehåller sulfid och organiskt material. Den långsiktiga grundvattenkemiska utvecklingen i förhållande till dagens situation påverkar förutsättningar för korrosion, men förändringarna på förvarsdjup är generellt måttliga (SKB TR-10-58).

SKB:s redovisning av den grundvattenkemiska utvecklingen behandlas utförligt i avsnitt 4.6 och 5.5 i denna granskningsrapport och mer specifikt behandlas sulfidkoncentrationerna i avsnitt 4.6.3.1. SKB har sammanfattat utgångspunkterna för kvantifieringen av sulfidhalter för korrosionsberäkningarna och de fall som undersöks för att utvärdera korrosionsresultatens känslighet för sulfidhalterna (SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.5; SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2). SKB framhåller att bidrag från sulfatreducerande bakterier beaktas vid kvantifieringen av sulfidhalterna (SKB TR-10-66 avsnitt 5.3.2, SKB SR-Site huvudrapport avsnitt 12.6.2). I avsnitt 4.10.4.1 och 5.5 i denna granskningsrapport behandlas SKB:s redovisning kring sulfatreducerande bakteriers påverkan på sulfidhalterna. Vidare anger SKB att sulfidkoncentrationen under en glaciationscykel antas vara lika med den för tempererade förhållanden vilket anses vara ett pessimistiskt antagande (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.7 och 10.4.7). Sulfidkoncentrationerna vid deponeringspositionerna förutsätts variera i de rumsliga dimensionerna men förutsätts vara konstanta i tiden över den en miljon långa analysperioden. Detta angreppssätt medför fler kapselbrott än ännu mer förenklade beräkningar baserade på att medelvärdet för sulfidkoncentrationerna föreligger vid alla deponeringshål (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2).

Kapseltemperaturen sjunker från maximalt cirka 100°C mot rumstemperatur under ett antal tusentals år, vilket också har en betydelse för bedömningen av den långsiktiga kapselkorrosionen. Temperaturen når ca 70°C efter 100 år och 50°C efter 1000 år.

5.11.1.2 SSM:s bedömning

SSM konstaterar att SKB med utgångspunkt från platsundersökningsresultat har tagit fram ett godtagbart och väl underbyggt underlag för bedömningen av hydrogeologiska och grundvattenkemiska förhållanden av betydelse för kopparkorrosion. Detaljerade bedömningar kring dessa frågor återfinns i andra delar av denna granskningsrapport. SSM anser att SKB har genomfört omfattande analyser för att belysa betingelser av relevans för allmän korrosion av kopparkapseln under olika förhållanden som kan förväntas förekomma under slutförvarets långsiktiga utveckling med en fullständigt mättad buffert. SSM anser att SKB:s kvantifiering av massöverföring av sulfidjoner via diffusion och advektion med Qeq-konceptet är ett rimligt angreppssätt.

SSM anser att det finns behov av en tydligare specifikation för att underbygga analysen av korrosionsbarriärens långsiktiga beständighet. Ytterligare mätningar i berggrunden och ytterligare karaktärisering av tilltänkta buffert- och återfyllnadsmaterial förväntas kunna bidra till en mera detaljerad analys av korrosionsprocesser i slutförvarsmiljön. SSM anser vidare att ytterligare modelleringsinsatser behöver genomföras för att med bättre precision analysera utvecklingen av kemiska betingelser i direkt anslutning till kapselytorna snarare än i deponeringshålskala och i slutförvaret i stort. SSM bedömer dock att SKB har identifierat och analyserat de händelser och processer kopplat till klimatutveckling, hydrogeologi och grundvattenkemi med störst betydelse för analys av förutsättningarna för kapselkorrosion. Eftersom kapselkorrosion påverkas av buffertens integritet är den viktigaste utvecklingen sannolikt grundvattnets salthalt och infiltration av glaciala smältvatten. Variationer av de viktigaste grundvattenkemiska variablerna så som pH och redox är välbuffrade som ett resultat av grundvattnets alkalinitet och innehåll av lösta reducerande ämnen, samt berggrundens och bentonitmaterialens innehåll av buffrande mineral. Stora förändringar av pH bedöms vara mycket osannolika även om vissa pH-höjningar kan orsakas av närvaron av cement i slutförvarmiljön samt att vissa höjningar av pH kan ske i samband med infiltration av glaciala smältvatten. Grundvattnets salthalt som indirekt påverkar förutsättningar för korrosion kommer att förändras gradvis i ett cykliskt förlopp. Inverkan av denna variabel kan endast påverkas i liten omfattning via valet av förvarsdjup.

SSM konstaterar att korrosionsförloppet skiljer sig avsevärt mellan deponeringshål som snabbt blir återmättade och de som förblir omättade under lång tid. Olika typer av korrosionsprocesser föreligger beroende på förekomsten av en gasfas och buffererosion. Höga flöden ger snabb återmättnadstid och en tidig utveckling av en gastät buffert men medför samtidigt risk för långsiktig buffererosion. Låga eller inga flöden ger lång återmättnadstid men ingen risk för buffererosion och endast mycket små mängder tillfört grundvatten. Omättade förhållanden förekommer i alla hål under ett tidigt stadium och eroderade förhållanden förekommer i ett sent stadium för ett fåtal deponeringshål. Omättade deponeringshål med eroderad buffert förekommer sannolikt inte. De kvarstående kategorierna är därför:

- deponeringshål med intakt omättad buffert
- deponeringshål med eroderad buffert
- deponeringshål med intakt mättad buffert.

För vissa korrosionsprocesser skiljer sig förutsättningarna radikalt mellan dessa tre kategorier av deponeringshål. De två förstnämnda kategorierna är med all sannolikhet av störst betydelse ur korrosionssynpunkt. Korrosionsformer som är specifika för omättade och eroderade förhållanden bedöms endast i liten omfattning vara additiva eftersom de är kopplade till deponeringshål med olika karaktäristik. SSM anser att den mest betydelsefulla osäkerheten som påverkar korrosionsprocessernas utveckling avser långsiktig vattentillförsel i deponeringshål utan vattenförande sprickor. Dessa korrosionsmekanismer beskrivs i kapitel 4 men de kan även vara av betydelse för denna tidsperiod. SKB behöver i kommande steg av sitt program genomföra både experimentella och teoretiska studier inklusive platsspecifika mätningar för att bättre underbygga kvantifieringen av återmättnadsförloppet i deponeringshålskala. SSM instämmer med SKB att termisk spjälkning har stor betydelse för transport mellan buffert och vattenförande sprickor, men att processens betydelse har beaktats på ett godtagbart sätt av befintliga modeller.

5.11.2 Sulfidkorrosion under återmättade förhållanden för intakt buffert

5.11.2.1 Underlag från SKB

SKB förutsätter i sina analyser att tillförda sulfider reagerar fullständigt och momentant vid kontakten med kopparkapslarna. Effekter av en begränsad reaktionshastighet för korrosionsprocessen beaktas därmed inte. Korrosionsprodukten anses i samtliga fall vara $\text{Cu}_2\text{S}(s)$ eftersom denna fas ger den mest omfattande korrosionen för varje tillförd vätesulfidjon. Det har föreslagits att sulfid möjligen kan katalysera en korrosionsprocess utan att själv förbrukas, men SKB åberopar experimentella data och mekanistisk förståelse för korrosionsprocessen för att motivera förbrukning av tillförd sulfid under bildning av $\text{Cu}_2\text{S}(s)$ (SKBdoc1422182). SKB åberopar också experimentella undersökningar av sulfidkorrosion för att motivera antagandet om allmän korrosion av koppar. I dessa undersökningar bildas porösa och icke-passiverande ytfilmer av kopparsulfider i det lägre intervallet av sulfidkoncentrationer som anses vara relevant för slutförvarsmiljön. SKB:s beräkningar av sulfidkorrosion under återmättade förhållanden och intakt buffert utgår ifrån att den diffusiva masstransporten av sulfid är begränsande för korrosionen och att transportmotståndet vid gränssytan mellan en bergspricka som skär deponeringshållet och bufferten är en kritisk faktor för korrosionshastigheten (SKB TR-10-66, avsnitt 4). Om termiskt inducerad spjälkning förekommer minskar transportmotståndet vid gränssytan mellan berg och buffert och transportmotståndet i bufferten påverkas. SKB redovisar två alternativa beräkningssätt för transportmotståndet när spjälkning har förekommit (SKB TR-10-66, avsnitt 4.2.1, ekvation 4-15 och 4-16). SKB drar dock slutsatsen att de två beräkningssätten ger likartade resultat och att den mer pessimistiska varianten inte behöver beaktas i den vidare analysen (SKB TR-10-66, avsnitt 5.3.4). Korrosionshastigheten bestäms sedan utifrån sulfidkoncentrationen i grundvattnet, det relevanta ekvivalenta flödet Q_{eq} , diffusionsgeometrin i bufferten och kapselns geometri (SKB TR-10-66, ekvation 4-19). Vid dessa beräkningar använder SKB en probabilistisk ansats för fördelningen av vattenflödet i deponeringshålen samt 90:e percentilen av den sulfidhaltsfördelning som har uppmätts vid Forsmark (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.13).

SKB redovisar resultat för fördelningen av sulfidkorrosionshastigheter under antagande av intakt buffert för de olika beaktade fallen (SKB TR-10-66, avsnitt 5.3.4; SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.13). Slutsatsen är att korrosionsdjupet efter en miljon år för den mest ansatta kapseln ungefär blir 0,06 mm för fallet utan spjälkning, 0,6 mm för fallet med spjälkning och att ett korrosionsdjup på 7,8 mm erhålls om det antas att den maximalt uppmätta sulfidhalten i Forsmark antas råda vid alla deponeringshål under hela analysperioden. SKB anser dock att det sistnämnda beräkningsfallet är helt orealistiskt. Alla dessa resultat bygger på antagandet att den okorrelerade modellen för förhållandet mellan sprickstorlek och transmissivitet som ger de mest omfattande korrosionsdjupen (SKB TR-10-66, figur 5-2 till 5-4). SKB bedömer att korrosionens omfattning överskattas i beräkningarna eftersom alla sprickor antas skära deponeringshållet på en höjd där kapseln ligger och att Q_{eq} -värdena från flera sprickor adderas samtidigt som det antas att endast en spricka skär deponeringshållet. Det senare leder till att korrosionsangreppet antas vara mer koncentrerat och att korrosionsdjupet därför blir större (SKB TR-10-66, avsnitt 5.3.4). Baserat på massbalansberäkningar redovisar SKB att korrosion av koppar orsakad av sulfid från pyrit i buffertmaterialet endast påverkar korrosion av kopparhöljet marginellt, maximalt 2,9 mm. Med beräkningar baserade på diffusion och urlakning av pyrit erhålls korrosionsdjup på maximalt 114 mikrometer (SKB TR-10-66 avsnitt 5.3.1). SKB redovisar även att ökade flöden under en utökad period som antas vara 1000 år av en stillastående isfront över slutförvaret har en försumbar inverkan på korrosionsberäkningarna (SKB TR-11-01 avsnitt 12.6.2). SKB framhåller slutligen att det inte finns några betydande osäkerheter när det gäller korrosionsgeometrin för fallet med intakt buffert (SKB TR-10-66, avsnitt 5.3.5; SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2). SKB



kommer fram till att resultatet av analysen inom ramen för korrosionsscenarioet för intakt buffert inte talar emot slutsatsen från referensutvecklingen och att marginalen till kapselbrott är betydande och att det därför inte krävs ytterligare korrosionsberäkningar i syfte att undersöka känsligheten för olika parameterar för fallet med intakt buffert.

I avsnitt 4.10.5.1 i denna granskningsrapport behandlas SKB:s redovisning kring lokal korrosion under reducerande förhållanden. SKB:s slutsats är att för sulfid- och kloridkoncentrationer som är relevanta i slutförvarsmiljön finns ingen risk för gropkorrosion. SKB gör också bedömningen att det inte finns någon väletablerad mekanism för spänningskorrosion och sprickbildning av koppar under reducerande kemiska förhållanden (SKB TR-10-46).

5.11.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s analys av korrosion för kopparkapslar med intakt mättad buffert med sulfid i slutförvarsmiljön inklusive bildning av korrosionsprodukter har baserats på en godtagbar mekanistisk förståelse av korrosionsförloppet samt experimentella studier och observationer inom såväl SKB:s program som inom andra sammanhang. SKB:s konceptuella förståelse av sulfidkorrosion är väl motiverad och bygger i huvudsak på etablerad kunskap. Egenskaper hos kopparsulfider är väl kända bl.a. beroende på dessa mineralers stora kommersiella betydelse. Antagandet om momentan reaktion mellan lösta vätesulfidjoner och koppar är konservativt från ett konceptuellt perspektiv men har beroende på långsam transport förmodligen ingen direkt påverkan på beräkningarna förutom möjligen i fallet med en eroderad buffert. SSM anser emellertid att antagandet att sulfid konsumeras momentant inte kan vara icke-konservativt med avseende på lokal korrosion som gropkorrosion och spänningskorrosion. Enligt SSM:s bedömning finns det rimliga experimentella belägg för SKB:s slutsatser kring förbrukning av sulfid samt allmän korrosion i slutförvarsmiljön. SSM anser således att det är godtagbart att använda massbalanser som stöd för beräkningar av allmän korrosion. Samtidigt finns dock experimentella undersökningar som visar att passiverande ytfilmer av kopparsulfider kan bildas åtminstone vid något högre sulfidhalter (Mao m.fl., 2014) och vissa frågetecken kvarstår kring sulfidkorrosionsmekanismerna i en miljö med höga kloridhalter (Scully och Edwards, 2013). Förhållanden som gynnar gropkorrosion så som höga sulfidhalter och förhöjda temperaturer är sannolikt mest aktuella i den tidiga fasen av slutförvarets långsiktiga utveckling efter slutlig förslutning, men risken för gropkorrosion behöver beaktas under hela tidsperioden för slutförvarets långsiktiga utveckling. För dessa frågor behöver SKB enligt SSM:s bedömning genomföra förnyade insatser under kommande steg av ett slutförvarsprogram och utöka analysen och representation av denna typ av processer i scenarionanalysen. Så som framgår i avsnitt 4.10.5.2 av denna granskningsrapport anser dock SSM att risken för gropkorrosion främst kan kopplas till omättade deponeringshål med diffusion av vätesulfid i gasfas.

SSM anser att SKB:s angreppssätt med att utgå från att den diffusiva masstransporten av sulfid är begränsande för allmän korrosion och att transportmotståndet vid gränssytan mellan en skärande bergspricka och bufferten därför är styrande för korrosionen är ändamålsenlig. SSM:s externa experter konstaterar att SKB:s sätt att genomföra diffusionsberäkningar för sulfid med Qeq-ansatsen är rimlig och numeriskt effektiv (SSM Technical Note 2013:36). SSM bedömer även att SKB:s hantering av spjälkning i korrosionsberäkningarna för intakt buffert genom att ändra Qeq-termen för övergången mellan berg och buffert är ändamålsenlig och ger relevanta resultat. SSM delar SKB:s slutsats att det är konservativt att anta den maximalt uppmätta sulfidkoncentrationen för alla positioner under hela analysperioden. Att SKB antar att allt flöde koncentreras i en spricka i beräkningarna kan leda till en viss koncentration av korrosionsangreppet vilket även SSM anser är ett rimligt antagande. SSM:s externa experters beräkningar av sulfidinducerad korrosion med en numerisk modell är i överensstämmelse med SKB:s



resultat (SSM Technical Note 2013:36). SSM noterar att SKB inte verkar ha beaktat bidrag för sulfid tillförsel från vattenflöden i deponeringstunnelns sulas störda zon som i SKB:s redovisning benämns Q2. Grundvattenflödena längs Q2 förefaller vara högre än längs Q1 (SKB R-09-20, appendix E) samtidigt som diffusionsvägen från EDZ till kapseln är betydligt längre än den radiella diffusionsvägen i bufferten. SSM anser dock att SKB närmare behöver redogöra för sulfid tillförsel genom EDZ i kommande steg av sitt program.

SSM konstaterar att indata till korrosionsberäkningarna under intakta mättade buffertförhållanden har vissa osäkerheter, exempelvis när det gäller kvantifiering av grundvattenflöden, men SSM bedömer att SKB har beaktat osäkerheter i tillräcklig utsträckning och att de beräknade korrosionsdjupen som ett resultat av allmän korrosion av sulfid är så pass små i förhållande till kapseltjockleken att det finns god marginal för att kapselbrott inte ska ske före 100 000 år efter slutlig förslutning. SSM noterar SSM:s externa experters bedömning att det är mindre sannolikt att kapselbrott uppstår inom en miljon år till följd av sulfidkorrosion med beaktande av platsförutsättningarna i Forsmark och en sulfidtransport till kapselytorna som begränsas av diffusion. SSM anser dock att den längre tidsskalan på en miljon år innebär en större osäkerhet så till vida att scenariosäkerhet och mindre kända konceptuella osäkerheter kan visa sig mer betydelsefulla än vad som hittills är känt och att antagandet av upprepade glaciationscykler behöver beaktas.

5.11.3 Sulfidkorrosion för eroderad buffert och advektiva förhållanden

5.11.3.1 Underlag från SKB

SKB kvantifierar kapselkorrosion till följd av buffererosion och tillförsel av sulfid som finns i grundvattnet och som genereras av sulfatreducerande bakterier för ett antal fall (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2, figur 12-16 och 12-17). Dessa fall innefattar:

- ett fall som utgår från att tiden för att uppnå advektiva förhållanden i aktuella deponeringshål beräknas i enlighet med referensutvecklingen, ett gränssättande fall som antar att advektiva förhållanden råder under hela analysperioden, samt ett fall som antar att ingen buffererosion sker
- tre varianter av korrelation mellan sprickstorlek och transmissivitet i den hydrogeologiska DFN-modellen
- ett basfall och tre fall med alternativa antaganden om sulfidhalterna i grundvattnet
- ett fall där termiskt inducerad spjälkning förekommer i deponeringshålens väggar och ett fall utan spjälkning (dock endast för ett fall med intakt buffert)
- ett basfall och ett alternativt fall för förhållandet mellan sprickapertur och transmissivitet
- ett basfall och två alternativa fall för hur stor buffertförlust som krävs för att advektiva förhållanden ska uppstå
- ett basfall och ett alternativt fall för korrosionsgeometrin
- ett basfall och två alternativa fall för kapselns tjocklek
- ett basfall och två alternativa fall för urvalskriterier för deponeringshål.

Bland dessa fall definierar SKB den centrala korrosionsvarianten som en kombination av buffererosion enligt referensutvecklingen med antagande av den semikorrelerade varianten av den hydrogeologiska DFN-modellen och efterföljande korrosion som styrs av advektiv tillförsel av sulfid (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.3). I övrigt tillämpas för den centrala korrosionsvarianten de antaganden som i punktlistan ovan betecknas som basfall. Den centrala korrosionsvarianten bedömer SKB som representativ för huvudscenariot eftersom den har en viss sannolikhet att inträffa givet de antaganden som



görs i analysen och att den är förenlig med förvarets referensutveckling (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.9.2).

SKB:s beräkningar av korrosionshastigheter till följd av advektiv tillförsel av sulfid genomförs för alla beskrivna fall med utgångspunkt från ett materieöverföringsuttryck (SKB TR-10-66, ekvation 4-25). Förutom kända fysikaliska konstanter beror kopparkorrosionshastigheten på sulfidkoncentrationen i grundvattnet $[HS^-]$, det ekvivalenta flödet Q_{eq} i deponeringshålet och korrosionsarean A_{corr} . SKB:s kvantifiering av sulfidhalterna och grundvattenflödena som redovisas är samma som för fallet med intakt buffert (SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.5, 4.3.6, 5.3.2 samt appendix 2). För deponeringshål med låga flöden är Q_{eq} lika med volymsflödet i den del av sprickan som skär deponeringshålet multiplicerat med en faktor två, medan Q_{eq} för höga flöden beräknas med antagandet att inte all sulfid som flödar genom deponeringshålet kommer i kontakt med kapselytan (SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.2). SKB:s redovisning av eroderad volym behandlas i avsnitt 5.8.1 i denna granskningsrapport. SKB antar att korrosion äger rum på den sida av kapseln som ligger uppströms i förhållande till grundvattenflödet från en spricka som skär deponeringshålet i rät vinkel. Höjden för korrosionsangreppet antas vara lika med buffertjockleken 35 cm (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2). SKB redovisar även ett gränssättande pessimistiskt fall som utgår från att korrosionsangreppet växer cirkulärt i en korrosionsgrop utifrån en punkt i ett radiellt tvärsnitt av kapseln (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2, figur 12-15; SKB TR-10-66, SKBdoc 1385068). Arean för denna cirkel approximeras av SKB som lika med arean för en rektangel vars ena sida motsvarar kapseltjockleken. Ur detta resonemang följer att en minimal korrosionshöjd motsvarar cirka 8 cm. SKB förutsätter i beräkningarna en initial kapseltjocklek på 47 mm (SKB TR-10-52, avsnitt 4.1.12). Därutöver beräknar SKB antalet kapselbrott utifrån antagandet att deponeringshålen med de högsta flödena kombineras med de högsta uppmätta sulfidhalterna ned till flöden och sulfidhalter som inte ger kapselbrott under en miljon år. Sannolikheten för kapselbrott beräknas sedan genom att dividera antalet deponeringshål som under en miljon år ger kapselbrott för en uppmätt sulfidhalt med antalet representativa sulfidhaltsprover som har erhållits från platsundersökningarna (46 st.). Detta upprepas för alla sulfidhalter och slutligen summeras resultaten från alla sulfidhalter (SKBdoc 1346686).

SKB beräknar tidsåtgång tills att sulfidkorrosion leder till kapselbrott med början vid den tidpunkt då advektiva förhållanden har uppstått (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.9; SKB TR-10-66, avsnitt 5.3.5; SKBdoc 1346686; SKBdoc 1396663). För det centrala korrosionsfallet som bygger på det semikorrelerade hydrogeologiska basfallet erhålls i medel 0,117 kapselbrott efter en miljon år och för fallet med pessimistisk sprickapertur redovisar SKB 0,166 kapselbrott efter en miljon år (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2, figur 12-16). Fallet med tid tills advektiva förhållanden baserat på att bufferterosion förekommer under halva glaciationscykeln påverkar inte antalet genomkorroderade kapslar (SKBdoc 1448717).

Utöver bufferterosionsfall som utgår från referensutvecklingen genomför SKB även beräkningar med antagandet initial advektion i alla deponeringspositioner för DFN-modellens tre olika korrelationsfall. Det okorrelerade fallet med initial advektion ger med 1,22 kapselbrott efter en miljon år det minst fördelaktiga resultatet (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2, figur 12-16). SKB utvärderar dessutom effekten av olika antaganden beträffande sulfidkoncentration i grundvattnet och effekter av en pessimistisk korrosionsgeometri. Resultat för dessa fall är att i medeltal mellan 0,062 och 0,557 kapselbrott äger rum efter en miljon år. För att utvärdera effekten av osäkerheter i den hydrogeologiska DFN-modellen redovisar SKB antalet kapselbrott för de olika realiseringarna (SKB TR-10-66, figur 5-7). Som ett led i att undersöka bästa möjliga teknik när det gäller kapselutformning och förvarslayout redovisar SKB dessutom resultat



för antalet kapselbrott för en fördubblad eller halverad kapseltjocklek samt effekten av olika urvalskriterier för deponeringshålspositioner (SKB TR-10-66, figur 5-10). SKB redovisar för fördubblad kapseltjocklek 0,044 kapselbrott efter en miljon år medan en halverad tjocklek ger 0,22 kapselbrott. Att avstå från urvalskriterier för deponeringshål leder i medeltal till 3,7 kapselbrott efter en miljon år.

SKB framhåller att den semikorrelerade varianten av den hydrogeologiska DFN-modellen är mer kompatibel med platsdata än de andra hydrogeologiska varianterna och att buffererosionsmodellen är den bästa representationen av nuvarande kunskap även om konceptuella osäkerheter fortfarande föreligger. SKB betraktar de övriga beräkningsfallen som illustrativa exempel vilka gränssätter olika typer av osäkerheter. Alla dessa fall har dock förts vidare till konsekvensanalysberäkningarna. SKB konstaterar att de redovisade resultaten även är tillämpliga för varianten med global uppvärmning (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.3 och 10.6.3).

SKB framhåller att sulfidkorrosion under reducerande förhållanden endast uppträder som allmän korrosion och att lokal korrosion och därmed förknippade korrosionsgeometrier inte behöver beaktas (SKB TR-10-66 avsnitt 4.3.3).

5.11.3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s metod för att kvantifiera kopparkorrosionshastigheter för allmän korrosion orsakad av sulfid för deponeringshålspositioner med eroderad buffert utifrån resonemang kring massbalans och massöverföringshastigheter (SKB TR-10-66, ekvation 4-25) är rimlig och ändamålsenlig för säkerhetsanalysens behov. SSM:s detaljerade granskning av SKB:s beräkningssätt för korrosionstider har sammanfattats i en separat promemoria (SSM 2011-2306-32). Den viktigaste slutsatsen från denna promemoria är att SKB:s angreppssätt bedöms vara godtagbart.

SSM:s detaljerade granskning visar dock på att förutsättningarna för alla beräkningsfall inte helt har klarlagts och att vissa felaktigheter i beräkningar och tolkning av beräkningsresultat har påträffats. Volymen av den eroderade bufferten överskattades med en faktor två i beräkningarna av ekvivalenta flödet till kapseln. I ett svar på en kompletteringsbegäran (SKBdoc 1396663) bekräftar SKB förekomsten av detta fel i ansökansunderlaget men SKB argumenterar samtidigt att detta inte leder till en överskattning av kapselns beständighet. SSM:s externa experter har återskapat och analyserat SKB:s beräkningar av kapselkorrosion med sulfid under advektiva förhållanden och resultat från dessa beräkningar överensstämmer i grova drag med SKB:s (SSM Technical Note 2015:49). I dessa beräkningar har även vissa fall som SKB inte har beaktat studerats, exempelvis alternativa beräkningar för grundvattenflödet med tillämpning av den så kallade Hjerne-modellen för sambandet mellan sprickapertur och transmissivitet. Resultaten visar på en förhöjd kapselbrottsfrekvens med ytterligare någon kapsel som fallerar inom en miljon år. SKB antar en slumpmässig fördelning av sulfidhalter mellan hålen medan SSM:s experter antar en konstant sulfidkoncentration på 0,12 mM. Detta utgör en rimlig förklaring till varför SKB:s beräkningar ger färre kapselbrott. Experterna framhåller att tillförlitlighet för SKB:s analys till stor del beror på den statistiska fördelningen av sulfidhalter. SSM bedömer trots förekomst av vissa felaktigheter att SKB:s beräkningar är rimligt tillförlitliga samt är dokumenterade och kvalitetssäkrade på ett acceptabelt sätt.

SSM anser baserat på SKB:s beräkningsresultat att det är rimligt att kapselbrott inte sker under tiden upp till 100 000 år även för pessimistiska antaganden om initial advektion i deponeringshålen (SKB TR-10-66, avsnitt 5.3.5). Analysen pekar således på att kapselns säkerhetsfunktion sannolikt inte äventyras av korrosion med sulfid under relevanta tidsrymder. Analysen bedöms ha väsentligt större osäkerheter för tidsrymder över 100 000

år, men dessa är delvis ofrånkomliga och mindre betydelsefulla än de som identifierats för tidsskalor mindre än 100 000 år. SKB:s beräkningar tyder på att användning av urvalskriterier för deponeringshål är en betydelsefull åtgärd för att minimera risker kopplat till kapselkorrosion och buffererosion. SSM anser att SKB bör vidareutveckla metoder för att på ett effektivt sätt kunna välja bort deponeringspositioner som uppvisar ofördelaktiga förhållanden i perspektivet de tekniska barriärernas beständighet.

Även om det finns skäl för att förutsätta allmän korrosion snarare än gropkorrosion av koppar så som i SKB:s analys, anser SSM baserat på det tillgängliga kunskapsunderlaget att gropkorrosion i sulfidmiljö inte kan uteslutas. För eroderade buffertförhållanden i vilka betydande allmän korrosion av koppar förväntas ske skulle en omfattande och uthållig gropkorrosion för tiden efter 1000 år vara en betydelsefull process i SKB:s riskanalys.

SSM anser därför att det finns ett behov av fortsatta experimentella studier i samband med risken för att passiverande ytfilmer av kopparsulfider kan bildas i slutförvarsmiljön (Mao m.fl., 2014) och att vissa frågetecken kvarstår kring sulfidkorrosionsmekanismerna i en miljö med höga kloridhalter (Scully och Edwards, 2013). SKB behöver adressera dessa frågor med ytterligare experimentella undersökningar och utöka analysen och representation av denna typ av processer i scenarioanalysen.

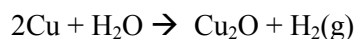
SSM anser att SKB under kommande steg i SKB:s program behöver genomföra ytterligare studier kring sammansättning och reaktivitet av organiska ämnen inom kategorin DOC i grundvatten, eftersom det inte kan uteslutas att oxidation av organiskt material leder till mikrobiell sulfatreduktion och bildning av ytterligare sulfider som kan reagera med kapseln.

SSM anser även att SKB närmare behöver redogöra för eventuell sulfid tillförsel genom EDZ i kommande steg av sitt program. SKB:s beräkningar tyder på att urvalskriterier för deponeringshål är en betydelsefull faktor för att minimera riskerna med kapselkorrosion och buffererosion. SSM anser att SKB bör vidareutveckla metoder för att på ett effektivt sätt kunna välja bort deponeringspositioner som uppvisar minst fördelaktiga förhållanden.

5.11.4 Korrosion av koppar i syrgasfritt vatten under vätgasutveckling för deponerade kapslar med omättad, mättad eller eroderad buffert

5.11.4.1 Underlag från SKB

När syre har förbrukats eller inte finns tillgängligt kan oxidation av metaller fortskrida genom sönderdelning av vatten under vätgasbildning. Processen fortskrider så länge vatten finns tillgängligt men vid tillräckligt låg redoxpotential och vid tillräckligt högt partialtryck av vätgas närmas tillståndet kemisk jämvikt och processen är därmed inte längre möjlig. Benägenheten att reagera med vatten varierar dock stort mellan olika metaller. För koppar har denna typ av reaktion varit föremål för en vetenskaplig diskussion. Förutom korrosion av koppar i syrgasfritt rent vatten har även processen benämnts anoxisk kopparkorrosion. Processen kan på ett förenklat sätt sammanfattas som:



I svenska grundvatten finns vid reducerande betingelser nästan alltid mätbara koncentrationer av sulfid i grundvattnet. Sulfid kan i vattenmiljö aktivera en oxidation av den kategori av metaller som reagerar med svavel.

SKB har i sin analys av koppars korrosionsegenskaper sedan början av SKB:s program förutsatt att koppar är immunt mot korrosion i rent syrgasfritt vatten och således enbart

förväntas reagera med sulfid i grundvattnet efter att kvarvarande syre har förbrukats (KBS teknisk rapport 90, 1978). Koppars immunitet i rent syrgasfritt vatten var dock på ett tidigt stadium ifrågasatt och experimentella resultat redovisades där vätgasutveckling kunde konstateras när ren koppar exponerades i rent syrgasfritt vatten (Hultquist, 1986, 1989). Frågan aktualiserades på nytt mot slutet av 2000-talet när nya resultat med samma innebörd presenterades, denna gång med hjälp av en mera avancerad experimentuppställning inkluderande ett palladium-membran som möjliggör att bildad vätgas avlägsnas från kopparytan och samlas upp i en särskild kammare för detektion (Szakalos m.fl., 2007). Författarna drog slutsatsen att vätgasens jämviktstryck över koppar är ca 2000 gånger högre än den stationära vätgashalten i atmosfären, dvs. ungefär 1 mbar vid 73°C. Jämviktberäkningar baserade på traditionella termodynamiska databaser visar dock på att jämviktstrycket av vätgas över koppar borde vara flera tiopotenser lägre. Som förklaring till resultaten angavs att befintliga termodynamiska data inte tar hänsyn till väteinnehållande korrosionsprodukter (förenklat representerade som H_xCuO_y).

I ansökansunderlaget framgår att SKB:s utgångspunkt för korrosionsanalysen är att koppar ur korrosionssynpunkt är termodynamiskt immunt i rent syrgasfritt vatten. Däremot redovisar SKB att kopparsulfider är termodynamiskt stabila i slutförvarsmiljön (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.4). Dessa utgångspunkter har funnits med ända från början av SKB:s program. Korrosion av koppar i rent syrgasfritt vatten ingår inte i SKB:s referensutveckling för säkerhetsanalysen (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10).

SKB genomförde vid tidpunkten för ansökan inte några egna experiment utan refererade till tidigare studier vid vilka ingen betydande vätgasutveckling hade kunnat påvisas (Simpson och Schenk, 1987; Eriksen m.fl., 1988). SKB redovisar dock i ansökan analys av ett hypotetiskt fall för att utröna betydelsen av kopparkorrosion i slutförvarsmiljö baserad på utgångspunkten att jämviktstrycket för processen är 1 mbar i enlighet med Szakalos m.fl. (2007). Detta innebär att korrosionsreaktionen avstannar när denna nivå har uppnåtts (SKB TR-10-66, avsnitt 5.4). Beräkningar genomfördes för tre fall; (i) diffusion av vätgas genom en mättad buffert, (ii) borttransport av vätgas med grundvattenflödet för eroderad buffert samt (iii) bildning av vätgas i en omättad buffert. Från dessa beräkningar redovisar SKB korrosionsdjup för en miljon år på 0,1 mm och 3 mm (för deponeringshål med högsta flödet) samt 2 μ m för beräkningsfall (i), (ii) respektive (iii). Så som framgår nedan har SKB efter det att ansökan lämnades in till SSM 2011 genomfört forskning för att belysa fenomenet ytterligare.

SSM har under granskningsprocessen efterfrågat kompletterande information om frågan, dels om processen som sådan, dels kring dess möjliga betydelse i slutförvarsmiljön (SSM 2011-2426). Kompletterande information kring de experiment som genomförts, den materialkaraktärisering som genomförts i samband med experimenten och en samlad redovisning inklusive slutsatser har också efterfrågats (SSM2011-2426-208). SKB:s argumentation i svaren följer två linjer; dels en fördjupad utvärdering baserad på processens betydelse i slutförvarsmiljön givet observerad vätgasproduktion (SKBdoc 1339716), dels en utvärdering baserad på egna experimentella undersökningar. SKB angav inledningsvis, baserat på experimentella resultat i Szakalos m.fl. (2007) som en grundförutsättning, att olika fall som beaktar inverkan av klorid, mikrober och samtidig sulfidkorrosion inte förväntas ha en stor betydelse för kapslarnas livslängd. SKB:s slutsatser baseras på kännedom om materieöverföringsbegränsningar i bufferten och berget baserat på experimentella undersökningar samt platsundersökningsresultat från Forsmark. SKB kunde dock inte, givet att processen existerar på ovan angivet sätt, kvantifiera betydelsen av en anoxisk korrosion där bildad vätgas konsumeras av mikrober i eroderade deponeringshål (SKBdoc 1339716).

Efter att ha genomfört ett eget forskningsprogram där processen har undersökts via såväl olika experimentella uppställningar som teoretiska analyser anser SKB att koppar inte kan betraktas som fullständigt immunt i termodynamisk mening (SKBdoc 1462125). SKB anser dock att omfattningen av kopparkorrosion i syrgasfritt vatten är mycket liten och att det inte finns något stöd för att korrosionen överskrider den omfattning som förutsägs av kända termodynamiska data. Detta innebär att även om korrosion i rent syrgasfritt vatten kan sägas existera som process under vissa förhållanden saknar den betydande praktisk inverkan på kapslarnas livslängd.

SKB:s experimentella och teoretiska program för utvärdering av kopparkorrosion i rent syrgasfritt vatten har omfattat följande punkter (SKBdoc 1473304):

- analys av kunskapsläget baserat på kända termodynamiska data
- undersökning av tidigare okända faser i Cu-O-H-systemet baserat på kvantmekaniska beräkningar och experimentell undersökning av CuOH
- analys av reaktivitet hos kopparytor
- korrosionsexperiment baserade dels på glasinneslutna system, dels på metallinneslutna system
- analys av koppars väteinnehåll före och efter exponering i rent syrgasfritt vatten

SKB anger att jämviktsberäkningar inkluderande kända förekomstformer i Cu-O-H-systemet ger koncentrationer av koppar kring 2×10^{-12} M och partialtryck för vätgas vid kemisk jämvikt kring 5×10^{-6} mbar. Detta är med andra ord nivåer som är runt 5 storleksordningar mindre än experimentella resultat med ett kvantifierat partialtryck för vätgas runt 1 mbar. Med utgångspunkt från verifierande kvantmekaniska beräkningar av de kända föreningarna Cu_2O , CuO och CuH har olika tänkbara konfigurationer av CuOH undersökts. CuOH har också syntetiserats experimentellt. SKB anger dock att CuOH spontant sönderdelas i Cu_2O och vatten. SKB anser därför att CuOH inte är tillräckligt termodynamiskt stabil för att ha betydelse för korrosionsprocessen.

En möjlig orsak till vätgasutveckling vid exponering av kopparbitar i syrgasfritt vatten är enligt SKB att kopparytorna snarare än själva bulkfasen reagerar med vattenfasen. Processen leder enligt SKB till en dissociation av vattenmolekyler under bildning av vätgas och ett på kopparytan adsorberat lager av OH_{ads} . För att bestämma omfattningen av denna process har SKB låtit genomföra kvantmekaniska beräkningar (Lousada m.fl., 2015) med resultatet att ytskikten kan, baserat på beräkning av ändringar i Gibbs fria energi, förväntas bli hydratiserat i omfattningen ett halvt monolager. Mer omfattande hydratisering t.ex. ett helt monolager sker inte spontant ($\Delta G^\circ > 0$), vilket överensstämmer med tidigare publikationer (Andersson m.fl., 2008). En viss mängd bildad vätgas under experiment med koppar skulle således kunna kopplas till ytskiktets reaktivitet, enligt SKB ca $2,4 \text{ ng/cm}^2$. SKB understryker att mekanismen inte är associerad med korrosion.

De korrosionsexperiment som har utförts för att bestämma omfattningen av korrosion av koppar i rent syrgasfritt vatten omfattar två principer, dels metallinneslutna system där vätgas samlas upp i en evakuerad metallkammare förbunden med reaktionskärlet med vatten och koppar via ett palladium-membran, dels glaskärl med vatten, koppar och en inert kvävgas-atmosfär ur vilken provtagning sker för att konstatera eventuell vätgasbildning. Den första metoden utvecklades av forskare vid KTH under många års arbete, medan den andra metoden utvecklades som en alternativ metod med finansiering från SKB för att utreda frågan kring korrosion i rent syrgasfritt vatten. Dessa försök benämns Micans experiment av SKB. SKB har även låtit genomföra experiment vid Uppsala universitet med en uppställning som är lik den som forskarna vid KTH har tagit fram (Szakalos m.fl., 2007).



SKB anger att förväntad vätgasutveckling baserad på etablerad termodynamik och kopparytans reaktivitet är så begränsad att den är svår att detektera i de korrosionsuppställningar som hittills har använts. Möjligen kan glaskärlsexperimenten detektera vätgas som bildats från ytreaktioner.

Beträffande SKB:s experiment kring vätgasbildning från koppar i metallinneslutna system vid Uppsala universitet konstaterar SKB att flera frågor av betydelse för mätningarnas tillförlitlighet har uppstått. I synnerhet två frågor bedömdes ha betydelse för de inledande experiment som genomförts vid Uppsala nämligen att bakgrunds nivåerna av vätgas var höga och i själva verket dominerar den sammanlagda vätgasbildningen, samt att visst läckage sannolikt uppstod i infästningen av palladium-membranet så att vätgas kunnat läcka ut till omgivningen. De höga bakgrunds nivåerna relateras till vätgasbildning från rostfritt stål i utrustningen. I en nyligen publicerad rapport beskrivs dock olika åtgärder som har vidtagits för att via värmebehandlingar av utrustning minska vätgasbakgrunden, samt även åtgärder för att täta palladium-membranet (SKB TR-16-01). Uppsala universitet har också utvecklat analysmetoder för studier av kopparytor, bulkfasen och vattenfasen. Resultat från korrosionsförsök som pågått i 29 månader med rengjorda och polerade kopparprov visar på en vätgasutveckling som endast i liten omfattning skiljer sig från bakgrundsexperiment, dvs. försök utan koppar. Olika försök att repa kopparytorna för att göra dem mera reaktiva ökade dock i vissa fall omfattningen av vätgasproduktionen något. Vid ytanalyserna kunde inga korrosionsprodukter detekteras och ökning av kopparhalter i vattenfasen var mycket liten (10^{-7} M).

I glasinneslutna system utvecklade av Micans (Microbial Analytics Sweden AB) placeras kopparbitar i provrör med rent vatten med en butylgummiförsegling. I varje rör finns en gasfas som initialt består av kvävgas. En rigorös procedur har utvecklats för att undvika kontaminering med syre under installation, provtagning och drift av försök. Förseglade provrör förvaras i kärl med kvävgasatmosfär och provtagning av gasfasen sker med jämna mellanrum med en nål, varav extraherad gasfas analyseras i en gaskromatograf för analys av väte- och syrehalt (SKB TR-13-13). Ett visst läckage av vätgas sker genom butylgummikorken men detta läckage anses vara förutsägbart och kvantifierbart (SKBdoc 1448587). SKB konstaterar att den typ av försök som Micans utfört har många fördelar i jämförelse med de metallinneslutna systemen därför att: (i) det inte finns några andra metalldelar än koppar som kan vara orsaken till vätgasbildning, (ii) den enkla experimentuppställningen medger noggranna mätningar utan störningar och tolkningsproblem associerade med mera komplexa system som inkluderar ett palladium-membran, (iii) kostnaden är låg och det är därför möjligt att göra många experiment och variera olika faktorer.

SKB har för att utnyttja möjligheten att variera olika faktorer undersökt ett antal kombinationer av kopparkvaliteter och provpreparationsmetoder med hjälp av Micans metod (SKBdoc 1448824). Kopparkvaliteter avser främst kopparhalt från extremt ren till den typ av mera normal renhetsgrad av koppar som SKB planerar för kapseltillverkning med bl.a. fosfortillsats. Provpreparationsmetoder innefattar; (i) elektropolering följt av vätgasreduktion och därefter uppvärmning, (ii) syralakning följt av ultraljudstvätt, (iii) uppvärmning till 400°C, eller alternativt (iv) ingen provpreparering. De första resultaten från dessa försök med s.k. kapselkoppar visade på en betydande vätgasutveckling som mest motsvarade partialtrycket 5 mbar vätgas (SKBdoc 1418966). Efter evakuering av gasfasen och tillsats av ren kvävgas producerades dock mindre vätgas, vilket enligt SKB talar för att vätgasproduktionen är ett övergående fenomen. Försök med ytbehandlad koppar enligt (i) ovan med hög renhetsgrad ger ingen mätbar vätgasutveckling i förhållande till blankprover med enbart vatten (SKBdoc 1448824). Vid en jämförelse av försök med högren koppar som preparerats på olika sätt enligt (i) – (iv) ovan konstaterar SKB att en viss vätgasutveckling kan noteras för obehandlad koppar men att den är



mycket lägre, den motsvarar som mest ett partialtryck kring 0,4 mbar. Ytbehandlad eller uppvärmd koppar gav mycket lägre vätgasbildning.

SKB bedömer att dessa bildade vätgasmängder skulle överensstämma med en reaktion som motsvarar ett monolager av kopparatomer. SKB anser att ytterligare skäl till att misstänka en inverkan av kopparytans struktur är att repade kopparbitar temporärt ger en väsentligt högre vätgasbildning, som dock visar en kontinuerligt avtagande trend. Vid försök med koppar med renhetsgrad 99,95 % kunde ingen väsentlig vätgasutveckling noteras medan försök med fosforlegerad koppar med motsvarande renhetsgrad (kapselkoppar Cu-0FP) medförde betydande vätgasbildning. SKB kunde efter vissa förberedande försök konstatera att viss vätgasutveckling sker för kapselkoppar även i provrör helt utan vatten vilket fick SKB att dra slutsatsen att temporär vätgasbildning kan vara kopplad till avgasning av väte i metallen. Visst belägg för denna slutsats anser SKB ha fått av att vid försök med koppar som värmts upp till 400°C är vätgasutveckling mycket mindre omfattande, vilket skulle kunna förklaras av att vätgas bunden till metallen redan i stor utsträckning avgasats under uppvärmningsbehandlingen. SKB har ingen definitiv förklaring till varför vätgasbildning är högre för kapselkoppar än för vanliga koppar av samma renhetsgrad, men de nämner som tänkbar förklaring att väte kanske är mindre hårt bunden på grund av fosfortillsatsen.

SSM har i kompletteringsbegäran efterfrågat en redovisning av vätehalter i koppar (SSM2011-2426-208). SKB redovisar mätningar av vätehalt i kopparprover genom uppvärmning av prov ända till smältning och detektion av väte i gasfasen med gaskromatografi (SKBdoc 1462125). SKB:s resultat antyder att den största andelen vätgas avges vid uppvärmningen av det första 100-talet antal grader. SKB konstaterar även att en stor del av vätet verkar finnas i koppars ytskikt och försvinner vid elektropolering av koppar som har använts vid försök vid Uppsala universitet (SKBdoc 1462125). Däremot verkar den ytbehandlingsmetod som har använts för försök i Micans provningsmetod inte ge någon betydande minskning av vätehalten. Beträffande försöken vid Uppsala konstateras att väteinnehållet i exponerade kopparprover endast marginellt översteg värmebehandlade prover och var ungefär en tiondel av innehållet i obehandlad koppar på 0,7 ppm (SKB TR-16-01). Med avseende på Micans försök konstaterar SKB att den totala vätgasbildningen i försök med kapselkoppar som mest motsvarar ungefär 2 $\mu\text{mol}/\text{år}$ och med beaktande av avtagande takt av vätgasbildning en total mängd frigjord vätgas på ca 4 μmol . Detta skall jämföras med det ursprungliga väteinnehållet baserat på innehållet ca 1 ppm vilket motsvarar 18 μmol .

SKB har fortsatt Micans försök utöver det som redovisats ovan med betydligt längre exponeringsperioder, upp till ca 2 år (SKB TR-15-03). SKB har också förutom de vanliga försöken i helt rent syrgasfritt vatten genomfört försök med vattenprover med olika pH och salthalter, liksom ett utökat antal experiment för att undersöka olika metoder för att preparera kopparproverna. Även om vissa preliminära resultat från dessa försök finns avrapporterade finns ännu ingen fullständig diskussion och analys av dessa resultat. För frågan kring salthaltens inverkan förlitar sig SKB istället på vissa försök som genomförts vid University of Toronto där koppar och vatten varit inneslutna i förseglade glasceller (Senior m.fl., 2013). Vid 75°C motsvarade vätgasutvecklingen en korrosionshastighet av 1 nm/år, och för försök med kloridhalter på 5 M och samma temperatur motsvarade vätgasutvecklingen en korrosionshastighet på som mest 4 nm/år. Kloridinnehållet har en betydelse så till vida att kloridjoner bidrar med betydande komplexbildning med koppar i lösning. SKB anser att det fortfarande finns oförklarade observationer kopplat till frågan så som låga bakgrundshalter för vätgas vid försöken vid Studsvik, den kraftiga effekten av SiC-repad koppar, den förhållandevis kraftiga vätgasutvecklingen vid KTH:s experiment och skillnaderna i kopparhalter i lösning mellan Micans och Uppsala universitets försök (SKBdoc 1473304).

5.11.4.2 SSM:s bedömning

SSM:s analys och bedömning av frågan kring korrosion i rent syrgasfritt vatten omfattar följande moment:

- konceptuell förståelse av korrosionsprocessen
- betydelsen för mättade deponeringshål med intakt buffert
- betydelsen för omättade deponeringshål
- betydelsen för mättade deponeringshål med eroderad buffert.

SSM konstaterar att såväl experimentella data som teoretiska analyser pekar på att koppar korroderar i syrgasfritt vatten i frånvaro av löst vätgas (SSM forskningsrapport 2011:34; SSM forskningsrapport 2013:07; SSM forskningsrapport 2011:09). Omfattning av vätgasproduktionen skiljer sig i viss utsträckning mellan olika experiment, men det är frågan om förhållandevis små mängder och processen verkar spontant avstanna vid förhållandevis låga partialtryck av vätgas. SSM anser att i ett slutförvar på 500 m djup kan materietransport i buffert och berg vara begränsade för denna korrosionsform, vilket medför att närvaron av korrosionsprodukter invid kapselytor hämmar reaktionen i samband med ett närmande till kemisk jämvikt. I vilken omfattning detta begränsar denna typ av korrosion kommer därmed vara beroende på om bufferten är mättad eller inte. Korrosionen kan dock fortskrida under förhållanden nära kemisk jämvikt och styrs då av bortförel av bildat väte och om någon fast korrosionsprodukt bildas, vilket har benämnts kvasi-immunitet (SSM forskningsrapport 2011:09).

SSM anser att det finns en godtagbar förståelse och rimlig tillgång till data för att kvantifiera materieöverföringsbegränsningar i slutförvarssystemet, vilket är en av flera utgångspunkter för bedömning av denna korrosionsform. Analyser och mätningar av bergets transportbegränsningar i form av förekomst och egenskaper hos vattenförande sprickor och den intakta bergmatrisen utgjorde en del av det platsundersökningsprogram som SKB har genomfört vid Forsmarksplatsen. Transportegenskaper hos en mättad buffert av bentonitmaterial har blivit föremål för undersökningar inte bara i SKB:s program men även i andra länders kärnavfallsprogram och bedöms därför vara välkända. Det är dock möjligt att i väsentlig omfattning ytterligare underbygga bergets transportegenskaper under en kommande detaljundersökningsfas och konstruktionsfas vid Forsmark. De största kvarvarande osäkerheterna har betydelse för bedömning av framförallt tidsperioden för omättade och eroderade förhållanden i bufferten. Dessa båda tillstånd påverkar den möjliga omfattningen av korrosion i rent syrgasfritt vatten (se nedan). Syrgasfritt opåverkat grundvatten från stora djup i berggrunden är troligen inte helt fritt från löst vätgas. Grundvatten på stora djup i berggrunden är kemiskt reducerande med bl.a. löst järn(II), sulfidsvavel och reducerande organiska ämnen, och små mängder löst vätgas förväntas förekomma i grundvattnets opåverkade tillstånd. För närvarande finns dock endast ett fåtal mätningar som påvisar förekomst av löst vätgas i Forsmarksgrundvatten i betydande halter. Processer som påverkar närvaro av vätgas i slutförvarsmiljön är också komplexa då väte förutom av oorganiska processer också produceras och konsumeras av mikrobiella processer i grundvattnet via komplexa delreaktioner. SSM anser vidare att det inte är klargjort om och i så fall vilken fast korrosionsprodukt som bildas vid denna typ av korrosion, vilket kan vara av betydelse för att bedöma transportbegränsningar i systemet.

SSM har som grund för sin bedömning med hjälp av externa experter på teoretisk väg analyserat korrosionsprocessen i samband med koppar och syrgasfritt vatten (SSM forskningsrapport 2011:09; SSM forskningsrapport 2011:12). Författarna redovisar resultat i huvudsak med korrosionsdomändiagram som visar hur koppar reagerar i olika kemiska miljöer med olika pH, temperaturer och koncentrationer. Författarna definierar kvantiteten $P^e = [Cu^+] * P_{H_2}^{1/2}$ som den partiella reaktionskvoten vid kemisk jämvikt för reaktionen $Cu(s) + H^+ \leftrightarrow Cu^+ + \frac{1}{2}H_2$ (SSM forskningsrapport 2011:09). Den partiella

reaktionskvoten vid icke jämviktsförhållanden benämns bara P . För det fall då $P < P_e$ redovisas att koppar inte är termodynamiskt immunt medan då $P > P_e$ är koppar immunt och vid $P = P_e$ kvasi-immunt. När koppar initialt placeras i rent vatten är metallen icke immun och korrosion sker. Detta kan förklara observerad vätgasutveckling i samband med experiment. Allt eftersom korrosion fortskrider, ökar dock Cu^+ - och vätehalten till dess att jämviktsläget närmas i ett system med begränsad materieöverföring. Den partiella reaktionskvoten har vid $\text{pH}=7$ och 25°C bestämts till 10^{-15} (SSM forskningsrapport 2011:09). Högre partiella reaktionskvoter vid jämvikt är möjliga vid högre temperatur och lägre pH men fortfarande vid mycket låga nivåer. Låga partiella reaktionskvoter vid jämvikt innebär att reaktionen under förutsättningen begränsad materieöverföring fortskrider i liten omfattning innan den avstannar på grund av att jämviktsläget närmas. Kvasi-immunitet vid jämviktsläget i ett system med begränsad transport innebär dock inte att reaktionen helt upphör men reaktionshastigheten kan inte överskrida den hastighet med vilken reaktionsprodukter borttransporteras. Om tillräckligt höga halter av Cu^+ och H_2 finns närvarande i systemet uppnås immunitet och processen äger då inte alls rum. Författarna har även definierat den partiella reaktionskvoten vid kemisk jämvikt för reaktionen $2\text{Cu} + \text{HS}^- + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Cu}_2\text{S} + \text{H}_2(\text{g})$ som $P_e = \text{pH}_2 / [\text{HS}^-]$. Den partiella reaktionskvoten vid kemisk jämvikt för denna process är cirka 10^{-10} , vilket är 20-25 tiopotenser högre i jämförelse med korrosionen i rent syrgasfritt vatten.

SSM konstaterar att frågan kring kopparkorrosion i syrgasfritt vatten på senare år har studerats i högre detaljeringsgrad både av SKB och oberoende instanser i jämförelse med de tidigare faserna i SKB:s program när korrosionsformen först diskuterades. Det är därför möjligt att dra mera välunderbyggda slutsatser kring processernas betydelse i en representativ slutförvarsmiljö. SSM konstaterar dock att vissa frågor kring experimentella data kvarstår, så som det faktum att en långsam vätgasproduktion påvisats under lång tid under vissa experiment (Hultquist m.fl., 2015). Dessutom redovisar uppmätta korrosionshastigheter att koppar kan korrodera med i storleksordningen $0,1 \mu\text{m}/\text{år}$ (Hultquist 2015; Cleveland m.fl., 2014). Dessa resultat ska sättas i relation till att SKB redovisar att denna korrosionsform i det närmaste helt uteblir i SKB:s senast genomförda experimentella studier (SKBdoc 1448824). En annan viktig fråga avser karaktären hos korrosionsprodukterna som bildas vid processen. Vid bildning av faser med välkända termodynamiska egenskaper så som $\text{Cu}_2\text{O}(\text{s})$ bör immunitet/kvasi-immunitet uppnås efter mycket kort tid vid normala slutförvarförhållanden efter att reducerande kemiska betingelser först har etablerats. Mera omfattande korrosionsangrepp kan förväntas om högre halter av löst koppar och vätgas erfordras innan kemisk jämvikt närmas/uppnås. Med tanke på att termodynamik för koppar och kopparföreningar är ett väl undersökt område samt med tanke på resultat från SKB:s experimentella studier som har genomförts inom ramen för ansökan är det enligt SSM:s bedömning mindre sannolikt men ändå inte omöjligt att det finns andra korrosionsprodukter med ännu ej fullständigt kända egenskaper som kan påverka korrosionsförloppet. Det finns också vissa frågor kvar kring korrosionsförloppet vid mera komplexa grundvattensammansättningar bl.a. reaktionen i syrgasfritt vatten med mycket höga salthalter.

SSM anser att fallet med en ännu inte fullt ut karakteriserad korrosionsprodukt för reaktionen mellan koppar och syrgasfritt vatten har en betydelse som grund för känslighetsanalyser om hur korrosionsprocessen skulle påverka slutförvarssystemet (H_xCuO_y som når kemisk jämvikt vid ett partialtryck för vätgas vid ungefär 1 mbar vid 73°C). Detta fall kan betraktas som en alternativ konceptuell modell. Korrosionshastigheten i slutförvarsmiljön för användning inom säkerhetsanalys beräknas i detta fall med utgångspunkt från jämviktsläget och inte från uppmätta bildningshastigheter för väte eller uppmätta kopparförluster. Ett annat alternativt angreppssätt som kan tillämpas i vissa fall är att helt bortse från överväganden kring kemisk jämvikt och utgå från en bedömning av processens potentiella betydelse via korrosionshastigheter som har



baserats på uppmätt vätgasproduktion i experimentella uppställningar (exempelvis Hultquist m.fl., 2015).

Beträffande anoxisk korrosion av koppar i mättade deponeringshål konstaterar SSM att det enligt SKB:s analys inte är fullständigt känt hur snabbt löst vätgas transporteras genom en mättad buffert via diffusion. SKB har baserat sin analys på mätningar av diffusion med tritierat vatten. SSM anser därför att diffusionskoefficienten för vätgas i en mättad buffert behöver bestämmas. Det är i huvudsak buffertens tätande förmåga och låga materieöverföringshastigheter på 500 m djup som kan skapa förutsättningar för att begränsa denna korrosionsform under de långa tider som slutförvarets tekniska barriärer förväntas bidra till den långsiktiga strålsäkerheten. Det kan noteras att temperaturen gradvis sjunker i tidsskalan efter de första 1000 åren och att den förväntade sulfidkorrosionen också ger upphov till vätgasbildning. Denna vätgasbildning kan i viss utsträckning motverka korrosionsmekanismen. Mikrobiell aktivitet som skulle kunna förbruka väte hämmas i en mättad buffert av höga svälltryck och låg vattenaktivitet. Denna begränsning är sannolikt starkt beroende av buffertdensiteten. Ytterligare en faktor vid bedömning av korrosionsformens betydelse är det opåverkade grundvattnets innehåll av löst vätgas, vilket kan begränsa vätgastransporten genom bufferten och korrosionsangreppens omfattning.

Beaktande av massbalanser för bildat väte, kemisk jämvikt vid ett partialtryck för vätgas vid ungefär 1 mbar och rimliga materieöverföringshastigheter i en mättad buffert innebär en avsevärd begränsning av korrosionsformens omfattning i förhållande till uppmätta korrosionshastigheter. För lägre partialtryck av bildat väte som motsvarar kända koppar(I)-faser uppnås en än mer omfattande begränsning. SSM konstaterar dock att experimentella data pekar på att väte även kan tas upp av metallen (Szakalos m.fl., 2007). För att i grunden ändra förutsättningarna för analys av massbalans och materieöverföring i systemet måste dock mängden väte upptagen i metallen även långsiktigt vara en dominerande andel av vätet som bildas vid korrosionsprocesserna.

Beträffande anoxisk korrosion av koppar i omättade deponeringshål konstaterar SSM att en viss mängd bildad vätgas behöver ackumuleras i den tillgängliga isolerade gasvolymen innan korrosionen avstannar. SSM anser att SKB i sitt hypotetiska fall kring vätgasbildning behöver beakta att transport av vätgas i gasfasen möjligen skulle kunna åtföljas av en mikrobiell konsumtion av vätgas i återfyllnaden där svälltrycken är lägre och vattenaktiviteten är högre i jämförelse med bufferten. Detta fall kan möjligen orsaka mera omfattande korrosionsangrepp. Förloppet skulle kunna pågå under den tidsperiod som en kontinuerlig gasformig transportväg från kapselyta till deponeringstunnel finns tillgänglig, vilket dock inte nödvändigtvis innefattar hela tidsperioden tills bufferten har blivit helt återmättad. Transport av atomärt väte kan även ske in i kopparmetallen. Avlägsnande av löst vätgas med grundvattenströmning i deponeringshål med höga grundvattenflöden saknar sannolikt betydelse, med tanke på att denna typ av deponeringshål återmättas förhållandevis snabbt och att perioden med omättade förhållanden då får en liten betydelse. Under omättade förhållanden kan grundvattenflödesriktningen förväntas orienteras lokalt mot snarare än från deponeringshålen. SSM konstaterar att den anoxiska korrosionens omfattning även med beaktande av eventuella kvarstående konceptuella osäkerheter sannolikt är liten i omättade deponeringshål. Även om man helt bortser ifrån överväganden kring kemisk jämvikt och enbart beaktar korrosionshastigheter med utgångspunkt från bildade mängder vätgas från experiment blir det sammanlagda korrosionsangreppet från denna process begränsat. Resultat från sådana experiment pekar på korrosionshastigheter från som mest 10-tals till 100-tals nm per år. Även om kontinuerlig gasformig transportväg från kapselyta till återfylld deponeringstunnel finns tillgänglig under 1000-tals år blir bidraget som mest någon eller några mm.



Beträffande anoxisk korrosion av koppar i eroderade deponeringshål konstaterar SSM att det är tänkbart att korrosionen, förutom den borttransport av väte som SKB har baserat sin analys på, även drivs framåt av mikrobiella processer som förbrukar bildat väte i närheten av kapselytan. I en eroderad buffert med avsaknad av höga svälltryck och låg vattenaktivitet kan mikrobiell aktivitet förekomma och möjligen konsumera bildat väte. Det mest pessimistiska fallet är sannolikt att transportbegränsningar i slutförvarssystemet upphör att bidra till säkerheten och att korrosionens fortskridande representeras med korrosionshastigheter från experiment om 10-tals till 100-tals nm per år. För att detta fall ska realiseras krävs dock att en händelsekedja fullbordas: (i) grundvattnets salthalt behöver först sjunka radikalt till dess att jonstyrkan från katjoner motsvarar 4 mM, (ii) erosionen av buffertmaterial påbörjas och fortskrider till dess att mikrobiell aktivitet möjliggörs och advektiva förhållanden uppstår, (iii) mikrobiella populationer etableras i eroderade deponeringshål med en kapacitet att konsumera även små mängder bildad vätgas, och (iv) korrosionen fortskrider med ovan nämnda korrosionshastigheter till dess att kopparhöljet fallerar. SSM anser att det inte helt kan uteslutas att anoxisk korrosion i fallet eroderade deponeringshål kan orsaka kapselbrott som inte förutsågs av SKB:s modellering. Detta gäller dock sannolikt för tider efter 100 000 år och detta omfattar sannolikt som mest ett fåtal deponeringshål med högre grundvattenflöden i vilka bufferterosion fortskridit under en längre tid. Processen behöver vid behov integreras i analysen av kopparkapslarnas långsiktiga beständighet och beaktas i riskanalysen.

SSM anser sammanfattningsvis att det inte helt kan uteslutas att korrosionsformen kan ha en betydelse för kopparhöljets långsiktiga beständighet med påverkan för korrosionsbeständigheten hos ett fåtal kapslar främst i tidsskalor längre än 100 000 år. Det finns också en möjlig påverkan på kapselns mekaniska egenskaper som kan kopplas till denna korrosionsform eftersom väteupptag av kopparmaterialet har visats ske i samband med denna process (se även avsnitt 4.12 i denna granskningsrapport).

5.11.5 Korrosion av koppar med syre som tillförs via glaciala smältvatten

I samband med infiltration av glaciala smältvatten skulle möjligen en period med oxiderande betingelser kunna uppstå på nytt efter en lång period av reducerande betingelser efter slutlig förslutning av slutförvaret. Frågan har analyserats och diskuterats sedan slutet av 1990-talet (Glynn m.fl., 1999). Ett viktigt skäl till att situationen skulle kunna uppstå är de höga hydrauliska gradienter som kan uppstå i samband med avsmältningen av en inlandsis och de i jämförelse med normala förhållanden mycket höga nedåtriktade grundvattenflödes hastigheterna. Situationen anses vara mest extrem i samband med att isfronten passerar slutförvaret, men förhöjda flöden kan också uppstå under inlandsisen om den är varmbaserad dvs. att avsmältningen av is sker underifrån och att markens permafrost har släppt beroende på isens värmeisolerande förmåga. Ytterligare ett skäl till att syrenedträngning blir mera betydande under dessa förhållanden är att organiskt material som normalt finns i ytskiktet och i lösa avlagringar kan förväntas vara bortskrapat av inlandsisens rörelser. Organiskt material som bryts ned kommer att konsumera syre så att grundvatten normalt sett är syrgasfritt på förhållandevis grunda djup. Den kvarstående mekanismen som kan förbruka syre är frigörelse och oxidation av löst järn från vittring av mineral med syreförbrukande förmåga i berggrunden som t.ex. biotit. Frågan är dock om denna reaktion är tillräcklig för att under samtliga tänkbara förhållanden utesluta förekomst av syre på slutförvarsdjup. Ytterligare ett skäl till infiltration av förhöjda halter av syre är att smältvatten kan innehålla mera löst syre än regnvatten därför att snö och is kan ha blivit komprimerad under höga tryck.



5.11.5.1 Underlag från SKB

SKB utesluter efter utvärdering av referensutvecklingen att syre når ner till förvarsdjup som följd av infiltration av glaciala smältvatten (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.7 och 12.6.2). I det särskilda fallet att isfronten blir stillastående över slutförvaret under en längre tid och att den teoretiskt maximala syrehalten i smältvattnet förekommer under hela tidsperioden kan dock glacialt smältvatten föra ner syre till vissa kapselpositioner på förvarsdjup (SKB TR-10-66, avsnitt 5.2.3). Detta fall anser SKB vara så osannolikt att det har hanterats utanför referensutvecklingen.

SKB beräknar att sannolikheten för en bottenmältande isfront som står stilla vid Forsmark under 1000 år är 0,012. Utifrån dessa förutsättningar och ett massbalansresonemang beräknar SKB att korrosionsdjupet blir 0,3 mm i den mest utsatta kapseln för fallet att bufferten är intakt. Under antagandet att advektiva förhållanden råder i deponeringshålet och att syrenedförseln beräknas baserat på flödesbanan från ytan till deponeringshålet ger beräkningarna dock ett korrosionsdjup på 6 mm på tusen år. SKB noterar att de advektiva positionerna inte sammanfaller med positionerna med de högsta syrehaltarna eftersom randvillkoren för dessa två typer av beräkningar skiljer sig åt. Trots detta antar SKB att dessa två ofördelaktiga betingelser sammanfaller i ett och samma deponeringshål. SKB framhåller vidare att betydande syrenedträngning endast erhålls vid tillämpning av antagandet om en stillastående isfront. Om isfrontsläget skulle oscillera några hundra meter skulle ingen deponeringsposition utsättas för oxiderande betingelser. Lokal korrosion förväntas uppträda endast som ojämn allmän korrosion med en råhet som motsvarar några hundratals mikrometer för korrosionsdjup på millimeterskala (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2; SKB TR-10-66, avsnitt 5.2.3; Jacobs och Edwards, 2000).

5.11.5.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB:s angreppssätt med kopplad syretransport och syreförbrukning i berggrunden samt massbalansresonemang för allmän kopparkorrosion utgör godtagbara metoder att kvantifiera förekomst av syrenedträngning och uppskattning av korrosionsdjup i samband med inträngning av glacialt syre.

SSM konstaterar att SKB endast för fallet med en isfront som är stillastående i 1000 år vid Forsmarksplatsen får nedträngning av syre till förvarsdjup vid de mest utsatta deponeringshålen. SSM anser att SKB:s uppskattning av sannolikheten för en stationär isfront är godtagbar (avsnitt 5.4 i denna granskningsrapport). SSM noterar vidare att SKB gjort en rad konservativa antaganden i syrenedträngningsberäkningarna (avsnitt 5.5 i denna granskningsrapport), exempelvis antar SKB att syrekoncentrationen i det glaciala smältvattnet är den maximalt tänkbara samt att det råder advektiva förhållanden i deponeringshålen som exponeras för glaciala smältvatten. Vidare beaktar SKB enbart syreförbrukning från vittring av mineralet biotit och bortser från i viss omfattning sannolikt förekommande syreförbrukning från mikrobiell aktivitet och från vittring av sulfidhaltiga mineral. SSM anser därför att SKB:s beräkningar sannolikt är konservativa.

Resultat från SSM:s externa expert pekar dock på att F-värdena i den del av hydromodellen som bygger på uppskalning av diskreta spricknätverket (ECPM) kan ha underskattats med den skalningsmetodik SKB tillämpar (SSM technical note 2012:67). SSM noterar dock att det endast är de deponeringshål som ligger direkt under isfronten för vilka syrenedträngning är problematisk. För dessa deponeringshål är flödesvägarna i stort sett vertikala och flödesvägen genom ECPM-modellen utgör endast en liten del av den totala flödesvägen. SSM bedömer därför att påverkan kopplad till SKB:s metodik för uppskalning av F-värden på syrenedträngningsberäkningarna är obetydlig.

Sammantaget bedömer SSM att SKB:s kvantifiering av allmän korrosion med syre är godtagbar och att det valda beräkningsfallet gränsätter påverkan på korrosion av kopparkapslar. SSM noterar att de hittills genomförda mineralogiska studierna vid Forsmark inte visar några tydliga spår efter en betydande inträngning av syre ner till stora djup. Eftersom sannolikheten för att en stationär isfront vid Forsmark har påverkat berget bedöms vara låg så konstaterar SSM att det därför är tveksamt om det överhuvudtaget ur befintliga data går att utläsa vilken effekt en sådan situation skulle ha haft på berget. Befintliga observationer stöder därför troligen endast en situation där isfronterna har dragit förbi Forsmark utan några långa uppehåll. SSM delar därför SKB:s uppfattning att befintliga data pekar på en sådan situation. Det bedöms vara osannolikt att någon betydande syrenedträngning har uppstått under sådana förhållanden.

SSM konstaterar att SKB:s beräkningar enbart avser allmän korrosion med jämnt fördelade korrosionsangrepp. SKB:s argumentation för att utesluta gropkorrosion i en oxiderande miljö har baserats på att passiverande ytfilmer inte uppstår i slutförvarsmiljön eftersom kombinationen låga pH, låga vätekarbonathalter och höga kloridhalter medför aktiv korrosion snarare än passivering (SKB TR-13-27). I glaciala smältvatten är dock kloridhalterna mycket lägre än i dagsläget och pH är högre vilket skulle kunna gynna uppkomst av passiverande ytfilmer och därmed orsaka gropkorrosionsrisk, vilket SKB inte har beaktat i sin analys. SSM noterar dock att fallet med nedträngning av glaciala smältvatten bara avser ett fåtal deponeringshålspositioner, avser ganska extrema och osannolika antaganden kring isfrontens läge och rörelser, förutsätter gränssättande höga syrehalter i smältvattnet, samt konservativt försummar vissa rimligt förekommande syreförbrukningsprocesser. SSM anser att inverkan av gropkorrosion under en begränsad period i slutförvarets utveckling för ett fåtal deponeringshålspositioner lång tid in i framtiden har liten betydelse för bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga.

5.12 Inverkan av jordskalv i förvarets närhet för de första 100 000 åren

Detta avsnitt innefattar SSM:s bedömningar av SKB:s beräkningar av frekvens, sannolikhet och magnitud för jordskalv kopplade till en glacial cykel under de första 100 000 åren efter förslutning av slutförvaret. Därmed ingår inte bedömningar av termiskt inducerade eller nutida jordskalv, vilka redovisas i kapitel 4 om de första 1 000 åren (avsnitt 4.16). SKB:s beräkningar inom området är centrala för uppskattningen av antalet potentiellt skadade kapslar som kan förekomma inom tidsperioden (avsnitt 5.10 i denna granskningsrapport). En eventuell förekomst av jordskalv i närheten av slutförvaret har en påverkan på kapselns säkerhetsfunktion att motstå skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshålen (SR-Site huvudrapport, figur 8-2, Can3). Enligt SKB:s koncept uppfylls säkerhetsfunktionen om kapseln inte skjuvas mer än 50 mm vid en skjuvhastighet på maximalt 1 m/s. Skjuvning av stora sprickor i närheten av deponeringshålen kan också påverka bergets hydrogeologi vilket bland annat påverkar förmågan att fördröja utsläpp av radionuklider (SR-Site huvudrapport, figur 8-3, R2). Exempel på relevanta processer i detta sammanhang är spricköppning, sprickpropagering och sprick-sammanlänkning (avsnitt 5.3 och 5.4 i denna granskningsrapport).

Det finns idag ingen internationellt formaliserad metodik för att hantera riskbedömning av konsekvenser för ett jordskalv som inträffar i anslutning till ett geologiskt slutförvar för använt kärnbränsle eller annat radioaktivt avfall, till skillnad från exempelvis kärnkraftverk (IAEA, 2010 b). SKB har därför utvecklat en egen metodik som bygger på erfarenheter av hur jordskalv påverkar underjordiska anläggningar, historiska seismiska observationer samt fältobservationer från post-glaciala förkastningar i norra Sverige och Finland. Baserat på dessa kunskaper har SKB definierat konceptet ”respektavstånd” som avser ett minimalt avstånd till deformationszoner som skulle kunna hysa större jordskalv.



SKB anser att endast stora sprickor som skär deponeringshål är en möjlig orsak till skaderisk för deponerade kapslar. Den minsta spricka som skulle kunna skada en kapsel definieras som en "kritisk spricka". För att i så hög utsträckning som möjligt undvika denna typ av sprickor har SKB utvecklat en strategi för urval av deponeringshålspositioner som ska tillämpas i deponeringstunnlar och deponeringshål baserat på det så kallade FPI/EFPC-kriteriet.

I detta avsnitt granskar SSM dessa grundläggande begrepp i SKB:s jordskalvredovisning. Risken för kapselskada härleds av SKB från kunskapen om frekvenser för skalven som kan skada en kapsel, antalet större sprickor som inte kan upptäckas med FPI/EFPC-kriteriet samt tidsintervallet som risken är beräknat över. Tidsperioden 100 000 år omfattar större delen av den första förväntade glaciationscykeln efter slutförvarets förslutning.

5.12.1 Allmänt om jordskalvsrisk

5.12.1.1 Underlag från SKB

Sverige ligger i den s.k. Fennoskandiska skölden, långt från tektoniska plattgränser samt aktiva vulkaner. Av detta skäl är den nuvarande seismiska aktiviteten i Sverige relativt låg (SKB R-06-67; FENCAT 2007; SKB TR-00-08; La Pointe m.fl. 2002; Hora och Jensen, 2006; Fenton m.fl., 2006). Ovanstående referenser förutom Hora och Jensen bygger på data från historiska skalv från Svenska Nationella Seismiska Nätet och FENCAT. Ett problem är dock att data från historiska skalv endast täcker ett ganska begränsat tidsspänn jämfört med tiden 100 000 år. Frekvensen för skalv med magnitud lika med eller större än M5, för ett område med en radie på 5 km runt Forsmarksplatsen är enligt SKB $2,5 \times 10^{-6}$ per år (SKB SR-Site huvudrapport, tabell 10-14). Hora och Jensen (2006) redovisar uppskattningar av jordskalvssannolikhet efter nedisning i Sverige som har tagits fram genom formella expertutfrågningar. SKB redovisar dock att dessa uppskattningar inte skiljer sig från de övriga uppskattningar som är framtagna baserade på historiska skalv (SKB SR-Site huvudrapport, tabell 10-14).

SKB använder i sin analys antagandet att frekvens för större jordskalv av en viss magnitud för de första 100 000 åren efter förslutning av slutförvaret överensstämmer med jordskalvsfrekvens baserat på historiska skalv. Detta leder till att årlig sannolikhet för ett jordskalv med magnitud större än M5 är maximalt $7,8 \times 10^{-8}$ i någon av de 30 potentiellt instabila deformationszonerna inom en radie på 5 km runt Forsmark (SKB SR-Site huvudrapport, tabell 10-14). Av dessa 30 potentiellt instabila zoner ligger endast ett fåtal inom SKB:s respektavstånd på 600 m mellan de regionala deformationszonerna och det planerade slutförvaret. Beroende på det antagna spänningsfältet kan antalet instabila zoner antingen vara ett för revers-spänningsregimen, eller fem för revers-strike-slip-spänningsregimen, vilket dock inte ändrar den totala sannolikheten för inträffande av ett närliggande jordskalv (SKB TR-10-21, figur 7-3).

Förekomst av större förkastningsrörelser i de nordliga delarna av den Fennoskandiska skölden, som är daterade till Weichsel och avsmältningen av den senaste stora nedisningen över Sverige, visar att den seismiska aktiviteten ökar till följd av en inlandsis tillväxt och avsmältning. Dyliga glacialt inducerade postglaciala förkastningsrörelser (post-glaciala skalv) har identifierats i norra Sverige. Dessa kopplas till sen- till postglaciala förkastningsbranter vilka associeras med seismiskt inducerade deformationsstrukturer i den Kvartära lagerföljden, som likvifiering och vattenflyktstrukturer. Inga post-glaciala skalv som SKB redovisar har observerats söder om Västerbotten, men samtidigt har inte SKB uteslutit att mindre post-glaciala skalv kan ha förekommit i Forsmarksområdet under tidigare glaciationer. SKB utesluter inte heller



möjligheten att kraftiga post-glaciala skalv kan förekomma i Forsmark i samband med framtida glaciationer (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt. 10.4.5). SKB uppskattar den maximala magnituden som kan förekomma i Skandinavien till mellan M7 och M8,2, baserat på observationer av rörelser på Pärvie-förkastningen i Lappland (SKB TR 93-13; Arvidsson 1996; Johnston 1996).

SKB motiverar det faktum att inga stora post-glaciala jordskalv har kunnat dokumenteras i Forsmarksområdet med att inga branter har kunnat observeras som kan kopplas till skjuvrörelser hos förkastningar (SKB TR-10-48, avsnitt 4.1.3). SKB har dock endast analyserat topografin i skogarna runt om Forsmark med hjälp av flygfoto­grammetri.

SKB har utvecklat en strategi för projektering av slutförvaret som beaktar risken för jordskalv vid närliggande deformationszoner. Strategin grundar sig på principen att undvika kapselpositioner i berg som skärs av långa sprickor vilka i samband med jordskalv kan hysa större sekundära skjuvrörelser. SKB definierar en "kritisk position" som den kapselposition som skärs av en spricka som kan hysa en skjuvrörelse på mer än 50 mm som motsvarar SKB:s kriterium för kapselbrott. Den minsta sprickan associerad med en "kritisk position" kallas för "kritisk spricka" och dess radie benämns "kritisk radie" (SKB TR-10-21). Sprickor större än den kritiska sprickan kan hysa en skjuvrörelse som är större än kapselbrottkriteriet, vilket också kan medföra att kapseln förlorar sin täthet.

SKB beaktar alla deformationszoner med en längd som är 3 km eller mer inom ett "buffertavstånd" på 600 m från deponerade kapslar i samband med beräkningarna avseende inverkan av jordskalv (SKB TR-10-21, avsnitt 7.2). Det innebär att enbart de deformationszoner som ligger inom denna 600 meters zon runt slutförvaret antas kunna bidra till signifikanta sekundära skjuvrörelser. De regionala deformationszonerna Forsmark, Eckarfjärden samt Singö ligger på cirka 2 200 m, 700 m respektive 800 m avstånd från den närmaste deponerade kapseln i enlighet med SKB:s preliminära anläggningslayout.

SKB beräknar antalet kritiska positioner genom att räkna antalet skivformade sprickor med en radie större än den kritiska radien som skär deponeringshålspositioner i en syntetisk modell av bergmassan vilken har tagits fram med hjälp av diskreta spricknätverksmodeller DFN ("Discrete Fracture Network"; SKB TR-10-21). Den kritiska radien är beroende av längden hos den aktiverade deformationszonen som hyser jordskalvet, samt sprickans lutning och dess avstånd till den aktiverade deformationszonen (SKB SR-Site huvudrapport, tabell 10-16). Kritiska radier för zonlängder mellan 3 till 5 km eller längre än 5 km, spricklutningar samt avstånd till närmaste deformationszon bedöms utifrån numeriska modelleringar. I SKB:s modellering av jordskalv antas sprickorna ha en strykning som löper parallellt med den aktiverade deformationszonen.

SKB har genomfört modelleringar av jordskalv med beräkningskoden 3DEC (Itasca, 2007) på stiliserade flacka och branta förkastningszoner med längd på mellan cirka 3 km och 40 km (SKB TR-08-11). Bergspänningsfält har skapats för simulering av syntetiska skalv med en momentmagnitud mellan M5,3 och M7,5, vilka induceras när hållfastheten i förkastningsplanen nollställts eller drastiskt reducerats på successivt större och större ytor runt hypocentrum. Den minsta horisontella bergspänningen är också den minsta huvudspänningen i alla modeller för djup större än ca 2 000 m (revers-förhållande vid slutförvarsdjup om ca 500 m, strike-slip-förhållanden för stora djup). Ett vattentrycksöverskott på 1 MPa antas för postglaciala förhållanden. Skjuvrörelserna beräknas för sekundära sprickor med en diameter på 300 m, som stryker parallellt med förkastningszonen och har konstant stupning på 0°, ±30° och ±45°. SKB har använt olika



värden för de sekundära sprickornas friktions- och dilatationsvinkeln, medan alla sprickor är tilldelade samma värde för skjuv- och normalstyvheten.

Den kumulativa fördelningen av skjuvrörelser längs med sekundära sprickor på 300 m som SKB har erhållit från 3DEC-modellering är approximativt linjär (SKB TR-08-11, figur 7-1). Resultaten pekar på att skjuvrörelsens maximala värde ökar med minskat avstånd från förkastningszonen (SKB TR-08-11, avsnitt 5.4.4). Skjuvrörelser för sprickor med andra diametrar än 300 m kan också uppskattas baserat på antagandet om en linjär relation mellan den maximala skjuvrörelsen och sprickans diameter (Eshelby, 1957). På så sätt blir det möjligt att beräkna den kritiska radien som funktion av avståndet till deformationszonen. Kartor kan därmed ritas för kritiska radier med hänsyn tagen till längden av förkastningszonerna (SKB TR-08-11, figur 7-5).

SKB har, baserat på förståelse kring sekundära bergrörelsers ursprung och fortplantning i berggrunden, utvecklat kriterier för val av deponeringshålspositioner i deponeringstunnlar. Dessa kriterier sorterar bort de flesta deponeringshålspositioner som skulle ha träffats av sekundära sprickor lika med eller större än de kritiska radierna (SKB TR-10-21). Emellertid finns det ”kritiska positioner” där skjuvrörelser längs med sekundära sprickor kan bli större än 50 mm, men som inte går att undvika. Beräkning av antalet kritiska positioner N_{crit} är baserad på stokastiska simuleringar av SKB:s geologiska diskreta spricknätverksmodeller (Geo-DFN), och tillämpningen av det s.k. FPC-kriteriet (”Full Perimeter Criterion”) samt EFPC-kriteriet (”Extended Full Perimeter Criterion”). FPC- och EFPC-kriterierna har använts av SKB för att välja bort deponeringshålspositioner som potentiellt kan skäras av kritiska sprickor. SKB har också uppskattat nyttjandegraden DoU (”Degree-of-Utilisation”) för deponeringstunnlarna, dvs. den procentuella längden av en deponeringstunnel där det är möjligt att deponera kapslar. Baserat på SKB:s val av Geo-DFN-modell för Forsmark varierar nyttjandegraden mellan 70 och 90 procent.

Inga av SKB:s simulerade jordskalv medför att kapselns säkerhetsfunktion att motstå snabba skjuvrörelser överskrids (SKB TR-08-11), dvs. skjuvhastigheten verkar alltid understiga 1 m/s längs med kritiska sprickor som skär deponeringshålspositioner i slutförvaret.

5.12.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s analyser av inverkan av jordskalv i förvarets närhet mellan 1 000 och 100 000 år efter slutlig förslutning av slutförvaret, vilket i tid ungefärligen sammanfaller med den första glaciationscykeln, är rimliga och tillräckligt tillförlitliga för detta skede i SKB:s program. SSM anser att SKB:s analys av jordskalvsrisk är baserad på en godtagbar metodik och utgör ett lämpligt underlag för säkerhetsanalysberäkningarna som har genomförts inom SR-Site. SSM:s granskning har särskilt fokuserat på följande aspekter av SKB:s redovisning:

- jordskalvmagnituder
- jordskalvsfrekvens
- samband mellan skjuvrörelser hos sprickor och avståndet från jordskalvets hypocentrum
- samband mellan skjuvrörelser hos sprickor och sprickstorlek.

De följande kommentarerna syftar till att uppmärksamma SKB på frågeställningar som SSM avser att följa upp i samband med kommande steg i SKB:s program.

Teoretiska analyser av jordskalvsrisk måste vanligtvis anses vara förknippade med betydande eller till och med stora osäkerheter. Av detta skäl bedömer SSM att SKB i högre utsträckning än hittills behöver härleda sin kvantifiering av jordskalvsrisk genom att tillämpa olika av varandra oberoende angreppssätt och metoder (i.e. ”multiple lines of



evidence”) för att om möjligt ytterligare reducera osäkerheterna (Ault, 1998; NEA, 2004a; NEA, 2007).

Beträffande den första punkten i punktlistan, jordskalvmagnituder, är det enligt SSM:s bedömning ett rimligt antagande att inga kraftiga jordskalv med en magnitud som betydligt överskrider M7 har inträffat i Forsmarksområdet under avsmältningen av Weichselistället (avsnitt 3.1.2 i denna granskningsrapport). SSM anser dock att SKB fortsättningsvis behöver beakta Lantmäteriets arbete med att ta fram en digital höjdmmodell baserad på flygburen laserskanning LiDar (”Light Detection and ranging”). Denna metod ger en bättre upplösning av topografiska lineament och därmed bättre förmåga att upptäcka även mindre sen- till postglaciala förkastningsbranter, i jämförelse med användning av flygfotogrammetri. Detta möjliggör undersökning av om observerade störningar i den kvartära lagerföljden kan associeras med mindre kraftiga post-glaciala skalv. Två nyligen publicerade studier indikerar att kraftiga jordskalv kan ha förekommit även i mellersta Sverige (Jakobsson m.fl., 2014; Smith m.fl., 2014). SSM anser att det därmed är fullt möjligt att fler post-glaciala skalv kommer att kunna identifieras tack vare den högupplösta digitala höjdmodellen och fler marina undersökningar.

Tillämpning av lasertekniken LiDar har medfört avsevärt förbättrad upplösning av flygburna mätningar särskilt i områden med mycket vegetation. Förkastningsbranter på några få meter kan idag upptäckas med flygburna lasermätningar, vilket tidigare inte varit möjligt enbart med hjälp av flygfotogrammetri (Tabor m.fl., 2011; Hunter m.fl., 2011; Howle m.fl., 2012; Thackray, 2013). Kartering av förkastningar från Holocen samt Pleistocen har därför avsevärt förbättrats under de senaste fem åren. Mikko m.fl. (2014) visar att branter i landskapet kan kopplas till områden med täta paleo-jordskred och indirekt till förekomst av post-glaciala jordskalv. Mikko m.fl. visar också att nutida skalv förekommer i betydligt mindre områden än i vilka det förekommer indikationer på paleo-jordskred. I Bollnäs i Jämtland cirka 180 km nordost från Forsmark, har en cirka 6 km lång förkastningsbrant med en vertikal förskjutning om cirka 5 m hittats. Strukturen skär genom multipla glaciala sediment och baserat på förekomst av överlagrande torvlager kan man dra slutsatsen att strukturens ålder är minst cirka 10 180 år före nutid (Smith m.fl., 2014). Jordskalvet associerat med dessa strukturer uppskattas ha haft en momentmagnitud större än M5,5. Det finns också misstankar om att post-glaciala jordskalv med magnituder upp till M7,5 har förekommit vid Vättern-gravsänkan (Jakobsson m.fl., 2014). För övrigt har effekter av post-glaciala jordskalv med magnitud uppemot M7,6 eller högre endast kunnat identifieras för förkastningar i Lappland, bl.a. Pärvie och Landsjärv (Olesen m.fl., 2010). Författare som t.ex. Mörner och Fenton (2004) tolkar vissa fältindicer såsom sedimenteringsanomalier, likvefaktion, jordskred och bergbranter runt omkring Forsmark som resultat av stora jordskalv och efterföljande tsunamis. SKB har än så länge inte tagit vara på detaljerade LiDar-mätningar och med hjälp av dessa bekräftat avsaknandet av post-glaciala förkastningar runt Forsmark. Med detta vill SSM påpeka att för varje nyupptäckt glacialt jordskalv av signifikant magnitud kan den sammantagna bilden av seismiciteten i Forsmarksområdet förändras i termer av möjliga förekommande magnituder och dess frekvens för tiden fram till 100 000 år efter förslutning av slutförvaret.

SSM bedömer att det måste anses vara allmänt accepterat att magnituden för ett skalv är kopplat till längden för förkastningszonens skärning längs med markytan (Wells och Coppersmith, 1994; Leonard, 2010). Detta innebär att möjliga jordskalvmagnituder för Forsmarksområdet kan kopplas till längden för de kända och observerade deformationszonerna. För Forsmarkszonen, som är ca 70 km lång och ligger ca 2 km från utkanten av det planerade slutförvaret, kan därför ett medelvärde för en möjlig skalvmagnitud på cirka M7,2 uppskattas (SSM Technical Note 2014:22). Detta värde överensstämmer relativt väl med de magnituder på upp till 7,5 som har erhållits från

SKB:s modelleringsarbete (SKB TR-08-11) och som har redovisats i SR-Site (SR-Site huvudrapport, tabell 10-15). Enligt beräkningar utförda av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:58) baserade på Leonard (2010) kan den maximala magnituden på en cirka 70 km lång deformationszon inom ett stabilt kontinentalt område nå upp till M7,8 (95 % -percentilen). Motsvarande beräkningar för den cirka 30 km långa Singözonens maximalt möjliga skalvmagnitud ger ett värde upp till cirka M7,4 (95 % -percentilen), vilket är i linje med de magnituder som SKB har redovisat.

Beträffande jordskalvsfrekvenser gör SSM bedömningen att SKB:s frekvenser för tidsperioden fram till 100 000 år efter slutlig förslutning av slutförvaret kan vara för optimistiska. Tabell 10-14 (SR-Site huvudrapport) visar att den jordskalvsfrekvens som SKB använder inte påverkas av förekomsten av post-glaciala skalv: jordskalvs sannolikheten i SKB R-06-67, som enbart baseras på historiska skalv, sammanfaller med jordskalvs sannolikheten i Hora och Jensen (2005), som har tagits fram med hänsyn till glaciala skalv. SSM anser att detta motsvarar att SKB använder dagens jordskalvsfrekvens och därmed inte fullt ut beaktar sannolikheten för att jordskalv, liknande dokumenterade post-glaciala skalv i Sverige, kan förekomma i samband med varje framtida glaciation, och inte bara efter de första 500 000 åren (SKB TR-10-48, avsnitt 4.3.7). SSM anser att detta strider mot den allmänt accepterade uppfattningen att den tektoniska aktiviteten, både beträffande skalvens magnitud och frekvens, ökade under och direkt efter avsmältningen av Weichselistället (Lagerbäck och Sundh, 2008).

SKB bör i framtida utredningar ta hänsyn till eventuella nya bevis för förekomst av tidigare större post-glaciala skalv som ett resultat av nya LiDar-mätningar och fältobservationer. Sådana framtida insatser kan leda till att den rekonstruerade jordskalvsfrekvensen kan förändras och ge en högre årlig sannolikhet för jordskalv av viss magnitud. Enligt SSM:s externa experter skulle den årliga sannolikheten för ett jordskalv med momentmagnitud mellan M5 och M7,2 i direkt anslutning till slutförvaret i Forsmark kunna bli till ca 2×10^{-6} (SSM Technical Note 2013:33, SSM Technical Note 2014:22). Denna sannolikhet har tagits fram baserat på en så kallad PSHA ("Probabilistic Seismic Hazard Assessment") av Forsmarksområdet för perioden med postglaciala förhållanden. Denna sannolikhet är högre än SKB:s motsvarande uppskattning. SKB:s uppskattning har baserats på dagens seismicitet i Mellansverige (SKB SR-Site huvudrapport, tabell 10-14) samt på den formella expertutfrågningen i Hora och Jensen (2006).

Den tektoniska töjningshastigheten inom plattor ger upphov till att energi lagras i jordskorpan som sedan kan frigöras i samband med jordskalv. Den största delen av töjningsenergin frigörs icke-seismiskt genom långsamma deformationer ofta lokaliserade till deformationszoner, men energin kan också ackumuleras lokalt och snabbt frigöras vid ett jordskalv. Ackumulation av töjningsenergi kan också påverkas av islaster under en glaciationscykel. För att identifiera aseismisk frigörelse av töjningsenergi eller ackumulationsområden kan de relativa rörelsemönstren studeras genom GPS-mätningar med hög precision ("Ground Positioning System"). I Forsmarksområdet verkar det finnas övervägande kontraherande töjningar med en storleksordning på cirka 10^{-8} per år (SKB R-13-11), vilket är högre än SKB:s antagna töjningar om cirka 10^{-10} per år (SKB TR-10-48, avsnitt 4.3.7). SKB:s antagna töjningar har använts för att beräkna en återkommandetid till nya skalv på 500 000 år efter ett större jordskalv. SSM anser att uppgiften om kontraherande töjningar tillsammans med den allmänna uppfattningen att bergspänningarna i Forsmarklinsen kan vara högre än i intilliggande områden skulle kunna indikera någon form av energiackumulation. SSM bedömer dock att de publicerade GPS-mätningarna för Forsmark, vilka genomfördes mellan 2005 och 2009 (SKB P-10-29), utgör ett för litet dataunderlag för att kunna göra en slutlig bedömning av frågan. SSM anser därför att SKB behöver fortsätta med GPS-mätningarna för att införa

kommande steg i SKB:s program säkerställa storleksordningen för de kontraherande töjningarna vid Forsmark.

Den tredje punkten i punktlistan i början av detta avsnitt avser sambandet mellan skjuvrörelsen på sprickor och avståndet från jordskalvets hypocentrum. SSM bedömer att SKB:s redovisning kring denna fråga är tillräcklig tillförlitlig i detta skede av SKB:s program. SSM bedömer att SKB på ett ändamålsenligt sätt har tagit hänsyn till: i) idealiserade geometrier med realistiska intervall för stupning hos deformationszoner; ii) stupning hos sekundära sprickor; samt iii) magnituder hos de modellerade jordskalven.

SSM konstaterar att tillämpning av alternativa angreppssätt och metoder för beräkning av skjuvrörelser hos sekundära sprickor kan resultera i ett större variationsintervall för ett specifikt antaget jordskalv i jämförelse med SKB:s redovisning. Detta gäller särskilt med hänsyn till hur den platsspecifika geometrin hos deformationszonerna samt de stokastiska realiseringarna av spricknätverk (Geo-DFN) har beaktats och utförts. SSM anser att SKB inför kommande steg i sitt program behöver ta fram ett mer utförligt underlag för att motivera buffertavståndet på 600 m. Detta buffertavstånd avgör bland annat vilka deformationszoner som behöver inkluderas i riskuppskattningar kopplade till att skjuvrörelser eventuellt överstiger 50 mm. Gällande konceptet för "kritisk radie" anser SSM att SKB ytterligare behöver underbygga sin konceptuella modell. Det behöver beaktas att naturliga processer i geologiska sammanhang sällan har ett deterministiskt maximalt värde. Tillhörande statistiska fördelningar kan inte heller anses ha en konstant frekvens över hela variationsspännet för parametern, och detta avser i synnerhet skjuvrörelser hos en sekundär spricka (SKB TR-08-11, figur 7-1). På basis av dessa argument anser SSM att det för närvarande inte helt kan uteslutas att skjuvrörelser större än 50 mm hos en sekundär spricka kan förekomma i samband med ett skalv med momentmagnitud på $M_{5,5}$ och ett avstånd på 200 m från deformationszonen. Detta gäller trots att deterministiska 3DEC-beräkningar pekar på att så stora skjuvrörelser inte förekommer och att sådana skjuvrörelser sannolikt är förknippade med en väldig låg sannolikhet.

SSM:s externa experter har genomfört modelleringar som antyder att magnituder på mellan M_4 och $M_{5,5}$ i samband med nutida skalv och post-glaciala skalv kan ge sekundära skjuvrörelser som överstiger 50 mm för upp till några procent av sprickorna i slutförvarsvolymen (SSM Technical Note 2014:59). SSM anser att detta resultat tyder på att SKB behöver beakta ett bredare magnitudintervall vid beräkning av jordskalvsrisk. SKB har beaktat magnituder mellan $M_{5,5}$ och $M_{7,5}$ men det kan finnas skäl att beakta magnituder från M_4 .

Analyser utförda av SSM:s externa experter antyder även att ett jordskalv längs med Singö-zonen med en momentmagnitud mellan M_6 och $M_{6,3}$ under dagens spänningsförhållanden oavsett sprickstorlek leder till sekundära rörelser som är större än 50 mm i över 25 procent av de sprickor som ligger mellan 400 och 600 m från zonen, respektive i cirka 5 procent av de sprickor som ligger mellan 800 och 1 000 m från zonen (SSM Technical Note 2014:59). Dessa resultat skulle innebära att vid ett jordskalv längs med Singö-zonen, som ligger 700 m bortom slutförvarsvolymen, kan minst 5 procent av alla sprickor i slutförvarsvolymen hysa en skjuvrörelse som överstiger 50 mm. I samma studie erhöles resultat av effekterna av jordskalv under en glaciationscykel. Jordskalvsrisk under denna period ansågs vara särskilt förknippad med hävningen av marken framför istäcket ("forebulge"). Dessa resultat skulle innebära att SKB:s användning av ett buffertavstånd på 600 m till närmaste kapsel inte helt kan utesluta att ett jordskalv längs med de regionala deformationszonerna kan ha en effekt på slutförvaret. Detta skulle också medföra att riskbidrag från Eckarfjärden samt Singö-zonen inte heller helt kan exkluderas. Med andra ord tyder resultaten ovan på att SKB:s buffertavstånd från de regionala



deformationszonerna Singö och Eckarfjärden på 600 m kan behöva utökas. Analyser utförda av SSM:s externa experter antyder att avståndet för att större delen av alla sekundära skjuvrörelser ska understiga 50 mm kan behöva vara på över 1000 m, men resultaten pekar även på att vid ett avstånd på ca 2 000 m kan några enstaka sprickor hysa sekundära skjuvrörelser större än 50 mm i samband med samma jordskalv.

Det finns en koppling mellan sambandet mellan skjuvrörelsebelopp och sprickstorlek, och sambandet mellan skjuvrörelsebelopp och avståndet från jordskalvets hypocentrum. Som påpekats ovan kan sekundära skjuvrörelser större än 50 mm på avstånd större än respektavståndet möjligen inte helt uteslutas. Av samma skäl kan inte heller förekomst av sekundära skjuvrörelser större än 50 mm på sprickor med en radie mindre än den kritiska radien med säkerhet uteslutas. SSM anser därför att SKB i kommande steg av sitt program behöver underbygga argumentet om varför frekvensfördelningar för sekundära skjuvrörelser inte kan innehålla enstaka värden större än 50 mm, även om dessa är förknippade med en väldigt låg sannolikhet. Alternativt behöver dessa enstaka värden beaktas i riskberäkningarna. Aspekter som behöver belysas är t.ex. om skärningarna mellan olika sprickor i de naturliga spricknätveken kan länka ihop kortare sprickor till längre enheter, samt om variationer i strykning hos sekundära sprickor i förhållande till strykningen hos den aktiva zonen samt i förhållande till bergspänningsfältet påverkar sekundära skjuvrörelsebelopp.

SKB förutsätter giltigheten av ett linjärt samband mellan skjuvrörelsen längs med en sekundär spricka och dess längd (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.5). Antagandet motiveras av att det finns ett linjärt analytiskt samband som gäller för en rät spricka inbäddad i ett oändligt stort elastiskt medium med homogena egenskaper under statiska förhållanden (Eshelby, 1957). SSM anser dock att det av SKB utnyttjade linjära analytiska sambandet inte är helt tillförlitligt, exempelvis om sprickor interagerar med andra sprickor i ett spricknätverk (DFN) eller med deformationszoner. Sambandet förutsätter ett homogent ostört spänningstillstånd bortom den observerade sprickan. Sprickor i ett spricknätverk kan terminera mot varandra och därmed isolera bergblock som har större frihetsgrader än en isolerad spricka i ett homogent medium. Detta kan också medföra att skjuvrörelse längs med en spricka i närheten av andra sprickor inte nödvändigtvis behöver ha en kontinuerlig variation. Skjuvrörelsen kan istället bli koncentrerad till vissa delområden i anslutning till andra sprickor. Sprickorna i DFN-modellerna påverkar dessutom de lokala bergspänningarna, vilket innebär att det inte är meningsfullt att jämföra skjuvspänningar som föreligger längs med en spricka med den teoretiska skjuvspänningen i det homogena mediet. Lokala koncentrationer av skjuvrörelsen i delar av sprickorna kan sammanfalla med spänningsvariationer i den spruckna bergmassan. SSM anser att SKB behöver beakta dessa frågor i kommande steg i sitt program.

Långa sprickor i en sprucken bergmassa kan bete sig som en sammanlänkning av korta sprickor och kan därför ha skjuvrörelser som inte är proportionella mot spricklängden. INSITE-gruppen anförde liknande argument så som att längden hos en spricka eller en deformationszon inte ensam ger erforderlig information om den möjliga skjuvrörelsen som sprickan eller deformationszonen kan hysa (INSITE, 2009, avsnitt 3.1.2.). Den strukturella interaktionen mellan sprickor och deformationszoner behöver studeras för att bestämma ”representativa längder” för kvantifiering av skjuvrörelser eller seismiska momentmagnituder. Detta beror på att skärningar mellan sprickor med olika orienteringar kan leda till betydligt längre aktiverade objekt än enstaka länkade sprickor (INSITE, 2009).

Observationer som påminner om de ovanstående kan även baseras på jordskalvsmodellering som har genomförts av SSM:s externa experter, i vilka explicita spricknätverk har genererats med hjälp av SKB:s Geo-DFN-modeller (SSM Technical



Note 2013:37; SSM Technical Note 2014:59; SSM Technical Note 2015:30). Dessa jordskalvsimuleringar antyder att det inte finns något tydligt samband mellan spricklängd och sekundära skjuvrörelser som är proportionella med avståndet från jordskalvets hypocentrum. Det finns för närvarande endast ett fåtal vetenskapliga publikationer, utöver de som har tagits fram inom det svenska slutförvarsprogrammet för använt kärnbränsle, som explicit och utförligt hanterar problematiken gällande sambandet mellan spricklängden och sekundära skjuvrörelser. Därmed är det idag svårt att få detta samband bekräftat. Modelleringar utförda av SSM:s externa experter innefattar även vågiga och råa sprickor samt förekomst av bergbryggor mellan närliggande sprickor. Beaktande av dessa kan ha en betydelse så till vida att skjuvrörelserna längs med långa sprickor överskattas om dessa approximeras som plana ytor i vilka vågighet i sprickplanet och andra ojämnheter samt bergbryggor inte tillgodoräknas, vilket överensstämmer med synpunkter som SKB ger uttryck för i SR-Site (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.5). SSM observerar att dessa detaljerade aspekter av sprickornas egenskaper och struktur skulle kunna ge upphov till högre friktionsvinklar och kohesionsvärden i jämförelse med laboratorieresultat för små prover.

SSM anser att en eventuell avsaknad av en linjär relation mellan sekundär rörelse och spricklängd inte behöver gälla för sprickzoner och deformationszoner som innefattar flera närliggande sprickor. I det fallet kan sekundära skjuvrörelser längs med flera sprickor ge upphov till en total skjuvrörelse längs med sprickzonen där bidrag från flera sprickor förekommer. I och med att antalet sprickor i en sprickzon eller deformationszon växer med dess längd gäller sambandet för dessa. En direkt proportionalitet mellan längden och den totala skjuvrörelsen har dokumenterats till exempel för seismiskt aktiva förkastningszoner av Wells och Coppersmith (1994) och Leonard (2010). En sådan proportionalitet kan även observeras i SSM:s modelleringar där de uppmätta rörelserna längs med de större deformationszonerna stämmer väl överens med dess uppskattning baserat på referenserna ovan.

Konsekvenser av tektoniska och glaciationsinducerade skalv för de första hundrausen åren bedöms i kapitel 7 i denna granskningsrapport.

5.12.2 Kvantifiering av jordskalvsrisk

5.12.2.1 Underlag från SKB

Ett av scenarierna i SR-Site är fallet med förlust av säkerhetsfunktioner pga. jordskalv i närheten av slutförvaret, vilket analyseras med probabilistiska beräkningar i avsnitt 10.4.5 i SKB SR-Site huvudrapport. Där använder SKB följande samband för att beräkna antalet potentiellt skadade kapslar pga. jordskalv:

$$N_{failed} = 5 \cdot f \cdot t \cdot N_{crit} \quad \text{Ekv. (5-1)}$$

där:

- f är frekvensen för ett skalv med momentmagnitud större än M5 vid en av de fem potentiellt aktiva zoner som SKB har identifierat inom en radie på 600 m runt slutförvaret. Aktiviteten hos zonerna har bedömts baserat på dess friktionsstabilitet vid antagna bergspänningstillstånd i Forsmark. Koefficienten 5 i Ekv. (5-1) tar hänsyn till alla 5 potentiellt aktiva zoner, eller till den totala sannolikheten i fall endast en av dessa zoner seismiskt aktiveras.



- t är tiden över vilken sannolikheten för kapselskada pga. jordskalv ska beräknas.
- N_{crit} är antalet kapselpositioner i slutförvaret som genomskärs av sprickor som kan hysa sekundära rörelser pga. jordskalv som överstiger 50 mm, vilket är kriteriet för upprätthållande av kapselns integritet. N_{crit} bestäms baserat på en metod som bygger på positiv korrelation mellan sprickländgen och sprickrörelsen, negativ korrelation mellan sprickrörelsen och avståndet mellan sprickan och skalvets hypocentrum. Beräkningen förutsätter att FPI-EFPC-kriteriet för att undvika att långa sprickor genomskär kapselpositionerna tillämpas. SKB utgår från att kriteriet har begränsningar och att konsekvensen av detta är att några sprickor längre än de som kan få en sekundär skjuvrörelse större än 50 mm kan förbli oupptäckta. Dessa oupptäckta sprickor bidrar till slutförvarets beräknade risk.

SKB väljer att skilja mellan tiden före det möjliga inträffandet av ett första större jordskalv, och tiden efter ett första jordskalv som antas inträffa ca 500 000 år efter förslutning av slutförvaret. Ekv. (5-1) ovan gäller alltså generellt för de första 500 000 åren. De probabilistiskt beräknade konsekvenserna av kapselbrott i slutförvaret på grund av jordskalv för perioden mellan tusen år och en miljon sammanfattas i Figur 13-48, SKB SR-Site huvudrapport. Figuren påverkas av avvikelser från Ekv. (5-1) för tiden efter 500 000 år (avsnitt 6.3 i denna rapport)

5.12 .2.2 SSM:s bedömning

Beträffande den totala jordskalvsfrekvensen bedömer SSM:s experter att den kan vara underskattad med ca en faktor 20 (SSM Technical Note 2013:33). Detta baserat på en tätare förekomst av jordskalv i samband med istider. Revidering av jordskalvsfrekvensen behöver göras i samband med att nya stora skalv upptäcks i Skandinavien.

Den totala jordskalvssannolikheten som tilldelas slutförvaret beror på den geografiska arean där förekomst av ett jordskalv påverkar de deponerade kapslarna. SKB använder ett "buffertavstånd" från de regionala deformationszonerna på 600 m, inom vilket ingen kapsel får deponeras på grund av en ökad risk för skjuvrörelse i sprickorna. SSM:s studier visar att buffertavståndet kan behöva vara större och uppemot 1000 m. Detta innebär att den totala sannolikheten för jordskalv också ökar proportionellt pga. Att den geografiska arean där påverkande jordskalv kan förekomma ökar.

Den totala sannolikheten för jordskalv som kan påverka de deponerade kapslarna beror också på vilket intervall för momentmagnituden som ingår beräkningen enligt Ekv. (5-1). SSM bedömer att även jordskalv med momentmagnitud från M4 kan påverka slutförvaret om de förekommer i direkt anslutning till eller i bergvolymen för slutförvaret. Emellertid kan man anta ett högre värde för den nedre gränsen för magnitudintervallet om man utgår ifrån effekterna av större jordskalv i termer av antal sekundära sprickor som skjivas mera än 50 mm. Den nedre gränsen behålls därför i denna bedömning som liksom i SKB:s redovisning är lika med en momentmagnitud på M5. Den övre gränsen för magnitudintervallet antas vara lika med M7,2 (SSM Technical Note 2014:58).

Beträffande effekterna från jordskalv på slutförvaret antas i fortsättningen representativt ett jordskalv på Singözonen med en momentmagnitud mellan M6,3 och M6,5 (SSM Technical Note 2014:59).

Baserat på ovanstående bedömer SSM att den totala sannolikheten, dvs. produkten $5 \cdot f$ i Ekv. (5-1), för alla jordskalv med momentmagnitud mellan M5 och M7,2 som kan påverka slutförvaret kan ligga på cirka $1 \cdot 10^{-5}$ per år. Här har buffertavståndet 1 000 m



använts, istället för SKB:s 600 m, så att arean där jordskalvssannolikheten beräknas bli lika med ca 16 km² och därmed något större än SKB:s.

För beräkning av antalet kritiska kapselpositioner N_{crit} är proportionaliteten mellan skjuvrörelsen och sprickradie en av grundstenarna i SKB:s metod för att uppskatta antalet kapslar som kan skadas av ett jordskalv. För olika avstånd från en aktiv deformationszon bestämmer SKB en ”kritisk radie” över vilken sprickor kan hysa en skjuvrörelse större än 50 mm. FPI-EFPC-kriteriet tillämpas för att undvika så många stora sprickor som möjligt. I vissa geometriska lägen kan dock intrång av långa sprickor i de valda deponeringshålerna inte upptäckas och undvikas, vilket resulterar i de antal kritiska kapselpositioner sammanfattade i Tabell 10-17 och 10-18 i SR-Site huvudrapport.

Beräkningar har genomförts av SSM för att bekräfta SKB:s uppskattning av antalet kritiska kapselpositioner N_{crit} som förväntas förekomma i det planerade slutförvaret i Forsmark (SSM Technical Note 2014:44). Det N_{crit} som har beräknats är generellt högre än det som SKB redovisar. Skillnaden är en faktor på mellan 2,5 och 14 beroende på den använda Geo-DFN-modellen. Vissa implementeringsskillnader (t.ex. en kortare medeltunnellängd baserad på den aktuella SKB-layouten D2) förklarar endast en mindre del av skillnaden i N_{crit} . Särskilt SKB:s värden för N_{crit} för den längre deformationszonen ZFMNW0017 förefaller vara onormalt låga även i jämförelse med de värden SKB själva har tagit fram för andra liknande deformationszoner.

SKB:s metod för att beräkna N_{crit} begränsas möjligen av en avsaknad av proportionalitet mellan spricklängden och sprickans skjuvrörelse. Detta kompenseras dock av att det tillämpade FPI-EFPC-kriteriet är betydligt strängare än vad som skulle behövas. SKB antar att om en spricka skär genom hela deponeringstunneln och dess förlängning träffar en kapselposition ska denna förkastas. Detta motsvarar sprickor med längd och diameter på ca 6 m vid tillämpningen av FPI-kriteriet för en deponeringstunnelhöjd på 4,8 m (SKB TR-10-21, avsnitt 4.4.1). Flacka sprickor som skär genom minst fem intilliggande deponeringspositioner ska också förkastas vilket motsvarar sprickor med diameter på ca 24 m när EFPC-kriteriet tillämpas för ett center-avstånd mellan deponeringshålerna på 6 m (SKB TR-10-21, avsnitt 3.3). Dessa diametrar är betydligt kortare än den minsta storleken för en kritisk spricka på 125 m som SKB har valt att förkasta i vissa områden av slutförvaret.

SKB bedömer att det inte kommer att upptäckas några nya okända deformationszoner som kan hysa ett jordskalv i anslutning till slutförvarsområdet under dess uppförande och drift. SKB antar även att alla sprickor som skär genom hela deponeringstunneln samt deponeringshålerna kommer att kunna identifieras utan undantag genom de undersökningar som sker under driften av slutförvaret. Även alla långa flacka sprickor som träffar flera än fem intilliggande deponeringshål kommer enligt SKB:s bedömning kunna identifieras utan undantag med hjälp av de av SKB föreslagna geologiska och geofysiska metoderna (SKB R-11-14). SSM anser dock att SKB:s metod för närvarande inte beaktar risk för mänskliga fel som kan förekomma när samma mät-, karterings-, projekterings-, kontroll- samt beslutprocesser ska upprepas tusentals gånger under den långa driftperioden för slutförvarsanläggningen.

Inom ramen för FPI-EFPC-kriteriet, kan antalet kritiska positioner N_{crit} på ca 0,11 beräknat av SKB (SKB SR-Site huvudrapport, Tabell 10-17 och 10-18) vara underskattat baserat på en jämförelse med SSM:s beräkning som hamnar på ca 2,3 (SSM Technical Note 2014:44, där en faktor 0,25 har tillämpats på värdet 9,2 i Tabell 15 för att efterlikna SKB:s ”reducerad-skjuv-formel”). Om man sedan lägger till osäkerheter samt mänskliga fel under kartering kan N_{crit} öka med en enhet (SSM Technical Note 2014:22) dvs. till ca



tre, vilket är en dryg storleksordning högre än SKB:s resultat. I följande bedömningar kommer ett värde på 9,2 att användas i beräkningar.

Antalet kritiska positioner N_{crit} kan uppskattas med avancerade beräkningar genom användning av Geo-DFN-modeller, layouten för slutförvaret och antagande om olika kritiska radier beroende på avståndet från de potentiellt aktiva deformationszonerna. Dessa beräkningar är särskilt avancerade och måste genomföras för olika realisationer inom samma Geo-DFN, och för flera tillgängliga Geo-DFN-modeller för att erhålla tillräckligt underlag för bedömningen av kapselskador pga. jordskalv. SSM anser det vara motiverat att göra en bedömning baserat på välgrundade men förenklade antaganden av sprickgeometrin samt dess interaktion med slutförvarslayouten. Strävan är att hålla denna förenklade bedömning så pass oberoende från den bedömning som SKB presenterar i SR-Site så att en jämförelse kan göras för att bedöma tilltron till SKB:s redovisning.

För olika Geo-DFN uppskattas olika antal sprickor som skär genom hela deponeringstunneln. Det mest konservativa antagande gäller för TCM-modellen där ca 17 hela skärningar förutsågs för varje 100 m deponeringstunnel (se Figur 7-5, SKB TR-10-21). Slutförvaret består av ca 200 deponeringstunnlar (SKBdoc 1091960) med medellängd på ca 265 m (SSM Technical Note 2013:44). Detta innebär att i hela slutförvaret förväntas ca 7392 hela skärningar av deponeringstunnlar. Inte alla hela skärningar sammanfaller med deponeringspositionerna. Enligt Figur 29 i (SSM Technical Note 2013:44), måste ca 1400 kapselpositioner undvikas eftersom de skulle kunna sammanfalla med en helskäring av deponeringstunneln och deponeringshålet med en spricka längre än 6 m vid tillämpning av FPI-delkriteriet. När EFPC-delkriteriet tillämpas för att undvika flacka sprickor kan, enligt Figur 30 i SSM Technical Note 2013:44, ytterligare ca 800 sprickor längre än ca 24 m undvikas. Totalt sätt undviks genom tillämpningen av FPI-EFPC-kriteriet ca 2200 sprickor längre än 24 m. Jämfört med totalen på ca 7392 sprickor utgör 2200 sprickor ca 30% av alla sprickor längre än 24 m.

SSM gör antagandet att endast de sprickor som skär genom hela deponeringstunneln och deponeringshålet kan hysa en skjuvrörelse större än 50 mm. Detta kan motiveras med slutsatsen att alla sprickor som endast tangerar deponeringstunneln och deponeringshålet är sannolikt korta eller slutar i anslutning till skärningen, och kan därför inte utsätta deponeringshålet för en skjuvning större än 50 mm. Ett mindre konservativt antagande är att alla sprickor kortare än 125 m (dvs. med diameter mindre än 125 m) inte hyser en skjuvning större än 50 mm. Värdet på 125 m återfinns, å ena sidan, som den minsta kritiska radie som SKB använder i sina beräkningar av N_{crit} , å andra sidan, som den kortaste spricka i SSM:s modelleringar om jordskalvseffekterna på DFN-realiseringar av spricknätverket i slutförvaret (SSM Technical Note 2013:44).

Antagandet om att sprickor kortare än 125 m inte hyser en skjuvning på 50 mm leder till att FPI-EFPC-kriteriet kan accepteras som en metod för att diskriminera långa sprickor. Dessutom redovisar SSM:s externa studie om beräkning av antalet kritiska positioner (SSM Technical Note 2013:44) att största delen av de kritiska positionerna förekommer vid ändarna av deponeringstunnlarna, och därför närmast de potentiellt aktiva deformationszoner som omger slutförvaret. Långa sprickor i anslutning till huvudtunnlarna kan undvikas genom analys av sprickdata från flera deponeringstunnlar samt huvudtunneln. Detta innebär att det är ofta den minsta kritiska diametern som SKB har använt, på 125 m, som mest påverkar beräkningen av antalet kritiska positioner N_{crit} i båda studierna.

Om man accepterar utfallet för tillämpningen av FPI-EFPC-kriteriet som redovisas i SSM Technical Note 2013:44 blir 9,2 sprickor för hela slutförvaret en rimlig skattning av antalet kritiska kapselpositioner som blir oupptäckta vid tillämpning av FPI-EFPC-



kriteriet enligt de mest konservativa värdena i Tabell 15 i SSM Technical Note 2013:44. Om 9,2 sprickor av ca 2200 sprickor undgår FPI-EFPC-kriteriet betyder att ca 0,5 % av alla helskärningar som kan förekomma i deponeringstunnlarna och deponeringshålen förblir oupptäckta.

Av SSM:s modellering av jordskalv med explicita DFN-realiseringar med sprickor större än 125 m (Yoon m.fl. 2014, SSM Technical Note 2014:59) framgår att i det mest konservativa fallet, dvs. för ett jordskalv med magnitud $M_{4,75}$ på zon ZFMWNW2225 under uppvärmning av slutförvaret under dagens spänningsförhållanden, skjuvas ca 30 av de ca 350 modellerade sprickor med mera än kapselbrottskriteriet på 50 mm. I modellerna tas alla Geo-DFN-sprickor som har en skärning på ett horisontellt plan och faller inom slutförvarsvolymen explicit omhand.

Det är baserat på ovanstående resultat nu möjligt att uppskatta antalet kritiska positioner genom att räkna andelen av dessa 30 sprickor som skulle kunna skjuvas mera än 50 mm och som kan sammanfalla med en helskärning av deponeringstunnel och deponeringshålet (dvs. 30 % av alla helskärningar) vilket blir cirka 10 sprickor. Av dessa 10 sprickor skulle ca 0,5% bli oupptäckta på grund av begränsningarna hos FPI-EFPC-kriteriet och därför skulle det totala antalet kritiska positioner N_{crit} baserat på detta resonemang bli ca 0,05.

Antalet deponeringshål som träffas av kritiska sprickor N_{crit} vid ett jordskalv i närheten av slutförvaret är en av de centrala punkterna i SKB:s bedömning av jordskalvsrisken. SKB:s redovisning visar att för de första 120 000 åren är antalet uppskattade kapselbrott N_{failed} lika med 0,0057 för hela förvaret. Enligt SKB motsvarar detta ett värde för N_{crit} på 0,11 efter att har tillämpat FPI-EFPC-kriteriet (se SKB TR-10-21), vilket motsvarar ca 0,0013 % av det totala antalet kapselpositioner för hela KBS-3 förvaret.

En enda kapselposition som av någon anledning, t.ex. otydlig geologi, brist i geologisk kartering, sprickpropagering m.m., skulle förbli oupptäckt efter tillämpningen av FPI-EFPC-kriteriet (eller motsvarande kartering/geofysisk metod utvecklad av SKB för deponeringstunnlarna samt deponeringshålen), skulle innebära en ökning av sannolikheten för kapselbrott vid jordskalv med ca nio gånger jämfört med värdet på 0,0057 som har uppskattats av SKB i SR-Site för tiden de första 120 000 åren.

Om man använder parametrarna enligt SSM:s bedömning för den totala sannolikheten som räknas fram ovan, dvs. $1 \cdot 10^{-5}$ per år, och antalet kritiska positioner som uppskattas, dvs. ca 0,05 kritiska positioner N_{crit} för hela slutförvaret, i Ekv. (5-1) kommer man fram till ett totalt antal av potentiellt skadade kapslar N_{failed} som är lika med ca 0,05 vid 100 000 år. Detta är endast cirka 10 gånger större än värdet på 0,0057 som uppskattas av SKB vid tiden 120 000 år efter slutlig förslutning av slutförvaret.

En jordskalvfrekvens på $1 \cdot 10^{-5}$ per år innebär statistiskt att i genomsnitt ett jordskalv med momentmagnitud större än M_5 kan förekomma under en period på 100 000 år (SSM Technical Note 2013:33).

SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB har utvecklat en gedigen metodik för kvantifiering av risken för kapselskador i slutförvaret pga. jordskalv vilket har lett till möjligheten att ta fram ett underlag för konsekvensanalysen. Denna metodik har tidigare inte varit tillgänglig inom vetenskapsvärlden. De tillgängliga modelleringsresultaten som såväl SKB som SSM har tagit fram pekar på att det finns förutsättningar att genom en anpassad förvarsutformning hantera jordskalvsrisk för ett slutförvar vid Forsmark. Dessa resultat har baserats på vissa mycket konservativa antaganden (t.ex. valet av ett jordskalv med momentmagnitud större än M_6 som representativ för att kvantifiera skalveffekten på sprickorna i slutförvaret), grova förenklingar (t.ex. bortse från antagande om



proportionalitet mellan sprickstorlek och skjuvrörelsen), olika bedömningar av jordskalvsfrekvensen (baserade på nutida jordskalv eller post-glaciala postulerade jordskalv i Forsmarksområdet) samt osäkerheter i ingående parametrar för jordskalv- samt riskanalysen för att bedöma dess konsekvenser. I detta kapitel berörs dock inte kapselns mekaniska tålighet för skjuvrörelser (se avsnitt 5.10 i denna rapport) eller radionuklidtransport och riskberäkningar i samband med skjuvlastfallet (se avsnitt 7.4.1 i denna rapport).

I ljuset av SSM:s bedömning samt granskningskommentarer finns i SKB:s kommande redovisning utrymme för utveckling och förbättring av SKB:s metodik särskilt med avseende på:

- En kompletterande deterministisk och probabilistisk seismisk riskanalys ("Probabilistic Seismic Hazard Assessment", PSHA; Budnitz et al., 1997) av slutförvarsanläggningen inklusive mark- och underjordiska delar för tiden för uppförande, drift, förslutning samt efter förslutning med särskilt fokus på post-glaciala förhållanden.
- En kompletterande probabilistisk riskanalys av förkastningsrörelser pga jordskalv i Forsmarksområdet ("Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis", PFDHA; Youngs m.fl., 2003) av slutförvarsanläggningen inklusive mark- och underjordiska delar för tiden för uppförande drift, förslutning samt efter förslutning med särskild fokus på post-glaciala förhållanden.
- En alternativ metod för uppskattning av antal skadade kapslar N_{failed} i samband med jordskalv i närheten av slutförvaret, till metoden i SR-Site, i vilken inga antaganden gällande bör ingå: a) proportionaliteten mellan sprickstorleken och skjuvrörelsen i spricknätverket, b) vilka sprickzoner som kan aktiveras, samt c) vilka momentmagnituder som kan utvecklas vid jordskalv i Forsmarksområdet. Ett bekräftande av resultat genom att tillämpa en alternativ metod för bestämning av antal skadade kapslar N_{failed} vid jordskalv som leder till liknade resultat, skulle innebära att osäkerheterna hos ingående parametrar i analyserna kan hanteras samt att en tillförlitlig uppskattning av graden av konservatism i beräkningsresultat skulle kunna kvantifieras.
- En kvalitetssäkring av de komplicerade beräkningarna kopplade till FPI/EFPC-kriteriet för att förklara eller avfärda de skillnader mellan SKB:s redovisning (SKB TR-10-21) och SSM:s kvantifiering av antalet kritiska positioner i slutförvaret N_{crit} (SSM Technical Note 2014:44).
- En särskild insats bör också göras för att motivera SKB:s val av buffertavståndet på 600 m från de sprickzonerna längre än 3 km som ligger i anslutning till slutförvaret. Ändringar av detta värde innebär en större yta där förekomsten av jordskalv behöver antas i beräkningen. Därav kan följa att flera potentiellt aktiva deformationszoner skulle kunna påverka värdet 5 för koefficienten i Ekv. (5-1).

5.13 Bedömning buffererosions omfattning i slutförvarsmiljön och tider till uppkomst av advektiva förhållanden i deponeringshål

I detta avsnitt beskriver och granskar SSM SKB:s beräkningar kring när buffererosion i deponeringshålen blir så omfattande att advektiva förhållanden uppstår. Beräkningarna syftar till att kvantifiera när de av SKB definierade säkerhetsfunktionerna för bufferten inte längre kan upprätthållas. Dessa säkerhetsfunktioner är att begränsa advektiv transport (Buff 1), reducera mikrobiell aktivitet (Buff2), förhindra kapselsjunkning (Buff5), filtrera kolloider (Buff7) samt sorbera radionuklider (SKB SR-Site huvudrapport, Buff8, figurer 8-2 och 8-3). Advektiva förhållanden i deponeringshålen leder till betydligt ökad



sulfidkorrosion och huvudscenariot i SR-Site har baserats på att sulfidkorrosionen ökar pga. buffererosion och att därmed en risk för kapselbrott föreligger. SKB har redovisat beräkningar som syftar till hela tiden för slutförvarets utveckling och beträffande buffererosion förväntas processen ske för tider längre än 1000 år. Enligt resultaten från beräkningarna uppkommer advektiva förhållanden endast i enstaka deponeringshål för tider fram till 100 000 år. Eftersom SSM:s föreskrifter ställer de mest långtgående kraven för tiden innan 100 000 år redovisas SSM:s bedömning i detta kapitel. I avsnitt 5.8 beskrivs ingående SKB:s konceptuella modell för buffererosionsprocesserna och SSM:s bedömning av denna. Den konceptuella modellen ligger till grund för beräkningarna som behandlas i detta avsnitt.

SKB har på SSM:s begäran inkommit med flera förtydliganden och kompletteringar relaterade till beräkningar av erosionstider:

- SKBdoc 1448717, Svar till SSM på begäran om förtydligande om nedträngning av utspädda vatten.
- SKBdoc 1396324, Svar till SSM på begäran om komplettering rörande osäkerheter i hydrogeologiska beräkningar, med hänvisning till en promemoria som beskriver beräkningen av buffererosionstider utifrån hydrogeologiska resultat (SKBdoc 1396325) och till en Excel-fil med beräkningar av buffererosionstider (SKBdoc 1396328).
- SKBdoc 1385068, 2013, Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kemisk erosion av buffert.
- SKBdoc 1396663, 2013. Documentation of the code for erosion and corrosion calculations in SR-Site.
- SKBdoc 1416908, 2013. Future evolution of groundwater composition at Forsmark during an extended temperate period (bilaga till SKBdoc1396703).

5.13.1 Underlag från SKB

De beräknade tiderna det tar i enskilda deponeringshål att nå advektiva förhållanden på grund av buffererosion utgår från indata för vattenflödeshastighet i en spricka som skär ett deponeringshål. Vattenflödeshastigheten beräknas baserat på Darcyflödet U_r (även benämnt V_o) och sprickaperturen (SKBdoc 1396325, ekvation 4-4). Sprickornas aperturer beräknas utifrån deras transmissivitetsfördelning i hydro-DFN-modellen (SKB TR-10-52, ekvation 6-19). SKB tillämpar i erosionsberäkningarna resultat från tre olika hydrogeologiska konceptuella modeller som utgår ifrån olika samband mellan sprickstorlek och transmissivitet (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.2). För varje modell har SKB genomfört ett antal realiseringar för hydro-DFN-modellen (SKB TR-10-66, appendix A tabell A2-1). SKB antar i erosionsberäkningarna grundvattenflöden som motsvarar de som har beräknats för den tempererade fasen vilket anges vara konservativt. Darcyflödenas medelvärde för hela glaciationscykeln är ungefär 20 procent lägre än flödena under den tempererade fasen (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.6 och 12.6.2; SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.6, se även avsnitt 5.4.2 i denna granskningsrapport). SKB framhåller att en situation där inlandsisens front ligger stilla över slutförvaret i 200 år eller 1000 år är mycket osannolik och att detta fall kan försummas vid beräkning av ett representativt grundvattenflöde som kan tillämpas för hela glaciationscykeln (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.2).

SKB:s redovisning av den grundvattenkemiska utvecklingen beskrivs utförligt i avsnitt 4.6 i denna granskningsrapport och mer specifikt behandlas utvecklingen av salthalt och nedträngning av utspädda vatten till förvarsdjup i avsnitt 5.5. SKB:s redovisning av den buffertgeometri som utvecklas i ett deponeringshål med en skärande spricka där erosion sker behandlas i avsnitt 5.8 i denna granskningsrapport.



För att bufferterrosion ska initieras behöver jonstyrkan i grundvattnet understiga 4 mM (SKB TR-09-34). SKB:s analys har baserats på en uppskattning av hur stor andel av tiden inom en glaciationscykel som så utspädda grundvatten kan förekomma på förvarsdjup. Uppskattningen utgår från den definierade klimatutvecklingen och beräkningar av hur lång tid det tar för utspädda vatten att nå förvarsdjup (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.8, 10.4.6 och 10.4.1; SKB R-09-20, appendix F; se även avsnitt 5.4 och avsnitt 5.5 i denna granskningsrapport). I en komplettering till ansökan gör SKB en reviderad bedömning av andelen av tiden som utspädda grundvatten beräknas föreligga. Detta baseras på en reviderad tolkning av resultaten för nedträngningstider för utspädda vatten till förvarsdjup. Andelen av tiden som utspädda grundvatten beräknas föreligga uppskattas nu till ca halva glaciationscykeln i jämförelse med en fjärdedel av tiden som anges i huvudrapporten (SKBdoc 1448717, se även avsnitt 5.4 i denna granskningsrapport). Urvalskriterier för deponeringshål har en inverkan på resultatet av bufferterrosionsberäkningarna. Utöver det så kallade EFPC kriteriet ("Extended Full Perimeter Intersection Criteria") tillämpas samt det så kallade T/L-kriteriet (Transmissivitets-Längdkriteriet; SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.2 och 5.2.3). T/L-kriteriet innebär att deponeringshål som skärs av sprickor som har en radie större än 250 m eller en transmissivitet som är större än 10^{-6} m²/s utesluts eftersom dessa kommer att kunna detekteras under uppförandet av slutförvarsanläggningen.

SKB redovisar följande beräkningsfall för antalet deponeringshål som på grund av bufferterrosion når advektiva förhållanden inom en miljon år (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.2):

- DFN korrelationsfall; (i) semikorrelerat, (ii) korrelerat, och (iii) okorrelerat
- buffertförlust som krävs för advektiva förhållanden; förlust av 600 kg, 1200 kg eller 2400 kg buffert
- andel tid under en glaciationscykel som bufferterrosion sker; enligt referensutvecklingen eller 100 procent av tiden
- olika fall för sambandet mellan sprickapertur och transmissivitet; basfallet även kallat Äspösambandet och det alternativa så kallade Hjernesambandet

Utöver dessa beräkningsfall diskuterar SKB effekten av olika klimatutvecklingar på bufferterrosion beträffande en förlängd period med tempererade förhållanden och ett fall med långvarig inlandsisutbredning (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.2). SKB:s slutsats är att dessa fall redan täcks in av de andra fallen som ingår i säkerhetsanalysberäkningarna. SKB nämner även olika konceptuella osäkerheter (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.2) och hänvisar till känslighetsanalysen för korrosionsberäkningarna för en bedömning av deras effekt på säkerhetsanalysresultaten. SKB utgår för alla beräkningar av tider när advektiva förhållanden uppstår i deponeringshål från samma ekvation (SKB TR-10-66, ekvation 4-20; SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.3.11). Erosionshastigheten för montmorillonit är i denna ekvation proportionell mot sprickans apertur, samt proportionell mot vattenflödeshastigheten i sprickan som skär deponeringshålet upphöjt i 0,41. Detta samband och tillhörande proportionalitetskonstant Aero har beräknats med en regression utifrån resultat från en mekanistisk erosionsmodell (SKB TR-10-64, avsnitt 5.1; se även avsnitt 5.8.1 i denna granskningsrapport). Tiden det tar att uppnå advektiva förhållanden beräknas sedan som kvoten av massförlusten som krävs för att advektiva förhållanden ska uppstå, erosionshastigheten samt andelen av analystiden som utspädda grundvatten förekommer på förvarsdjup och som bufferterrosion pågår (SKB TR-10-66, ekvation 4-21).

SKB har beräknat fördelningarna av tiderna det tar innan advektiva förhållanden nås i deponeringshålen och redovisar medelantalet advektiva positioner efter 100 000 år och en miljon år (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.2, figur 12-3). SKB har inte redovisat tider för enskilda deponeringshål i ansökansmaterialet, men resultaten finns dokumenterade i SKB:s dokumenthanteringssystem och en av resultatfilerna har skickats

till SSM som en komplettering till ansökan (SKBdoc 1396328). En fördelning av erosionshastigheterna för hydrogeologiska basfallet redovisas i SR-Site huvudrapporten (figur 10-72). För det semikorrelerade basfallet erhålls som ett medeltal endast 0,6 deponeringshålspositioner med advektiva förhållanden medan fallet med pessimistisk sprickapertur ger 7,5 deponeringshålspositioner med advektiva förhållanden efter 100 000 år. För beräkningar baserade på att buffererosion förekommer under halva glaciationscykeln erhålls 3 advektiva deponeringshålspositioner (SKBdoc 1448717). Det korrelerade och det okorrelerade basfallet ger båda 1,2 advektiva positioner i medeltal. Efter en miljon år är motsvarande siffror för semikorrelerade basfallet 19 positioner och för fallet med pessimistiska sprickaperturer 575 positioner. För beräkningar baserade på att buffererosion förekommer under halva glaciationscykeln erhålls 71 advektiva positioner för det hydrogeologiska basfallet (SKBdoc 1448717). Det korrelerade basfallet resulterar i 68 advektiva positioner och det okorrelerade resulterar i 279 advektiva positioner. I beräkningarna i huvudscenariot behandlas även det gränssättande fallet att alla deponeringshål uppvisar advektiva förhållanden under hela analystiden (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.1).

SKB har gjort bedömningen att den semikorrelerade varianten av den hydrogeologiska DFN-modellen är mer kompatibel med platsdata än de andra varianterna och att buffererosionsmodellen är den bästa representationen av nuvarande kunskap även om vissa konceptuella osäkerheter fortfarande föreligger.

5.13.2 SSM:s bedömning

SSM noterar att SKB i samband med demonstration av kravuppfyllelse och analysen av huvudscenariot drar slutsatsen att det hypotetiska antagandet advektiva förhållanden i samtliga deponeringshålspositioner redan från tidpunkten för slutlig förslutning inte har någon stor betydelse för antalet beräknade kapselbrott i förhållande till de fall som har baserats på en mera realistisk analys av buffertens skyddsförmåga. Detta innebär att osäkerheter kring analysen av antalet eroderade deponeringshålspositioner som identifierats under granskningsprocessen har liten betydelse för analysen av antalet fallerade kopparkapslar under analysperioden. Enligt SSM:s bedömning är dock SKB:s konservativa antagande om advektiva förhållanden för hela analystiden problematiskt även om det beräkningsmässigt är korrekt därför att fallet inte medför en avvägd representation av de båda tekniska barriärernas relativa skyddsförmåga. Pessimistiska eller gränssättande antaganden med avseende på buffertens skyddsförmåga innebär att konceptuella antaganden kring kapselns förväntade utveckling i samband med korrosionsprocesser får mycket stor betydelse. SSM har identifierat ett flertal frågeställningar kopplade till SKB:s representation av korrosionsprocesser (se avsnitt 5.11 i denna granskningsrapport). Denna fokusering på kapselns skyddsförmåga försvårar också en helhetsbedömning av barriärsystemets robusthet. De är inte heller möjligt att optimera slutförvarets säkerhetsfunktioner baserat på att en barriär hanteras med realistiska antaganden och en annan med pessimistiska antaganden. SSM anser därför att förloppen i referensutveckling och huvudscenariot behöver ge en så representativ och realistisk bild av slutförvarets utveckling som möjligt. Därutöver kan mindre sannolika scenarier och/eller restscenarier belysa betydelsen av konceptuella och parametriska osäkerheter.

SSM konstaterar att SKB:s redovisning av resonemang och beräkningar av tiden det tar att uppnå advektiva förhållanden i ett deponeringshål samt hur många deponeringshål som når advektiva förhållanden i referensutvecklingen har betydande svagheter. SKB har kompletterat ansökan med information som pekar på att resultaten för beräkningarna av buffererosionstiderna som redovisas i ansökan är överskattade givet nya antaganden som har formulerats. SKB har dock inte kompletterat ansökan med en fullständig uppsättning



nya beräkningar utan hänvisar framförallt till resultat för det så kallade basfallet, samt de gränssättande fallen som har utvärderats på nytt. SSM bedömer därför att de redovisade buffererosionstiderna och antal positioner som når advektiva förhållanden inom 100000 år är behäftade med osäkerheter samtidigt som beräkningsresultaten är en grundläggande del av beskrivningen av SKB:s huvudscenario. SSM anser därför att SKB i kommande steg av sitt program behöver vidareutveckla och förnya beräkningar för fördelningen av tiderna det tar att nå advektiva förhållanden i samtliga deponeringshålspositioner.

En viktig förutsättning för beräkningarna av tider tills advektiva förhållanden uppstår i deponeringshål är grundvattenflödet vid deponeringspositionerna. SSM bedömer att SKB har beaktat de viktigaste osäkerheterna genom att redovisa resultat från fall med tre olika samband mellan sprickstorlek och transmissivitet och resultat från ett antal realiseringar för varje samband (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.2; SKB TR-10-66, avsnitt 4.3.6 och appendix A). SSM bedömer dock att en alternativ conceptualisering av flödet genom ett glest nätverk av sprickor möjligen kan ge skillnader i antalet deponeringshål som skärs av vattenförande sprickor och som kan komma att eroderas. Fördelningen av grundvattenflödena till deponeringshålen som skärs av vattenförande sprickor skulle sannolikt påverkas på ett betydande sätt (se även avsnitt 5.4.2 i denna granskningsrapport). För att underbygga förståelsen för grundvattenflödet på buffererosionshastigheter anser SSM att SKB behöver undersöka betydelsen av grundvattenflöde genom ett glest nätverk av kanaler i framtida steg av SKB:s program. Med befintlig information är det svårt att uppskatta den sammantagna effekten på slutförvarets skyddsförmåga av att flödet representeras med ett glest nätverk av kanaler.

En annan betydande ingångsparameter för beräkning av buffererosionstider är sprickornas apertur. Alternativa antaganden för förhållandet mellan transmissivitet och sprickapertur har förhållandevis stor inverkan på antalet positioner som kan bli utsatta för advektiva förhållanden, vilket både SKB:s resultat (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.2) och resultaten från SSM:s externa experters beräkningar pekar på (SSM technical note 2015:49). SKB avfärdar det så kallade Hjernesambandet eftersom elektriska resistivitetmätningar visar att sprickorna bör ha mindre aperturer än de som framräknas med detta samband. Enligt SKB kan Hjernesambandet endast användas som gränssättande övre fall för radionuklidtransportberäkningar (TR-10-52, avsnitt 6.6.9). SSM noterar dock att basfallets samband ger mindre aperturer än de som framkommer av resistivitetmätningarna och med samma argumentation därmed skulle kunna anses vara ett gränssättande nedre fall snarare än ett övre fall (SSM technical note 2015:49). SSM anser att SKB behöver genomföra en utförligare analys kring varför det i referensutvecklingen antagna sambandet kan anses vara det mest realistiska (se även 5.4.2).

SKB tillämpar de flödesvärden som har beräknats för den tempererade fasen under hela glaciationscykeln med argumentet att medelvärdet för flödet under hela glaciationscykeln är mindre än flödena under den tempererade fasen. Sedan multipliceras flödesvärdena med andelen tid under vilken utspätt vatten kan förekomma. SSM anser att det inte är uppenbart detta angreppssätt är konservativt i förhållande till beräkningar som utgår från beräknade flöden för olika klimatfaser och de tider under vilka utspädda vatten föreligger vid deponeringshålen. SSM anser att SKB i kommande steg av sitt program behöver göra en mindre grov uppskattning av hur flöden och buffererosion är fördelade över en glaciationscykel. Enligt SSM:s bedömning behöver också SKB i kommande redovisningar i högre utsträckning och med större realism beakta och beskriva innebörden av den förväntade salthaltutveckling vid Forsmarksplatsen samt en analys av hur salthaltutvecklingen påverkas av osäkerheter både med avseende på berggrundens egenskaper och med avseende på den kommande klimatutvecklingen. SSM bedömer vidare att SKB:s resonemang kring sannolikheten att isfronten vid avsmältningen skulle



ha ett uppehåll på 1000 år direkt över slutförvaret är godtagbart och att sannolikheten för detta fall är liten (se avsnitt 5.2.2. i denna granskningsrapport).

Bufferterosiogeometrin stiliseras av SKB eftersom en exakt geometri är svår att förutspå samtidigt som osäkerheterna enkelt kan gränssättas. SSM delar SKB:s bedömning att osäkerheter i förhållande till kapselkorrosionsberäkningarna kan gränssättas med detta angreppssätt och att denna metod därför är godtagbar som utgångspunkt för korrosionsberäkningar. SSM noterar dock att flödes hastigheterna vid EDZ i deponeringstunnlarnas botten, som i beräkningarna benämns Q2, i allmänhet förefaller vara större än flödes hastigheterna i sprickor som skär deponeringshålet, vilken benämns Q1 (SKB R-09-20, appendix E). Det behöver därför utrönas huruvida erosionshastigheten kan bli större vid toppen av deponeringshålet i jämförelse med i anslutning till en spricka som skär deponeringshålet. SSM anser att SKB tydligare behöver beskriva omfördelningen av buffertmaterial i deponeringshålet vid erosion och förklara om erosion via EDZ kan påverka förhållanden i anslutning till kopparkapseln. Vid erosion i toppen av deponeringshålet har sannolikt även återfyllnadsmaterialet en betydelse, vilket i så fall behöver beaktas.

SSM anser att massan av buffertförlust som krävs för att uppnå advektiva förhållanden är ändamålsenligt framtagen och beskriven av SKB (se avsnitt 5.8 i denna granskningsrapport). Därutöver anser SSM att det är positivt att SKB har utvärderat effekten av osäkerheter i buffertens beskaffenhet genom att modellera alternativ för hur mycket buffertförlust som krävs för att uppnå advektiva förhållanden. SKB bedömer i SR-Site att utspädda hydrokemiska förhållanden kan uppträda under 25 procent av en glaciationscykel baserat på att det tar ca 10 000 år innan utspädda förhållanden uppstår under den tempererade fasen. I en komplettering till ansökan argumenterar dock SKB att andelen snarare kan förväntas vara cirka 50 procent eftersom beräkningarna pekar på nedträngningstider för utspädda vatten i de mest utsatta deponeringshålspositionerna på endast ett tiotal år (SKBdoc 1448717). SSM har genomfört en granskning av SKB:s redovisning av salthaltsutveckling på förvarsdjup (avsnitt 5.5 i denna granskningsrapport). SSM anser baserat på dessa granskningsresultat att det måste anses vara orealistiskt att utspädda vatten kan nå ned till förvarsdjup redan efter ett tiotal år. Även SKB:s detaljerade hydrokemiska analyser ger vissa belägg för denna slutsats (SKBdoc 1416908; SKBdoc 1396703). SSM noterar även att SKB bortser ifrån permafrost som kan förväntas leda till ökade salthalter i grundvattnet tack vare saltutfrysning. En fördubbling av tidsrymden inom vilken bufferterosion sker under en glaciationscykel leder till en halvering av tidpunkterna när advektiva förhållanden uppstår, vilket leder fler advektiva positioner inom de första 100 000 åren. SKB har i kompletteringen redovisat att antalet advektiva positioner som uppstår under de första 100000 första åren ökar från ett till tre. SKB har dock inte redovisat beräkningar för fall som ingår i den relevanta känslighetsanalysen (SR-Site huvudrapporten, figur 12-3). SSM anser att detta är en svaghet eftersom känslighetsanalyser är ett verktyg för att bedöma osäkerheter i samband med konsekvensanalysberäkningar, vid bedömning av barriärernas tålighet samt vid tillämpning av bästa möjliga teknik (se även avsnitt 7.4.4.2 i denna granskningsrapport).

SSM anser vidare att känslighetsanalysen har en bäring på bortvalskriterier för deponeringshål. Eftersom dessa är viktiga verktyg för att optimera förvarets skyddsförmåga finns en anledning för SKB att utvärdera betydelsen av bortvalskriterier för kvantifieringen av bufferterosionen i deponeringshålen. SSM instämmer visserligen med SKB att det nuvarande angreppssättet är rimligt för att gränssätta korrosionsberäkningar. Antaganden om initial advektion i alla deponeringshål medför dock att konceptuella osäkerheter kopplade till analysen av korrosionsprocesser får stor



betydelse när buffertens skyddsförmåga inte beaktas, exempelvis i samband med betydelsen av mikrobiell aktivitet (avsnitt 3.5.7 och 4.6 i denna granskningsrapport). SSM anser att den exakta tidpunkten för advektion i deponeringshål inte har någon större betydelse om tiderna kan inplaceras i den senare delen av glaciationscykeln. Givet antagandet att utspädda vatten uppträder under halva glaciationscykeln (SKBdoc 1448717) skulle dock advektiva förhållanden möjligen kunna nå tidigare. För fallet med Hjernemodellen för sambandet mellan sprickapertur och transmissivitet och fallet med global uppvärmning skulle advektion möjligtvis kunna uppstå redan under den första tempererade fasen som varar knappt 60 000 år med SKB:s antaganden i beräkningarna. Tidpunkten när advektiva förhållanden uppstår skulle då halveras för dessa positioner eller minska en faktor fyra i jämförelse med det ursprungliga fallet erosion under 25 procent av tiden. Detta beror på att det inte blir något avbrott i erosionen innan den leder till advektiva förhållanden.

SSM har givit externa experter i uppdrag att kontrollberäkna fördelningen av buffererosionstider beroende på lokala hydrogeologiska förhållanden. Baserat på informationen från SKB:s platsundersökningar och hydrogeologiska modellering samt SKB:s konceptuella beskrivning av erosionsprocesserna erhålls resultat som överensstämmer med SKB:s (SSM technical note 2015:49). Experterna får även med hjälp av resultat från en alternativ hydromodell mycket likartade resultat givet SKB:s konceptuella beskrivning av buffererosion. SSM:s externa experter påpekar att det i SKB:s redovisning finns motstridiga resultat för regressionen av resultat från den detaljerade numeriska buffererosionsmodellen, men att det tillämpade sambandet förefaller att vara konservativt (se avsnitt 5.8 i denna granskningsrapport).

6. Slutförvarets skyddsförmåga efter 100 000 år

SSM bedömer i detta kapitel SKB:s redovisning av slutförvarets utveckling och skyddsförmåga för tider efter 100 000 år. I avsnittet återges först en bedömning av SKB:s övergripande angreppssätt och argumentationen för dessa tidsperioder. Därefter följer mer detaljerade bedömningar kring SKB:s hantering av denudationen i Forsmarksområdet och SKB:s beräkningar av jordskalvseffekter efter 100 000 år. Bedömningen av SKB:s beräkningar av buffererosion och kapselkorrosion bedöms i avsnitt 5.13 och 5.11 i denna granskningsrapport och kommenteras endast övergripande i detta avsnitt. Denna uppdelning har valts för att SKB har redovisat detaljerade beräkningar för tiden fram till en miljon år sammanflätat med diskussionen av förvarets utveckling för tiden fram till 100 000 år.

I SSMFS 2008:37 ställs krav på att slutförvarets ska utformas så att den årliga risken för skadeverkningar till en representativ individ i den kritiska gruppen efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken. I de allmänna råden till SSMFS 2008:37 framförs att riskanalysens resultat succesivt bör betraktas mer som en illustration av slutförvarets skyddsförmåga givet vissa antagna förutsättningar och att riskanalysen efter första glaciationscykeln bör utsträckas i tid så länge som den tillför betydelsefull information om möjligheten att förbättra slutförvarets skyddsförmåga, dock inte längre än en miljon år. För tider efter de första 100 000 åren anger de allmänna råden att bedömning av slutförvarets skyddsförmåga bör baseras på beräknad risk tillsammans med alternativa indikatorer på säkerhet och slutförvarets skyddsförmåga. En strikt jämförelse med slutförvarets risk anses inte meningsfull men om det finns tecken på störningar i slutförvarets skyddsförmåga bör de bakomliggande orsakerna redovisas liksom möjliga åtgärder för att förbättra slutförvarets skyddsförmåga. Klimatutvecklingen kan därvid förenklat beskrivas som en upprepning av identiska glaciationscykler. När det gäller säkerheten anger 10 § SSMFS 2008:21 att säkerhetsanalysen ska omfatta så lång tid som behövs och i tillhörande allmänna råd anges



att hänsyn bör tas till att meningsfulla analyser inte är möjliga för extremt långa tidsrymder förutom att redovisa att farligheten hos de radioaktiva ämnena avtar med tiden.

Med dessa krav och allmänna råd som utgångspunkt granskas och bedöms i detta avsnitt om SKB:s redovisning för tiden efter 100 000 år är ett godtagbart underlag för att bedöma SKB:s förutsättningar att kunna uppfylla tillämpliga krav. Själva bedömningen om kraven bedöms kunna uppfyllas diskuteras i del 1 i denna granskningsrapport.

6.1 Övergripande redovisning för tiden efter 100 000 år

6.1.1 Underlag från SKB

SKB redovisar angreppssättet i SR-Site för tider efter den första glaciationscykeln i samband med en redogörelse av säkerhetsanalysens olika tidskalor (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.4). Analysen i SR-Site omfattar en miljon år med utgångspunkt från de allmänna råden till SSM:s slutförvarsföreskrifter och med tanke på att det använda kärnbränslet efter 100 000 år har klingat av till en nivå som är jämförbar med motsvarande mängd uranmalm. SKB genomför en kvantitativ riskanalys fram till en miljon år som ligger till grund för diskussioner om slutförvarets skyddsförmåga efter 100 000 år. SKB kompletterar riskberäkningarna med beräkningar av alternativa indikatorer för slutförvarets säkerhet (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.6.3). Därutöver för SKB en diskussion om slutförvarets utveckling efter en miljon år med fokus på utvecklingen fram till 10 miljoner år.

SKB:s riskberäkningar fram till en miljon år baseras på förenklingen att klimatets referensutveckling under den första glaciationscykeln som varar 120 000 år därefter upprepas sju gånger. SKB argumenterar att de flesta säkerhetsfunktioner påverkas av fenomen som följer en cyklisk utveckling utifrån klimatets cykliska utveckling (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.5). Tillstånden för dessa säkerhetsfunktionsindikatorer förblir därmed inom de ramar som referensutvecklingens analyser pekar på. Det finns dock vissa säkerhetsfunktioner som inte följer klimatets cykliska utveckling utan kan betecknas som irreversibla vilket leder till att effekterna på säkerhetsfunktionerna kan bli ackumulativa. Detta gäller buffererosion, som påverkar grundvattenflödet genom berörda deponeringshål, och korrosion av kopparkapslar. Säkerhetsfunktionerna som kopplar till buffertens densitet kan inte med säkerhet upprätthållas för deponeringshål där omfattande erosion leder till att advektiva förhållanden uppstår. Buffererosionen och tilltagande kopparkorrosionen som uppstår på grund av advektiva förhållanden i deponeringshålen beräknas för tidsperioden upp till en miljon år. SKB:s slutsats är att i medel 19 deponeringspositioner utsätts för advektiva förhållanden och mindre än ett kapselbrott från en statistisk synvinkel inträffar under en miljon år baserat på SKB:s analys av referensutvecklingen (avsnitt 5.11 i denna granskningsrapport). För fallet med initial advektion och den korrelerade DFN-modellen som ger flest kapselbrott erhåller SKB drygt ett kapselbrott (SR-Site huvudrapport, figur 12-16). Det minst fördelaktiga buffererosionsfallet resulterar i 575 advektiva positioner efter en miljon år (SR-Site huvudrapport, figur 12-3). Beträffande jordskalv så ökar sannolikheten för att ett skalv av en viss magnitud ska inträffa med analystiden vilket påverkar riskanalysen. SKB:s beräkningar visar att kapselbrott på grund av jordskalv är osannolikt (avsnitt 5.12 i denna granskningsrapport). Bränslets resteffekt avtar med tiden vilket påverkar beräkningar av permafrostdjup. SKB:s beräkningar pekar på att permafrostdjupet ökar med 37 m när bränslets resteffekt inte ingår i beräkningarna och därmed att säkerhetsfunktionen R4, tillhandahålla termiskt gynnsamma förhållanden, kan upprätthållas.



SKB följer SSM:s rekommendationer i allmänna råden till SSMFS 2008:21 och 2008:37 och tillämpar alternativa indikatorer på slutförvarets långsiktiga säkerhet och skyddsförmåga. SKB framhåller att ett problem med alternativa indikatorer är att det i allmänhet inte finns något kriterium att jämföra med. De säkerhetsfunktionsindikatorer som SKB tillämpar i analysen är relaterade till barriärsförhållanden och inte direkt till koncentrationer och flöden av radionuklider som nämns i allmänna råden. SKB tillämpar utifrån tidigare studier och de finska begränsningarna för utsläpp av radioaktiva ämnen följande alternativa riskindikatorer och referensvärden (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.6.3):

- utsläpp av aktivitet till geosfären som jämförs med de finska aktivitetsbegränsningarna som referensvärden
- radiotoxicitetsflöden från geosfären som jämförs med referensvärden från SPIN-projektet (Becker m.fl., 2002)
- koncentrationer av radionuklider i ekosystem vilka jämförs med uppmätta koncentrationer av naturligt förekommande radionuklider i ekosystem vid Forsmark eller andra jämförbara platser
- flöden av radionuklider som jämförs med naturligt förekommande flöden av radionuklider på platsen, i synnerhet U-238 och Ra-226.

SKB utgår från det centrala korrosionsfallet och beräknar aktivitetsutsläpp från geosfären fram till en miljon år (SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.5.8). Resultaten visar att utsläppen ligger tre storleksordningar under den finska myndighetens STUK:s gränsvärde. Likaså visar jämförelsen av de andra tre indikatorerna med referensvärdena att beräkningsresultaten med marginal ligger under referensvärdena.

SKB diskuterar även slutförvarets övergripande utveckling efter en miljon år med tanke på att en definitiv borte tidsgräns för beskrivning av slutförvarets långsiktiga utveckling inte kan härledas ur SSM:s föreskrifter (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.4.2). SKB redovisar avfallets radiotoxiska utveckling vid intag via födan och konstaterar att radiotoxiciteten minskar något mellan en och tio miljoner år för att sedan förbli konstant under en mycket lång tidsperiod eftersom de dosdominerade nukliderna, särskilt uran-238 och dotternukliderna i sönderfallskedjan Ra-226, ger dosbidrag under extremt långa tidsskalor. SKB för ett resonemang kring platsens utveckling efter en miljon år med tyngdpunkten på tektonik. SKB framhåller att det inte går att anta att mönster och egenskaper hos deformationszoner och sprickor i förvarsområdet kommer att vara tillräckligt konstanta inom tidsrymden en till tio miljoner år för att i någon högre detaljeringsgrad analysera risken för jordskalv. Det kan förväntas att platsen genomgår väsentlig denudation och belastas av sediment från erosion av bergskedjor. SKB drar dock slutsatsen att sprickor som kan skjivas mer än 5 cm kommer att vara sällsynta och att omfattningen av kapselbrott till följd av skjuvlast bör vara begränsad även i tidsperspektivet 10 miljoner år. Om grundvattenkemi och flödesförhållanden i berggrunden inte förändras på ett väsentligt sätt och kommer att likna nuvarande förhållanden skulle omfattningen av kapselbrott till följd av korrosion vara begränsad till några få kapselbrott under denna tid med utgångspunkt från resultaten att i medel 0,12 kapselbrott förväntas baserat på referensutvecklingen under en miljon år. SKB konstaterar att det hypotetiska fallet som innefattar att alla tekniska barriärer har degraderats och att fördröjning av radionuklider i berggrunden inte kan tillgodoräknas resulterar i utsläpp av radioaktiva ämnen som efter en miljon år motsvarar doskonsekvenser jämförbara med den naturliga bakgrundsstrålningen.

Slutligen för SKB ett resonemang kring naturliga analogier (SR-Site huvudrapport, avsnitt 14.5). Det finns uranfyndigheter i Kanada på 450 m djup som har bestått i över en miljard år samtidigt som inga geokemiska spår av dessa förekomster har kunnat påträffas vid ytan. Detta pekar på att rörligheten av radionuklider från en reducerande uranhaltig miljö på denna plats är så pass begränsad att ämnena associerade med malmen har hållits kvar



under geologiska tidsrymder. Liknande slutsatser kan dras från uranmalmsrika områden i Oklo, Gabon, där kriticitet uppstod naturligt i berget för cirka två miljarder år sedan. I avsnitt 14.6 i SR-Site huvudrapport diskuterar SKB mer utförligt naturliga analogier och deras användbarhet i samband med säkerhetsanalyser.

6.1.2 SSM:s bedömning

SSM anser sammanfattningsvis att SKB har valt lämpliga tidsrymder för säkerhetsanalysen och att det generellt är ett godtagbart angreppssätt att basera analyserna på en upprepning av referensglaciationscykeln i enlighet med SSM:s allmänna råd. SSM bedömer att det är bra att SKB har genomfört en kvantitativ riskanalys för tidsperioden en miljon år, även om SSM i denna granskningsrapport i första hand har bedömt slutförvarets långsiktiga utveckling under de första 100 000 åren. SSM bedömer dock att SKB i sin presentation av beräkningsresultat har lagt väl stor vikt vid exakta resultat från kvantitativa beräkningar samt risk/dos uppskattningar för tiden mellan 100 000 år och fram till en miljon år, särskilt med tanke på att osäkerheter som uppstår till följd av antagandet av den upprepade referensglaciationscykeln inte diskuteras i samband med redovisning av resultaten. SSM anser att tiden efter 100 000 år succesivt med ökande tidsintervall behöver ses som en illustration av slutförvarets utveckling och som en utgångspunkt för en analys av möjligheter till att förbättra slutförvarets skyddsförmåga. SSM bedömer att SKB i kommande steg i sitt slutförvarsprogram därför på ett mera utförligt sätt behöver identifiera och analysera osäkerheter för förutsägelser för tider bortom 100 000 år samt diskutera konsekvenser av att basera analysen på upprepade identiska glaciationscykler. Därutöver behöver SKB diskutera hur osäkerheter som uppstår i och med förutsägelser på mycket långa tider kan hanteras genom att anpassa slutförvarsutformningen. För tider bortom en miljon år anser SSM att prognoser kring sannolikhet för kapselbrott har begränsad betydelse för bedömning av kravuppfyllelse men att vissa analyser av den naturliga barriärens utveckling även på extremt långa tidsintervall bör ha en mera betydande roll. SSM anser att SKB i framtida steg i slutförvarsprogrammet behöver fokusera på betydelsen av osäkerheter för att möjliggöra en optimering av slutförvarets barriärer och långsiktiga skyddsförmåga inom tidsperioden en miljon år.

SSM anser att SKB:s angreppssätt med att bedöma olika förekommande processer som antingen reversibla eller irreversibla är en bra utgångspunkt för att analysera deras effekter under de glaciationscykler som följer på den första cykeln.

Exakta kvantitativa resultat för tider uppemot en miljon år, behöver åtföljas av en analys kring hur osäkerheter och antagandet om upprepade glaciationscykler påverkar beräkningsresultatens betydelse och innebörd, vilket gäller såväl advektionskorrosionsfallet som jordskalvsscenario. Kvantitativ analys för tidsperioden en miljon år kan anses vara en bästa möjliga uppskattning baserat på den information som finns tillgänglig, men för tider efter 100 000 år minskar betydelsen av kvantitativa resultat gradvis medan analysen av osäkerheternas innebörd ökar. Detta gäller även dos och riskberäkningarna som är kopplade till antaganden om biosfärsförhållanden. SSM anser att en utökad diskussion av osäkerheter stärker tilltron till resultatens betydelse. Betydelsen av nuvarande modelleringsresultat är svårtolkad, bland annat därför att det förväntade antalet kapselbrott i SR-Site redovisas med upp till tre decimaler (SR-Site huvudrapport, figur 12-16).

Ett exempel på en osäkerhet som behöver belysas följer av sannolikheten för att upprepade belastnings- och avlastningscykler av inlandsis påverkar tunnelsystemet samt spricknätverket runt slutförvaret. Återkommande cykler med belastning och avlastning kan leda till utmattningsfenomen med resultatet sprickbildning i berget runt



deponeringstunnlar och deponeringshål. Dessa fenomen kan accentueras av de mekaniska och/eller fysikaliska-kemiska processer som påverkar sprickbildningen i bergmatrisen och utvecklingen av spricknätverket i anslutning till de deponerade områdena, dvs. tidsrelaterade deformationer, underkritisk sprickpropagering och spänningskorrosion i bergsprickor (avsnitt 4.4.6 och 5.3.6 i denna granskningsrapport). En generell utveckling med sprickbildning i slutförvaret kan påverka omfattning av spjälkning runt deponeringshålen och bergskadезonen runt deponeringstunnlarna och därmed öka transmissiviteten på spricknätverket eller öka materieförföringen från spricksystemet till bufferten. Sådana förändringar har en betydelse för utvecklingen av de tekniska barriärerna.

Ytterligare exempel på osäkerheter som SKB behöver belysa i framtida steg i sitt slutförvarsprogram beskrivs av SSM i följande avsnitt om denudation och jordskalvseffekter för tiden efter 100 000 år. SSM:s granskning pekar därutöver på vissa förbättringsåtgärder inom områdena hydrologi, grundvattenkemi, buffererosionsberäkningar och utvärderingen av kopparkapselns långsiktiga utveckling.

SSM konstaterar att SKB inte uttryckligen har kopplat resultat från analys av tider efter 100 000 år och längre till osäkerheter som uppkommer i och med mycket långa tidsrymder och möjligheter att förbättra slutförvarets skyddsförmåga. SKB sammanfattar viktiga osäkerheter som påverkar den beräknade risken för hela analysperioden (SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.10) och drar slutsatsen att utvecklade kriterier för urval av deponeringshålspositioner har en stor potential att minska slutförvarets långsiktiga risk. SSM bedömer att detta förhållningssätt är godtagbart men anser att SKB i kommande steg i sitt slutförvarsprogram mer ingående behöver analysera om betydelsen av osäkerheter kopplade till extremt långa tidsperspektiv kan begränsas även med annan anpassning av slutförvarets utformning så som val av förvarsdjup eller val av minimiavstånd till större deformationszoner.

SSM noterar att SKB har valt att presentera alternativa indikatorer för slutförvarets skyddsförmåga i linje med de allmänna råden till SSMFS 2008:37. SKB har baserat beräkningar av de alternativa indikatorerna på detaljerade riskberäkningar fram till en miljon år. SKB framför att de flesta korrosionsfallen kan skalas till de alternativa indikatorerna med hjälp av utsläppet av radionukliden radium-226. SSM konstaterar att jämförelsen mot de alternativa indikatorerna pekar på att de av SKB valda referensvärdena medför ungefär samma marginaler som analysen av kravuppfyllelse i förhållande till riskkriteriet. Eftersom SKB i redovisningen framhåller att riskkriteriet har förutsättningar att uppfyllas även för tider fram till en miljon år, så finns det ingen anledning för att de andra indikatorerna skulle peka på något annat än resultat under referensvärdena. SSM saknar dock en värdering av osäkerheter kopplade till alternativa säkerhetsindikatorer. Eftersom dos- och riskberäkningarna är avhängiga beräkningar av radionuklidens spridning i biosfären och på vilket sätt de tas upp av människor, så har de alternativa indikatorerna fördelen att de inte kräver specifika antaganden om biosfärsförhållanden eller om mänsklig aktivitet vid Forsmarksplatsen och på så sätt kan de anses vara robusta. SSM konstaterar att resultat från utvärdering av alternativa indikatorer inte tillför särskilt mycket med tanke på att de i stort sett är proportionella mot utsläpp av den dominerande radionukliden.

SSM delar SKB:s uppfattning att även om riskanalysen är förknippad med en absolut tidsgräns (SSMFS2008:37, AR till 10-12§§) så bör inte en fixerad borte tidsgräns tillämpas för analysen av slutförvarets generella utveckling. SSM anser därför att det är lämpligt att SKB på ett övergripande plan har redogjort för slutförvarets utveckling även efter en miljon år. SKB har visat att avfallets radiotoxicitet endast avtar något efter en miljon år och för en mycket lång tid framåt. Den extremt långa halveringstiden för uran-



238 medför att betydelsen av dosdominerande dotternuklider som Ra-226 kvarstår. SSM delar även SKB:s uppfattning att det inte är meningsfullt att kvantitativt analysera risker för kapselbrott pga. jordskalv efter en miljon år. SSM anser att SKB:s argumentation för att omfattning av kapselbrott pga. jordskalv och korrosion är av begränsad betydelse även för tidsperspektivet 10 miljoner år. Som SSM framhåller ovan anses analysen av tider bortom 100 000 år och upp till en miljon år redan att betrakta som illustrativa med tanke på att osäkerheterna förväntas öka väsentligt i samband med upprepningar av hela glaciationscykler. SSM anser dock att SKB:s dosberäkningar för fall som antar kapselbrott och förlust av buffertens säkerhetsfunktioner samt även för illustrativa syften en helt försummad geosfärsretardation har stor betydelse. Dessa fall ger för det mest pessimistiska fallet dos/risk i ungefärlig nivå med bakgrundsstrålningen vilket är av värde för gränssättning av tänkbara konsekvenser på mycket lång sikt. SSM noterar dock att vissa beräkningar som beaktar geosfärsretardation utgår från antaganden om att huvuddelen av deponeringshålen inte skärs av vattenförande sprickor. Detta antagande kan ifrågasättas för tider bortom en miljon år med tanke på att denudation skulle avsevärt kunna förändra spricksystemets beskaffenhet både i när- och fjärrområdet.

SSM anser att användning av information från naturliga analogier har en begränsad betydelse i förhållande till uppfyllelse av föreskriftskrav. SSM anser dock att det är betydelsefullt och ändamålsenligt att SKB har sammanställt information från naturliga analogier av betydelse för SKB:s ansökan eftersom utvecklingen av vissa naturliga system delvis har egenskaper som liknar slutförvarssystemets. Resultaten ger vissa indikationer på vilka kombinationer av miljöer och material som medför goda förutsättningar för beständighet och långsam transport under mycket långa tider. Det är dock svårt att i samband med bedömningar av kravuppfyllelse basera argumentationen på naturliga analogier eftersom det med tanke på systemens stora komplexitet är svårt att entydigt påvisa likheterna mellan slutförvarssystemet och de naturliga analogierna.

6.2 Denudation för tider efter 100 000 år

För hela analysperioden på en miljon år är behöver hänsyn tas till den totala denudationen, dvs. vittring och erosion av markytan, som kan förutsättas ske. Om omfattande denudation skulle ske blir förvarsdjupet med tiden betydligt mindre vilket kan påverka slutförvarets fortsatta utveckling. Slutförvarsdjupet påverkar bergmekaniska, hydrogeologiska och grundvattenkemiska förhållanden och även möjligheten för temperaturer under fryspunkten att nå ner till slutförvaret. Eventuella förändringar i dessa förhållanden jämfört med referensutvecklingen behöver beaktas vid bedömning av de tekniska barriärernas integritet och radionuklidtransport för mycket långa tider.

6.2.1 Underlag från SKB

SKB:s beskrivning av denudationen i Forsmark redovisas i klimatrapporten (SKB TR-10-49, avsnitt 3.5), vilket innefattar en kvantifiering av vittrings- och erosionshastigheterna under hela analysperioden (SKB TR-09-18). SKB har även gjort en bedömning av den glaciala erosionen under en glacial cykel (SKB TR-04-25). En kort sammanfattning av den totala denudationen under hela analysperioden ges i huvudrapporten till SR-Site (SR-Site huvudrapport, avsnitt 6).

SKB har på SSM:s begäran om komplettering förtydligat vilken effekt en mycket högre glacial erosion har för förvarets temperaturutveckling med avseende på permafrost (SKBdoc 1396769).

Genom studier av berggrundens långsiktiga morfologiska utveckling uppskattar SKB den totala denudationen av markytan i Forsmark-regionen till 8-21 m/Ma. Av denna bedömer

SKB att den glaciala erosionen står för upp till 16 m/Ma (SKB TR-10-49, tabell 3-17). Detta ligger i linje med SKB:s skattning av den glaciala erosionen baserat på medeltjockleken av de glaciala avlagringarna i de områden som täcktes av is under det senaste glaciala maximumet (SKB TR-04-25). De låga denudationshastigheterna förklaras av den låga topografiska reliefen i området, den hårda berggrunden och av att förvaret inte kommer att placeras i någon större deformationszon (SKB TR-10-49, avsnitt 3.5.4). SKB visar även att låga denudationshastigheter i Forsmark stöds av den vetenskapliga litteraturen (Hallet m. fl. 1996, Koppes och Montgomery 2009), i vilken argument framförs för att topografi och glaciärens temperaturförhållande styr en glaciärs förmåga att erodera underlaget.

SSM har begärt kompletteringar gällande bl.a. temperaturkurvans felgränser efter ismodellens kalibrering, vilket resulterade i ett förtydligande av den dokumentation som ursprungligen har levererats (SKBdoc 1396769). I förtydligandet antar SKB, baserat på SSM:s rekommendation, att den glaciala erosionen är tiofalt högre och därmed upp till 20 m per glaciationscykel. Det innebär att efter de sju första glaciationscyklerna är markytan sänkt med 140 m och därmed kan -4°C isotermin nå förvaret under glaciationscykel 8, i slutet av analysperioden på 1 miljon år (SKBdoc 1396769, tabell-1). Detta under den mycket pessimistiska förutsättningen att alla parameterosäkerheterna, inklusive temperaturen, i permafrostmodellen är satta till de värden som ger högst permafrosttillväxt.

6.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s uppskattning av den glaciala erosionen och hantering av osäkerheterna gällande storleken på den glaciala erosionen under kommande glaciationscykler är ändamålsenlig för tillståndsprovningen. SSM anser dock att SKB inför framtida steg i sitt program behöver kvantifiera osäkerheter kring graden av glacial erosion med beaktande av den höga glaciala erosionen som har förekommit utanför Upplandskusten.

SSM har i granskningen utgått från SKB:s redovisning som sammanfattas ovan. Förutom detta material har SSM beaktat resultat från SSM:s externa expert för granskning av hanteringen av glacial erosion i SR-Site (SSM Technical note 2012:60). Därtill har SSM finansierat ett forskningsprojekt som syftar på att öka förståelsen av processerna som påverkar underlaget under en glaciation med speciellt fokus på deglaciationsskedet (Holmlund m.fl., 2016).

Värden för glacial erosion från nuvarande glaciärer skiljer sig markant beroende på klimatet, dvs. glaciärens temperatur och tillgången på glacialt smältvatten, och berggrundens egenskaper (Koppes m.fl., 2015; Koppes och Montgomery 2009; Fernandez m.fl. 2011 och referenser däri). Erosionsförmågan hos nutida glaciärer förefaller minska betydligt över tidskalor omfattande en glaciationscykel eller hela kvartärperioden (Koppes och Montgomery 2009; Fernandez m.fl. 2011; Delmas m.fl., 2009). Erosionshastigheten över längre tidskalor kan följaktligen ses som ett genomsnitt över varierande glaciala förhållanden, som exempelvis glaciärens massbalans och tillgång på subglacialt smältvatten. Den låga erosionshastigheten vid längre tidsperspektiv, vilken är jämförbar med de nutida polära glaciärernas erosionsförmåga på ca 0,01 till $<0,1$ mm/år, kan därför förklaras av att kvartärperioden generellt sett har dominerats av ett kallare klimat (glacialer) än det nutida varma klimatet (Koppes m.fl., 2015; Fernandez m.fl., 2011).

En tidig studie från det Grönländska istäcket uppskattar den nutida glaciala erosionen vid östra Grönland till ca 0,01 mm/år (Andrews m.fl., 1994). Detta är jämförbart med uppskattning av den nutida erosionshastigheten för polära glaciärer men betydligt lägre än

den uppskattade nutida glaciala erosionen på ca 0,1 till >10 mm för tempererade glaciärer (Hallet m.fl., 1996). Andrews m.fl., (1994) kan dock ha underskattat den nutida glaciala erosionen med en faktor 10 (Cowton m.fl., 2012). Nyligen gjorda beräkningar av den subglaciala erosionshastigheten i västra Grönland indikerar en nuvarande glacial erosion på ca 2–7 mm/år, vilket är ca 10 gånger högre erosionshastigheter än den uppdaterade beräkningen från östra Grönland (Cowton m.fl., 2012). Denna skillnad kan förklaras av att de olika studierna har utgått från olika storlekar på glaciärernas respektive avrinningsområden över vilken yta den genomsnittliga glaciala erosionen beräknas. Studien från västra Grönland utgår från ett betydligt mindre avrinningsområde som enbart omfattar ablationsområdet. Avrinningsområdet från östra Grönland omfattar även delar av ackumulationsområden där den glaciala erosionen kan förväntas vara betydligt mindre (Cowton m.fl., 2012).

SSM bedömer att framtida glaciationer över Forsmark troligen kommer uppvisa samma erosionsmönster över tid som dagens forskning visar, dvs. den glaciala erosionen över Forsmark kommer att koncentreras till deglaciationsfaserna av kommande glaciationscykler under vilka den kan vara jämförbar med uppskattningarna av den nutida glaciala erosionen vid Grönland. SSM bedömer, i likhet med SKB, att kvalitativa argument för låga glaciala erosionshastigheter är tillämpbara på stora delar av det sub-kambriska peneplanet i Uppland, baserat på områdets klimatutveckling, topografi och berggrundens beskaffenhet. SSM bedömer dock att SKB:s uppskattning av 8-21 m erosion över en miljon år under dessa förutsättningar behöver underbyggas bättre (se nedan). Vidare anser SSM att förvarets placering mycket nära Ålandshavsområdet, vilket påverkades stort under exempelvis Weichselnedisningen, innebär att det kan ifrågasättas om dessa argument är helt tillförlitliga (SSM Technical note 2012:60). SSM:s externa expert uppskattar att erosionen i Ålandshavsområdet skulle kunna uppgå till ca 200 m på en miljon år vilket motsvarar den tiofaldigt ökade erosionshastigheten som SSM i sin komplettering rekommenderade SKB att beakta (SSM2012-2426-107). SKB genomförde beräkningar för denna erosionshastighet men ansåg att sådana höga erosionshastigheter kan betraktas som hypotetiska (SKBdoc 1396769).

Med anledning av den potentiella framtida glaciala denudationen i Forsmarksområdet har SSM finansierat forskning vilket omfattat studier av nutida glaciärer och inlandsisar, geomorfologiska data från land och Bottenhavet samt modellering av Weichselisen och dess känslighet för smältvatteninjektioner i underlaget. Dessa studier har gett ökad insikt i hur en kommande nedisningar kan påverka miljöerna vid norra Upplandskusten. Den isström som har gått från Bottenhavet ner till Ålands hav har lämnat mycket tydliga spår i havsbotten och rimligen medfört en hög grad av erosion. Väster om den djuprännan, mellan Åland och Upplandskusten, som isströmmen har gått i är de glaciala spåren också tydliga, men där är erosionen svårare att kvantifiera (Holmlund m.fl., 2016).

SSM bedömer att SKB behöver underbygga de kvalitativa argumenten för en låg erosionshastighet på ca 1-2 m glacial erosion per glaciationscykel, exempelvis genom att mäta förekomsten av kosmogena nuklider (Be-10, Al-26) i exponerade berggrundsytor i profiler över Forsmarksområdet mot kusten. Berggrundsytor som eroderats mer än ca 2 m under den senaste glaciationen bör ha en kosmogen nuklidålder motsvarande tiden när berggrundsytan senast blottades, dvs. motsvarande områdets senaste deglaciationsålder. Berggrundsytor där den glaciala erosionen varit mindre än ca två meter kommer i motsvarande grad att ge högre åldrar med minskad glacial erosion på grund av nedärvda kosmogena nuklider från perioder av tidigare berggrundsexponering (Fabel och Harbor, 1999). SSM bedömer att en sådan studie har potential att fastställa graden av glacial erosion som inträffade under den senaste glaciationscykeln. SSM anser att dessa resultat tillsammans med beaktande av en möjlig ökad erosion i likhet med den som kan ha förekommit i Ålandshavsområden behöver ligga till grund för att uppskatta graden av



glacial erosion för hela analysperioden. Resultaten behöver ge information om sannolikheten att betydande förändringar är att vänta på förvarsdjup under en miljon år eller om -4°C isotermen kan förväntas nå förvarsdjup under delar av analysperioden.

6.3 Inverkan av jordskalv efter 100 000 år

SSM bedömer i detta avsnitt SKB:s jordskalvsberäkningar samt analyser av konsekvenser för slutförvaret på en tidskala upp till en miljon år efter slutlig förslutningen av förvaret.

6.3.1 Underlag från SKB

Probabilistiska beräkningar har presenteras (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.5). SKB använder sambandet i Ekvation (5-1) för att beräkna antalet potentiellt skadade kapslar N_{failed} till följd av ett jordskalv som förekommer under de första 500 000 åren. För tiden efter 500 000 år och fram till 1 000 000 år använder SKB ett tillägg från ett annat samband för att ta hänsyn till en linjärt ökande skalvsannolikhet med tiden från förekomsten av första skalvet till förekomsten av det andra. Tillägget för antalet skadade kapslar N_{failed} beräknas genom följande samband:

$$N_{\text{failed}} = 1/2 \cdot (5 \cdot f)^2 \cdot (10^6 \text{ years} - T)^2 \cdot N_{\text{crit,2nd}} \quad \text{Ekvation (6-1)}$$

tär T är relaxationstiden och $N_{\text{crit,2nd}}$ är medelvärdet för antalet kapslar i kritiska positioner när halva skjuvrörelsen på 25 mm jämfört med konstruktionsförutsättningen har skett och för att den kritiska radien har halverats (SKB TR-11-01, Tabell 10-19).

Tabell 10-20 (SR-Site huvudrapport) visar att det totala antalet potentiellt skadade kapslar N_{failed} efter 1 000 000 år är 0,079 när man summerar bidragen från Ekvation (5-1) och Ekvation (6-1) för hela tidsperioden. Ekvation (6-1) börjar gälla efter 500 000 år baserat på SKB:s uppskattning att det endast kan förekomma två skalv med momentmagnitud större än 5 som skulle kunna påverka slutförvaret under tiden den första en miljon åren. Baserat på 0,079 fallerade kapslar efter en miljon år efter slutlig förslutning finns förutsättningar för uppfyllelse av SSM:s riskkriterium för skydd av människors hälsa med en säkerhetsmarginal på cirka två tiopotenser (SR-Site huvudrapport, figur 13-48).

6.3.2 SSM:s bedömning

SSM redovisar en utförlig bedömning av SKB:s redovisning kring frågan om kommande stora jordskalv som kan förekomma i närheten av slutförvaret under de första 100 000 åren efter förslutning på annan plats i denna granskningsrapport (avsnitt 5.12 och kapitel 9).

SSM anser att användning av ett särskilt samband som i Ekvation (6-1) för att beräkna sannolikheten för kapselbrott pga. ett andra skalv inte är väl motiverad, dels för att återkommandetid för jordskalv kan vara kortare än 500 000 år (se kapitel 9 i denna granskningsrapport), dels för att 500 000 år ligger så pass långt in i framtiden att riskbidraget från Ekvation (6-1) blir obetydligt när det väl implementeras i beräkningarna (SR-Site huvudrapport, figur 13-48).

Baserat på parametrar som SSM diskuterar i kapitel 9 för beräkning av sannolikheten för kapselbrott på grund av jordskalv kan det totala antalet potentiellt skadade kapslar N_{failed} röra sig om cirka 0,5 efter en miljon år. Dessa parametrar innefattar bland annat en sannolikhet för stora jordskalv på 10^{-5} per år och antalet kritiska positioner N_{crit} för hela slutförvaret på 0,05. Detta är ca 6 gånger större än SKB:s uppskattade värde på 0,079 för tiden en miljon år efter förslutning, men inom ramen för riskkriteriet som motsvarar cirka



6 fallerade kapslar på grund av jordskalv i hela slutförvaret under de första 100 000 åren efter förslutning (SSM Technical Note 2014:22). Bedömningen inkluderar implicit risken för upprepade jordskalv med motivering att en jordskalvfrekvens på 10^{-5} per år innebär att ca 10 jordskalv med momentmagnitud större än 5 kan påverka slutförvaret och förekomma under en period på en miljon år i Forsmarksområdet (SSM Technical Note 2013:33), dock inte varje gång på samma deformationszon och därmed påverkan på olika sekundära sprickor som kan påverka kapslarna.

Jämförelsen ovan pekar på, med hänsyn tagen till stora osäkerheter som i synnerhet präglar en bedömning av tiden bortom de första 100 000 åren, att SSM:s krav på risk för skadeverkningar för en individ i den kritiska gruppen enligt SSMFS 2008:37 skulle kunna uppfyllas även för tiden upp till 1 000 000 år efter förslutning av slutförvaret. Förutsättningar för kravuppfyllelse behöver dock inte strikt baseras på sådana kvantitativa analyser för en sådan lång tidsperiod, utan snarare på en värdering av åtgärder som kan vidtas för att i så hög utsträckning som möjligt förbättra slutförvarets skyddsförmåga. SKB har valt att analysera tiden efter de första 100 000 åren med samma metod och liknande antaganden som för tiden fram till perioden 100 000 år efter förslutning av slutförvaret.

Vissa tänkbara kombinationer av förutsättningar från SKB:s analys och oberoende analysresultat skulle dock kunna leda till problem att uppfylla SSM:s riskkriterium under den första perioden på en miljon år i vart fall om SKB inte vidtar ytterligare åtgärder för att begränsa jordskalvsrisk. Exempelvis om kritiska sprickdiametrar antas vara hälften så stora som de som SKB har redovisat i (SKB TR-10-21), och som enligt SKB skulle gälla för fallet med upprepade skalv (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.5 och Tabell 10-19), är de inte förenliga med ett större antal kritiska positioner som redovisas i SSM:s oberoende beräkning (SSM Technical Note 2014:44) eller med en ökad jordskalvfrekvens som föreslås av SSM:s anlitate experter (SSM Technical Note 2014:22).

7. Konsekvensanalys

En konsekvensanalys är en viktig del av en säkerhetsanalys. I en konsekvensanalys kvantifieras dos och risk under slutförvarsutvecklingen genom matematisk modellering av radionuklidutsläpp, -transport och dosberäkningar. I detta kapitel beskrivs SSM:s granskning av SKB:s konsekvensanalys i SR-Site. SSM granskar här beräkningar av den radiologiska effekten på både människor och andra organismer för huvudscenariot, de mindre sannolika scenarierna och de restscenarier som har presenterats av SKB. Ytterligare processer med potentiell påverkan på säkerhetsfunktioner, och därmed betydelse för val av relevanta scenarier, redovisas samlat i kapitel 2. Dessa tillkommande processer och scenarier hanteras och bedöms i kapitel 9.

Den huvudsakliga metoden för granskning av SKB:s konsekvensanalys är dokumentgranskning utförd av SSM personal, med stöd av externa experter. SSM:s dokumentgranskning är också stödd av SSM:s oberoende modellering, som genomförs både internt och av extern expertis. SSM:s oberoende modellering kan kategoriseras enligt följande:

- användning av SKB:s modeller (med andra ekvationslösare),
- användning av alternativa konceptuella modeller och
- beräkning av gränssättande fall.

Genom att upprepa SKB:s modelleringar eller genom SSM:s egen modellering utifrån tolkning av SKB:s modellbeskrivningar kan SSM få insikt i detaljer i SKB:s beräkningar på ett sätt som inte kan uppnås genom att enbart granska SKB:s modelleringsrapporter. Detta sätt att granska ger även en kvalitetskontroll av SKB:s beräkningsresultat.



Användning av alternativa konceptuella modeller ger möjlighet att utforska olika typer av modellosäkerhet i samband med kritiska frågor. Slutligen kan beräkning av gränssättande fall användas för att kontrollera robustheten i SKB:s system och stödja SSM:s slutliga bedömning av förutsättningarna för kravuppfyllelse.

En granskning av den metodik som används för konsekvensanalys finns i avsnitt 7.1. De modeller som används för radionuklidtransport i vattenfasen för närområde, fjärrområde och biosfär granskas i avsnitt 7.2. Indata i SKB:s konsekvensanalys granskas i avsnitt 7.3. Genomgång av de beräknade resultaten med känslighets- och osäkerhetsanalys för olika beräkningsfall av scenarierna finns i avsnitt 7.4. I avsnitt 7.5 ges en sammanfattning av SSM:s bedömning av SKB:s konsekvensanalys.

7.1 Metodik

7.1.1 Övergripande metodik

7.1.1.1 Underlag från SKB

I figur 13-12 i huvudrapporten för projekt SR-Site (SKB TR-11-01) redovisar SKB en övergripande bild av modeller och data som används för konsekvensberäkningar för de utsläpp av radioaktiva ämnen som sker efter kapselbrott. Konsekvensberäkningarna har baserats på modeller som beskriver radionuklidtransport i närområde, fjärrområde och biosfär. Modellen för närområdet beskriver processer relaterade till radionuklidutsläpp och transport i kapselns inre, bentonitbufferten och i deponeringstunnelns återfyllnad. Modellen för fjärrområdet beskriver processer som advektion-dispersion, matrisdiffusion och sorption längs sprickor i berget. Dosberäkningar i biosfären görs med hjälp av landskapspecifika doskonverteringsfaktorer (LDF). LDF-faktorer är baserade på en separat analys av ett konstant utsläpp (1 Bq/år) till biosfären. Doser för varje givet scenario beräknas genom att multiplicera LDF-värden med modellerade utsläpp från geosfären.

SKB har också redovisat följande förtydligande och kompletterande information med koppling till övergripande metodik:

- SKBdoc 1334853. Svar på SSM:s begäran om förtydligande information.
- SKBdoc 1418468. Svar till SSM på begäran daterad 2013-02-11 om komplettering rörande radionuklidtransport och dos.

7.1.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s övergripande metodik är acceptabel. SKB har utvecklat en metodik för konsekvensanalys under många år och myndigheten har följt utvecklingen genom granskning av tidigare säkerhetsanalyser, t.ex. SKB 91 (SKB TR-92-20), SR-97 (SKB TR-99-06) och SR-Can (SKB TR-06-09). Ett exempel på en utförlig granskning återges i SKI Rapport 2008:19, SSI Rapport 2008:04. SSM anser att metodiken överensstämmer med internationell utveckling inom området och är i linje med OECD/NEA:s rekommendationer (NEA 2005; 2012).

SKB:s metodik innebär att dosberäkningarna är frikopplade från modellen för närområdet och fjärrområdet och SSM anser att detta förfaringsätt har både för- och nackdelar. Fördelen är att konsekvensanalysen för olika scenarier underlättas. Nackdelen är att en rad frågor och processer som är viktiga för konsekvensanalysen blir svåra att analysera. SSM har haft svårt att analysera följande frågor och processer:

- hanteringen av inväxt från modernuklider
- betydelserna av att utesluta radon ur dosberäkningarna

- hanteringen av pulsutsläpp från den omedelbart tillgängliga fraktionen av radionuklider, IRF ("Instant Release Fraction").

SKB har för långlivade radionuklider tagit hänsyn till inväxt från modernuklider i när- och fjärrområdet men inte i biosfären. I biosfären har hänsyn tagits till dosbidrag från dotternuklider i LDF-beräkningarna. SSM anser att denna hantering av inväxt inte ger en rättvisande bild av dosraten från långlivade radionuklider. Även om det inte kommer att påverka den totala dosen anser SSM att hanteringen är en svaghet när det gäller tydlighet i presentationen av resultaten.

I radionuklidtransportberäkningarna i SR-Site tar SKB inte hänsyn till Rn-222 i den radioaktiva uransönderfallsserien med argumentet att Rn-222 ger ett relativt litet bidrag till strålningsrisken (SKB TR-10-50, figur 2-6 och tabell D-3). SSM saknar en tydlig argumentation till stöd för detta påstående (se avsnitt 7.2.1.2 i denna granskningsrapport).

I SR-Site har flera åtgärder använts för att hantera pulsutsläpp av IRF vid kapselbrott. IRF förutsätts ge en frisättning av en puls med obestämd varaktighet. SKB drar efter en lång härledning slutsatsen att en IRF-puls skulle ge ett försumbart bidrag till den probabilistiskt beräknande genomsnittliga dosen och behöver därför inte ingå i de probabilistiska beräkningarna. SKB motiverar ställningstagandet att hänsyn inte behöver tas till IRF-puls i de probabilistiska beräkningarna med följande argument: "Bredden av doskurvorna i biosfären är typiskt tusen år. Sannolikheten för att exponering till följd av ett pulsutsläpp, pExpo, föreligger vid en given tidpunkt under perioden på 100 000 år är således 10^{-2} · pFail. (Sannolikheten för överlappning mellan pulser är mycket liten på grund av de låga sannolikheterna.)" (SKB TR-11-01 i svensk översättning, Art 818, avsnitt 13.5.4). SSM instämmer med den bedömning av frågan som SSM:s externa experter har kommit fram till (SSM Technical Note 2012:58), nämligen att SKB:s motivering till varför IRF pulsutsläpp kan försummas i de probabilistiska beräkningarna av en årlig medelvärdesrisk är rimlig. SSM anser dock att härledningen av sannolikheten för exponering per definition innebär en potential för riskutspädning. Kompletterande information som begärts från SKB och detaljerade analyser utförda av SSM angående frågor om riskutspädning diskuteras vidare i avsnitt 7.2.1.2 och 7.4.6.2.

7.1.2 Metodik för dosberäkning

7.1.2.1 Underlag från SKB

I rapport SKB TR-10-09 ger SKB en översikt av den metodik som har använts för biosfärsanalys. Metodiken baseras i huvudsak på filosofin att uppskatta den radiologiska risken för människa och miljö så realistiskt som möjligt och så långt som möjligt använda platsspecifik information från Forsmark. En grundlig platsundersökning inom flera vetenskapliga discipliner genomfördes under flera år för att förstå ytsystemet i Forsmark och en stor mängd platsspecifik data samlades in (SKB TR-10-05; SKB TR-10-07). Grundvattenflödesmodellering har använts för att identifiera vilka mindre, avgränsade områden, kallade biosfärsobjekt, som kan påverkas av ett utsläpp av radionuklider från ett slutförvar i framtiden (SKB R-09-20). I Forsmarksområdet pågår en postglacial landhöjning efter avsmältningen av Wechelistäcket. Landhöjningen ger upphov till strandlinjeförskjutning så att landskapet utvecklas över tid och biosfärsobjekten går från att omfatta dagens marina miljö till att omfatta en miljö med sjöar, myrar och skogar. Denna miljö kan sedan genom mänsklig påverkan bli jordbruksmark. Landskapsutvecklingsmodeller beskriver utvecklingen av biosfärsobjekt (SKB TR-10-56) och ythydrologimodellering genomförs med hjälp av modelleringsverktyget MIKE SHE (SKB R-10-02) för att göra en uppskattning av framtida hydrologi i Forsmark. Framför allt fokuserar ythydrologimodelleringen på utvecklingen av vattenbalanser, in- och



utströmningsvägar och transport av lösta ämnen i den översta delen av berggrunden och i det ovanliggande lösa jordtäcknet, regoliten.

Radionuklidmodellering har sedan använts för att modellera olika radionuklidens egenskaper och hur de når biosfären (SKB TR-10-06). En stor mängd data hämtas från landskapsutvecklings- och ythydrologimodelleringen och används i radionuklidmodelleringen där hänsyn tas till en följd av egenskaper hos varje biosfärsobjekt för att modellera radionuklidtransport och ackumulation i enskilda biosfärsobjekt, och slutligen uppskatta LDF för varje objekt. LDF kan beskrivas som en omvandlingsfaktor, som kan kopplas till olika rumsliga och tidsmässiga utsläpp. SKB beräknar och använder tre typer av LDF; i) grundläggande LDF, ii) puls-LDF och iii) distribuerad LDF. För varje radionuklid och biosfärsobjekt beräknas LDF och det högsta värdet över tid bland alla objekt väljs för att representera dosen till den mest utsatta gruppen. Detta definieras som grundläggande LDF och används för scenarier med enstaka kapselbrott och kontinuerliga långvariga utsläpp som konsekvens. Puls-LDF är grundläggande LDF modifierad för pulsutsläpp som innebär scenarier där utsläpp kommer koncentrerat under ett år. Distribuerad LDF används för scenarier med flera kapselbrott. Det maximala LDF-värdet, taget över alla potentiella utströmningsområden och tider, kan sägas vara slutresultatet av alla biosfärsanalyser och -beräkningar.

SKB:s biosfärsanalyser baseras på klimatutvecklingen i referensutvecklingen, dvs. referensglaciationen och klimatfallet med global uppvärmning. Med denna utveckling som utgångspunkt beskriver SKB vidare inom vilka gränser det framtida klimatet kan variera (tempererat, periglacialt och glacialt klimat) vilket styr förvarsplatsens utveckling avseende landskap och ytnära ekosystem.

7.1.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att de grundläggande elementen i SKB:s metodik för biosfärsmodellering och dosberäkning är förenliga med internationella riktlinjer för biosfärsmodellering.

SSM anser att den metodik som SKB utvecklat för biosfärsanalyser och beräkningar, och som finns redovisad i SR-Site är komplex. Redovisningen består av ett stort antal rapporter (SKB TR-10-09, figur 2-1). SSM bedömer att SKB:s redovisning av metodik för dosberäkning vad gäller biosfärsbeskrivningar är omfattande och att det utförda arbetet är av hög vetenskaplig kvalitet. SKB har utförligt beskrivit kända trender i omgivningen kring slutförvaret i biosfärsanalyserna i enlighet med de allmänna råden till 10-11 § i föreskriften SSMFS 2008:37. De grundläggande delarna i SKB:s metodik för biosfärsanalyser överensstämmer med internationellt arbete, bland annat det som utvecklades inom BIOMASS ("BIOsphere Modelling and ASSEssment"), ett program startat av IAEA 1996 (IAEA, 2003). Nya delar i SKB:s metodik är konceptet LDF och några stödverktyg för modelleringen. Denna del av metodiken är skapad av SKB och används inte internationellt inom liknande biosfärsanalyser. Granskning och bedömning av modeller diskuteras i avsnitt 7.2 i denna granskningsrapport.

Konceptet LDF användes av SKB i den förberedande säkerhetsanalysen SR-Can (SKB TR-06-09). I granskningen av SR-Can påpekade myndigheten att SKB bättre borde motivera användningen av LDF-konceptet (SKI Report 2008:19; SSI Report 2008:08). Myndighetens viktigaste synpunkter rörde SKB:s hantering av diskretisering av biosfärsobjekt och fördelningen av utsläppspunkter över landskapet. Myndigheten ansåg att SKB:s hantering skulle kunna leda till en utspädningseffekt med betydelse bl.a. för bedömningen av potentiell inverkan på andra organismer än människan. I SR-Site har SKB tagit hänsyn till SSM:s synpunkter och använder bl.a. olika storlekar på biosfärsobjekt för bedömning av dos.

SSM anser att SKB:s metodik för biosfärsanalys i SR-Site generellt är rättvisande men ställer sig frågande till några aspekter. Även om SSM bedömer att aspekterna inte på ett betydande sätt påverkar hur SKB demonstrerar uppfyllelse av kravet på en risk på högst 10^{-6} (5 § SSMFS 2008:37) anser SSM att de visar på en svaghet med avseende på tydlighet och öppenhet i redovisningen av resultat. SSM anser att SKB behöver förbättra redovisningen i kommande biosfärsanalyser. De aktuella aspekterna redovisas nedan.

I basfallet av SKB:s huvudscenario förutsätts det befintliga tempererade klimatet fortsätta under de kommande 10 000 åren (SKB TR-10-49). Utveckling av biosfärsobjekt förutspås av landskapsutvecklingsmodeller som bygger på den befintliga platsens topografi. Det innebär en fortsatt men avtagande landhöjning som successivt kommer att förvandla delar av Östersjöns botten till flera olika biosfärstyper med skog, sjö, myr och åkermark. Utvecklingen av enskilda biosfärsobjekt med avseende på tid och area anges noggrant. Men utvecklingen av det framtida landskapet är bara en enda realisering i SR-Site. I de scenarier där förvarets tekniska barriärer fungerar bristfälligt under utvärderingsperioden, modelleras radionuklidernas migration från geosfären till biosfären i förkastningar och sprickzoner. Radionuklider kan ackumuleras i bottensediment i havet och olika biosfärsobjekt kan utvecklas genom landhöjning till olika biosfärstyper. LDF härleds sedan från biosfärsobjekten. SKB:s metodik tillåter inte en djupare analys av osäkerheter kopplade till effekten på LDF av ackumuleringsperiod för radionuklider, storlek på biosfärsobjekt och avrinningsområden.

En annan aspekt är att den metodik SKB använder för biosfärsanalyser i SR-Site omfattar många steg och SSM anser att dokumentationen av dessa steg är otydlig. Ett exempel är att vattenflöden som används i radionuklidtransportmodelleringen i biosfären kommer från fysiskt baserade MIKE SHE modelleringar. Resultaten från MIKE SHE behandlas sedan genom till exempel medelvärdesbildning, normalisering och multiplicering med modellerade områden. Beskrivningen av alla de här stegen är inte alltid tydlig i dokumentationen av biosfärsanalysen i SR-Site. SSM anser att detta minskar förståelsen för hur SKB härleder de vattenflöden som används i radionuklidtransportmodelleringen och vad flödena faktiskt representerar. Detta leder till en ökad osäkerhet som SSM måste ta hänsyn till vid bedömningen av LDF-värdenas rimlighet.

På grund av komplexiteten i den metodik som SKB använder i biosfärsanalysen, är det svårt att förstå alla detaljer genom enbart dokumentgranskning. Därför omfattar SSM:s granskning också reproduktion av SKB:s LDF-värden för att få inblick i den metodik och de modeller som används i SR-Site (se avsnitt 7.2.2.2). Granskningen omfattar också beräkningar med alternativa modeller för att utforska konceptuell modellosäkerhet. Dessa två granskningsmetoder ligger till grund för SSM:s slutliga bedömning av kravuppfyllelse.

7.1.3 Metodik för analys av miljöpåverkan

7.1.3.1 Underlag från SKB

SKB:s utvärdering av risker för växter och djur i SR-site baseras på underlagsrapporten SKB TR-10-08. Som ett svar på SSM:s begäran om kompletterande information under den initiala granskningsfasen (SSM Dnr 2011-2426-91) har SKB publicerat en uppdaterad utvärdering (SKB TR-13-23). Då denna uppdatering i stort sett är heltäckande, och inte bara innehåller den kompletterande information som efterfrågats, utgår granskningen i huvudsak från den senare utvärderingen.

SKB har använt sig av ERICA integrated approach (Beresford m.fl., 2007) som övergripande metodik för att utvärdera risken för negativa effekter på växter och djur.



Till denna metodik hör ett verktyg (ERICA Tool) för att genomföra utvärderingen vilket innehåller databaser med information kring ett antal referensorganismer och radionuklider samt modeller för att beräkna absorberad helkroppsdos utifrån aktivitetskoncentrationer i vatten, sediment, jord och organismer (se vidare om modeller under avsnitt 7.2.3). Verktyget innehåller också modeller för att beräkna aktivitetskoncentrationer i alla de olika miljömatriserna utifrån kännedom om aktivitetskoncentration i någon av dem, eller utifrån utsläppshastigheter.

ERICA integrated approach omfattar också en bedömningsgrund i form av ett så kallat screeningvärde. Betydelsen av detta screeningvärde är att om utvärderingen visar att exponeringen av alla djur- och växtarter understiger screeningvärdet så kan slutsatsen dras att risken för negativa effekter på populationsnivå är mycket låg. Om någon art förväntas få en högre exponering rekommenderas en mer utförlig art- och platsspecifik riskbedömning kopplad till denna exponering. En exponering högre än screeningvärdet innebär inte med automatik att negativa effekter kan förväntas.

Utvärderingen av risker för växter och djur utgår från aktivitetskoncentrationer i vatten, sediment och jord såsom de har beräknats i det centrala korrosionsfallet. Aktivitetskoncentrationerna har uppskattats utifrån en deterministisk beräkning av spridning av radionuklider då en kapsel går sönder. Aktivitetskoncentrationerna beräknas dels utifrån den omedelbart tillgängliga delen (IRF) av kapselns innehåll av radionuklider, dels utifrån det långsiktiga utsläpp som sedan följer då radionuklider blir tillgängliga för spridning till biosfären i takt med att metaller korroderar och bränslet löses upp. IRF ("Instant Release Fraction") är den del av radionuklidinventariet som om kapseln går sönder direkt kan spridas i omgivningen och når biosfären som ett pulsutsläpp redan några decennier efter ett kapselbrott (SKB TR-10-50, avsnitt 3.2.1). För de båda utsläppstyperna beräknas aktivitetskoncentrationerna när hela källtermen når ett enda biosfärsobjekt, och beräkningarna upprepas sedan för varje biosfärsobjekt. När det gäller pulsutsläpp görs även beräkningar för antagandet att biosfärsutvecklingen hunnit olika långt i området vid tidpunkten för utsläppet, dvs. tidigt då de flesta objekt utgörs av hav, senare då det finns såväl hav som sjöar och landobjekt, och ännu senare då havet inte längre finns i området och sötvattenssystemen utgörs av åar snarare än av sjöar. Ur dessa olika beräkningar väljs sedan de högsta beräknade aktivitetskoncentrationerna för respektive radionuklid i vatten, sediment och jord som ingångsvärden för beräkning av exponering av växter och djur, oavsett i vilket biosfärsobjekt eller vid vilken tidpunkt de uppträder.

Då det finns ett mycket stort antal växt- och djurarter är det inte möjligt att inkludera samtliga direkt i en utvärdering av exponering och risker. ERICA Tool innehåller ett antal referensorganismer som kan illustrera olika typer av organismer. Dessa referensorganismer är generella organismer och är inte specificerade på artnivå. SKB har dessutom enligt de allmänna råden till SSMFS 2008:37 valt ut ett antal representativa arter som förekommer i området i syfte att täcka in skyddsvärda arter. Utvärderingen med utgångspunkt i dagens ekosystem har kompletterats med en mer översiktlig analys av hur exponering och risk kan förväntas bli under andra klimatförhållanden när dagens biosfärsförhållanden inte kan anses rimliga, t.ex. vid permafrost. I denna analys ingår t.ex. endast de generella referensorganismer som förväntas finnas under sådana klimatförhållanden.

7.1.3.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att den metodik som SKB har använt för att bedöma riskerna förknippade med exponering av växter och djur för joniserande strålning till följd av det planerade slutförvaret är väl lämpad för ändamålet.



Den övergripande metodiken, ERICA integrated approach och det tillhörande verktyget ERICA Tool, överensstämmer med internationell utveckling inom området. Denna metodik har utvecklats genom flera EU-projekt: FASSET, ERICA, PROTECT (samlad information finns på <http://www.ceh.ac.uk/protect>) och stämmer väl överens med de generella riktlinjer från ICRP (2003) som föreslås i de allmänna råden till SSMFS 2008:37 samt även med senare vägledning från ICRP (2014).

SSM anser även att SKB:s ansats att välja ut platsspecifika representativa arter i tillägg till de referensorganismer som är med i ERICA Tool är i linje med ICRP:s senaste rekommendationer (ICRP, 2014). Urvalskriterierna för dessa representativa arter bedöms även vara i linje med de allmänna råden till SSMFS 2008:37 angående val av organismer som bör tas med i analysen.

Även bedömningsgrunden, med användandet av det screeningvärde på $10\mu\text{Gy/h}$ som föreslagits inom projekten ERICA och PROTECT som ett värde som ger möjlighet att slå fast att riskerna för populationseffekter är mycket låga ifall det underskrids, bedöms av SSM vara tillämplig. ICRP har efter det att ansökan lämnats in kommit ut med riktlinjer (ICRP, 2014) angående tillämpning av ICRP:s ramverk för utvärdering av miljöeffekter. De rekommenderar att det lägre värdet i de olika spannen som utgör DCRL-värden ("Derived Consideration Reference Levels") som ICRP tagit fram för sina referensorganismer bör användas som ett referensvärde vid planerade exponeringssituationer. Vidare ska optimering av strålskyddet ske i området under detta värde. Det innebär att för några typer av organismer: hjort, råtta, anka och tall, så rekommenderar ICRP nu ett något lägre värde, $4\mu\text{Gy/h}$, än det använda screeningvärdet på $10\mu\text{Gy/h}$ som en utgångspunkt för acceptabel exponering av växter och djur. Denna skillnad i bedömningsgrund mellan ERICA Tool och ICRP framework är dock möjlig att ta hänsyn till när SSM bedömer betydelsen av beräknad exponering.

SSM bedömer att SKB:s val att basera utvärderingen av miljöpåverkan på en deterministisk beräkning av aktivitetskoncentrationer för basfallet av det centrala korrosionsscenarioet, inklusive pulsutsläpp av den omedelbart tillgängliga delen av inventariet, är rimligt. Detta eftersom korrosionsscenarioet, tillsammans med skjuvlastscenariot, utgör de fall som bidrar till risk i SKB:s utvärdering av dos till människa (SKB TR-11-01). Vid en jämförelse av vilka doser SKB har redovisat för de olika deterministiska beräkningsfallen inom korrosionsscenarioet och skjuvlastscenariot (SKB TR-10-50) framgår att doserna beräknas vara tämligen likvärdiga. Inget alternativt deterministiskt beräkningsfall avviker mer än en faktor 2 från det centrala korrosionsscenarioet. För de probabilistiska beräkningarna är skillnaden som mest ungefär en faktor 5 mellan SKB:s olika beräkningsscenarioer, men i allmänhet på en lägre nivå då de flesta realisationer inte leder till något kapselbrott (i probabilistiska beräkningar av skjuvlastscenariot ansätts ändå ett kapselbrott deterministiskt, varpå doserna blir på samma nivå som för andra deterministiska beräkningar). Detta centrala beräkningsfall bedöms därför av SSM vara robust och väl representera beräknade aktivitetskoncentrationer i miljön under mindre sannolika men möjliga scenarier där ett kapselbrott deterministiskt ansätts. SSM bedömer det också som rimligt att basera utvärderingen på en deterministisk beräkning snarare än en probabilistisk där de flesta realisationer inte leder till något kapselbrott. Detta eftersom bedömningsgrunden för effekter på växter och djur är baserad på deterministiska dos-respons-samband som inte enkelt kan vägas samman med en medelkoncentration. Istället kan sannolikheten för det beräknade korrosionsscenarioet ingå i en slutlig bedömning av lämpligheten av det föreslagna slutförvaret om beräkningar skulle visa att det finns risker för växter och djur förknippade med utsläpp vid ett givet kapselbrott.



SKB har fokuserat sin utvärdering på dagens biosfärsförhållanden med en mindre detaljerad analys av drastiskt annorlunda framtida förhållanden såsom permafrost, t.ex. genom att under sådana förhållanden enbart utvärdera generella referensorganismer. Detta bedöms vara rimligt och i linje med de allmänna råden till SSMFS 2008:37.

7.2 Modeller

7.2.1 Modeller för radionuklidtransport i när- och fjärrområde

7.2.1.1 Underlag från SKB

Bland de modeller som SKB använder i SR-Site för beräkning av radionuklidtransport finns en s.k. "kompartiment"-modell för närområdet, COMP23 (Romero, 1995; SKB R-04-64), som beskriver tre olika utsläppsvägar i närområdet (Q1: spricka i berg som skär deponeringshålet, Q2: den störda zonen utmed golvet i deponeringstunneln och Q3: en spricka i berg som skär deponeringstunneln). Den modell som huvudsakligen används för fjärrområdet för att hantera radionuklidtransport i vattenfas är FARF31 (SKB TR-90-01; R-04-51). FARF31 har använts i tidigare analyser, till exempel i SR-97 (SKB TR-99-06) och SR-Can (SKB TR-06-09). SKB har även utvecklat en ny radionuklidtransportmodell, MARFA ("Migration Analysis of Radionuclides in the Far Field"), för att simulera transporten av radionuklider i ett geologiskt medium med låg sprickighet med hjälp av en partikelbaserad Monte Carlo-metod. Modellen kan användas för att undersöka olika strömningsförhållanden och transportbetingelser som kan påverkas av kolloidbildning. MARFA har använts parallellt med FARF31 och framförallt för beräkningar som kräver sådana funktioner som inte finns i FARF31. De två modellerna beskriver migration längs endimensionella flödesvägar och tar hänsyn till advektion, sorption, matrisdiffusion och kedjesönderfall. MARFA kan dessutom hantera flödets storlek, dvs. ändra det längs flödeslinjerna.

Förutom numeriska transportmodeller som nämns ovan har förenklade analytiska transportmodeller för när- och fjärrområde utvecklats (Hedin, 2002). Dessa modeller använder sig av samma indata som motsvarande numeriska modeller och kan fungera som ett av flera kvalitetssäkringsmått för de numeriska beräkningarna genom att identifiera möjliga skillnader i resultaten från de analytiska och numeriska modellerna. De enkla analytiska transportmodellerna kan också bidra till förståelse för transportprocesser.

Förtydliganden och kompletterande information har begärts från SKB inom följande områden:

- verifiering av MARFA- kod
- motivering av potentiell transport av radionuklider i gasform
- ytterligare redovisning av hantering av pulsutsläpp
- ytterligare redovisning avseende ignorering av Rn-222 i konsekvensanalysen.

Angående den första frågan anger SKB i en komplettering (SKBdoc 1396389) att de felaktiga parametrarna i den ursprungliga koddokumentationen för MARFA (SKB R-09-56) har korrigerats i en ny rapport (Painter och Mancillas, 2013). SKB förklarade att de felaktiga värdena endast angavs i den beskrivande texten; i beräkningarna användes korrekta värden och ytterligare fyra nya kontrollfall presenterades i en bilaga (SKBdoc 1396392) till denna komplettering. SKB förklarade också att även om en direkt jämförelse plottad i samma figur inte fanns med i SKB TR-10-50, kan överensstämmelsen mellan MARFA koden och FARF31 koden verifieras genom att jämföra den svarta streckade kurvan i figur 4-5 i TR-10-50 (gjord med FARF31) med den svarta heldragna kurvan i



figur 4-24 i TR-10-50 (gjord med MARFA), eftersom båda avser probabilistiska beräkningar för det centrala korrosionsfallet.

Rörande den andra punkten inkom SKB kompletterande information (SKBdoc 1418468) och förklarade att i princip endast C-14 och Rn-222 kan förekomma i gasform. Vidare angav SKB att I-129 teoretiskt kan förekomma som elementärt jod, men att mängden kommer att vara försumbar. Samma resonemang förde SKB beträffande Cl-36 och Se-79. I kompletteringen håller SKB med SSM om att den effektiva dosen beräknad från utsläpp av C-14 och Rn-222 i gasform, som visas i tabell 13-11 i SKB TR-11-01, är felaktig eftersom beräkningarna har baserats på felaktiga inventarier. Kompletteringen innehåller dock nya korrigerade beräkningar av effektiv dos för C-14 och Rn-222 utsläpp i gasform. Tabell 13-11 i SKB TR-11-01 uppdaterades i enlighet med de nya beräkningarna.

Som svar på den tredje frågan inkom SKB med en komplettering (SKBdoc 1418468) som innehåller en deterministisk beräkning inkluderande puls och kontinuerliga utsläpp för det centrala korrosionsfallet. Den beräknade utsläppstiden är vid 114 000 år efter deponering. Men beräkningarna är inte gjorda i ett integrerat system vilket framgår av figur 0-1 i kompletteringen. Den totala maximala årliga effektiva dosen (summan av doserna till följd av puls och kontinuerliga utsläpp) för just detta fall är 8,5 μ Sv. Den totala doskurvens bredd pga. pulsutsläpp är ca 5 000 år.

I den kompletterande informationen angående den fjärde punkten om Rn-222 (SKBdoc 1418468) redovisar SKB en beräkning med de parametervärden som används i SR-Site för att visa betydelsen av Rn-222 för radionuklidtransport i fjärrområdet. SKB:s beräkning visar att exkluderingen av Rn-222 i radionuklidtransportberäkningarna innebär att den beräknade totala dosen maximalt kan vara underskattad med en faktor 1,2. SKB jämför detta resultat med resultatet från SSM:s externa experters överslagsberäkningar som visade på en maximal underskattning med en faktor 2 (SSM2012-142-8). SKB:s förklaring till skillnaden är att den landskapspecifika doskonverteringsfaktorn (LDF) för Rn-222 och de transportparametrar som de externa experterna använder, inte helt överensstämmer med de värden som SKB har använt. I den kompletterande informationen påpekade SKB också att de beräknade doserna för korrosionsscenarioet i SR-Site är för höga med en faktor 1,2 på grund av ett räknefel i korrosionsanalysen, som redovisas i SKB:s svar på begäran om komplettering rörande dokumentation och kvalitetssäkring av koder (SKBdoc 1396660). Vidare innehåller kompletteringen (SKBdoc 1418468) nya beräkningar för det centrala korrosionsfallet som inkluderar Rn-222 i radionuklidtransportberäkningarna och en korrigerad korrosionsanalys. Resultaten från dessa beräkningar stämmer väl överens med de ursprungliga beräkningar som redovisas i SR-Site. När det gäller gasutsläpp av Rn-222 som inte begränsas av upplösningen av bränslematrisen och som skulle kunna leda till utsläpp av Pb-210 i ytmiljön bekräftade SKB att de externa experternas beräkning med mycket pessimistiska antaganden stämmer (maximalt en storleksordning högre doser om gasutsläpp av Rn-222 beaktas). Men SKB framhåller att sådana Rn-222 gasutsläpp är orealistiska. SKB:s argument är att Rn-222 har en halveringstid på endast 3,8 dagar och inte kan diffundera genom bränslematrisen till bränsleytan på så kort tid. Argumentet stöds med en vetenskaplig referens (Matzke, 1980).

7.2.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s radionuklidtransportmodeller generellt är i linje med transportmodeller som används i säkerhetsanalyser internationellt inom hantering av radioaktivt avfall och slutförvar. SSM anser att det är förtroendeingivande att de modeller som används för radionuklidtransport i när- och fjärrområde har utvecklats av SKB och är baserade på erfarenhet av säkerhetsanalyser sedan SKB:s första säkerhetsanalys (SKB TR-92-20). SSM noterar att dokumentationen och motiveringen av antaganden för radionuklidtransportmodelleringen som används för två scenarier; kapselbrott till följd av



korrosion och kapselbrott till följd av bergets skjuvrörelser längs med en spricka, har förbättrats sedan säkerhetsanalysen SR-Can (SKB TR-06-09). SSM bedömer att SKB:s beräkningar är transparenta, modellbeskrivningarna är tillräckliga och data godtagbara vad gäller tydlighet för att en erfaren radionuklidtransportmodellerare ska kunna reproducera beräkningarna. SSM uppskattar att SKB har tagit hänsyn till de synpunkter som SSM och SSM:s externa experter framfört i granskningen av SR-Can och förbättrat redovisningen av de deterministiska beräkningsfallen vilket underlättar SSM:s förståelse för SKB:s beräkningsresultat.

SSM noterar att MARFA endast används i ganska begränsad omfattning i SR-Site varför den huvudsakliga radionuklidtransportmodellen för fjärrområdet fortfarande är FARF31. SSM ser positivt på att SKB även använt förenklade analytiska modeller för modellering av radionuklidtransport i närområdet och fjärrområdet, samt jämfört resultaten med de numeriska beräkningarna erhållna från FARFA31 och MARFA. SSM anser att SKB:s konceptualisering av systemet och dess processer leder till att resulterande doser styrs av relativt enkla processer som är enkla att förstå och modellera.

SKB modellerar till stor del radionuklidtransport på samma sätt i SR-Site som i tidigare säkerhetsanalyser och vissa modeller har tagits fram långt innan SR-Site. En viktig fråga som därför granskats tidigare är radionuklidens diffusiva transporthastighet från den intakta bufferten till sprickor med rörligt vatten. Hastigheten modelleras genom användning av parametern Q_{eq} vilken kan beskrivas som ekvivalent flödes hastighet i gränssytan mellan buffert och spricka. En grundlig genomgång av SKB:s härledning av Q_{eq} har utförts med hjälp av både analytisk och numerisk modellering (Maul och Robinson, 2005; SSM Rapport 2011:11). Slutsatsen är att SKB:s metod för att beräkna Q_{eq} värden är tillfredsställande.

En detaljerad genomgång och verifiering av MARFA har också genomförts (SSM Rapport 2011:11; SSM Technical Note 2012:62). Slutsatsen är att MARFA kan hantera stora transportnätverk utan att behöva orimligt stor datorkapacitet och att de grundläggande algoritmer som används är ändamålsenliga. SSM:s externa experter identifierade fel i beskrivningen av testfall och SSM begärde därför förtydliganden och kompletterande information kopplat till detta (se nedan).

SSM:s externa experter har under den inledande granskningsfasen utfört en översiktlig granskning som omfattar SKB:s rapporter kring radionuklidtransport i närområdet och fjärrområdet samt stödjande referenser (SSM Technical Note 2012:55, 2012:56, 2012:58 och 2012:62). Ett antal frågor har identifierats av SSM för ytterligare granskning och kompletterande information har begärts från SKB enligt nedan:

- verifiering av MARFA- kod
- motivering av potentiell transport av radionuklider i gasform
- ytterligare redovisning av hantering av pulsutsläpp
- ytterligare redovisning avseende ignorering av Rn-222 i konsekvensanalysen.

När det gäller den första frågan bedömer SSM efter att ha tagit del av SKB:s förtydligande att SKB på ett acceptabelt sätt verifierat MARFA-koden. Trots att den inte har använts som ett huvudverktyg för radionuklidtransport i fjärrområdet i SR-Site, kommer SSM fortsätta att följa upp SKB:s utveckling av MARFA.

Efter att ha tagit del av SKB:s komplettering gällande den andra punkten i listan ovan bedömer SSM att det är C-14 och Rn-222 som i huvudsak kan förekomma i gasform och att bidraget till effektiv dos från utsläpp av dessa radionuklider inte är av stor betydelse för de beräknade riskvärden som SKB presenterar. SSM anser att det felaktigheter som

förekommit i redovisningen är en kvalitetssäkringsfråga som SKB behöver rätta till i kommande steg i slutförvarsprogrammet.

I en begäran om komplettering avseende punkt 3 ovan efterfrågade SSM en deterministisk beräkning i ett integrerat system för att illustrera risken för individer vid pulsutsläpp av IRF (Instant Release Fraction). Det integrerade systemet begärdes omfatta utsläpp (både puls och kontinuerliga) från närområdet, transport genom fjärrområdet och input till biosfärmodellerna. Eftersom kompletteringen inte innehöll beräkningar i ett integrerat system har SSM utfört egna sådana beräkningar. Resultatet visar att den beräknade maximala totala årliga effektiva dosen (summan av doserna till följd av puls och kontinuerliga utsläpp) skulle kunna vara en faktor 8 högre än SKB:s resultat. Den totala doskurvans bredd pga. pulsutsläpp är i detta fall ca 10 000 år (SSM2011-2306-32). Betydelsen av osäkerheten i beräknad maximal årlig dos från pulsutsläpp diskuteras vidare i avsnitt 7.4.6.2.

Bakgrunden till den fjärde frågan avseende radon är att det i den inledande fasen av granskningen av SR-Site uppkom frågor om effekten av att exkludera Rn-222 i radionuklidtransportberäkningarna och av att exkludera gasutsläpp av Rn-222 som inte begränsas av upplösningen av bränslamatrixen och som skulle kunna leda till utsläpp av Pb-210 i ytmiljön (SSM Technical Note 2012:58). Denna granskning resulterade i att SSM gav i uppdrag till de externa experter som uppmärksammat frågorna att med egen modellering undersöka möjliga effekter av att inte ta hänsyn till Rn-222. SSM begärde också kompletterande information kring SKB:s motivering av att exkludera Rn-222 i säkerhetsanalysen. De överslagsberäkningar som gjorts av SSM:s externa experter (SSM 2012-142-8) visar att exkluderingen av Rn-222 i radionuklidtransportberäkningarna innebär att den beräknade totala dosen maximalt kan vara underskattad med en faktor två. Överslagsberäkningarna visar också att exkluderingen av gasutsläpp av Rn-222, som inte begränsas av upplösningen av bränslamatrixen och som skulle kunna leda till utsläpp av Pb-210 i ytmiljön, innebär att den beräknade totala dosen med de mest pessimistiska antagandena kan vara underskattad med maximalt en storleksordning. SSM bedömer att den kompletterande information SKB tillhandahåller (se SKB:s underlag ovan) är tillräcklig och att SKB:s resonemang är rimliga. SSM drar därför slutsatsen att effekten av att exkludera Rn-222 i säkerhetsanalysen är försumbar.

SSM och SSM:s externa experter har modellerat några kritiska frågor och utvalda beräkningsfall för att kontrollera SKB:s radionuklidtransportberäkningar som utgör underlag till riskanalysen som syftar till att påvisa uppfyllelse av SSM:s krav för skydd av människors hälsa (5 §, SSMFS 2008:37). Modelleringen innebär ett test av reproducerbarhet för viktiga scenarier och ”what-if”-fall som varianter till viktiga scenarier (SSM2011-2306-30; SSM Technical note 2012:58; 2014:33; 2014:55; Xu m.fl., 2014). Några modelleringar som bedömts som särskilt kritiska har genomförts av både SSM och de externa experterna. Resultatet av denna kontroll av SKB:s radionuklidtransportberäkningar är att de går att reproducera och de framstår som rimliga. Närmare uppgifter om dessa beräkningar finns i avsnitt 7.4.1.2 och 7.4.2.2.

Flödesrelaterat transportmotstånd, F (år/m), är en av de viktigaste parametrarna i radionuklidtransportberäkningar för fjärrområdet. I SR-Site har F -värdena inte korrigerats för att ta hänsyn till effekten av kanalisering av flödet. Detta är en skillnad mot den tidigare säkerhetsanalysen SR-Can i vilken F -värdena hade reducerats med en faktor 10. SKB:s motivering av denna förändring är att det finns en zon med stillastående vatten på vardera sidan av kanalen som mildrar effekten av kanalisering (SKB TR-10-50). SSM:s externa experter har gjort beräkningar för att granska motiveringen (SSM Technical Note 2012:55; SSM2012-140-10). Beräkningarna stödjer SKB:s motivering som innebär att även om kanalisering kan leda till tidigare genombrottstider är effekten försumbar om

flödet går genom många små kanaler i en spricka, vilket är det mest sannolika fallet för verkliga sprickor. Denna effekt minskar om F-värdet, som beräknas genom att anta ett enhetligt flöde genom hela sprickan, är tillräckligt stort, dvs. 10^6 (år/m) vilket är storleksordningen på de värdena som används i SR-Site. Men denna analys är baserad på en konceptuell modell som innebär att vattnet i sprickorna fördelas mellan en flödande kanal och ett område där vattnet är stillastående. Om det hydrogeologiska systemet skulle skilja sig från det som har modellerats i SR-Site, dvs. att flödet är begränsat till smala och glest uppträdande kanaler på ett sprickplan och inget stillastående vatten förekommer i anslutning till kanalerna skulle den fördröjande effekten av det stillastående vattnet inte förekomma. Därför anser SSM att SKB i kommande steg i slutförvarsprogrammet ytterligare bör undersöka hur en alternativ konceptualisering av flödesnätverket påverkar F-värdena (se SSM:s kommentar i avsnitt 5.4.3).

7.2.2 Modeller för dosberäkning

7.2.2.1 Underlag från SKB

Radionuklidmodellen för biosfären är en klassisk s.k. kompartmentmodell med 10 kompartment per biosfärsobjekt, där systemkomponenter anses internt homogena i varje kompartment (SKB TR-10-06). Radionuklidmodellen är generell för alla typer av biosfärsobjekt och består av två delar, en akvatisk och en terrester del. Biosfärsobjektens utveckling över tiden i radionuklidmodellen hanteras genom att storleken och egenskaperna hos dessa delar varierar i enlighet med utvecklingen av det särskilda biosfärsobjektet. De flesta biosfärsobjekt förväntas genomgå följande fyra huvudstadier: havsstadium, övergångsstadium, sjöstadium och landstadium. I SR-Site representeras biosfären i Forsmark av ett antal hydrologiskt sammankopplade biosfärsobjekt.

Radionuklidmodellen används för dynamisk modellering av 10 kompartment i varje biosfärsobjekt. Aktivitetskoncentrationerna i övre avlagringar, atmosfär och ytvatten används för att beräkna exponering av människor och av andra organismer. Slutprodukten från dosberäkningen med radionuklidmodellen är den landskapsspecifika doskonverteringsfaktorn (LDF). LDF-värdet definieras som medelårsdosen för en representativ individ i den mest exponerade gruppen vid en konstant utsläppshastighet på 1 Bq/år för en viss radionuklid. Som nämnts i avsnitt 7.1.2.1 har tre typer av LDF definierats och använts i SR-Site, dvs. grundläggande, puls och distribuerad LDF. Förutom beräkningen av dos till följd av radionuklider som når människan efter transport genom biosfären så beräknas också doser till följd av att utsläppet sker till en brunn borrhåll genom berggrunden. Aktivitetskoncentrationen i brunnsvatten (Bq/m^3) beräknas då genom att dividera utsläppshastigheten (1 Bq/år) med brunnens kapacitet ($\text{m}^3/\text{år}$). Detta dosbidrag från intag av brunnsvatten ingår sedan i beräkningen av LDF-värdet.

Som ett resultat av den initiala granskningen av SKB:s underlag identifierade SSM frågor där kompletterande information från SKB efterfrågades. De identifierade frågorna kan sammanfattas i tre kategorier; tydlighet i dokumentation, kvalitetssäkring av modeller och data samt motivering av val av modeller och antaganden (SSM2011-1483). SSM har begärt följande kompletterande information om SKB:s dosberäkningsmodeller:

- Beskrivning av härledning av distribuerad LDF.
- Härledning av flödesparametrar som används i biosfärsradionuklidmodellen från yhydrologisk modellering.
- Förklaring av modellerade resultat.
- Inkonsekvens mellan den beskrivna C-14-modellen och den C-14 modell som faktiskt används i bedömningen.
- Diskrepans mellan den rapporterade sorptionskoefficienten för Ra-226 och faktiskt värde som använts vid bedömning.



- Ytterligare beskrivning av genomförandet av modeller i det numeriska verktyget, Ecolego.
- Ytterligare beskrivning av exponeringsvägar på grund av intag baserat på produktion av livsmedel från platsen.
- Motivering till bortseende från exponeringsväg såsom torvbränning.
- Motivering till att bortse från föroreningar från uppströms biosfärsobjekt.
- Motivering till att biosfärsobjekt modelleras som homogena oavsett storlek i förhållande till den förväntade spridningen av radionuklider i objektet.

SKB har gett kompletterande information (SKBdoc 1339994) med en kort beskrivning av härledning av distribuerad LDF och datauppsättningar i form av Excel-filer för att möjliggöra för SSM att härleda distribuerad LDF. Enligt SKB fördelas ett konstant kontinuerligt utsläpp till biosfären (1 Bq/år) mellan biosfärsobjekt i förhållande till fördelningen av utsläppspunkter i respektive objekt (vilka härrör från flödesmodellering). Skillnaden mot vanliga LDF är alltså att det ursprungliga LDF värdet för varje objekt multipliceras med andelen av utsläppet som förväntas nå just detta objekt om alla kapslar går sönder. För varje radionuklid väljs sedan den maximala dosfaktorn som beräknats för alla objekt och under hela beräkningsperioden som distribuerade LDF-värden.

Angående härledning av flödesparametrar som används i biosfärsradionuklidmodellen från ythydrologisk modellering har SKB gett kompletterande information med begärda datafiler för vattenbalans i sex sjöar i Forsmark, vilka används för att härleda vattenomsättningen för ett "genomsnittligt objekt" och vidare för parameterisering av överföringshastigheter i radionuklidtransportmodellen (SKBdoc 1440564, SKBdoc 1479486).

I SKB:s kompletterande information (SKBdoc 1397007) ges en förklaring till de toppar som visas i doskurvorna i figur 3-5 i SKB TR-10-06. SKB förklarar att topparna inte beror på instabilitet i den numeriska integrationen, utan är en direkt effekt av dynamiken i modellen. Orsaken till att toppar, eller en plötslig ökning av koncentrationen av radionuklider i vatten, observeras i tidsperioden mellan 7 000 f Kr till 5 000 f Kr och i slutet av havsperioden beror på resuspension av sediment under dessa perioder.

SKB har gett kompletterande information (SKBdoc 1387920) och förklarar att den C-14-modell som används i SR-Site baseras på den modell som beskrivs i R-08-06, men med vissa skillnader i tillämpningen. Den huvudsakliga skillnaden mellan de två modellerna är att modellen i R-08-06 är en jämviktsmodell medan den modell som faktiskt använts i SR-Site är en dynamisk kompartiment modell vilken används för att beskriva omsättning av C-14 i atmosfären och i vatten. Därtill uppger SKB att skillnaden mellan resultaten från de två modellerna är försumbar.

När det gäller skillnaden mellan de rapporterade sorptionskoefficienterna för Ra (SKB TR-10-07) och de värden som faktiskt används i SR-Site har SKB gett kompletterande information (SKBdoc 1387920) och förklarar att de platsdata som rapporteras i SKB TR-10-07 fanns tillgängliga först efter det att LDF-beräkningarna hade gjorts. SKB påpekar vidare att senare insamlade och rapporterade sorptionsdata för Ra ligger inom det intervall som används i de probabilistiska beräkningarna av LDF. I ytterligare kompletterande information från SKB till SSM (SKBdoc 1429433) beräknade SKB LDF-värdet för Ra-226 utgående från den rapporterade sorptionskoefficienten och jämförde resultatet med LDF-värdet som använts i SR-Site. Den nya beräkningen av LDF för Ra-226 ger 2.6×10^{-12} Sv/år per Bq/år jämfört med det gamla LDF-värdet för Ra-226 som är 3.8×10^{-12} Sv/år per Bq/år.



Angående implementeringen av radionuklidmodellerna i Ecolego har SKB gett kompletterande information (SKBdoc 1429433) i form av Ecolego-kod för biosfärsobjekt 121_03.

SKB har också gett kompletterande information angående beskrivningen av exponeringsvägar kopplade till intag av föda (SKBdoc 1387920) och förklarar att i de fall jordbruk är möjligt är sannolikheten lika stor för produktion av spannmål, rotfrukter, grönsaker, foder (för nötkött- och mejeriproduktion) samt för svamp och bär. Det motsvarar att ett biosfärsobjekt med jordbruksmark indelas i fem lika stora delar för produktion av livsmedel.

När det gäller frågan om torvförbränning har SKB svarat (SKBdoc 1387920) med en bilaga (SKBdoc 1418363) som innehåller en analys av betydelsen av denna exponeringsväg. I analysen beaktar SKB två fall: förbränning av torv i ett kraftverk respektive i ett hushåll. I fallet kraftverk beräknas doserna vid ett kontinuerligt utsläpp på 1 Bq/år till 10 % eller mer av LDF-värdet (vilket anger motsvarande dos från övriga exponeringsvägar) för de tre nukliderna Th-232, Pu-242 och Pu-239. Det högsta relativa tillskottet beräknades för Th-232 (69 %). Det är dock inte realistiskt att produktion av torv från Forsmark kan stödja industriell energiproduktion. För scenariot med hushåll som använder torv som bränsle är motsvarande siffra för Th-232 (31 %), och för 16 andra radionuklider överstiger siffran 1 % av LDF. Även i hushållsfallet är torvförbränning som huvudexponeringsväg orealistisk eftersom tillgången på torv som bränsle är lägre om objekten samtidigt används för att odla livsmedel.

SKB gav kompletterande information angående hur radionuklidutsläpp i ett biosfärsobjekt påverkar biosfärsobjekt som ligger nedströms (SKBdoc 1387920). De förklarar att biosfärsobjekt nedströms ett biosfärsobjekt med ett radionuklidutsläpp inte ingår i dosberäkningen pga. att SKB antar att personer som exponeras för radionuklider från detta biosfärsobjekt får lägre eller lika stora doser som de personer som exponeras för radionuklider från det biosfärsobjekt som får radionuklidutsläppet. De hänvisar till ett exempel i SKB TR-10-06 (figur 5-3), där ett utsläpp på 1 Bq/år under hela simuleringsperioden samt LDF-värden beräknas för biosfärsobjekt 136 och för alla biosfärsobjekt nedströms detta biosfärsobjekt. Resultaten visar att LDF-värdena alltid är högre för biosfärsobjekt 136, jämfört med LDF-värdena för de biosfärsobjekt som ligger nedströms. I SKBdoc 1418468 nämner SKB att kompletterande information vad gäller om biosfärsobjekt mo-delleras som homogena lådor (kompartments) kommer under våren 2014 i samband med publiceringen av SR-PSU. SKB:s kompletterande information inkom till SSM 2015-05-20 (SKBdoc 1480681) och SKB instämmer med SSM i att biosfärsobjekt kommer att kontamineras delvis på grund av utsläpp till det identifierade objektet. Det finns dock osäkerheter i samband med modellering av utsläppsplatsens storlek. Två analyser presenteras i SKBdoc 1480681. Metoden som SKB använder i den första analysen är lik den som används av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2015:22). SKB väljer biosfärsobjekt 116 i SR-Site för att analysera effekten av varierande storlek på ett kontaminerat område inom ett biosfärsobjekt. De analyserar tre fall:

- endast den övre delen av biosfärsobjekt 116 är kopplad till den minsta storleken på avrinningsområde
- ett mittenområde i biosfärsobjekt 116 är kopplad till ett avrinningsområde av normal storlek
- ett litet område, stort nog att med modern jordbruksteknik försörja en familj, nära utloppet av biosfärsobjekt 116 är kopplat till dess hela avrinningsområde.

De beräknade resultaten för de tre fallen jämförs med referensfallet, det vill säga de LDF-värden som erhålls för objekt 116 i SR-Site. Den andra analysen utförs inom SR-PSU säkerhetsanalys, och skiljer sig från den första genom att avgränsningarna i det delvis

kontaminerade området inom biosfärsobjektet bygger på hydrologisk modellering och markanvändning. Båda analyserna utfördes för två radionuklider; I-129 och Ra-226. Det kontaminerade område med minst area får de högsta doserna, om avrinningsområdet är detsamma som i referensfallet. SKB:s analyser visar också att det blir mer komplicerat om förhållandet mellan storleken på det kontaminerade området och avrinningsområdet varierar. Desto större kvoten är mellan storleken på avrinningsområdet och storleken på det förorenade området, desto lägre doser för svagt sorberande radionuklider. Det motsatta gäller för måttligt sorberande radionuklider (SKBdoc 1480681). Den maximala effekten på dos är en faktor 3,8 för Ra-226 och 3,3 för I-129 och gäller när de tre fallen appliceras på biosfärsobjekt 116 och jämförs med LDF-värden för referensbiosfärsobjekt 116. Användning av brunnsvatten ingår inte i de två analyserna.

7.2.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s biosfärsmodellering och dosberäkningar i allmänhet ger en bra beskrivning av biosfären och att de LDF-värden som SKB beräknat genom biosfärsmodellering och dosberäkning är rimliga att använda. Det finns dock svagheter, främst i bristande dokumentation och kvalitetssäkring vilket leder till att SSM:s förtroende för konsekvensanalysen påverkas negativt. SSM:s bedömning grundas därför i viss mån på att genomförda oberoende beräkningar och SKB:s användning av konservatism kompenserar för svagheter i SKB:s dosberäkningar.

SSM konstaterar att för SR-Site har SKB infört en helt ny radionuklidmodell för biosfärsanalyser och beräkningar. Modellen för radionuklidtransport och beräkning av dosen för varje biosfärsobjekt är det sista steget i hela biosfärsanalysen. De grundläggande elementen i SKB:s tillvägagångssätt vid biosfärsanalysen överensstämmer med internationella riktlinjer för biosfärsmodellering. Dock har SKB antagit dosberäkningsmodeller och en del stödverktyg (t.ex. för behandling av radionuklidintag via näringskedjor) som är innovativa och ovanliga i samband med traditionell biosfärsmodellering. De parametrar som används i radionuklidtransportmodellen härleds från olika stödverktyg med många modelleringssteg. Beskrivningen av dessa modelleringssteg är inte alltid tydlig vilket bidrar till ökad osäkerhet vad gäller beräknad dos. Till viss del kan det övergripande försiktiga tillvägagångssättet som tillämpats på beräkning av LDF inom den bredare bedömningen (särskilt genom användning av det högsta beräknade värdet över tiden i alla biosfärsobjekt) anses vara tillräckligt för att uppväga dessa osäkerheter, men detta har inte visats på ett övertygande sätt.

I den inledande granskningsfasen har SSM:s externa experter utfört en översiktlig granskning som var en bred täckning av SKB:s dosberäkningar inklusive stödjande referenser (SSM Technical note 2012:46; 2012:56; 2012:59; SSM2012-110-3). SSM reproducerade grundläggande LDF-värden för ett valt biosfärsobjekt med tempererade förhållanden (SSM2011-2306-31). Med användning av SKB:s modellbeskrivning och indata fick SSM inblick i SKB:s LDF beräkningar. Genom att återskapa LDF-värden och med hjälp av externa experters granskning kunde SSM identifiera flera kritiska frågor för ytterligare granskning och begärde kompletterande information från SKB. De identifierade frågorna kan sammanfattas i tre kategorier; tydlighet i dokumentation, kvalitetssäkring av modeller och data samt motivering av val av modeller och antaganden (SSM2011-1483). SSM har begärt följande kompletterande information om SKB:s dosberäkningsmodeller:

- Beskrivning av härledning av distribuerad LDF.
- Härledning av flödesparametrar som används i biosfärsradionuklidmodellen från ythydrologisk modellering.
- Förklaring av modellerade resultat.
- Inkonsekvens mellan den beskrivna C-14-modellen och den C-14 modell som faktiskt används i bedömningen.



- Diskrepans mellan den rapporterade sorptionskoefficienten för Ra-226 och faktiskt värde som använts vid bedömning.
- Ytterligare beskrivning av genomförandet av modeller i det numeriska verktyget, Ecolego.
- Ytterligare beskrivning av exponeringsvägar på grund av intag baserat på produktion av livsmedel från platsen.
- Motivering till bortseende från exponeringsväg såsom torvbränning.
- Motivering till att bortse från föroreningar från uppströms biosfärsobjekt.
- Motivering till att biosfärsobjekt modelleras som homogena oavsett storlek i förhållande till den förväntade spridningen av radionuklider i objektet.

Dessa punkter diskuteras mer utförligt nedan.

SSM konstaterar att distribuerade LDF-värden är angivna i tabell 3-7 i SKB TR-10-50, men att inga ytterligare beskrivningar om distribuerad LDF kan hittas i SR-Site eller i underliggande rapporter. SSM har begärt kompletterande information av SKB kring härledningen av distribuerad LDF.

SSM har kontrollberäknat SKB:s distribuerade LDF-värden för några radionuklider baserat på de datauppsättningar (Excel-filer) som SKB tillhandahållit enligt ovan (SSM2011-2306-32). SSM konstaterar att distribuerade LDF-värden som SKB beräknat snarare är viktade medelvärden över alla objekt. Distribuerade LDF-värden väljs som summan av de olika objektens viktade (utifrån andelen utsläppspunkter) dosfaktorer. Detta till skillnad från SKB:s beskrivning ovan vilken antyder att det högsta värdet ensamt antogs som distribuerad LDF. Det värde som SKB faktiskt använt är alltså högre än det värde som kan härledas från SKB:s metodbeskrivning (SKBdoc 1339994). SSM anser att den metod SKB faktiskt använt för att härleda distribuerade LDF-värden är rimlig. SSM anser också att denna skillnad mellan beskriven modell och faktiskt använd modell är ytterligare ett tecken på brister i kvalitetssäkringen av dokumentationen som SKB behöver förbättra under kommande säkerhetsanalyser.

SSM och dess externa experter anser att det inte finns några tydliga beskrivningar av härledningen av de flödesrelaterade parametrarna från yhydrologisk modellering som används i radionuklidmodellen. SSM har begärt kompletterande information om SKB:s härledning av flödesparametrar och flödesmodelleringsdata som används för härledning av flödesparametrar. Efter att ha tagit del av SKB:s kompletteringar (se ovan) anser SSM att det ändå finns kvarvarande oklarheter. Modellstrukturen för "det genomsnittliga objektet" modellerat med MIKE-SHE (ett verktyg för hydrologisk modellering) respektive radionuklidmodellen (SKB TR-10-06) är olika, och SSM saknar transparens och motivering i tolkningen av flödessystemet i det "genomsnittliga objektet" och hur informationen implementeras i radionuklidtransportmodellen. Exempelvis är det förståeligt att för flödet från nedre till mellersta regoliten i radionuklidtransportmodellen använda sig av nettoflödet mellan dessa marklager såsom det beräknas för "genomsnittsobjektet", men motsvarande tillvägagångssätt används inte för att karaktärisera flöden från mellersta regoliten till den övre (se SSM Technical note 2015:48). Det är noterat att några (men inte alla) flöden in i och ut ur den mellersta regoliten i "det genomsnittliga objektet" har använts i härledning av flöden till den övre regoliten i radionuklidtransportmodellen. Det finns ingen motivering till varför bara vissa vattenflöden används i någon SR-Site-dokumentation, inklusive den kompletterande information som erhållits från SKB. SSM har låtit utföra en studie som härleder vattenflöden som används i radionuklidtransportmodellen baserat på förståelsen av MIKE-SHE-modelleringen (SSM Technical note 2015:48). De härledda numeriska värdena skiljer sig något från SKB:s, vilket bidrar till en minskning av graden av förtroende för SR-Site-modellen (SSM Technical Note 2015:48, tabell 2). För att undersöka betydelsen



av denna skillnad utförde SSM:s externa expert en analys, i vilken en alternativ radionuklidmodell baserad direkt på flödena för "det genomsnittliga objektet" används. Resultaten i form av beräknade radionuklidinventarier jämförs med motsvarande resultat från radionuklidtransportmodellen som redovisats i SR-Site (SSM Technical Note 2015:48, avsnitt 3). Analysen visar att den oklarhet och osäkerhet som finns i SKB:s parameterisering har en begränsad effekt. SSM anser dock att SKB behöver förbättra viktiga steg i identifiering och motivering av systemval för att stödja modellutvecklingen i framtida säkerhetsanalyser.

SSM gav i uppdrag till externa experter att granska den kompletterande informationen kring de toppar som visas i doskurvorna i figur 3.5 i SKB TR-10-06 (se ovan), och de ansåg att SKB:s förklaring är tillfredställande (SSM 2011-4544-11). Dock påpekade de att resuspensionshastighet, som är orsaken till toppar/plötsliga koncentrationsökningar av radionuklider, huvudsakligen bestäms genom inmatning av resuspensionshastighet från en s.k. stödmodell till radionuklidtransportmodellen. SSM anser att denna fråga inte är av stor betydelse för de beräknade doskonverteringsfaktorer som SKB presenterar, men beskrivningen av erhållna resultat behöver förbättras i kommande steg i SKB:s program.

SSM har efterfrågat kompletterande information angående att den C-14 modell som slutligen används i SR-Site inte förefaller vara den som beskrivits i underliggande rapporter (SKB R-08-06, SKB TR-10-06). Efter att ha tagit del av SKB:s kompletterande information (se ovan) saknar SSM ändå en analys av påståendet att skillnaden mellan modellerna är försumbar, och har därför låtit externa experter utföra oberoende beräkningar för att jämföra resultat från de två modellerna. Dessa beräkningar bekräftar SKB:s uttalande om att skillnaderna är mycket små (SSM Technical note 2014:35).

Efter att ha tagit del av SKB:s kompletterande information gällande sorptionsdata för radium anser SSM att i detta fall har skillnaden mellan rapporterade radiumsorptionsdata och de faktiska värden som användes i LDF-beräkningarna obetydliga effekter på det beräknade LDF-värdet, men att detta är ytterligare en kvalitetssäkringsfråga avseende SKB:s redovisning.

SSM har implementerat SKB:s radionuklidmodeller i det numeriska verktyget Ecolego baserat på beskrivningarna i SKB TR-10-06 och input-data som erhållits från SKB (SKBdoc 1334853) i syfte för att reproducera SKB:s beräknade LDF-värden. Resultaten avviker från SKB:s resultat i SR-Site genom att SSM fick diskontinuiteter i beräknade doskurvor orsakade av numerisk instabilitet (SSM2011-2306-31). Efter att ha undersökt SKB:s kod som lämnades till SSM som kompletterande information (se ovan) visade sig orsaken till diskontinuiteter vara att SSM tolkat SKB:s beskrivning av parametervärdet avseende landmarkens storlek som noll under havsperioden och ökande till ett stort värde under den terrestra perioden, medan SKB istället använde ett stort värde under hela simuleringsperioden för att undvika numerisk instabilitet. Efter korrigering av detta parametervärde ligger SSM:s reproducerade LDF-värden mycket nära de värden som beräknats av Ecolego-koden som levererats av SKB. SSM konstaterar att tekniken som används av SKB för att undvika numerisk instabilitet är rimlig och inte har någon effekt på beräknade doser. SSM betonar dock att detta behöver redovisas i dokumentationen av LDF-modelleringen, och noterar ytterligare en fråga om otydlighet i dokumentationen.

Efter att ha tagit del av SKB:s kompletterande information kring hantering av exponeringsvägar kopplade till föda från jordbruksmark anser SSM att SKB:s tillvägagångssätt är rimligt. Dock är det svårt att tolka resultaten i förhållande till faktisk diet och/eller förstå om de dominerande livsmedelsgrupper som bidrar till dos är en rimlig återspeglning av vad som kan vara effekten av faktiskt diet. Denna fråga har granskats ytterligare av SSM:s externa experter (se nedan).



SSM har begärt kompletterande information kring exponeringsvägen torvbränning vilken SKB bortsett från i SR-Site, men kring vilken mer information efterfrågats av SSM:s externa expert (SSM 2012-110-3). SSM ser positivt på att SKB har gjort en kompletterande analys för att stödja sin argumentation (se SKB:s underlag ovan). SSM instämmer i SKB:s analys att det är rimligt att bortse från torvförbränning som exponeringsväg.

Efter att ha tagit del av SKB:s kompletterande information angående kontaminering av biosfärsobjekt nedströms utsläppspunkten anser SSM att SKB:s motivering till att inte inkludera biosfärsobjekt nedströms biosfärsobjekt med radionuklidutsläpp i dosberäkningen är rimlig. Rörande den andra frågan om betydelsen av att representera biosfärsobjekt som homogena lådor snarare än heterogena lådor där hänsyn tas till mindre kontaminerade områden inom lådan, konstaterar SSM att i allmänhet är SKB:s analyser i god överensstämmelse med de analyser SSM:s externa experter genomfört (se nedan) och att effekterna är begränsade av detta förfarande. SSM anser också att om analysen skulle utföras för biosfärsobjekt av denna ringa storlek (tillräckligt stora för att försörja en familj) skulle det vara rimligt att tillämpa riskkriteriet för en liten exponeringsgrupp (10^{-5} snarare än 10^{-6} per år) (Allmänna råd SSMFS 2008:37).

Förutom att SSM begärt kompletterande information av SKB i syfte att undersöka osäkerheter i identifierade frågor och därmed stödja slutliga bedömningar, har SSM även gett två uppdrag till externa experter för att utföra oberoende modelleringsarbete. SSM instämmer med de externa experternas förslag (SSM 012-110-3; SSM Technical note 2012:46) att jämföra doskonverteringsfaktorer erhållna från så kallade referensbiosfärmodeller (IAEA, 2003) med SKB:s LDF-värden. Om några referensbiosfärmodeller visar sig leverera högre dosomvandlingsfaktorer än LDF-värdena från den platspecifika landskapsmodellen, skulle målet vara att förklara huruvida de villkor som antas i den generiska modellen rimligen kan inträffa vid Forsmark. På detta sätt kan SSM undersöka om nuvarande antaganden, som är inbäddade i modellerna, är tillräckligt robusta för att stödja tilltron till uppskattningar av konsekvenser av eventuella utsläpp till biosfären på sikt.

Resultaten från det första uppdraget som handlar om modelljämförelse mellan enkla referensbiosfärmodeller och SKB:s LDF-modeller rapporteras i SSM Technical note 2014:34; 2014:54 samt i Walke m.fl., (2015). De referensbiosfärmodeller som används finns beskrivna i SSM Technical note 2014:34 och beräkningar kan göras för radionuklidutsläpp till biosfären under tempererade klimatförhållanden i Forsmark. Vidare kan modellerna hantera utsläpp till sex biosfärssystem och här görs beräkningar för marin-, sjö-, myr-, skogs-, betesmarks- och jordbrukssystem. Antaganden om exponeringsvägar och kost för dosberäkningarna finns angivna. De beräkningsresultat som gäller andra klimatförhållanden, t.ex. varmt klimat och periglaciala förhållanden finns redovisade i SSM Technical note 2014:54 där de också jämförs med beräkningsresultat från SKB:s LDF-modeller.

Resultaten från modelleringen med de enkla referensbiosfärmodellerna för interglaciala förhållanden visar att av alla de sex biosfärssystemen ger jordbrukssystemet, där brunnsvatten används som dricksvatten, de högsta doskonverteringsfaktorerna. Resultaten visar också att dricksvatten från en djup brunn bidrar med mer än 50 procent av doskonverteringsfaktorn för 32 av 39 modellerade radionuklider. De doskonverteringsfaktorer som beräknas med de enkla referensbiosfärmodellerna överensstämmer med de som beräknas med SKB:s LDF-modeller (SSM Technical note 2014:34, figur 6). Med tanke på att odlingssystemet som definieras i beräkningarna är litet och bara kan försörja en liten grupp med ett fåtal individer så är riskkriteriet som

tillämpas 10^{-5} istället för 10^{-6} per år (SSMFS 2008:37). Anledningen till överensstämelsen är att användning av brunnsvatten som dricksvatten ger det största bidraget till doskonverteringsfaktorer i båda modellerna. Vad gäller periglaciala förhållanden visar resultaten från de enkla referensbiosfärmodellerna att doskonverteringsfaktorerna är betydligt lägre än för interglaciala förhållanden vilket överensstämmer med resultaten från SKB:s LDF-modeller.

För scenariot med varmare klimat beräknar de enkla biosfärmodellerna dock dosfaktorer som är 40 procent högre för vissa radionuklider, särskilt Ra-226, Th-230, Th-232 och uranisotoper (se SSM Technical note 2014:54, tabell 16), än de dosfaktorer som SKB:s LDF-modeller beräknar. Skillnaden i dosfaktorer för Ra-226 och Th-232 förklaras av att de enklare biosfärmodellerna tar hänsyn till bevattning av grödor med grundvatten, vilket inte görs i LDF-modellerna. Detta beror på att de beräkningar som görs för fallet global uppvärmning är en förlängning av de LDF-beräkningar som görs för dagens interglaciala förhållanden och då ingår inte bevattning med grundvatten. Dock innehåller SR-Site beskrivningar av vilka skillnader ett varmare klimat skulle kunna innebära, såsom ökad nederbörd, ökad evapotranspiration och förändringar i jordbrukets produktivitet.

En viktig skillnad mellan de enkla modellerna och SKB:s LDF-modeller är hur diskretisering av regolit genomförs. SKB:s LDF-modeller använder tre kompartiment för att beskriva regolit, medan åtta kompartiment används i de enkla modellerna. SSM anser att den diskretisering som används i LDF-modellerna leder till modelleringsresultat där radionuklider snabbare når markytan pga. numerisk dispersion. För radionuklider med kort halveringstid är denna diskretisering konservativ men för radionuklider med lång halveringstid kan den istället leda till underskattning av dos pga. att dotternuklider bildas från de radionuklider som sorberas i regoliten. SSM anser också att den transporttid som är ett resultat av diskretiseringen och tidsskalan i SKB:s modellering av landskapsutvecklingen är inkonsekventa.

I det andra uppdraget som handlar om modelljämförelse har en av SSM:s externa experter jämfört modelleringsresultat från GEMA-Site-modellen (SSM Technical note 2015:22) och från SKB:s LDF-modeller. GEMA-Site-modellen skiljer sig från SKB:s LDF-modeller ur framför allt två aspekter. Den ena aspekten är hur modellerna behandlar utvecklingen av flöden och avrinningsområden samt biosfärsobjekt i samband med utvecklingen av framtida landskap. Den andra aspekten är hur modellerna behandlar användningen av vatten. SKB:s LDF-modeller kan beskrivas som en komplett modell av landskapet, med alla biosfärsobjekt och avrinningsområden kopplade genom en fast uppsättning relationer t.ex. är storleken på ett biosfärsobjekt med dess avrinningsområden en funktion av tiden i den framtida utvecklingen. När det gäller flödet är SKB:s metod att härleda en genomsnittlig grundvattenhastighet baserad på en genomsnittlig grundvattenhastighet från sex sjöar vid en enda tidpunkt med hjälp av MIKE-SHE modellering. Denna "ögonblicksbild" av den genomsnittliga grundvattenhastigheten använder SKB sedan för att ange vattenflöden för biosfärsobjekt som en funktion av tiden. GEMA-Site-modellen använder istället en representation av ett enda biosfärsobjekt med dess avrinningsområde och probabilistiska beräkningar för att göra en stor sampling som ska representera egenskaperna hos de objekt och avrinningsområden som ingår i SKB:s landskapsmodell. GEMA-Site Modellen tar hänsyn till utvecklingen i landskapet orsakad av landhöjningen genom att tolka utvecklingen av flöde i de olika delarna av avrinningsområden och biosfärsobjekt baserat på hydrologiska indata till landskapet vid olika tidpunkter. När det gäller användningen av vatten antar SKB att dricksvattnet kommer från en brunn i berggrunden, vars utspädningsegenskaper bestäms som en regional genomsnittlig siffra (SKB TR-10-06). I GEMA-Site-modellen tas vattnet från ytvatten eller från en grund brunn i den nedre delen av regoliten.



Modelljämförelsen mellan GEMA-Site-modellen och LDF modellerna fokuserar på två frågor; tiden för övergången från våtmark till jordbruksmark och storleken på ett biosfärsobjekt kopplat till avrinningsområde. Tiden för övergången från våtmark till jordbruksmark speglar under hur lång tid radionuklider, från ett radionuklidutsläpp från berggrunden till ett biosfärsobjekt, ackumuleras i mark som i framtiden kan utnyttjas som jordbruksmark och därmed exponera människor och andra organismer för joniserande strålning från radionuklidutsläppet. Modelljämförelsen visar att dosen är relativt okänslig för denna tidsparameter (SSM Technical note 2015:22). Frågan om storleken på ett biosfärsobjekt är mer komplicerad än frågan om övergången från våtmark till jordbruksmark. Resultaten från flödessimuleringen i GEMA-Site-modellen visar för svagt sorberande radionuklider att desto större avrinningsområdet är i ett biosfärsobjekt med netto infiltration av vatten desto lägre blir doserna från jordbruksmarken i biosfärsobjektet. För starkt sorberande radionuklider (med höga distributionskoefficienter, K_d) visar flödessimuleringen att ett större avrinningsområde leder till högre doser från jordbruksmarken i biosfärsobjektet. Till exempel för radionuklider från den radioaktiva sönderfallsserien för uran (t.ex. Ra-226) ökar dosen med en storleksordning när storleken på avrinningsområdet är två tiopotenser större än SKB:s referensfall för LDF-modellerna (se SSM Technical note 2015:22, figur 13). Utifrån modelljämförelsen kan SSM konstatera att radiologiska konsekvenser på grund av storlek på topografiskt område inom ett avrinningsområde är begränsade.

Ytterligare analyser visar att användningen av vatten från en grund brunn ger avsevärt högre doser, särskilt för Ra-226 (se SSM Technical Note 2015:22, figur 14). Denna effekt observerades också vid en modelljämförelse mellan SKB:s modeller och s.k. referensbiosfärsmodeller (se SSM Technical Note 2014:34). Sammantaget tyder dessa analyser på att SKB:s antaganden om exploatering av lokala vattenresurser inte fångar hela skalan av möjliga framtida mänskliga aktiviteter. SSM anser att SKB behöver motivera användning av brunnsvatten i säkerhetsanalyser i kommande steg i SKB:s program.

SSM:s slutsats är att SKB:s biosfärsmodellering och dosberäkningar i allmänhet ger en bra beskrivning av biosfären, men att kvaliteten vad gäller hur dosberäkningarna utförs är otillfredsställande. Svagheten ligger främst i bristande dokumentation och kvalitetssäkring vilket leder till att SSM:s förtroende för konsekvensanalysen påverkas negativt. För att kontrollera SKB:s dosberäkningar har SSM, med hjälp av s.k. referensbiosfärsmodeller och en något mer komplex modell som SSM låtit utveckla, undersökt osäkerheter i SKB:s LDF-modeller. Utifrån detta har SSM kunnat dra slutsatsen att de LDF-värden som SKB beräknat genom biosfärsmodellering och dosberäkning är rimliga. SSM:s modellering visar att SKB:s dosberäkningar innehåller konservatism genom att den dosfaktor väljs som är högst både vad gäller biosfärsobjekt och tid. SKB:s dosberäkningar inkluderar också konsumtion av grundvatten från en djup brunn, vilket utgör en dominerande exponeringsväg i många fall. SSM:s bedömning är att SKB:s användning av konservatism kompenserar för några av svagheter i SKB:s dosberäkningar.

SSM anser att SKB:s standard för radiologiska beräkningsmodeller behöver förbättras, särskilt med avseende på (i) tydlighet i dokumentation, (ii) motivering till modelleringsmetoder/antaganden, (iii) förklaring av resultat och (iv) kvalitetssäkring av modeller, data och resultat. SSM vill också betona att en förbättring av standarden här inte betyder att SSM ser ett behov av större komplexitet eller mer detaljerade modeller. Utan snarare att mer stiliserade modeller används för att skapa förståelse för komplexa modeller genom att kontrollera rimligheten i komplexa modeller, belysa osäkerheter som införts utifrån konceptuella antaganden och genom att enkla modeller kan ge stöd för att kvantifiera konservatism i komplexa modeller och bedöma robustheten hos en konsekvensanalys.



7.2.3 Modeller för miljöpåverkan

7.2.3.1 Underlag från SKB

Aktivitetskoncentrationer i mark, sediment och vatten beräknas med samma modell som används för att beräkna LDF-värden (SKB TR-10-06) och som diskuteras ovan.

Utvärderingen av exponering av referensorganismer och representativa arter görs med ERICA Tool (Brown m.fl. 2008; senaste version tillgänglig på <http://www.ERICA-tool.com/>) och baseras på aktivitetskoncentrationerna beskrivna ovan. I den första utvärderingen (SKB TR-10-08) användes versionen daterad maj 2009, och i den kompletterande utvärderingen (SKB TR-13-23) används versionen daterad november 2012. I den senare SKB-rapporten redovisas skillnaderna mellan dessa versioner och vilken eventuell påverkan som dessa skillnader kan ha på re-sultatet.

ERICA Tool används för att beräkna dosrat (absorberad helkroppsdos, $\mu\text{Gy/h}$) för olika organismer från radionuklider i mark, sediment, vatten och från radionuklider i organismerna själva. Fördelningen av radionuklider antas vara homogen inom varje miljömatris respektive inom organismen, där aktivitetskoncentrationen i organismerna beräknas från aktivitetskoncentrationerna i vatten eller jord med hjälp av koncentrationsfaktorer (CR-värden, Bq/kg organism per Bq/kg jord respektive Bq/l vatten). De CR-värden som SKB valt diskuteras vidare i 7.3.4. Dos till organismerna beräknas sedan med doskoefficienter för intern och extern bestrålning. Sådana doskoefficienter finns färdiga i verktygets databas för de inbyggda referensorganismer och radionuklider som ingår. ERICA Tool kan även själv beräkna sådana doskoefficienter för andra organismer och radionuklider som specificeras av användaren.

7.2.3.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att de dosberäkningsmodeller som ingår i ERICA Tool är väl lämpade för att, som i SR-Site, beräkna helkroppsdos till organismer baserade på aktivitetskoncentrationer i jord, sediment, vatten och organismerna själva.

Utvecklingen av ERICA Tool och de beräkningsmodeller för stråldoser till organismer som ingår har skett inom EU-projekten FASSET och ERICA. Utvärdering av verktyget har bl. a. skett inom IAEA:s avslutade program EMRAS I och II respektive inom det pågående programmet MODARIA, där många modeller ingått i olika modell-modell och modell-data jämförelser och där ERICA Tool framstår som ett väl fungerande och tillgängligt verktyg (Beresford m.fl., 2009, Vives i Batlle m.fl., 2011). ERICA Tool har också använts för miljöriskbedömningar i flera andra länder och sammanhang (Oughton m.fl., 2013; Vandenhove m.fl., 2010; Wood m.fl., 2008). Även ICRP använder samma underliggande beräkningsmodell för att ta fram doskoefficienter för sina referensdjur och -växter (ICRP publication 108, 2008).

7.3 Indata

7.3.1 Urval av radionuklider

En viktig förutsättning för att kunna bedöma det använda bränslets farlighet nu och i framtiden är att dess innehåll av radionuklider, det så kallade inventariet, är väl känt. Innehållet av radionuklider beror främst på hur bränslet har använts och belastats vid driften i kärnkraftverket. Det använda bränslet består av fissions- och aktiveringsprodukter, samt radionuklider som deltar i längre sönderfallskedjor, i huvudsak aktinider. Dessutom finns radioaktiva ämnen i bränsleelementens konstruktionsdelar. Eftersom använt kärnbränsle består av ett mycket stort antal radionuklider varav många antingen är mycket kortlivande och/eller finns i mycket små mängder är det möjligt att endast beakta ett urval av radionuklider utan att för den skull förlora precision i säkerhetsanalysen. I detta avsnitt granskas den process som SKB använt för urval av



radionuklider. Frågan har betydelse för analysen av långsiktig framtida dos/risk för ett slutförvar. Inventariet har betydelse även för kriticitetsanalysen och för förståelsen av hur bränslets resteffekt avtar som funktion av tiden, se vidare avsnitt 3.3.5 "Beräkning av aktivitetsinventarium", avsnitt 3.3.6 "Beräkning av resteffekt" samt avsnitt 4.3 "Kriticitet" i denna granskningsrapport.

7.3.1.1 Underlag från SKB

Datorkoden Origen har använts för inventarieberäkningar kopplade till det svenska använda kärnbränslet (SKB TR-10-13, sid 51). Vissa mätningar har gjorts för att kontrollera beräkningsresultat (DeHart och Hermann (1996), Hermann och DeHart (1998), samt Hermann m.fl. (1995)). Beräkningar har också genomförts för inventariet i inducerad aktivitet, aktiverade korrosionsprodukter "CRUD" ("Chalk River Unidentified Deposit") och styrstavar (SKB TR-10-13, appendix).

Konsekvensberäkningar, särskilt probabilistiska simuleringar, är resurskrävande och därför finns ett stort behov att förenkla beräkningarna genom att försumma radionuklider som uppenbart inte kan medföra ett signifikant bidrag till dos/risk (SKB TR-10-50, appendix D). För fissions- och aktiveringsprodukter tillämpar SKB en enkel första sortering varvid radionuklider med kortare halveringstid än 10 år samt nuklider med en total radiotoxicitet lägre än 0,1 Sv vid deponeringstillfället försummas, vilket reducerar antalet beaktade radionuklider från ett 40-tal till ett 20-tal. För analysen av den långsiktiga säkerheten kan ytterligare en sortering göras baserad på halveringstid samt en total radiotoxicitet, vilket medför att endast 13 betydande radionuklider kvarstår (C-14, Cl-36, Ni-59, Se-79, Sr-90, Zr-93, Nb-94, Tc-99, Pd-107, Sn-126, I-129, Cs-135 and Cs-137). För fallet med tidig kapselskada behöver dock vissa av de uteslutna nukliderna ingå som Ag-108m.

För nuklider som deltar i kedjesönderfall används två generella typer av förenklingar, dels att kortlivade dotternuklider anses stå i radioaktiv jämvikt med sina modernuklider, dels att kortlivade nuklider i början av sönderfallskedjan anses ha fullständigt sönderfallit till den närmaste långlivade dotternukliden. För att i övrigt avgöra vilka förenklingar som är möjliga har SKB för var och en av de fyra sönderfallskedjorna ($4n$, $4n+1$, $4n+2$, $4n-3$) genomfört deterministiska dosberäkningar. De mera resurskrävande probabilistiska beräkningarna kan på basis av dessa resultat förenklas ytterligare. De allra viktigaste nukliderna som identifierats av SKB och som måste hanteras fullt ut i konsekvensanalysen är för $4n$: Pu-240, U-236, Th-232; för $4n+1$: Cm-235, Am-241, Np-237, U-233, Th-229; för $4n+2$: Cm-246, Am-242m, Pu-242, U-238, Pu-238, U-234, Th-230, Ra-226, Pb-210; för $4n+3$: Am-243, Pu-239, U-235, Pa-131, Ac-227.

Kortlivade radionuklider i sönderfallkedjor som försummas i konsekvensberäkningar beaktas indirekt eftersom deras effekt ingår i doskonverteringsfaktorer för motsvarande långlivade nuklider.

7.3.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s metod för urval av radionuklider för säkerhetsanalysen är lämplig och välmotiverad samt att det är osannolikt att det kan bli betydande dosbidrag från nuklider som inte har beaktats. Det finns dock frågeställningar som behöver belysas ytterligare inför kommande steg av SKB:s program. SSM har i granskningen beaktat SKB:s redovisning samt resultat från granskning utförd av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:41).

SSM:s granskning fokuserade på att identifiera om någon eller några radionuklider som SKB inte uttryckligen beaktar kan ha en betydande påverkan på säkerhetsanalysens resultat. De externa granskarna har jämfört SKB:s urval av radionuklider med de radionuklider som beaktats av tre andra organisationer (US Nuclear Regulatory



Commission, US Department of Energy, Japan Nuclear Cycle Development Institute). Resultatet visar att SKB generellt har beaktat en bred uppsättning radionuklider.

Några frågeställningar som har identifierats är bland annat huruvida SKB lämnat tillräcklig information för att utesluta Sb-126, fullständighet av nuklider som ingår i kategorin crud, samt huruvida utsläpp i närzonen av Pb-210 kan orsakas av Rn-222 från bränsle som ännu inte blivit påverkat av matrisupplösning. Den sistnämnda frågan identifierades även under SSM:s inledande granskningsfas (SSM Technical Note 2012:58) och diskuteras vidare i avsnitt 7.2.1.2. De externa granskarna fann även att SKB:s redovisning inte var helt klarläggande i det avseendet att dosbidrag från kortlivade nuklider som deltar i sönderfallskedjor verkligen har beaktats vid val av doskonverteringsfaktorer. Vissa frågetecken finns även kring användning av antagandet av radioaktiv jämvikt vilket är en approximation för den tidiga perioden efter förvarets förslutning.

För analysen av förvarets långsiktiga utveckling måste det anses osannolikt att det finns betydande dosbidrag från nuklider som inte har beaktats. För fallet mycket tidiga kapselbrott behöver dock SKB fördjupa analysen i kommande steg i slutförvarsprogrammet. Särskilt antagandet av radioaktiv jämvikt behöver förtydligas, liksom en fördjupad analys behövs kopplad till det mycket stora dosbidraget från Ag-108m. I övrigt vad gäller inventarieberäkningar påpekar SSM att det är viktigt att dessa hålls aktuella till framtida gransknings- och beslutstillfällen med beaktande av bränsletyper, utbränningsgrad, slutförvarsprogrammets drifttid samt drifttid för svenska reaktorer.

7.3.2 Löslighetsgränser för radionuklider

7.3.2.1 Underlag från SKB

Begränsade lösligheter för radionuklider innebär att vissa nuklider som frigörs från bränslet inte blir fullt tillgängliga för vidare radionuklidtransport då lösligheten för en sekundär fas som innehåller nukliden överskrids. Dessa typer av beräkningar baseras på termodynamiska data för utvalda radioelement liksom för huvudkomponenter i grundvattnet samt sammansättning för fyra olika grundvattentyper relevanta för Forsmarksplatsen. Dessutom krävs kännedom om den löslighetsbegränsande fas som kan bildas under aktuella grundvattenkemiska betingelser. I princip är det den mest termodynamiskt stabila fasta fasen som är löslighetsbegränsande men SKB förutsätter dock generellt bildning av en mindre stabil amorf fas, vilket ger en mer konservativ uppskattning av löslighetsgräns. Sådana faser behöver beaktas eftersom bildning av den mest stabila fasen kan vara kinetiskt hämmad. Löslighetsberäkningarna som genomfördes i samband med den tidigare säkerhetsanalysen SR-Can utfördes med de mer etablerade och fullständiga specieringskoderna PHREEQC och HYDRA-MEDUSA (SKB TR-06-32). I jämförelse med tidigare studier har det nu funnits ett större behov av att på ett tydligare och mer utförligt sätt representera osäkerheter kopplat till grundvattenkemisk sammansättning och termodynamiska data i form av normalfördelningar. Av denna anledning används det förenklade beräkningsverktyget "Simple Functions" som är skraddarsytt för probabilistiska tillämpningar och vilket utför specieringsberäkningar med Excel-koden som bas (SKB TR-10-61). Verktyget "Simple Functions" utför i princip samma beräkningar som PHREEQC och HYDRA-MEDUSA med skillnaden att det inte finns någon direkt koppling mellan huvudkomponenter och radioelement. Först beräknas den fria koncentrationen av huvudkomponenter, och sedan används denna för att tillsammans med löslighetsprodukten för den löslighetsbegränsande fasen beräkna fria radioelementkoncentrationer. Därefter beräknas de totala koncentrationerna av



radioelement. Beräkningar med verktyget "Simple Functions" har också förenklats så till vida att många species som förväntas förekomma i mycket låga halter inte beaktas.

I risk/dosberäkningar inkluderas de framräknade löslighetsbegränsningarna för olika radioelement som en parameter i närzonsmodellen (COMP23) för radionuklidtransport från en skadad kapsel. COMP23 täcker in kapseldomänen och den omgivande bufferten. Det finns ingen möjlighet att representera en tidsberoende utveckling, så varierande grundvattenkemiska betingelser täcks in genom att olika realiseringar får representera en variation av grundvattenkemin. I SR-Site tillämpas inte löslighetsgränser för advektion/korrosionsfallet förutom för uran då SKB anser att löslighetsgränserna inte kan garanteras eftersom buffertens förmåga att filtrera kolloider har försvunnit. Detta medför dock inga stora förändringar av resultaten i just detta beräkningsfall eftersom löslighetsgränserna är svårast att uppnå för just de deponeringshål med störst grundvattenflöde i vilka bufferterosion är mest sannolik. Löslighetsgränser tillämpas dock för skjuvlastfallet, för vissa av beräkningsfallen för att illustrera barriärfunktioner, samt för vissa scenarier avseende mänskliga handlingar. I vissa av beräkningsfallen för att illustrera barriärfunktioner har löslighetsgränser stor betydelse eftersom processerna aktiveras i samtliga deponeringshål, dvs. även i dem med mycket låga grundvattenflöden.

I SR-Site tillämpar SKB en variant av beräkningsverktyget "Simple Functions" som tar hänsyn till kemisk jämvikt med korrosionsprodukterna magnetit och götit från en korroderande gjutjärnsinsats. SKB bedömer att dessa reaktioner kommer att påverka de kemiska betingelserna av relevans för löslighetsberäkningar under hela den tid som hanteras i säkerhetsanalysen. Eftersom "Simple Functions" baseras på en hög grad av förenkling i förhållande till mer etablerade specieringsverktyg som PHREEQEC och Medusa har SKB genomfört betydande insatser för verifikation av beräkningsresultat genom att jämföra förenklade och fullständiga specieringsmodeller. Verifikationen har omfattat redoxkontroll, koncentrationer av radioelement i kemisk jämvikt med en rad uppsättning fasta faser, inverkan av grundvattentyp, inverkan av jonstyrka samt inverkan av temperatur. I det sistnämnda fallet saknar dock "Simple Functions" kapacitet för temperaturkorrektioner, utan beräkningarna har utförts för basfallet 25°C. Temperaturberoendet har dock studerats i intervallet 0-100°C med HYDRA-MEDUSA-koden. SKB:s slutsats är att resultat från "Simple Functions" generellt sätt överrenstämde med resultat från PHREEQEC och Medusa (SKB TR-10-61, avsnitt 4.1).

De probabilistiska simuleringarna med "Simple Functions" har utförts med excel-tillägget @risk för att studera inverkan av variationer i grundvattenkemisk sammansättning samt osäkerheter i termodynamiska data (SKB TR-10-50, avsnitt 3.7.1). En uppsättning av simuleringar har genomförts för att studera inverkan av osäkerhet och rumslig fördelning av grundvattenkemisk sammansättning genom att slumpvis variera koncentrationerna av olika grundvattenkomponenter för fyra huvudtyper av grundvattensammansättningar (tempererade förutsättningar, glaciala betingelser, permafrost, havsövertäckta betingelser). Inverkan av osäkerheter i termodynamiska data studeras genom att låsa grundvattensammansättningen och sampla termodynamiska data från fördelningar som etablerats med kännedom om storleken av osäkerhetsintervall. Vid en jämförelse med fall för vilka grundvattensammansättningen tillåts variera och termodynamiska data istället fixeras, drar SKB den generella slutsatsen att osäkerheter i termodynamiska data har störst inverkan på beräknade löslighetsgränser (SKB TR-10-50, avsnitt F4). De fördelningar av löslighetsgränser som används i dos/riskberäkningar baseras förenklat på grundvattensammansättningar fördelade på 25 % vardera för ovanstående grundvattentyper med hänsyn tagen till osäkerhetsintervall för alla termodynamiska data. För deterministiska simuleringar används medianvärdet.



I bestämningarna av löslighetsgränser används databasen NAGRA/PSI Chemical Thermodynamic Database 01/01 (Hummel m.fl., 2002). Ett flertal modifieringar och tillägg till den termodynamiska databasen har dock införts av SKB. En systematisk genomgång av databasen som motiverar ändringar och tillägg i förhållande till den ursprungliga databasen finns redovisad i SKB TR-06-17. SKB anger där att särskilda ansträngningar gjorts för att ta fram reaktionsentalpier för temperaturkorrektioner med viss användning av kemiska analogier och metoder för uppskattningar. SKB har också gjort vissa insatser för att försäkra sig om att databasen är internt konsistent. SKB har även genomfört en uppdatering av databasen, i vilken data för nickel, zirkonium, torium, och uran har uppdaterats baserat på arbeten inom OECD-NEA (SKB R-10-50). Dessutom har termodynamiska data för bly tillfogats som inte tidigare fanns med i databasen.

Medfällning kan innebära att radionuklider som sorberas på fasta mineralytor med tiden inkorporeras i mineralets kristallgitter och därmed blir starkare bundna till den fasta fasen. Denna typ av retentionsprocesser är dock svåra att förutsäga med god precision, och SKB har följaktligen valt att inte beakta medfällning. Ett undantag finns dock för radium där SKB i konsekvensanalysen beaktar medfällning av radium med barium i form av mineralet baryt (SKB TR-10-52, avsnitt 3.4.7). Baryt finns naturligt i berggrunden men viktigare är att mineralet bildas vid frigörelse av barium från det använda bränslet. SKB pekar på övertygande bevisning i naturen kring medfällning av radium och barium i mineralet baryt (SKB TR-08-07). SKB har också genomfört laboratorieförsök för att undersöka hur radium och barium tas upp i samband med bildning respektive växelverkan med mineralet. Försöken visade att upptag av radium involverade bulkfasen och inte bara ytlaget (SKB TR-10-43). Beroende av denna medfällning så styrs koncentrationer av radium i lösning av en fast fas med flera storleksordningar lägre löslighet i förhållande till en ren $\text{RaSO}_4(\text{s})$ fas. I SKB:s konsekvensanalys används en löslighet för radium som motsvarar 1/100 av den rena radiumsulfatfasen. Kvoten styrs av det maximala förhållandet mellan radium och barium som inträder först efter 100 000 år beroende på den långsamma inväxten av Ra-226 (SKB TR-10-52, avsnitt 3.4.7).

I samband med den inledande granskningsfasen identifierade SSM områden där SKB:s underlag innehöll oklarheter. SSM har därför begärt in följande kompletterande information kring SKB:s löslighetsberäkningar (SKBdoc 1396558):

- utförligare motivering av hur inverkan av grundvattenkemisk variabilitet, osäkerhet och långsiktig utveckling har beaktats
- ytterligare redovisning kring osäkerhetsintervall
- ytterligare motivering av hanteringen av Ag-108m
- SKB:s hantering av fosfatkoncentrationer i samband med löslighetsberäkningar
- SKB:s hantering av temperaturkorrektioner
- ytterligare motivering kring användning av medfällning av radium med barium.

Som svar på den första punkten anger SKB (SKBdoc 1396559) att variationer i grundvattnets redox tillstånd inte ger någon påverkan på löslighetsberäkningarna eftersom de enbart avspeglar betingelserna inuti en skadad kopparkapsel. Enligt SKB medför järninsatsen och buffringsförmågan av dess korrosionsprodukter (magnetit/göthit) att variationer i redoxpotentialen hos omgivande grundvatten saknar betydelse. SKB förväntar sig att denna redoxbuffring varar under hela den tid som behöver beaktas i säkerhetsanalysen. SSM:s informationsbegäran avsåg även metodiken kring medelvärdesbildning för att hantera det faktum att närområdeskoden COMP23 inte kan hantera tidsberoende. SKB förtydligar i sitt svar att grundvattensammansättning hanteras i de probabilistiska beräkningarna genom att ge fyra olika grundvattentyper (tempererat, permafrost, glacialt och vattenövertäckt) samma sannolikhet att infalla (d.v.s. 25 % var).



I SKB:s svar angående den andra punkten (SKBdoc 1396560) görs en genomgång och diskussion kring osäkerheter i termodynamiska data för huvudkomponenter i grundvatten, strontium, radium, palladium, samarium, holmium, bly, uran och americium. SKB börjar med att påpeka att osäkerhetsintervall för grundvattenspecies som bara finns i låga koncentrationer inte påverkar osäkerheten i löslighetsgränsen som helhet. I vissa fall är det egentligen enbart osäkerheten i löslighetsprodukten som har stor betydelse. I de fall SKB inte förutsätter kemisk jämvikt med den mest termodynamisk stabila fasta fasen utgör osäkerheter delvis en fråga om graden av konservatism i löslighetsgränsen. I vissa fall dominerar dock osäkerheten i data för enskilda species i vattenlösning t.ex. om löslighetsprodukten för den fasta fasen är mycket välkänd. SKB motiverar sedan standardintervallet $\pm 0,3$ log-enheter med att många detaljerade granskningar av data från oberoende mätningar visar att osäkerheten är ungefär en faktor 2 upp eller ner, dvs. detta är en vanlig precision med vilka mätningar kan genomföras.

Angående hanteringen av Ag-108m förtydligar SKB (SKBdoc 1396561) att antagandet att allt silver frigörs momentant och blir löslighetsbegränsat är mycket konservativt med tanke på att silver är en ädelmetall. För att möjligen kunna motivera en mindre konservativ frigörelsehastighet för radioaktivt silver i framtiden har SKB nyligen påbörjat experimentella studier. Man förutsäger att korrosionsmekanismen som involverar bildning av silversulfider är den mest betydelsefulla. SKB påpekar att det förutom den radiella fördelningen finns en betydande axiell fördelning med tanke på styrstavens driftförhållanden. En annan omständighet är att frigörelse av silver förutsätter att en 0,5 mm tjock stålinskapsling först korroderas sönder. SKB håller dock med om SSM:s påpekande i begäran om förtydligande att det sannolikt finns en radiell fördelning som kan ha en viss betydelse. SKB har genom en enkel överslagsberäkning kommit fram till skillnaden mellan att beakta och att inte beakta radiell fördelning borde vara ungefär en faktor tre.

För att belysa frågeställningarna kring fosfatkoncentrationer och temperaturkorrektioner (punkt 4 och 5 ovan) har SKB genomfört en ny analys (Grivé m. fl., 2013). SKB börjar med att konstatera att koncentrationer i aktuella grundvattenmiljöer förväntas vara 10^{-8} – 10^{-5} M. Dessa nivåer är ändå något högre än de koncentrationer som motsvaras av kemisk jämvikt med mineralet hydroxiapatit, vilket är SKB:s utgångspunkt i modelleringen av grundvattenkemisk utveckling (SKB TR-10-58). Tillgänglig information antyder att bufferten inte förväntas bidra väsentligt till fosfatkoncentrationer i lösning. SKB går igenom tillgänglig termodynamiska data för relevanta fasta faser och species i vattenlösning. Generellt finns relativt lite data för fosfat och de data som finns är ofta behäftad med betydande osäkerheter. SKB har, baserat på tillgängliga data, genomfört specieringsberäkningar med både ”Simple Functions” och PHREEQEC för att utvärdera betydelsen av fosfat i grundvatten. De båda koderna ger överrenstämmande resultat. SKB:s generella slutsats är att fosfatkoncentrationer bara förväntas ha en marginell påverkan på grundvattenkemin och radionuklidernas löslighet. För vissa radionuklider, som trevärdiga lantanider och aktinider, kan dock bildning av fasta fosfater bidra till extremt låg löslighet. Denna möjliga effekt kan ha betydelse i det övre intervallet av troliga fosfathalter. Effekten av komplexbildning med fosfat i lösning för lösligheten hos andra fasta faser som karbonat har dock visats vara mycket liten.

Beträffande temperaturkorrektioner redovisar SKB en genomgång av hur lösligheten påverkas av temperatur från 0°C till 90°C för ett antal radioelement (Grivé m. fl. 2013). Temperaturskillnaden kan ha både en liten och en stor effekt för specifika element, men ofta är osäkerheten betydande pga. att reaktionsentalpier inte är tillräckligt kända genom den vetenskapliga litteraturen. För att med god precision kunna beräkna temperaturpåverkan i ett större temperaturintervall krävs dessutom kännedom om reaktionsentalpiernas egna temperaturberoenden. På ett grundläggande plan argumenterar



SKB för att det förenklade antagandet, dvs. att temperaturen konstant är 25°C, är konservativt och att det vore en alltför stor insats att införa en tidsberoende temperaturkorrektur för löslighetsgränserna även om det i princip är möjligt. SKB påpekar att användning av löslighet vid lägre temperatur än 25°C är det mest realistiska alternativet med tanke på att risk för kapselbrott är störst efter ca 3 000 år då temperaturen sjunker under denna nivå. Lösligheter är lägre vid lägre temperaturer med undantag av nickel och av detta skäl är SKB:s förenkling konservativ. Enligt SKB:s bedömning saknar undantaget nickel dock betydelse eftersom lösligheten ändå är så hög att löslighetsgränsen inte nås. Lösligheter vid högre temperaturer är visserligen högre men för att dessa ska bli aktuella förutsätts mycket osannolika tidiga kapselbrott t.ex. genom stora skjuvlaster.

När det gäller den sista begäran i listan ovan avseende avsaknad av information kring tillgänglighet och eventuell förlust av barium, vars tillgänglighet utgör en förutsättning för processen svarar SKB (SKBdoc 1396558; Grandia, 2013) att barium från radioaktivt sönderfall av cesium-137 anses i huvudsak vara jämt fördelat i bränslematrisen och bör därför frigöras i takt med bränsleupplösningen. En mindre mängd barium kommer dock vara direkt tillgänglig för upplösning vilket medför att löslighetsgränsen för radiumbariumsulfat förväntas uppnås redan när grundvatten kommer in i en havererad kopparkapsel. SKB anser inte att det finns någon risk för att barium försvinner ut ur systemet i en sådan omfattning att processen skulle inhiberas beroende på förekomst av upplöst barium även utanför en havererad kopparkapsel. Barium finns i porvattnet i bentonit och barium- och sulfatkoncentrationer i omgivande grundvatten ligger nära mättnadsgränsen för baryt (Grandia, 2013). Detta medför att det inte finns någon betydande koncentrationsgradient och risk för uttransport i en sådan omfattning att förhållandet mellan radium och barium påverkas signifikant. Beträffande inverkan av konkurrerande katjoner som strontium anser SKB att de endast i liten omfattning kan förändra förutsättningarna för upptag av radium (Grandia, 2013).

7.3.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser sammanfattningsvis att SKB i vissa avseenden underskattat betydelsen av löslighetsgränser som säkerhetsfunktion i slutförvaret. SSM bedömer visserligen i likhet med SKB att löslighetsgränser generellt inte uppnås i deponeringshål med höga grundvattenflöden. Med tanke på att konceptuella osäkerheter kring upplösningen av bränslematrisen sannolikt är svåra att helt eliminera är dock löslighetsgränser en väletablerad och viktig mekanism för att begränsa utflödet av radionuklider, vilken är helt oberoende av bränsleupplösningshastighet (dock inte för icke-löslighetsbegränsade radionuklider). Förståelse för de kemiska processer som ger upphov till löslighetsgränser bidrar därmed till ett visst mått av robusthet i säkerhetsanalysens resultat. Dessutom förväntas löslighetsgränser kunna uppnås i deponeringshål med lägre grundvattenflöden vilket t.ex. har betydelse för hypotetiska beräkningsfall för att illustrera barriärfunktioner. SKB har avstått från att använda löslighetsgränser för fall med advektiva förhållanden i deponeringshålen vilket förefaller välmotiverat med tanke på kvarstående osäkerheter kring betydelsen av att buffertens filtreringsförmåga gått förlorad. SSM anser dock att med tanke på att utfällningen i första hand förväntas ske inuti en skadad kapsel med begränsat utbyte med omgivningen finns det anledning för SKB att närmare undersöka mobilisering och uttransport av utfällda radionuklider.

SSM har som ytterligare underlag för sin bedömning av SKB:s hantering av lösligheter för radioaktiva ämnen genomfört två externa expertgranskningar (SSM Technical Note 2012:48) respektive SSM Technical Note 2014:11). Den första av dessa granskningar genomfördes under den inledande granskningsfasen med fokus på SKB:s beräkningsmetoder och datahantering. Den andra granskningen, som genomfördes under huvudgranskningsfasen, inkluderade genomförande av oberoende beräkningar för att verifiera ett urval av SKB:s resultat. Beräkningarna omfattade reproduktion av

löslighetsgränser för radioelementen Sr, Th, Ra, Pu, och Np. Valet av radioelement reflekterar ett urval av kemisk komplexitet och egenskaper för att belysa olika frågeställningar inom geokemiska beräkningar. Beräkningar som har utförts för olika grundvattentyper överensstämmer relativt väl avseende relativa betydelsen av grundvattenspecies och löslighetsgränser med små skillnader som kan förklaras av ett något annorlunda angreppssätt. SSM instämmer dock med SSM:s externa expert (SSM Technical Note 2014:11) att SKB bör undersöka betydelsen av en bredare uppsättning av löslighetsbegränsande faser.

Under den inledande granskningen (SSM Technical Note 2012:48) genomfördes vissa rudimentära uppföljningar kring spårbarheten av termodynamiska data för ett fåtal grundvattenspecies. Inga uppenbara problem detekterades på detta område, men samtidigt konstaterades att de probabilistiska beräkningarna med programvaran @risk är bristfälligt dokumenterade. Baldwin och Hicks (SSM Technical Note 2012:36) genomförde en mer utförlig genomgång av jämviktkonstanter som används vid beräkningar med verktyget "Simple Functions". De konstaterar att även om inga stora fel har kunnat upptäckas finns exempel i SKB:s redovisning på avsaknad av fullständig spårbarhet och otillräcklig dokumentation kring detaljer i beräkningskedjan. Ytterligare exempel på denna typ av problem förs fram av SSM:s externa konsult under huvudgranskningsfasen (SSM Technical Note 2014:11) vilken finner vissa oklarheter kring data för t.ex. Th.

SSM har inom ramen för tillståndsprövningen inte låtit genomföra någon fullständig granskning av SKB:s termodynamiska databas, men vissa begränsade granskningsinsatser av SKB:s databasarbete har genomförts redan innan ansökan lämnades in (se nedan). SSM bedömer dock att SKB:s arbete till stora delar bygger på väletablerad kunskap. Eftersom termodynamiska data används inom kärnavfallsprogram i många länder finns ett omfattande internationellt samarbete etablerat inom t.ex. OECD och EU. Även om just beräkning av löslighetsgränser har liten eller ingen betydelse för de scenarier som dominerar beräknade riskbidrag (riskbidrag från advektion-korrosionsfallet samt skjuvlastfallet), är SSM av uppfattningen att SKB bör höja sin ambitionsnivå kring dokumentation av beräkningar kopplade till löslighetsgränser för radionuklider. Det saknas en sammanhängande beskrivning som dokumenterar de olika stegen i beräkningskedjan särskilt den probabilistiska hanteringen. Området är svårt att granska eftersom informationen är uppdelad på olika rapporter varav vissa endast inkluderar uppdateringar av tidigare arbeten (SKB R-10-50). Som SKB själva konstaterar finns exempel på mindre inkonsekvenser och kvalitetsproblem i den nuvarande redovisningen (se SKB rapport TR-10-50, avsnitt 3.7.3).

SSM och tidigare SKI har granskat tidigare versioner av SKB:s arbete med löslighetsgränser för radionuklider innan inlämnandet av SKB:s tillståndsansökan för slutförvar för använt kärnbränsle (SKI rapport 2007:17; SKI rapport 2008:17; SSM research report 2009:33; SSM research report 2011:21). Dessa tidigare granskningar visade att SKB har genomfört lämpliga åtgärder för att förbättra löslighetsberäkningar som: (i) att i högre grad beakta kemiska reaktioner i närområdet involverande bufferten och kapselns insats, (ii) att säkerställa att termodynamiska databaser är internt konsistenta (SKI report 01:46) samt (iii) att förbättra och utveckla hanteringen av osäkerheter. SKB:s databas för termodynamiska data ansågs hålla en hög kvalitet. Dessa data har till stor del baserats på noggrant genomförda kvalitetsgranskningar av experimentell information som utförts av NAGRA-PSI och OECD-NEA. En rekommendation var dock att SKB inte enbart skulle beakta osäkerheter i grundvattenkemisk sammansättning utan även ange och utvärdera osäkerhetsintervall för termodynamiska data. Dessa åtgärder har nu genomförts och resultaten av detta angreppssätt visar att osäkerheter i termodynamiska data har en större betydelse än osäkerheter i grundvattenkemi. Andra nämnvärda granskningsresultat var en viss otillfredsställelse kring SKB:s förenklade synsätt kring lösligheternas



temperaturberoende samt betydelsen av fosfatkoncentrationer, särskilt i perspektivet lösligheten för plutonium (se nedan).

En frågeställning som diskuterades utförligt av Brown m.fl. (SSM report 2011:21) är bildning av plutonium(IV) kolloider. Bildning och transport av kolloidala species har t.ex. betydelse för beräkningar kopplade till radionuklidtransport. SSM anser att ytterligare insatser kan krävas framledes för att frågor kring inneboende kolloider ska kunna belysas bättre. Löslighetsgränser för plutonium behöver diskuteras mer ingående i perspektivet av denna förekomstform (se även SSM Technical Note 2014:11). Enligt SSM har frågan dock begränsad betydelse för SR-Site dels med tanke på att löslighetsgränser inte tillämpas för fall där buffertens filtrerande förmåga har förlorats, dels för att kolloidtransport totalt sett har visats ha begränsad betydelse för geofärsretardationen i stort (se t.ex. SSM Technical Note 2014:29). För en framtida utveckling av säkerhetsanalysen behöver dock frågan hanteras mera ingående.

I ett senare skede av SSM:s granskning kommenterades SKB:s nya beräkningsverktyg ”Simple Functions” (SSM research report 2009:33; SSM research report 2011:21). Det konstaterades då att verktyget ”Simple Functions” stegvisa beräkningsmetodik innefattar tillkommande osäkerheter till följd av dels att inte alla interaktioner mellan radioelement och grundvattnets huvudkomponenter beaktas, dels att radioelement kan interagera med varandra genom att i viss mån förändra geokemiska betingelser som jonstyrka, pH och Eh. Expertbedömningar har i hög grad tillämpats av SKB vid val av specier i grundvatten som behöver beaktas snarare än att låta beräkningarna visa att vissa species har försumbar påverkan. I granskningen påpekades att flera viktiga grundvattenkomponenter inte hade beaktats så som Mg^{2+} , K^+ , Mn^{2+} , F^- , Br^- , och Al^{3+} . Stabila fissionsprodukter som barium har inte heller beaktats. Det påpekades även att användningen av mer etablerade modelleringsverktyg som PHREEQC gör det möjligt att beakta en mer omfattande uppsättning grundvattenspecies som kan påverka uppskattningarna av löslighetsgränser (SSM research report 2009:33; SSM research report 2011:21). Dessa synpunkter avser inte direkt prövningen av SKB:s ansökan eftersom synpunkterna avser tidigare versioner av SKB:s arbete, men en uppföljning av dessa frågor har ändå gjorts eftersom SKB har fortsatt användningen av detta modellkoncept.

SSM anser att SKB på ett acceptabelt sätt visat att beräkningskoden ”Simple Functions” kan reproducera beräkningsresultat framtagna med den väletablerade PHEREEQC koden. Med tanke på att ”Simple Functions” kan reproducera enstaka fall relativt väl bedömer SSM att de förenklingar som tillämpats kan vara acceptabla. Dock, eftersom ”Simple Functions” bara inkluderar ett fåtal grundvattenspecies (de som motsvarar mer än 1 % av totala koncentrationer) anser SSM att den förenklade koden bara ger tillförlitliga resultat inom ett ganska snävt intervall av grundvattensammansättningar (genom att jämföra med beräkningsresultat från mera etablerade specieringskoder). Detta beror på att om grundvattensammansättningen förändras, ändras också andelen av grundvattenspecies för en viss komponent. Detta innebär att det finns en osäkerhet kring kodens förmåga att täcka in ett stort intervall av grundvattensammansättningar inom ramen för en probabilistisk simulering. SSM bedömer att verktyget ”Simple Functions” utgör ett innovativt lättanvänt verktyg för jämviktsberäkningar som kan ha stort värde i olika sammanhang men det finns vissa tveksamheter kring huruvida koden i sin nuvarande form är lämplig för att skapa underlag för slutliga riskberäkningar gällande slutförvaringen av använt kärnbränsle. Enligt SSM:s bedömning har de begränsningar som påtalats för ”Simple Functions” förmodligen en mycket liten betydelse för de risk/dosberäkningar som presenteras i SR-Site, men detta bör ställas i relation till begränsad betydelse av löslighetsbegränsningar som säkerhetsfunktion.



Som nämnt ovan har SSM under den inledande granskningsfasen begärt in följande kompletterande information kring SKB:s löslighetsberäkningar (SKBdoc 1396558):

- utförligare motivering av hur inverkan av grundvattenkemisk variabilitet, osäkerhet och långsiktig utveckling har beaktats
- ytterligare redovisning kring osäkerhetsintervall
- ytterligare motivering av hanteringen av Ag-108m
- SKB:s hantering av fosfatkoncentrationer i samband med löslighetsberäkningar
- SKB:s hantering av temperaturkorrektioner
- ytterligare motivering kring användning av medfällning av radium med barium.

Efter att tagit del av SKB kompletterande information (se SKB:s underlag ovan) angående den första punkten framhåller SSM:s externa expert att inte bara magnetit/göhtit, utan även metastabila faser som grönröst kan bildas inuti kapseln, vilket inte har beaktats av SKB (SSM Technical Note 2014:11). Samma expert anser även att SKB borde ta större hänsyn till interaktioner mellan grundvatten och bentonitlera vilka kan påverka detaljer i korrosionsförloppet. SSM gör dock, liksom sin externa expert (SSM Technical Note 2014:11), bedömningen att även om den exakta sammansättningen av järninsatsen korrosionsprodukter inte är kända så är avvikelserna i förväntat redoxstillstånd förmodligen små. SSM vill dock påpeka att det inte finns några tydliga beräkningsfall som motiverar att korrosionsprocesser med järninsatsen fortgår under 10^6 år för fall med olika typer av kapselskador. SSM bedömer dock inte att denna fråga har avgörande betydelse eftersom även det omgivande grundvattnet förväntas förbli reducerande, möjligen med undantag för vissa kapselpositioner under perioder med infiltration av glaciala smältvatten.

Det omgivande grundvattnets sammansättning påverkar däremot andra aspekter av löslighetsberäkningarna än redoxpotentialen. Efter att tagit del av SKB förtydligande avseende hur grundvattensammansättning hanteras i de probabilistiska beräkningarna anser SSM att SKB i jämförelse med tidigare studier (t.ex. SKB TR-06-32) har förbättrat förutsättningarna att få en detaljerad förståelse för hur variationer och osäkerheter i grundvattensammansättning påverkar beräkningarna av löslighetsgränser. SSM bedömer att SKB:s presentation av resultat ger vissa inblickar i betydelsen av grundvattentyp och relativa betydelsen av grundvattenkemi och osäkerheter i termodynamiska data (SKB TR-10-50, appendix F). SSM anser dock att SKB även behöver presentera resultaten så att betydelsen av enskilda och särskilt viktiga grundvattenvariabler kan utläsas. En annan begränsning är förenklingar i koden COMP23 vilket medför en omfattande probabilistisk hantering som i viss utsträckning kan minska precisionen i riskberäkningarna.

I den andra punkten ovan efterlyste SSM en komplettering kring SKB:s metod att definiera osäkerhetsintervall för termodynamiska data; den att i första hand utgå ifrån publikationer i vilka osäkerhetsintervall har definierats, i andra hand utnyttja skillnader mellan data från oberoende källor och i sista hand använda ett standardintervall på $\pm 0,3$ log-enheter. SSM påtalade att osäkerheter vid mätningar som görs med hög precision men med inslag av systematiska fel har förutsättningar att upptäckas vid användning av alternativ två ovan men inte vid användning av alternativ ett. SSM konstaterar att om inte tillräcklig uppmärksamhet ägnas åt att definiera välmotiverade osäkerhetsintervall så tillför beräkningar i syfte att propagera osäkerheter i termodynamiska data inget väsentligt bidrag till förståelsen av osäkerheter i säkerhetsanalysens resultat (även om sådana studier kan vara värdefulla från metodiksynpunkt). I vissa fall är det egentligen enbart osäkerheten i löslighetsprodukten som har stor betydelse. I de fall SKB inte förutsätter kemisk jämvikt med den mest termodynamiskt stabila fasta fasen utgör osäkerheter delvis en fråga om graden av konservatism i löslighetsgränsen. I vissa fall dominerar dock osäkerheten i data för enskilda species i vattenlösning t.ex. om löslighetsprodukten för den fasta fasen är mycket välkänd



SSM anser att SKB:s komplettering på ett lämpligt sätt klargör hur osäkerhetsintervall har definierats och motiverats för ett urval av radioelement. Tillräcklig uppmärksamhet kring välmotiverade osäkerhetsintervall bör i första hand göras till en databasfråga. SSM håller dock med SKB att man dessutom bör identifiera och analysera de mest betydelsefulla osäkerhetsintervallen i specifika fall i samband med kommande steg i slutförvarsprogrammet. SSM anser att en uppenbar risk är att osäkerhetsintervall underskattas i enskilda studier beroende på en underskattning av de egna resultatens osäkerheter. Därför bör alltid, när så är möjligt, jämförelser göras mellan olika experimentella studier vid diskussion av osäkerheter även om det är möjligt att utgå från publikationer i vilka osäkerhetsintervall redan har definierats. En av SSM:s externa experter påpekar att korrelationer inte bevaras vid SKB:s probabilistiska modellering med osäkerhetsintervall, vilket anses överskatta betydelsen av osäkerheter i den termodynamiska databasen (SSM Technical Note 2014:11). Detta beror på att vissa kombinationer av data inom sina respektive osäkerhetsintervall inte är möjliga i en internt konsistent termodynamisk databas. SSM anser att detta sannolikt har liten betydelse men bedömer att SKB behöver utveckla sitt resonemang kring denna fråga i kommande steg i slutförvarsprogrammet.

Bakgrunden till SSM:s begäran om kompletterande information kring hantering av Ag-108m är dess dosbidrag i vissa scenarier som involverar tidiga haverier av tekniska barriärer. SSM efterfrågade i linje med detta ett förtydligande från SKB angående att SKB i sin definition av löslighet förutsätter att Ag-108m fördelar sig i förhållande till stabilt silver i samma proportion som totalhalterna i styrstaven. Detta förefaller icke-konservativt med tanke på att Ag-108m i första hand borde bildas i stavens ytskikt och denna radionuklid borde därför vara mera lättillgänglig än stabilt silver i stavens centrum. SSM bedömer efter att ha tagit del av SKB:s kompletterande information att denna fråga har liten betydelse rörande uppfyllelse av riskkriteriet, men eftersom även radionuklider som har betydelse för scenarier med tidiga kapselbrott behöver analyseras behöver en mera välgrundad analys som motiverar hanteringen av frigörelsen av Ag-108m genomföras i kommande steg i slutförvarsprogrammet.

I SSM:s kompletteringsbegäran ingår förtydliganden och ytterligare analys med tanke på SKB:s förenklade hantering av fosfatkoncentrationer och temperaturkorrektioner. Beträffande fosfatkoncentrationer konstaterade SSM att även om ingen löslighetsbegränsande fosfatfas bildas kan bildning av fosfatkomplex i lösning påverka även beräknade löslighetsgränser baserad på andra fasta faser. Avsaknad av data och hantering av fosfat i grundvatten har även påpekats under tidigare granskningar (SKI report 2008:17). SSM anser att SKB:s förnyade analys trots vissa kunskapsluckor konfirmerar en mycket begränsad betydelse av komplexbildning med fosfat i vattenlösning. Påverkan på riskanalysens resultat bör kunna anses vara försumbar men det är ändå viktigt att utredningar och analyser som ligger till grund för riskanalyser är så fullständiga som möjligt.

När det gäller frågan om temperaturkorrektioner anser SSM att viss klargörande information framkommit från SKB:s kompletterande information särskilt kring betydelsen av temperaturer som är lägre än 25°C. SSM anser dock att högtemperaturfallet fortfarande har betydelse och behöver vara föremål för utredning med tanke på tidiga hypotetiska felfunktioner hos de tekniska barriärerna. Det hade t.ex. varit intressant att studera riskkurvor med eller utan temperaturkorrektioner så som SKB förtjänstfullt redovisat för att motivera hanteringen av fosfatkoncentrationer men det är uppenbart att begränsningarna med COMP23-koden har varit en försvårande omständighet. SSM inser att fullständiga utredningar kring temperaturberoende hos termodynamiska data är en orimligt stor arbetsuppgift som inte kan motiveras av betydelse för riskanalysen. SSM anser dock att SKB framledes tydligare bör identifiera vilka data som är mest



betydelsefulla ur perspektivet temperaturkorrektioner, så att dessa kan följas upp i samband med kommande forskning, sammanställningar av litteraturdata och databasarbete.

Som sista punkt i listan ovan har SSM begärt ett förtydligande kring SKB:s metod för att beskriva medfällning av radium med barium i form av mineralet baryt. SSM kompletteringsbegäran avser avsaknad av information kring tillgänglighet och eventuell förlust av barium vars tillgänglighet är en förutsättning för processen. Bakgrunden till denna begäran är att såvitt SSM känner till är det första gången som medfällningsprocesser förutsätts för att beskriva retardation av radionuklider i en säkerhetsanalys för slutförvaring av radioaktivt avfall. Enligt SSM:s bedömning kan medfällning även generellt förväntas vara en betydelsefull retardationsprocess för många radioaktiva ämnen, men processen har ansetts vara svåröversäglig och därför mindre lämplig som grund för säkerhetsanalys. Det faktum att processen försummas ger möjligen en viss säkerhetsmarginal i säkerhetsanalyseräkningar. SSM håller dock med SKB om att de analoga kemiska egenskaperna för radium och barium är så pass väldokumenterade att beaktande av medfällningsreaktioner kan motiveras i säkerhetsanalyssammanhang.

SSM anser liksom sin externa expert (SSM Technical Note 2014: 11) att det finns betydande experimentell information som bekräftar mera omfattande upptag av radium än vad som kan förklaras av enbart sorption på mineralytor SKB TR-10-43. Det att det finns även belägg för att radium tas upp av baryt genom studier av naturliga system (van Beek m.fl., 2007; Foster m.fl., 2004). SSM:s externa experter påpekar att tillgängligheten av sulfat både som ett resultat av variationer i grundvattensammansättning och som ett resultat av eventuell mikrobiell sulfatreduktion kan ha en betydande påverkan på processen (SSM Technical Note 2012:48; SSM Technical Note 2014:11). De s.k. MINICAN-försöken visar t.ex. att mikrobiell sulfatreduktion sannolikt kan förekomma i en skadad kapsel åtminstone om buffertens densitet påverkats av erosion, vilket förbrukar sulfat som i sin tur skulle kunna återmobilisera utfällt radium. SSM bedömer i linje med detta att den mest betydande osäkerheten kring SKB:s konceptuella förståelse för medfällning av radium och barium avser risken för betydande lokal mikrobiell sulfatreduktion som förbrukar sulfat och därmed försämrar förutsättningarna för processen. SSM anser inte att begränsad tillgång på elektronondonatorerna väte och metan (SKB TR-10-52, avsnitt 3.4.6) utgör ett tillräckligt starkt argument för att utesluta inverkan av mikrobiell sulfatreduktion (se avsnitt 4.6.3.2 i denna rapport). Om mikrobiell sulfatreduktion äger rum lokalt inuti en havererad kapsel finns dock sannolikt bättre förutsättningar för att medfällningsprocessen istället äger rum utanför kopparkapseln. SSM anser att det finns utrymme för en mer uttömmande analys av hur mikrobiell sulfatreduktion inverkar på förutsättningarna på retardation av radium. SSM noterar att medfällning inte beaktas för fall med advektion i bufferten och frågan bör därför inte ha någon signifikant påverkan på säkerhetsanalysens resultat. Medfällningen har dock viss betydelse för skjuvlastfallet samt för fallen hypotetiska beräkningar för förlust av barriärfunktioner.

SSM anser att det föreligger ett visst behov av fortsatt grundläggande forskning kring förståelsen av termodynamiska egenskaper för bariumföreningar och mekanismer kring medfällning. En sådan grundläggande förståelse för medfällningsprocessen kan möjligen skapa förutsättningar för att beakta och integrera medfällningsprocesser för dels andra radionuklider än radium, dels andra fasta faser än baryt t.ex. kalcit eller kapselkorrosionsprodukter (se exempelvis European commission project SKIN, Grant agreement N°269688).

SSM anser sammanfattningsvis att SKB i vissa avseenden underskattat betydelsen av löslighetsgränser som säkerhetsfunktion i slutförvaret. SSM bedömer visserligen i likhet med SKB att löslighetsgränser generellt inte uppnås i deponeringshål med höga

grundvattenflöden. Med tanke på att konceptuella osäkerheter kring upplösningen av bränslematrisen sannolikt är svåra att helt eliminera är dock löslighetsgränser en väletablerad och viktig mekanism för att begränsa utflödet av radionuklider som är helt oberoende av bränsleupplösningshastighet (dock inte för icke-löslighetsbegränsade radionuklider). De bidrar därmed till ett visst mått av robusthet i säkerhetsanalysens resultat. Dessutom förväntas löslighetsgränser kunna uppnås i deponeringshål med lägre grundvattenflöden vilket t.ex. har betydelse för hypotetiska beräkningsfall för att illustrera barriärfunktioner. SKB har avstått från att använda löslighetsgränser för fall med advektiva förhållanden i deponeringshålen vilket förefaller välmotiverat med tanke på kvarstående osäkerheter kring betydelsen av att buffertens filtreringsförmåga gått förlorad. SSM anser dock att med tanke på att utfällningen i första hand förväntas ske inuti en skadad kapsel med begränsat utbyte med omgivningen finns det anledning för SKB att närmare undersöka mobilisering och uttransport av utfällda radionuklider.

7.3.3 Sorption av radionuklider på bentonit och berg

Sorption på bentonitlera och berg är av stor betydelse för säkerhetsfunktionen retardation av radionuklider. Detta kan påvisas genom att många av de radionuklider som bidrar med störst dos/risk samtidigt har en liten sorptionsförmåga. Ett mått på graden av interaktion mellan radionuklider och fasta ytor, dvs. sorptionen, ges av linjära fördelningskoefficienter (eller Kd-värden) som är specifika för radioelement med ett visst oxidationstal. Radioelement med olika oxidationstal kan ha helt skilda kemiska egenskaper och därmed olika sorptionsförmåga, medan radioisotoper inom ett och samma radioelement har samma sorptionsförmåga. Fördelningskoefficienter är konditionala konstanter i det avseendet att de endast representerar ett fast material av en viss sammansättning och ytkaraktäristik samt en viss grundvattenkemisk miljö. Användning av sorptionskoefficienter förutsätter också att koncentrationen i vattenlösning inte är så hög att sorptionen påverkas av mättnadseffekter. I detta avsnitt granskas SKB:s urval av sorptionskoefficienter för konsekvensberäkningar.

7.3.3.1 Underlag från SKB

SKB redovisar separat olika utredningar för sorption på bentonitlera (SKB TR-04-18) respektive berg (SKB R-10-48). En sammanställning och ytterligare motivering/justering av sorptionskoefficienter för dos/riskberäkningar finns redovisad i datarapporten (SKB TR-10-52). För sorption på bentonitlera tillämpas en triangelfördelning med medelvärde, övre- och undre gräns i logaritmskalan. För sorption på berg tillämpas lognormalfördelningar som samplas mellan 2,5 % och 97,5 % percentilerna.

SKB har genomfört omfattande studier för systematiskt urval av fördelningskoefficienter för relevanta radionuklider och bentonitlera som baseras på experimentella data. De radioelement som inkluderats är Ag(I), Am(II), C (karbonat, metan, organiska syror), Ce(III), Cl(-I), Cm(III), Cs(I), Eu(III), Ho(III), I(-I), Nb(V), Ni(II), Np(IV), Np(V), Pa(IV), Pa(V), Pb(II), Pd(II), Pu(III), Pu(IV), Pu(V), Pu(VI), Ra(II), Rn(-), Se(-II), Se(IV), Se(VI), Sm(III), Sn(IV), Sr(II), Tc(IV), Tc(VII), Th(IV), U(IV), U(VI), Zr(IV). För fall där data saknas används analogi med andra radioelement med likartade kemiska egenskaper (SKB TR-04-18). I studien argumenteras för att teoretiska termodynamiska sorptionsmodeller inte är tillräckligt avgränsade eller väl parameteriserade för att utnyttjas direkt och att direkta experimentella observationer är mer tillförlitliga. Modellering används dock för att kompensera för det faktum att experimentella betingelser inte överensstämmer med de som förväntas i slutförvarsmiljön. En serie korrektionsfaktorer har därför utvecklats som skalar uppmätta experimentella Kd-värden så att de blir representativa för slutförvarsmiljön (representativa värden erhålls genom att multiplicera uppmätt värde med tillämpliga korrektionsfaktorer). De omfattar korrektion för i) skillnader i katjonbyteskapacitet (CEC), ii) skillnader i pH, och iii) skillnader i



specieringen i lösningen. SKB konstaterar att förändringar som beror på bildning av hydrolyskomplex inte medräknas i den sista kategorin eftersom detta nästan helt innefattas i pH-beroendet. Den sista kategorin omfattar två varianter beroende på om bildning av karbonatkomplex förväntas konkurrera med sorption eller inte. Specieringsberäkningar har genomförts som tar fram koncentrationer av konkurrerande komplex för tre olika grundvattensammansättningar med väsentligt olika salthalt och jonstyrka (låg, medel och hög).

Studien innefattar också en faktormetod för uppskattning av osäkerheter i sorptionsdata där faktorer definierats för

- osäkerheter i källdata
- osäkerheter i katjonbytesförmåga
- osäkerhet i pH
- osäkerhet i speciering
- särskild ytterligare osäkerhet vid användning av experimentella data för ett analogt radioelement
- ytterligare osäkerhet pga. av att experimentella data tagits fram med ett batchsorptionförsök.

För varje radioelement med ett specifikt oxidationstal tas en total osäkerhetsfaktor fram genom multiplikation av samtliga relevanta osäkerhetsfaktorer. Osäkerhetsintervallet fås sedan fram genom att multiplicera respektive dividera det uppskattade K_d -värdet med den totala osäkerhetsfaktorn. I studien rapporteras K_d -intervall för referensgrundvatten som är öppet med avseende på koldioxid respektive slutet (i det första fallet kontrolleras karbonat av det omgivande grundvattnet) samt för ett grundvatten med hög salinitet. I SR-Site (SKB TR-11-01) hanteras tre olika bentonitleror MX-80, Deponit CA-N och Milos, men SKB anser att de är ekvivalenta ur sorptionshänseendet.

En motsvarande studie av sorption på berg finns redovisad i SKB R-10-48. Denna studie beskriver framtagning av fördelningar av K_d -värden för konsekvensberäkningar baserat på litteraturdata samt en omfattande uppsättning mätningar på platsspecifikt bergmaterial från borrhålskärnor. SKB redovisar platsspecifika mätningar omfattande olika storleksfraktioner av krossat berg respektive sprickfyllnadsmineral (SKB P-07-139). I denna rapport finns också mätningar av bergets porositet, diffusivitet och specifika yta rapporterade, vilket kommenteras närmare av SSM i avsnitt 7.3.5 i denna rapport. En motsvarande rapport har även tagits fram för de mätningar som gjorts med bergmaterial från undersökningarna i Oskarshamns kommun (SKB P-07-179). Sorptionsmätningarna utförda som batchförsök med radioaktiva spårämnen omfattade Cs^+ , Sr^{2+} , Ra^{2+} , $Ni(II)$, $Am(III)$, $Th(IV)$, $Np(V)$ och $U(VI)$. Försöken omfattade fyra olika typer av grundvatten med olika kemiska sammansättning (av utspädd, marin, salt, och extremt salt typ). Av betydelse för sorption är bland annat skillnaderna i jonstyrka, karbonathalt och pH.

SKB:s metod för urval av K_d -värden för sorption på berg påminner om motsvarande metod för sorption på bentonitlera i och med användning av korrektionsfaktorer för att kompensera för skillnader mellan experimentella betingelser och fältmässiga förhållanden. De korrektionsfaktorer som SKB arbetar med är för skillnader i ytarea, mekaniska skador orsakade av krossning av berg, jonbytesförmåga, samt kemiska betingelser (SKB R-10-48, avsnitt 5.1.1). De experimentellt uppmätta fördelningskoefficienterna (R_d) multipliceras först med korrektionsfaktorn för ytarea (f_A) för att få en ytnormaliserad fördelningskoefficient för krossat berg (R_{d0}). Därefter multipliceras denna med korrektionsfaktorer för krossat berg (f_m) respektive jonbytesförmåga (f_{CEC}) för att få en fördelningskoefficient som representerar in situ-berg i kontakt med den specifika grundvattensammansättningen som användes i experimentet (K_{d0}). I sista steget kombineras fördelningen av dessa in-situ fördelningskoefficienter med fördelningen av



korrektionsfaktorer för grundvattenkemi (fchem) genom faltning, och därmed erhålls in-situ-fördelningskoefficienter korrigerade för grundvattenkemisk påverkan (Kd). I motsats till studien för sorption på bentonitlera hanteras grundvattenkemisk påverkan med hjälp av empiriska data snarare än baserat på specieringsberäkningar. Parameterfördelningar etableras genom att först beakta osäkerhetsintervallet för empiriska data genom ett samplingsförfarande. Ytterligare osäkerheter och/eller variabilitet i korrektionsfaktorerna för krossning av berg respektive jonbytesförmåga används tillsammans med fördelning av empiriska data för etablering av ett parameterintervall för in-situ-fördelningskoefficienter. Den slutliga fördelningen av Kd-värden erhålls genom att betrakta variationsbredden av geokemiska förhållanden från SKB:s geokemiska modell för rumslig variabilitet och geokemisk utveckling vid Forsmark. Konsekvensberäkningarna ger därmed en statistiskt rimlig bild av bergets sorptionsförmåga men det anses oralistiskt att explicit betrakta påverkan av geokemiska förändringar både i tid och längs en strömbana från förvaret till biosfären. Avsikten är att slutresultatet ska representera ett försiktigt val av parametervärden. För deterministiska beräkningar används fördelningens medianvärde.

SKB jämför sin databas för platsspecifika Kd-värden med fältmätningar av sorption som gjorts i det så kallade LTDE-försöket vid Äspö och konstaterar att fältmätningarna visar på en mer effektiv retardationsförmåga än vad som förutsågs av sorptionsdatabasen. SKB anser att detta generellt talar för att SKB:s kvantifiering av sorption är försiktigt vald. SKB gör också vissa jämförelser med fastläggningsförmågan av naturligt Ra-226 baserat på mätningar i borrhålen och konstaterar att dessa resultat överensstämmer med SKB:s hantering av sorption för Ra-226.

SSM har begärt kompletterande information från SKB kopplat till området sorption av radionuklider. Behovet av dessa kompletteringar framkom under ett relativt tidigt stadium i processen för granskning av tillståndsansökan (SSM Technical Note 2012:63). SSM efterfrågade följande information (SSM2011-2426-110):

- SKB bör redovisa hur inverkan av cement påverkar sorption
- SKB bör redovisa hur geokemisk utveckling/omvandling av bentonitlera påverkar sorption
- SKB:s databas för sorption av radioelement på bentonitlera bör uppdateras eftersom den i huvudsak har baserats på nästan 10 år gammal information
- SKB bör redovisa hur mineralomvandlingar/sprickfyllnadsmineral påverkar radionuklidretardation

Som en del av sitt svar (SKBdoc 1396957) har SKB för att belysa den första frågan angående inverkan av cement låtit genomföra en modelleringsstudie (SKB-R-13-38) i vilken det konstateras att nuklider som sorberar via jonbytesprocesser inte påverkas nämnvärt medan för ytkomplexeringsreaktioner kan högt pH innebära både förbättrad och försämrade sorption. Överslagsberäkningar visar att det finns fall där lägre Kd-värden kan förväntas vid högre pH, men då bör det beaktas att zonen med högre pH sannolikt bara omfattar en liten del av hela strömbanan från kapsel till biosfär. Det finns även fall för vilka en starkare sorption kan orsaka högre doser pga. ökad inväxt av dotternuklider längs strömbanan. Det finns också särskilda svårigheter att utreda pH-beroendet för nuklider där samexistens av flera redoxstillstånd inte kan uteslutas. Dessa typer av effekter bör dock enligt författaren vara relativt små. På ett övergripande plan konstateras att kapselbrott förväntas i en avlägsen framtid och då har sannolikt cementdegradering som orsakar pH-plymen redan klingat av. SKB anger att det numera är bestämt att Portlandcement bara får användas till ett djup på maximalt 200 m för att minska betydelsen av höga pH i grundvatten.

Beträffande inverkan av geokemisk utveckling/omvandling av bentonitlera konstaterar SKB i sitt svar (SKBdoc 1396957) att sorption på bentonit generellt har liten betydelse för



SKB:s säkerhetsanalys. Frågan är därför mindre betydelsefull. Buffertens egenskaper förväntas dessutom förändras mycket litet i den tidsskala som beaktas i säkerhetsanalysen och därför är effekten på sorption liten. Jonbytesprocesser kan ske i bentonitleran men eftersom det endast är små skillnader för sorption på kalcium- och natriumformen är även denna effekt liten.

Angående uppdatering av kunskapsläget för sorption på bentonitlera anger SKB (SKBdoc 1396957) att nyare experimentell information inte har medfört några ändringar i förhållande till SKB TR-04-18 utan databasen bedöms fortfarande vara relevant i sin helhet.

Som svar på den sista punkten ovan framhåller SKB en kompletterande modelleringstudie som belyser retardation i vattenförande sprickor som består av tre lager; sprickfyllnadsmineral, omvandlat berg samt opåverkat berg (Löfgren och Crawford, 2014). Denna mer detaljerade representation av bergets egenskaper i jämförelse med de beräkningar som presenteras i SR-Site med bara opåverkat berg resulterar i lägre dos/risk. SKB har i huvudsak belyst denna fråga genom att variera diffusivitet mellan de olika lagren.

7.3.3.2 SSM:s bedömning

Förutom egen granskning av SKB:s underlag har SSM som ytterligare stöd för sin bedömning av SKB:s hantering av sorption genomfört två externa expertgranskningar (SSM Technical Note 2012:63 respektive SSM Technical Note 2014:48).

Den första externa expertgranskningen genomfördes under den inledande granskningsfasen och innefattade sorption på både bentonitlera och sorption på berg. Den andra granskningen genomfördes under huvudgranskningsfasen och fokuserade enbart på sorption på berg. Anledningen till denna inriktning är att SSM bedömde att osäkerheterna för sorption på berg är mera betydande eftersom detta är ett mera heterogent och svårkaraktäriserbart material. Granskningen under huvudgranskningsfasen (SSM Technical Note 2014:48) innefattade också en särskilt fördjupad granskning av underlaget för urval av Kd-värden för radioelementen cesium, radium, neptunium, plutonium och uran. Inriktningen för denna granskning var att dels täcka in någon eller några radioelement för vilka platsspecifika mätningar har genomförts, dels någon eller några radioelement för vilka Kd-värden i huvudsak har baserats på litteratordata.

SSM och tidigare SKI har även granskat tidigare versioner av SKB:s arbete med sorption av radionuklider redan innan inlämnandet av SKB:s tillståndsansökan (SKI rapport 2007:17; SKI rapport 2008:17; SSM research report 2009:33; SSM research report 2011:21). Det konstateras i dessa arbeten att få stora förändringar har genomförts vad gäller rekommenderade Kd-värden men att utvecklingen under de senaste 10-15 åren har medfört att härledningen är mera systematisk och transparent. Ett faktum som kvarstår från dessa granskningar är observationen att en betydande andel av rekommenderade Kd-värden för berg fortfarande inte kunnat baseras på platsspecifika material. För sorption på berg är dock en viktigare osäkerhet förmodligen betydelsen av att krossat bergmaterial vanligen används under experimentella studier istället för intakt bergmaterial.

Kvantifiering av krossningsprocessens påverkan är svår dels beroende på konceptuella osäkerheter kring färsk mineralyt, dels beroende på svårighet att mäta den ytarea som är tillgänglig för sorption. En annan fråga som har diskuterats i dessa tidigare granskningar och som fortfarande är aktuell är betydelsen av sorption på sprickfyllnadsmineral. Det kan dock vara så att sprickfyllnadsmineral dels bara täcker en mindre andel av alla tillgängliga sprickytor i berget, dels endast kan påverka sorption i gynnsam riktning. Under de tidigare granskningarna efterfrågades utökade



känslighetsanalyser för att visa den relativa betydelsen för osäkerheter kopplat till Kd-värden för individuella radioelement. För sorption på bentonitleras diskuterades betydelsen av osäkerheter kring sammansättningen av porvatten i bentonit samt svårigheter att karakterisera diffusionsrelaterade parametrar i bufferten vilket har en indirekt påverkan på sorption. En annan synpunkt som har framförts tidigare är att det i SKB:s arbete finns en potential till förbättrad transparens kring motivering av osäkerhetsintervall. Det framfördes också viss kritik mot SKB:s användning av triangelfördelningar istället för fördelningar med välgrundade statistiska egenskaper.

Med beaktande av SKB:s underlag inklusive kompletteringar samt resultat från de granskningsinsatser som redovisas ovan, bedömer SSM i frågan om påverkan av cement att cementlakvatten generellt inte medför en försämring av bergets sorptionskapacitet. SKB:s redovisning är dock i sin nuvarande form något fragmentarisk och översiktlig. SSM anser att frågan inte har stor betydelse för säkerhetsanalysen, men SKB bör ändå framgent antingen på ett mer övertygande sätt visa att betingelser med högt pH har en så liten utbredning i tid och rum att inverkan är betydelselös eller så behöver inverkan av cementpåverkat grundvatten undersökas grundligare t.ex. genom experiment. Även om påverkan av låg-pH-cement är mindre omfattande i jämförelse med Portlandcement behöver även inverkan av denna cementtyp undersökas.

SKB argumenterar enligt ovan att sorption på bentonit generellt har liten betydelse för säkerhetsanalysen avseende ett slutförvar i Forsmark enligt ansökan. SSM bedömer dock att i hypotetiska fall med tidiga kapselbrott har sorption av kortlivade nuklider på bentonit stor betydelse. SSM anser därför att känslighetsanalyser för Kd-värden behöver utvecklas för denna typ av beräkningsfall.

Även om SKB i sin komplettering argumenterar för att databasen med parametervärden för sorption på bentonitleras (SKB TR-01-18) fortfarande är relevant i sin helhet, konstaterar SSM att det för närvarande saknas en övertygande systematisk redovisning som visar att sorptionsdata framtagen efter 2004 har beaktats. SSM anser det vara osannolikt att sådan nyare information skulle ha någon stor inverkan på sorptionsdatabasen och ännu mindre sannolikt att det skulle påverka dos/risk beräkningar med beaktande av den begränsade betydelsen av säkerhetsfunktionen sorption på bentonitleras.

Då SKB:s komplettering angående retardation i vattenförande sprickor i huvudsak belyser frågan genom att variera diffusivitet mellan de olika ingående lagren, kommenterar SSM frågan i avsnitt 7.3.5 om bergets transportegenskaper.

SSM konstaterar att sorption av radionuklider på geologiska medier som lera och berg är ett område som varit föremål för omfattande undersökningar under flera decennier och därför är väl etablerat med begränsade kvarvarande osäkerheter för tillämpningar inom säkerhetsanalys. Området ingår som del i säkerhetsanalyser för i stort sett samtliga länder som har kärnavfallsprogram. Även om osäkerheter fortfarande finns kvar kring en rad fundamentala mekanismer och processer på molekylär nivå kan konceptuella osäkerheter som är av betydelse för säkerhetsanalysens resultat i de flesta fall bedömas som små. Betydelsen av sorption på geologiska medier illustreras av att beräknad dos/risk i de flesta analyser av långsiktig säkerhet och strålskydd för slutförvar för radioaktivt avfall domineras av nuklider med liten eller ingen sorption.

SSM anser att utveckling och användning av understödjande termodynamiska sorptionsmodeller bör uppmuntras eftersom den grundvetenskapliga förståelsen för hur sorption påverkas av olika omgivningsfaktorer bidrar med tilltro till det intervall av sorptionsegenskaper som anses representativt med hänsyn till variabilitet och osäkerhet.



SSM håller dock med bedömningen i SKB TR-04-18 att empiriska mätningar med både representativa material och kemiska betingelser bör utgöra stommen i säkerhetsanalysens hantering av sorption. Användning av konditionala Kd-värden är i de flesta fall det mest praktiskt användbara verktyget och de utgör en lämplig approximation för radionuklidtransportberäkningar i samband med slutförvaring av radioaktivt avfall. Det finns flera argument för det, och ett av de viktigaste är att kemiska betingelser som pH och Eh är relativt konstanta över tid och rum på stora djup för relevanta geologiska medier. Vad gäller dataunderlaget för sorption kan konstateras att det trots omfattande mättingsinsatser kvarstår betydande luckor. Det har visserligen varit möjligt att med hjälp av sorptionsdata för analoga element ta fram ett komplett underlag. SSM bedömer dock att ytterligare insatser krävs under en eventuell fortsättning av SKB:s program för att med bättre precision kunna förutsäga den platspecifika sorptionen. SSM anser att användning av mycket konservativa Kd-värden för att kompensera för avsaknad av dataunderlag för vissa nuklider är mindre lämplig eftersom det medför en bristande insikt kring den relativa betydelsen av de nuklider som bidrar till dos/risk. SSM vill också understryka att etablerandet av en lämplig fördelning av Kd-värden för användning inom probabilistiska beräkningar kräver stor omsorg. En mer explicit hantering av rumslig och tidsmässig variabilitet för de kemiska betingelser som påverkar sorptionen kan visa sig användbar för att förbättra precisionen i beräkningarna eftersom intervallet för de Kd-värden som behöver beaktas då kan minskas.

SSM anser att studien av Ochs och Talerico (SKB TR-04-18) är väl genomtänkt och utgör ett spårbart underlag för val av Kd-värden för bentonitlera samt en lämplig metod för att integrera kvantifieringen av sorption och transport i bentonit. Metoden för konditionering av Kd-värden så att de kan anses bli så representativa för slutförvarsmiljön som möjligt är också lämplig. Osäkerhetshandlingen i faktorform för beskrivning av olika bidrag till den totala osäkerheten är pedagogisk och lättbegriplig men SSM noterar att osäkerheter motiveras delvis med expertbedömningar. En strukturerad och väldokumenterad användning av expertbedömningar kan anses utgöra en försvarbar metod för vissa delar av säkerhetsanalysen, men i detta fall bör det vara möjligt att på ett mer objektivt sätt ytterligare belysa och motivera storleksintervallet för de osäkerheter som behöver beaktas inom säkerhetsanalysen. Vid tidigare granskningar har också observerats att variation och osäkerhet för kemiska betingelser i bufferten så som pH och pCO₂ bidrar på ett betydande sätt till osäkerhet för sorption på bentonitlera (SKI report 2007:17, SKI report 2008:17).

SSM:s externa konsult Bertetti (SSM Technical Note 2014:38) anser att SKB föreslår en försvarbar uppsättning av Kd-värden för sorption av radionuklider på berg som kan förmodas vara konservativa baserat på ett omfattande experimentellt program för bestämningar av Kd-värden (SKB P-07-139). Det finns dock brister i de mätningar som har genomförts t.ex. att redoxbetingelser inte har kunnat kontrolleras på avsett vis. SSM:s externa expert påpekar att den uppenbara konsekvensen av denna brist är att framtagen data för redoxkänsliga nuklider inte har kunnat utnyttjas då mätningarna avseende neptunium och uran tyder på oxiderande betingelser under experimenten. En betydande brist är även att experimenten inte genomfördes med en tillräcklig kontroll av partialtrycket av koldioxid (pCO₂) respektive pH. Detta har betydelse för sorptionen av främst aktinider. Bristerna avseende genomförande av experiment har medfört att användning av generiska litteratordata blivit mera betydande än vad som ursprungligen avsågs. Användning av data för analoga kemiska element har också en framträdande roll vilket bidrar till ytterligare osäkerheter i sorptionsdatabasen. Författaren påpekar dock att dessa brister inte påverkar bestämningen av sorptionsdata för radium som har stort betydelse för dos/risk beräkningar. Andra viktiga observationer som gjorts under denna granskning är att den metod som Crawford (2010) har använt för att uppskatta ytarea tillgänglig för sorption förmodligen är överdrivet konservativ samt att beräkningarna med överföringsfaktorer inte har presenterats på ett tillräckligt tydligt och spårbart sätt.



Kontrollberäkningar antyder förekomst av mindre beräkningsfel och av detta skäl bör ytterligare uppmärksamhet ägnas åt SKB:s kvalitetssäkringsprogram för experiment och bearbetning av data, liksom också åt olika beräkningsformers dokumentation.

SSM anser att SKB:s modelleringsstudie, samt de underliggande experimentella studierna för sorption på bergprover från Forsmark (SKB TR-10-48 och referenser däri), utgör ett lämpligt första steg för beskrivning och karaktärisering av platsspecifik sorption på berg. SSM håller dock med sin externa expert (SSM Technical Note 2014:38) om att ytterligare insatser med förnyade experimentella undersökningar av sorption på platsspecifika bergprover behöver genomföras under kommande steg av SKB:s program för att råda bot på de brister som hittills har identifierats. Exempel på insatser är genomförande av sorptionsexperiment med större kontroll av kemiska betingelser. SSM ser dock inte att något sådant behov föreligger inom området sorption på bentonitlera, förutom åtgärder för att säkerställa osäkerhetshantering samt uppdatering av sorptionsdatabasen med hänsyn till ny tillkommen information. SSM bedömer dock att identifierade brister inte är av den karaktären att de på ett väsentligt sätt undergräver tilltron till det intervall av K_d -värden som SKB föreslår eftersom SKB även har beaktat och inkluderat informationen som finns tillgänglig i den vetenskapliga litteraturen. SKB tar inte hänsyn till sorption av radionuklider på korrosionsprodukter. Detta är konservativt men kan ändå behöva utredas ytterligare.

7.3.4 Distributionskoefficienter (K_d) och överföringsfaktorer (CR) i biosfären

Distributionskoefficienter (K_d) och överföringsfaktorer (CR) är två viktiga typer av parametrar för modellering av radionuklidens transport och fördelning i biosfären liksom för upptag i växter och djur, och därmed för beräkningen av doskonsekvenser. K_d -värdet är ett mått på hur effektivt en given radionuklid adsorberas till den fasta fasen i mark, sediment eller vatten (partiklar i vattnet). Ett högre värde medför att radionukliden transporteras långsammare och har bättre förutsättningar att ackumuleras i mark och sediment. CR-värdena beskriver vilken aktivitetskoncentration som förväntas i en viss slags organism vid en given aktivitetskoncentration i miljön och har därmed en direkt linjär inverkan på dosbidraget förknippat med att människor använder organismen ifråga som föda. I detta avsnitt granskas hur SKB har tagit fram värden för dessa parametrar och om resulterande värden framstår som robusta eller om det finns så stora osäkerheter att SKB:s övergripande slutsatser inom konsekvensanalysen inte kan anses ordentligt underbyggda.

7.3.4.1 Underlag från SKB

SKB redovisar i sin rapport TR-10-07 metoder för framtagning samt resulterande värden för de distributionskoefficienter (K_d) och överföringsfaktorer (CR) i biosfären som använts inom SR-site för att beräkna LDF-värden. Metodiken bygger på att kombinera uppmätta platsspecifika värden (SKB R-10-28) och värden tagna från datasammanställningar i litteraturen. SKB gör detta med hjälp av Bayesianska statistiska metoder genom antagandet att litteratordata och platsspecifika data hör till samma population av data med en viss fördelning. Denna population kan bestå av fler subpopulationer. När parametervärden ska ansättas för den relevanta subpopulationen utifrån litteratordata och platsspecifika data har det stor betydelse om de båda dataseten antas representera samma subpopulation eller inte. Platsspecifika data får mycket större genomslagskraft om litteratordata antas representera en bredare population där den eftersökta subpopulationen (representerad av platsspecifika data) endast utgör en del. Motsatsen är om både litteratordata och platsspecifika data antas representera den eftersökta subpopulationen.



Vid utnyttjandet av dessa metoder har SKBs inriktning varit att lägga så stor vikt som är rimligt möjligt vid platsspecifika data, vilket görs genom att i mesta möjliga utsträckning utgå från att platsspecifika data endast tillhör samma population, men inte nödvändigtvis samma subpopulation som litteraturdata. För de parametrar där det varit för få bakomliggande data i endera den platsspecifika fördelningen eller i den litteraturbaserade fördelningen, eller om den geometriska standardavvikelsen för platsspecifika data är större än för litteraturdata så har dock antagandet varit att data representerar samma subpopulation (SKB TR-10-07, avsnitt 2.3).

Platsspecifika värden avseende Kd har tagits fram av SKB utifrån sanna provpar, dvs. där man utifrån samma prov kunnat mäta i såväl porvatten som i den fasta fasen för jord och sedimentprover, respektive i filtrerat vatten såväl som i suspenderat material i vattenprover. I radionuklidtransportmodellen behövs Kd-värden för de olika regolitlagren (rego_low, rego_mid och rego_up) i de olika ekosystemen (marina, limniska, terrestra). För att inte erhålla för få mätdata för varje sorts Kd-värde har SKB grupperat data så att ett gemensamt Kd-värde tas fram för det djupaste marklagret, rego_low, vilket motsvarar moränlagret, och ett annat Kd-värde som får representera övriga ytligare marklager (rego_mid och rego_up). Samma Kd-värden för regoliten antas för alla typer av ekosystem. SKB motiverar rimligheten i detta med att det i grunden är samma material som förekommer i alla tre ekosystemstyperna, även om tjockleken av de sediment som utgör rego_mid ökar med tiden. Den regolit som finns på plats när havet övergår till sjö är samma som finns på plats i sjön när denna bildas (SKB TR-10-07, avsnitt 3). Platsspecifika data för regoliten förs således till en av två olika grupper; endera till rego_low/morän/"inorganic deposits" (SKB tycks använda olika benämningar i olika sammanhang) eller till rego_low,up/lera,gyttja,torv/"organic deposits". De data som använts för det djupa marklagret, rego_low, har dock sitt ursprung i prover från ytliga mineraljordar, både vad avser platsspecifika data och litteraturdata.

SKB har beräknat CR-värden från prover som inte är sanna provpar, dvs. halten i en organism kan inte direkt kopplas till halten i mark eller vatten utifrån ett enda prov. Istället beräknas först geometriska medelvärdet och standardavvikelsen (GM respektive GSD) för halten över alla organismprov respektive alla mark- eller vattenprov. I huvudsak har då mark/vattenprover använts som kommer från samma lokaler som där organismerna provtagits. Under antagande om log-normalfördelning för båda dessa halter, med uppmätta GM och GSD som distributionsparametrar, beräknar SKB sedan ett CR-värde probabilistiskt genom att göra 1 000 beräkningar baserat på de två distributionerna. Dessa 1 000 värden används sedan till att beräkna GM och GSD för CR-värdet (SKB TR-10-07, avsnitt 2.2).

Även om SKB gjort stora insatser för att ta fram platsspecifika värden är datatillgången låg för ett stort antal ämnen för vissa parametrar. Dessutom rapporteras mätresultaten många gånger vara under detektionsgränsen. I de fall där det finns värden både under och över detektionsgränsen har metoder använts för att inkludera den information som ges av att en viss andel prover har halter som ligger under detektionsgränsen (SKB TR-10-07, avsnitt 2.2). Under antagande att värdena är log-normalfördelade rangordnas alla värden varpå den kumulativa sannolikheten (percentil) för varje värde kan uppskattas. Ur detta härleds sedan geometriskt medelvärde och standardavvikelse för den uppmätta parametern baserat på mätvärde och percentil för de prover som ligger över detektionsgränsen. De prover som är under detektionsgränsen påverkar på detta sätt vilka percentiler som de uppmätta värdena motsvarar och därmed den beräknade fördelningsfunktionen. Med platsspecifika data avser SKB data från såväl Forsmark som Laxemarområdet. Laxemarområdet inkluderas med motiveringen att man då får en bättre täckning över biosfärsförhållanden som kan komma att råda över den stora tidsrymd som behandlas inom SR-site.

De publicerade datasammanställningar som använts för att komplettera platsspecifika mätningar är inte heller helt kompletta, vilket innebär att ytterligare metoder har använts för att ta fram parametervärden när varken mätningar eller litteraturen har kunnat bidra (SKB TR-10-07, avsnitt 2.4-2.5). Avseende upptag till betande djur som älg och rådjur har en kinetisk-allometrisk modell använts för att beräkna en speciell sorts CR-värden som relaterar aktivitetskoncentrationen i kött till aktivitetskoncentrationen i födan (växter och svampar). Den utgår från dagligt intag av föda, andel som tas upp i mag-tarmkanalen, andel som återfinns i djurets mjukdelar, biologisk halveringstid och organismens livslängd, där födointag, biologisk halveringstid och livslängd är beroende av organismens vikt. Avseende andra parametrar där data saknas så har SKB utnyttjat analoger, dvs. antagit parametervärden med ursprung från andra organismtyper eller ekosystem. Den vidare användningen av framtagna Kd- och CR-värden inom SR-site är att de ingår i beräkningen av LDF-värden. LDF-värdena, såsom SKB använder dem för dosberäkning, är deterministiskt beräknade där ingående parametrar, inklusive Kd- och CR-värden, har ansatts värden utifrån en bästa uppskattning BE ("Best Estimate"). Metoden att välja BE är också inriktad mot att ta största rimliga hänsyn till platsspecifika data. I de fall där GM och GSD beräknats från den uppdaterade distributionen med antagandet att platsspecifika data tillhör en relevant subpopulation medan litteraturdata omfattar en bredare population, och platsdata därför får stor inverkan på GM och GSD, så har GM av den uppdaterade distributionen använts som BE. I de fall när litteraturdata och platsspecifika data antagits tillhöra samma subpopulation, och betydelsen av platsspecifika data varit mindre för den uppdaterade distributionens beräknade GM och GSD, har istället GM för platsspecifika data direkt använts som BE, förutsatt att det finns minst 10 ingående värden. Om antalet platsspecifika värden är mindre än 10 så har GM av den uppdaterade distributionen använts som BE.

De uppdaterade distributionerna (GM, och GSD) har använts inom osäkerhetsanalysen för LDF-värden, men variationen i Kd- och CR-värden används inte i probabilistiska beräkningar av dos/risk eftersom det endast är de deterministiskt beräknade LDF-värdena som används i det sammanhanget.

7.3.4.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB har valt en lämplig inriktning i att vid parameterisering av Kd- och CR-värden ta så stor hänsyn som rimligt möjligt till platsspecifika data, samtidigt som generiska data från litteratursammanställningar beaktas som ett komplement. Det är rimligt att den senare typen av data får ett varierande inflytande på parametervärdena beroende på hur mycket platsspecifika data som finns tillgängligt för respektive parameter. Även den statistiska metodiken, bayesiansk uppdatering, som SKB har valt för att väga samman platsspecifika data med data från litteratursammanställningar, bedöms av SSM vara tillämplig. SSM gör samma bedömning för SKB:s beräkningsmetod för att utnyttja mätvärden som är under detektionsgränsen när en fördelningsfunktion för platsspecifika data skattas.

SSM bedömer att den parameterisering som SKB genomfört angående Kd- och CR-värden är tillräckligt underbyggd och robust för att kunna utgöra en rimlig utgångspunkt för beräkningar inom konsekvensanalysen. Alternativa rimliga metoder för att få fram Kd- och CR-värden bedöms inte kunna medföra att de huvudsakliga slutsatserna från konsekvensanalysen ändras på något avgörande sätt.

SSM:s bedömning inom detta område grundas i huvudsak på granskning av SKB:s rapporter (SKB TR-10-07, SKB R-10-28), vilken till viss del genomförts av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:32, 2014:35). För att kunna genomföra granskningen begärde, och fick, SSM även kompletterande information från SKB i form



av utdrag ur SKB:s databas sicada (SKBdoc 1404194, benämning Data Delivery skb#13_02_SSM). Den specifika tillämpningen, dvs. de regler som SKB satt upp för att välja uppdateringsmetod och för att ansätta parametervärden (BE, GM och GSD) utifrån platsspecifika data, litteraturdata och resultat av den statistiska uppdateringsmetoden, innebär för vissa parametrar att mycket stor vikt läggs vid ett fåtal platsspecifika mätningar vid beräkningen av de LDF-värden som sedan används i dosberäkningen. Viktiga frågeställningar inom området har därför varit hur välgrundade platsspecifika data är, ifall en rimlig vikt lagts vid platsspecifika data, och hur framtagna parametervärden förhåller sig till varandra och till andra publicerade parametervärden.

SKB:s val uppdateringsmetod för varje parameter, ”prior from population” eller ”prior from subpopulation”, har stor betydelse för hur stor inverkan platsspecifika data får för den antagna fördelningen och den bästa uppskattning (BE) som används i beräkningen av LDF värden. Detta val baseras inte på någon bedömning av tillgängliga data och vad de representerar, utan är helt beroende av tillgång på data. Detta innebär att SKB riskerar att nedvärdera betydelsen av relevanta litteraturdata, om de kan antas vara representativa för den eftersökta subpopulationen, i jämförelse med betydelsen av relativt få platsspecifika prover (ned till 5 prover). I vissa fall vore det kanske möjligt att hitta litteraturdata som verkligen är representativa för den aktuella specifika situationen (på samma sätt som SKB:s data från Oskarshamn anses utgöra platsspecifika data), och därför använda den uppdateringsmetod som ger en mer balanserad vikt till litteraturdata respektive platsdata. Samtidigt bidrar tydliga regler för hur litteraturdata extraheras och för hur metodvalet sker till en ökad transparens. SSM har tidigare uppmanat SKB att försöka använda platsspecifika data så långt möjligt för att undvika den mycket stora variation som finns i litteraturdata just för att dessa data i många fall omfattar fler subpopulationer av data än den som är relevant för den föreslagna platsen i Forsmark (Xu m.fl., 2008). SSM bedömer utifrån detta att SKB:s regelstyrda val av vilken uppdateringsmetod som används är rimlig.

Vid SSM:s granskning av området, inklusive de granskningar som gjorts av externa experter (SSM Technical Note 2014:32, 2014:35), framkommer det även inom detta område otydligheter och därmed svårigheter att spåra och upprepa beräkningar. Ett exempel är benämningen och definitionen av olika marklager. Det förekommer indelning i ”regolith_low”, ”mid” och ”up”, men även indelning i ”organic” respektive ”inorganic soil” eller ”deposits”. SKB (SKB TR-10-07, sid 24) pekar ut ”rego_low” som morän, medan glacial och postglacial lera hör till ”rego_mid”. På sidorna 101-102 i samma rapport påpekas dock att ”rego_low” har beräknats från morän och glacial lera ”(inorganic soils)”. Sådana oklarheter bidrar sannolikt till skillnaden i antal prov som ligger till grund för specifika Kd-värden som SSM:s externa experter hittar i sin genomgång av tillgängliga platsspecifika data (SSM Technical Note 2014:35, avsnitt 4) jämfört med det antal som SKB rapporterar (SKB TR-10-07). Ett exempel är att SSM:s externa experter inte inkluderat sedimentdata i sin sammanställning av data för ”rego_mid+up”. SSM anser att dessa skillnader påvisar att tydligheten i beskrivningar och databaser behöver öka för att trygga tilliten till SKB:s hantering av platsdata.

När det gäller Kd-värden så innebär den valda metodiken att BE-värden, vilka används i den deterministiska beräkningen av LDF-värden, som i sin tur är den direkta deterministiska länken mellan inflöde av radionuklider till biosfären och doser, till mycket stor utsträckning har grundats på platsspecifika data om sådana alls finns tillgängliga. Endera genom att uppdateringsmetoden ”prior from population” har använts eller annars genom att GM för de platspecifika data har använts direkt. För ”Kd_regomid” och ”Kd_regoup” är BE-värdet mycket nära det platsspecifika geometriska medelvärdet för samtliga de radionuklider som har data från platsundersökningarna (19 av 29 radionuklider). Som mest skiljer sig dessa värden åt med endast 15 procent till följd av att



viss hänsyn också tagits till litteraturdata. För ”Kd_low” har litteraturdata ett större inflytande på valde BE-värden, där BE i något fall skiljer sig mer än en storleksordning från det platsspecifika geometriska medelvärdet och istället är relativt likt det geometriska medelvärdet taget från litteraturuppgifter. Detta beroende på att den platsspecifika uppskattningen av parametervärdet ibland grundar sig på ett mycket litet antal prover.

Kd-värdena uppvisar en mycket stor variation. Detta gäller inte minst litteraturdata som omfattar egenskaper hos material från hela världen, men det gäller också data från platsundersökningar som de som SKB genomfört inför SR-site. Det är därför mycket svårt att ansätta ett deterministiskt värde och probabilistisk fördelning som odiskutabelt kan anses vara den mest rimliga. Som ett underlag till en bedömning av rimligheten i SKB:s ansatta värden har SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:32) dels jämfört SKB:s Kd-värden med data från IAEA (2010) och dels jämfört SKB:s olika slags Kd-värden (nedre marklager, övre marklager samt suspenderat material i söt- och brackvatten) med varandra. Dessa senare jämförelser, i form av olika kvoter, t.ex. Kd suspenderat/Kd sediment, vilka jämförs med förväntade kvoter (i detta fall förväntas generellt en kvot på mellan 1-10), är ett sätt att hitta parametervärden som sticker ut på något sätt och därför kan behövas utvärderas ytterligare.

Vid SSM:s externa experters utvärdering framkommer att SKB:s Kd-värden för markmaterial generellt är lika med eller högre än motsvarande globala data från IAEA (undantaget selen). Samtidigt är variationen uttryckt som GSD i många fall lägre än i globala dataset, vilket är en förväntad följd av, men även anledning till, att SKB tagit stor hänsyn till platsspecifika data. I kombination med vissa oväntade kvoter mellan olika slags Kd-värden leder detta experterna till att peka ut ett antal parametervärden som kan anses tveksamma. En bidragande anledning till tveksam parameterisering enligt de utvärderingsmetoder som SSM:s externa experter har använt är SKB:s ansats att gruppera Kd-värden så att ett och samma parametervärde används för ”rego_mid” och ”rego_up” i såväl marin, limnisk och terrester miljö. Detta innebär t.ex. att samma Kd-värde används för en dränerad torvjord som ett marint sediment. Detta angreppssätt motiveras av SKB genom att man då får ett tillräckligt stort datamaterial från platsundersökningarna för att kunna ansätta parametervärden baserat på platsdata vilket annars inte skulle ha varit fallet.

För att bedöma om de tveksamheter som experterna uppmärksammat innebär betydande osäkerheter kring vilka konsekvenser som utsläpp av radionuklider till biosfären kan leda till så har alternativa LDF-värden beräknats (SSM2011-2306-32). Detta gäller för de nuklider som konsulterna uppmärksammat och som även ger ett dosbidrag i SKB:s dosberäkning av det centrala korrosionsfallet (SKB TR-10-50, figur 4.2). I denna analys har LDF-värden beräknats då SKB:s ansatta parametervärden ersatts med 5 respektive 95 percentilen av den fördelning som SKB erhållit från litteraturen (SKB TR-10-07, tabell D-1 och D-2) för ”Kd_regoLow” (Se-79) eller ”Kd_regoMid,Up” (Cs-135, I-129, Pu-239+242, Nb-94 och Ra-226). Vid denna utvärdering påverkades LDF-värdena (och därmed doserna från motsvarande nuklid) endast marginellt. Som mest ökade LDF-värdena med 20 procent (Ra-226 och Pu-239+242). I flera fall ligger SKB:s ansatta parametervärde utanför det intervall mellan 5 och 95 percentilen i den fördelning som tagits från litteraturdata, men i de utvärderade fallen leder SKB:s parametervärden till högre LDF jämfört med om parametervärden från litteraturen använts (Se-79 och I-129).

Angående CR-värden konstaterar SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:32) att de ansatta BE-värdena ofta leder till en mindre konservativ bedömning än om litteraturdata använts direkt. Strävan att största rimliga utsträckning använda platsspecifika data är i linje med SSM:s tidigare bedömningar (Xu m.fl., 2008) och litteraturdata är många gånger baserat på få data, vilket gör att SKB:s parametervärden generellt bedöms vara rimliga vid beaktande av tillgängliga platsspecifika data och globala litteraturdata.

Det går att peka ut ett antal fall där SKB:s ansatta värden sannolikt snarare underskattar än överskattar överföringen till organismer och därmed även dosen till människa. Till exempel när CR-värden för grön vegetation också används för svampar även för sådana ämnen, såsom vissa tungmetallar, som är kända för att tas upp i hög grad av svampar. För Cd tycks det finnas platsspecifika data för CR för svamp (SKB TR-10-07, tabell D-6) vilka också antyder en betydligt högre (20 ggr) överföring än det värde för grön vegetation som istället använts (SKB TR-10-07, tabell 4.6). Ett annat exempel är phytoplankton i sötvatten där SKB själva anger att de använda värdena, (platsspecifika värden för makrofyter) sannolikt underskattar upptaget eftersom de genomgående är lägre än tillgängliga litteraturdata för phytoplankton. I en konsekvensanalys av detta slag skulle det varit bättre med ett mer konservativt angreppssätt än att sätta parametervärden vars rimlighet ifrågasätts direkt i den följande diskussionen.

SKB har genomfört en känslighetsanalys avseende vilka parametrar som har störst betydelse för variationen i LDF-värden vid en probabilistisk beräkning av LDF (SKB TR-10-06, kapitel 5.3). En sådan analys ger information om hur en given parameter, inklusive dess osäkerhet, bidrar till osäkerheten i LDF. Om den antagna fördelningen för ett parametervärde är mycket smal så kommer bidraget till osäkerheten bli litet även om betydelsen av parametervärdet är av stor vikt. Betydelsen av ett enskilt CR-värde för ett ämne beror på hur dosen bestäms av olika exponeringsvägar. Den största betydelsen uppstår i fall LDF helt domineras av en enda exponeringsväg med endast ett CR-värde. Då kommer LDF variera helt linjärt med detta CR-värde. SKB:s nämnda känslighetsanalys ger viss information om vilka CR-värden som har störst relevans, även om viktiga CR-värden skulle kunna missas om den ansatta fördelningen är orimligt smal. Figur 5.41-45 samt figur C.1-8 i SKB TR-10-06 indikerar att följande CR-värden har störst betydelse (första ordningens känslighetsindex $\geq 5\%$) för dosen till människa som den beräknats inom SR-Site; $cR_{soilToVegetab}[Pb210, Ra226, I129, Se79, Cs135]$, $cR_{soilToTuber}[I129]$, $cR_{watToFish_Lake}[Np237]$ och $Ter_cR_pp[Cl-36]$. Av dessa parametervärden är alla tagna från litteraturen utom $Ter_cR_pp[Cl-36]$ som är baserat på platsspecifika data ($n=19$) vad gäller BE och bayesiansk uppdatering vad gäller den probabilistiska fördelningen (SKB TR-10-07, tabell 4.2, 4.4, 4.5, 5.6). Litteraturdata bygger i de flesta fall på ett relativt stort antal prover ($n>30$) med undantag för $cR_{soilToTuber}[I129]$ ($n=1$), och $cR_{watToFish_Lake}[Np237]$ ($n<2$). När det gäller parametervärdet för I-129 så är värdet högre (mer konservativt) än motsvarande värden för andra typer av grödor i samma datasammanställning (IAEA, 2010) men när det gäller Np-237 har SSM inte identifierat några andra publicerade data att jämföra med. För att inte underskatta den möjliga variation för dessa två parametervärden har SKB ansatt en hög GSD vid de probabilistiska beräkningar av LDF som gjort inom osäkerhets- och känslighetsanalysen (SKB TR-10-06, kapitel 5.3).

7.3.5 Matrisdiffusion och andra icke-flödesberoende transportparametrar
Icke-flödesrelaterade transportparametrar avser i första hand domäner i berggrunden med mycket låg hydraulisk konduktivitet så att grundvattenflöde blir försumbart. Den enda betydelsefulla transportprocessen under sådana betingelser är diffusion som är möjlig även i mycket tätt berg så länge ett sammanbundet system av porer finns tillgängligt. Diffusion i intakt berg sker genom mycket små sprickor och utrymmen vid korngränser som har bildats genom kemisk och mekanisk påverkan. Tätt opåverkat berg utan vattenförande sprickor benämns bergmatrisen och processen benämns matrisdiffusion. I tätt berg utgör matrisvatten en betydande andel i förhållande till rörligt grundvatten som finns i bergets spricksystem. De parametrar som karakteriserar matrisdiffusion utgörs av porositet, diffusivitet, den relaterade formationsfaktorn och i tillämpliga fall maximalt diffusionsdjup.



Matrisdiffusion har en säkerhetsbetydelse ur perspektivet radionuklidtransport då radionuklider som transporteras med strömmande grundvatten tenderar att tränga in och kvarhållas i bergsmatrisen. En annan betydelsefull process är att matrisdiffusion medför en viss tröghet vad gäller förändringar i grundvattnets salthalt eftersom saltare grundvatten antingen kan tränga in i bergsmatrisen eller diffundera ut för att jämna ut koncentrationsskillnader gentemot aktuell salthalt i det omgivande sprickvattnet. Ett tredje sammanhang där matrisdiffusion har tillämpats i SKB:s säkerhetsanalys är analysen av en inverkan av inflöde av syresatta glaciala smältvatten. Genom matrisdiffusion blir större ytor tillgängliga för mineralreaktioner som förbrukar syre.

7.3.5.1 Underlag från SKB

SKB har i samband med platsundersökningarna vid Forsmark genomfört porositetmätningar på utvalda borrhålskärnor från berggrunden. Två mätmetoder har använts, vattenmättnadsmetoden och ¹⁴C-PMMA impregneringstekniken (SKB P-07-139). De intakta bergproverna från Forsmark har en mycket låg porositet ca 0,2 %. Detta värde representerar det stora flertalet prover som är att betrakta som ”opåverkat berg”, men ett antal prover innehöll omvandlat berg nära sprickzoner som generellt har högre porositet. Dessutom förekommer exempel på episyenit, vilket är en mycket porös granit, som SKB dock ansåg vara så sällsynt att den inte har någon betydande påverkan på säkerhetsanalysens resultat. Enligt SKB är den största osäkerheten vid porositetmätningar att proverna har stressavlastats och därmed kan ha något högre porositet jämfört med in-situ-betingelser. Stressavlastningen kan också öppna upp transportvägar som inte finns under in-situ-betingelser. Experiment för att studera hur stor andel av porositeten som består av skapade mikrosprickor antyder dock att effekten är relativt liten. Genom hydrostatisk kompression av prover kunde effekten kvantifieras (SKB P-07-93, 2007). SKB föreslår en korrektionsfaktor på 0,8 för att ta hänsyn till stressavlastningens effekt på porositeten.

En betydelsefull parameter för att ta hänsyn till matrisdiffusion utgörs av effektiv diffusivitet (D_e), som kan beskrivas som produkten av diffusivitet för ett upplöst ämne i en ren vattenfas (D_w) samt formationsfaktorn (F_f). Diffusiviteten för joner i den fria vattenfasen (D_w) är som ett generellt riktvärde 10^{-9} m²/s, men för att få fram ett mer exakt värde behövs vissa korrekationer för t.ex. temperatur, salthalt, och effekter av att de lösta ämnena har olika förekomstformer. SKB anser att det inte är praktiskt genomförbart att korrigera för dessa faktorer och avsätter därför ett intervall på en halv storleksordning för att ta hänsyn till variabilitet för D_w . Formationsfaktorn beror enbart på den fasta fasens egenskaper och geometri. Den uttrycker i vilken omfattning diffusionen begränsas p.g.a. det minskade utrymmet för diffusion. Formationsfaktorn uttrycker främst porositeten men även porlingrihet och porväggarnas påverkan på diffusion. SKB anser dock att för de förhållandevis låga porositetsvärden som är tillämpliga för opåverkat berg finns inget enkelt samband mellan porositet och formationsfaktorn (SKB R-08-98, 2008).

SKB använder två huvudskaliga mätmetoder, dels mäts effektiv diffusivitet direkt via genomdiffusionsförsök i laboratoriet med stressavlastade bergprover, dels mäts formationsfaktorn in-situ med hjälp av elektriska resistivitetsmätningar (SKB P-07-138). Genomdiffusionsförsök kan beskrivas som den mest direkta mätmetoden av matrisdiffusion och utförs genom att mäta passagen av tritierat vatten (HTO) genom en bergskiva av en viss tjocklek. Resultat av sådana mätningar ger ett värde på formationsfaktorn kring 10^{-4} med ganska små skillnader mellan bergartstyper (SKB R-08-98, 2008). Användbarheten av elektriska resistivitetsmätningar vilar på analogin mellan elektromobilitet och diffusion. Genom mätning av elektrisk resistivitet är det möjligt att med hjälp av kännedom om elektrisk konduktivitet få ett mått på formationsfaktorn. SKB påpekar dock att ytledning måste avräknas eftersom en del av ledningsförmågan kan hänföras till det elektriska dubbellagret. Formationsfaktorer från elektriska



resistivitmätningar på bergprover i laboratorieskala ger i regel en överrensstämmelse med formationsfaktorer från genomdiffusionsförsök inom en faktor 2 (SKB TR-10-52, avsnitt 6.8.7).

SKB:s insatser kopplade till matrisdiffusion under platsundersökningarna vid Forsmark innefattar elektriska resistivitmätningar i fältskalan i utvalda borrhål. Den viktigaste fördelen med dessa mätningar är att de har utförts på berg som inte har blivit stressavlastat. En annan bidragande orsak till att laborietester inte fullt representerar fältförhållanden är att själva provtagningen kan ha påverkat diffusionsegenskaperna. Övriga osäkerheter är dock större än för laboriemätningar beroende på svårare mätförhållanden, bland annat är inverkan av ytdiffusion förmodligen större än för laboriemätningar och kännedom krävs kring bergmatrisens porvattensalthalt vilken inte alltid finns tillgänglig. Porvattensalthalt har betydelse eftersom den påverkar vattnets ledningsförmåga. Eftersom resistivitet påverkas av närvaron av vattenförande sprickor skiljer SKB på formationsfaktorer för opåverkat berg och uppsprucket berg. SKB argumenterar för att opåverkat berg är mest konservativt i radionuklidtransportsammanhang eftersom indiffusion är mera begränsad för berg med lägre formationsfaktorer. SKB:s fältmätningprogram ger formationsfaktorer på mellan 10^{-4} och 10^{-5} . Detta motsvarar effektiv diffusivitet på mellan 10^{-13} och 10^{-14} m²/s.

För att kunna jämföra de båda metoderna genomdiffusionsförsök i laboratorieskala och resistivitmätningar i fältskalan behöver genomdiffusionsförsök korrigeras för stressavlastningen vid provtagningen. SKB genomför denna korrektion genom att multiplicera värden från genomdiffusionsförsök med kvoten mellan uppmätt elektrisk resistivitet i fältskala dividerat med elektrisk resistivitet i laboratorieskala. De båda metoderna ger resultat som skiljer sig åt med ca en tiopotens. Detta innebär att även resultaten från genomdiffusionsförsök korrigerad för stressavlastning motsvarar effektiv diffusivitet på mellan 10^{-13} och 10^{-14} m²/s.

SKB anger att huvudsakliga konceptuella osäkerheter kopplade till effektiv diffusivitet för opåverkat berg är inverkan av ytleddning vid resistivitmätningar, analogin mellan diffusion och elektromigration, specieringeffekter, temperatur och salthalt. Baserat på expertbedömningar anses osäkerheterna inrymmas inom en tiopotens. För risk/dosberäkningar har en sannolikhetsfunktion definierats baserad på lognormalfördelningen med väntevärdet $2,1 \times 10^{-14}$ och standardavvikelsen $8,4 \times 10^{-15}$ m²/s. Ett värde för den effektiva diffusiviteten på 10^{-14} m²/s används också vid beräkningar av salthaltsutvecklingen (SKB R-09-20). Dessa resultat baseras i huvudsak på uppmätt elektrisk resistivitet i fältskala med konfirmerande resultat från genomdiffusionsförsök. SKB har funnit att rumslig variabilitet är begränsad och dessutom avser risk/dosberäkningar en hel integrerad strömbana så enligt SKB:s bedömning bör spridningsmålet hänföras konceptuella osäkerheter snarare än rumslig variabilitet. I ett verkligt fall behöver transportparametrarna integreras längs en strömbana från förvaret till biosfären (eller från ytan till förvaret i samband med inträngning av utspädda glaciala smältvatten).

En ytterligare typ av försök är indiffusionsförsök i fält. SKB har genomfört denna typ av försök vid Äspö men resultaten var inte färdiga i samband med framtagningen av ansökan (LTDE-SD försöket). Det enda resultat som fanns framme var från Stripaförsöken i slutet av 80-talet (Birgersson och Neretnieks, 1990). Resultaten avseende effektiv diffusivitet var något högre och spridningen var större i jämförelse med SKB:s senare studier.

Anjonexklusion innebär att området närmast negativt laddade mineralytor inte är åtkomligt för anjoner pga. repulsion i närheten av det elektriska dubbellagret vid mineralytan. Det innebär att matrisdiffusion bara är tillgänglig i en mera begränsad tvärsnittsarea i jämförelse med diffusion av oladdade molekyler eller positivt laddade



joner. SKB har studerat detta fenomen genom jämförelser mellan oladdade och negativt laddade spårämnen både i laboratoriemiljö och i fältskala, och kommit fram till att effekten varierar mellan ett tiotal procent och ungefär en halv storleksordning. En anledning varför effekten är begränsad för Forsmarkberg är den förhållandevis höga salthalten som ökar vattnets ledningsförmåga och därmed minskar utbredningen av det elektriska dubbellagret. SKB antar därför konservativt att matrisdiffusivitet för anjoner är lognormalfördelat med väntevärdet $6 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$, vilket är en faktor 3 lägre än motsvarande matrisdiffusivitet för oladdade eller positivt laddade radionuklider.

En fråga som har varit föremål för vetenskaplig debatt är i vilken utsträckning porsystemet är förbundet på större avstånd (SSM Technical Note 2012:44). Detta påverkar penetrationsdjupet för matrisdiffusion. Om detta avstånd skulle vara starkt begränsad skulle matrisdiffusion enbart kunna äga rum i berget närmast i anslutning till vattenförande sprickor. SKB bedömer dock att berggrundens porsystem i Forsmark är förbundet i sådan utsträckning att frågan saknar praktiskt betydelse. SKB anger som grund för denna bedömning att matrisdiffusion över avstånd uppåt 0,5 m har påvisats under spårämnesförsök, att elektrisk ström kan visas passera berg åtminstone i m skalan, samt att utbyte och migration av lösta kemiska ämnen i opåverkat berg över avstånd på 10 m kunnat påvisas genom studier av matrisvattensammansättning (SKB TR-10-52, avsnitt 6.8.7).

I linje med resultat från den inledande granskningfasen (Technical Note 2012:44) begärde SSM kompletterande information från SKB (SM2011-2426-110) kring tre punkter:

- Underlag som visar att bergets elektriska ledningsförmåga inte på ett väsentligt sätt kan störa de fältskaliga konduktivitetmätningar som ligger till grund för parameterisering av matrisdiffusion.
- Analys av betydelsen av rimlig sannolik variabilitet av bergets diffusivitet och dess inverkan på radionuklidtransport.
- Analys av hur mineralomvandlingar och sprickfyllnadsmineral i berget påverkar matrisdiffusion och retardation av radionuklider.

SKB har inkommit med svar på denna begäran om kompletteringar (SKBdoc 1396957). Svaren med koppling till matrisdiffusion har baserats på två rapporter varav den ena har fokuserats på de osäkerheterna/artefakterna som är kopplade till de elektriska mätmetoderna (Löfgren 2014) och den andra på kompletterande beräkningsfall och känslighetsanalyser kring matrisdiffusion (Löfgren och Crawford, 2014).

SKB har som ett svar på SSM:s begäran identifierat och ytterligare analyserat 4 faktorer som kan påverka mätningarna av elektrisk ledningsförmåga för att kvantifiera formationsfaktorn och matrisdiffusion:

- elektrisk ledningsförmåga av torrt berg över längre sträckor
- elektrolytisk ledningsförmåga i förutom bergets porer längs negativt laddade mineral (ytledning)
- dielektrisk ledning som ett resultat av användning av växelström vid mätning av vattenmättat bergs ledningsförmåga
- effekter av elektriskt ledande mineral som kan blockera diffusionsvägar men kortsluta elektrisk ledning mellan angränsade porutrymmen.

Beträffande elektrisk ledningsförmåga för torrt berg över längre sträckor har SKB undersökt frågan dels genom litteraturstudier kring elektrisk resistivitet för olika typer av mineral, dels genom mätning av elektrisk resistivitet för torra bergprover från Forsmark och Oskarshamn. SKB konstaterar på basis av resultaten att det torra bergets resistivitet är många tiopotenser högre än vad som hade krävts för att ledningsförmågan i cm-skala skulle kunna störa tolkningen av matrisdiffusionsmätningar med elektriska metoder.



En mer komplex fråga avser elektrolytisk ledningsförmåga längs negativt laddade mineral förutom i bergets porer. Ytledning av joner kan visserligen i vissa fall förstärka matrisdiffusion även i det verkliga fallet men eftersom processen inte fungerar för alla kationer och definitivt inte för anjoner bör processen konservativt bortses ifrån inom säkerhetsanalysen. Enligt SKB är effekten i vissa fall betydelsefull och medför en avvikelser från ett förmodat linjärt förhållande mellan resistivitet för ett mättat bergprov och resistiviteten för enbart motsvarande porvatten. Ytledning påverkas av det elektriska dubbellagrets utbredning och experimentell information har erhållits genom att studera resistivitet för mättade bergprover som funktion av porvattensammansättningar med olika salthalt. SKB:s slutsats från sådana experiment är att effekten är betydande för mycket utspädda grundvatten och har därefter bestämt att endast mätningar med porvatten/grundvatten med en resistivitet lägre än 2 ohm per meter ska användas. SKB:s data är av otillräcklig omfattning för att kunna uttala sig om hur olika mineralsammansättningar påverkar omfattningen av ytledning men Forsmarksberget har liten andel lermineral och en ungefärligt konstant innehåll av biotit, vilka båda är typer av mineral som gynnar ytledning. Sammanfattningsvis kvarstår bedömningen att det finns osäkerheter kring förståelsen av ytledning av joner, men osäkerheten knappast överstiger en faktor 2 vilket beaktas i säkerhetsanalysen.

Enligt SKB är polarisation av dielektriska material som en följd av att växelström har använts en tänkbar felkälla. Effekten har studerats genom att mäta resistivitet för mättade bergprover med likström samt med växelström i olika frekvensintervall upp till 2000 Hz. Användning av växelström leder till lägre resistivitet och därmed högre ledningsförmåga vilket i sin tur skulle kunna innebära en överskattning av bergets formationsfaktor. SKB anför dock att effekten redan inkluderats i korrektionen för ytledning samt att osäkerheten ändå inryms inom en faktor 2.

Den sista felkällan som SKB har adresserat är frågan om kopplad elektronisk och elektrolytisk ledning vid ledande mineral korn skulle kunna påverka tolkningen av data från SKB:s mätningar. Den grundläggande idén är att elektriskt ledande mineral korn skulle kunna blockera transportvägar i bergets porutrymmen men ändå bidra till ledningsförmågan via kopplad elektronisk och elektrolytisk ledning. Exempel på mineral av denna kategori är pyrit och magnetit. SKB beskriver i detta sammanhang ytterligare en typ av mätningar av matrisdiffusion som baseras på att migration av joner påskyndas i ett elektriskt fält s.k. elektromigration. Fördelen med denna typ av mätning är att migration av joner kan påvisas för längre sträckor i dm-skalan utan att försökstiden för den skull blir orimligt lång. SKB har jämfört formationsfaktorer som tagits fram med de olika metoderna genomdiffusion, elektrisk ledningsförmåga och elektromigration för olika bergprover och resultaten pekar generellt på små skillnader mellan de olika mätmetoderna. SKB argumenterar vidare att kopplad elektronisk och elektrolytisk ledning knappast skulle kunna vara effektiv över längre avstånd eftersom det skulle kräva att elektrokemiska reaktioner äger rum vid samtliga övergångar mellan de båda ledningsformerna. SKB:s slutsats är att denna felkälla kan ha viss betydelse men de experimentella resultaten pekar på att osäkerheten ryms inom en faktor 2.

Sammanfattningsvis, påpekar SKB att även om det finns vissa tänkbara felkällor kopplade till de elektriska mätmetoderna är det huvudsakliga resultatet av dess användning att påvisa en mindre omfattande matrisdiffusion i förhållande till genomdiffusionsförsök. Beträffande felkällorna anses de vara väl utredda och av begränsad omfattning, med reservationen att den sista felkällan kopplad elektronisk och elektrolytisk ledning vid ledande mineral korn är den svåraste att gränssätta. SKB föreslår att fortsätta fältförsök på slutförvarsdjup bl.a. med likspänning och elektromigration för att verifiera transportvägar över längre avstånd kan göras när tunnlar ner till förvarsdjup finns tillgängliga.



SKB har som ett svar på SSM:s begäran också genomfört kompletterande modelleringsstudier med MARFA koden för att adressera frågeställningar kopplade till förenklade antaganden kopplade till matrisdiffusion inom SR-Site (Löfgren och Crawford, 2014):

- Betydelsen av en realistisk representation av bergmatrisen med hänsyn tagen till närvaron av sprickfyllnadsmineral och en zon av omvandlat berg ovan det opåverkade berget nära vattenförande sprickor, vilket kan jämföras med SR-Site modellen med enbart opåverkat berg.
- Inverkan av variabilitet på bergmatrisens effektiva diffusivitet.

SKB har undersökt ett fall där matrisdiffusionen begränsas samt ett fall där diffusivitet för bergmatrisen (D_e) har minskats med en tiopotens. Beräkningarna är förenklade i det avseendet att endast ett mindre urval av representativa nuklider har medtagits och endast tre särskilt betydelsefulla transportvägar genom berget har beaktats.

SKB:s alternativa konceptualisering av bergmatrisen baseras delvis på resultat från platsundersökningar med beaktande av närvaron av lermineral, klorit och kalcit men även fall som representerar bara en modest omvandling av zonen nära vattenförande sprickor eftersom även relativt ”rena” sprickor också har identifierats. För parameteriseringen av sprickfyllnadsmineral och omvandlat berg finns endast porositetmätningar tillgängliga och därför har Archies lag används för att få fram justerade mått på effektiv diffusivitet. Korrektion för anjonexklusion har gjorts på samma sätt som i basfallet med undantag för kalcit medan inga justeringar av sorption har införts.

Resultaten från det nya modelleringsarbetet visar överlag att hänsyn tagen till en lagrad struktur i anslutning till vattenförande sprickor medför en försening och modest reduktion av dos från nukliderna I-129, Se-79, Ni-59 och Ra-226 i jämförelse med basfallet i SR-Site. Mineral kalcit behöver dock särskilt uppmärksammas eftersom det både kan bidra till en porös och i andra fall närmast icke-permeabel beläggning på sprickornas väggar. Ett särskilt beräkningsfall har tagits fram för att illustrera betydelsen av en kalcitbeläggning som begränsar matrisdiffusion. Detta fall visar sig dock ha en obetydlig påverkan eftersom endast en liten andel av sprickväggarna hos Forsmarkberg har en beläggning av kalcit.

SSM:s externa konsult diskuterar fallet med ett begränsat penetrationsdjup i sin granskning (SSM Technical Note 2012:44) och av detta skäl har SKB tagit med ett fall där man hypotetiskt antar att det maximala djupet är 10 cm. Valet av detta avstånd motiveras med att det motsvarar det maximala djupet för vilka verifierande in-situ experiment har genomförts. Resultatet av detta beräkningsfall visar att en begränsning av penetrationsdjupet har en liten påverkan på beräknad dos. Detta innebär sannolikt att radionuklidkoncentrationer inne i bergmatrisen i praktiken inte förväntas nå så pass hög koncentration att de får en stor påverkan på inträngningen av radionuklider vid sprickplanets yta. I ett annat beräkningsfall undersöker SKB effekten av att effektiv diffusivitet för bergmatrisen minskas med en tiopotens, vilket motiveras med SSM:s begäran (SM2011-2426-110) att ytterligare undersöka effekten av inverkan av variabilitet på bergmatrisens effektiva diffusivitet. Denna justering har en större effekt på beräknad dos med både ett annars obetydligt dosmaximum från Ni-59 och ett långsiktigt högre dosbidrag från Ra-226.

7.3.5.2 SSM:s bedömning

Enligt SSM:s bedömning ger information från olika skalor i tid och rum samt från olika mätmetoder sammantaget en robust uppskattning av den ungefärliga omfattningen av matrisdiffusion i fältskalan. SSM bedömer vidare att SKB:s kvantifiering av effektiv matrisdiffusivitet är måttligt konservativ i förhållande till flertalet mätningar och bör därför utgöra ett försvarbart parameterintervall i sammanhanget risk/dosberäkningar.



SSM konstaterar att forskning kring matrisdiffusion i slutförvarssammanhang är väl etablerad sedan länge eftersom SKB undersökt frågan sedan Stripatiden på 1980-talet. Forskning både i fältskala och i laboratorieskala har pågått i större eller mindre omfattning sedan dess. I samband med granskningen av SR-Can som i huvudsak har baserats på en liknande konceptualisering av matrisdiffusion som i SR-Site, konstaterades det dock att det fortfarande finns betydande osäkerheter kring användning av laboratoriedata för säkerhetsanalysberäkningar och att de elektriska mätmetoderna i fältskalan behöver vidareutvecklas för att bli allmänt accepterade som mätmetod användbar för diffusion i granitiskt berg (SKI rapport 2008:17). SSM:s tidigare INSITE grupp ansåg att SKB på ett lämpligt sätt har undersökt transportparametrar för bergmatrisen men att frågor kring bergets variabilitet och betydelsen av komplexa mineralstrukturer i vattenförande sprickor behöver ägnas fortsatt uppmärksamhet (SSM Rapport 2010:30).

I samband med den inledande granskningsfasen lät SSM göra en extern expertgranskning av SKB:s hantering av matrisdiffusion i SR-Site (SSM Technical Note 2012:44). Studien är i huvudsak positiv till SKB:s arbeten inom området men viss kompletterande information efterfrågas. Författaren ansåg att det finns frågetecken kring de elektriska mätmetoderna eftersom berget i sig och inte bara det konnekterade porutrymmet kan bidra till uppmätt ledningsförmåga. Detta skulle kunna innebära att ledningsförmåga inte ger tillförlitlig information kring matrisdiffusion. Betydelsen av mineral med hög ledningsförmåga behöver därför undersökas. Förutom frågor kring de elektriska mätmetoderna diskuteras betydelsen av direkta diffusionsmätningar på prover med diffusionsavstånd på tiotals decimeter samt klargöranden kring SKB:s användning av information från karakterisering av porvattensammansättningar. Ytterligare frågeställningar som har adresserats i denna granskning är variabilitet med avseende på diffusiv transport i bergmatrisen t.ex. beroende på omvandlingar av berget nära vattenförande sprickor samt förekomst av sprickfyllnadsmineral. Författaren påpekade i synnerhet att frågan kring huruvida det finns ett begränsat penetrationsdjup för matrisdiffusion är av stor betydelse. Eftersom SKB i sina beräkningar har utgått från ett obegränsat penetrationsdjup ansåg författaren att klargörande information erfordras. Slutligen påpekas i denna granskning att SKB:s spridningsmått för matrisdiffusivitet verkar vara i lägsta laget med tanke på att flera osäkerhetsfaktorer i storleksordningen en faktor 2 har påvisats av SKB. I granskningsrapporten efterfrågas därför en analys och utförligare motivering av osäkerhetsintervallet från SKB. De kompletteringar som SSM därefter begärde från SKB, samt de svar som SKB lämnade, beskrivs ovan under SKB:s underlag.

SSM anser att SKB i och med kompletteringarna på ett godtagbart sätt har adresserat de frågeställningar som diskuterats inom ramen för tidigare säkerhetsanalyser liksom de frågeställningar som framförts av SSM:s externa expert (SSM Technical Note 2012:44). SSM konstaterar att resultat från mätmetoder för att kvantifiera matrisdiffusion, både direkta mätningar med spårämnen och indirekta elektriska metoder, behöver tolkas med försiktighet. Betydelsen av identifierade osäkerheter måste dock anses vara undersökta i en rimlig omfattning.

Enligt SSM:s bedömning ger information från olika skalor i tid och rum samt från olika mätmetoder sammantaget en robust uppskattning av den ungefärliga omfattningen av matrisdiffusion i fältskalan. Det bör dock noteras att de båda metoderna genomdiffusion och elektrisk resistivitetsmätning i fält inte är helt oberoende eftersom resultat från elektriska resistivitetsmätningar används föra att korrigera genomdiffusionsmätningar för att bergspänningarna relaxerats i samband med provtagningen. Det senaste inslaget i mätningarna är karakterisering av porvattenkemisk sammansättning från olika delar av berggrunden (SKB R-08-105). Denna information ger ingen direkt kvantitativ information



om matrisdiffusion men är en oberoende källa till förståelse för matrisdiffusionens effekter på grundvattenkemisk sammansättning över långa tidsskalor. I dessa studier observeras vissa mönster och variationer i porvattnets sammansättning som funktion av djup och avstånd till vattenförande sprickor, vilket knappast skulle ha varit fallet om bergmatrisen hade varit impermeabel.

Ett angeläget område att ytterligare undersöka är betydelsen av variabilitet i porvattenkemisk sammansättning, inte bara för förståelsen av matrisdiffusion men även för den långsiktiga utvecklingen av grundvattnets salthalt. Känslighetsanalyser för hur salthaltsutvecklingen påverkas av osäkerheter kring matrisdiffusion kan behöva genomföras. SSM anser därför att osäkerheterna kring matrisdiffusionens inverkan på salthaltsutveckling kan behöva vidareutvecklas eftersom det inte är uppenbart att en lägre matrisdiffusivitet är ett konservativt parameterintervall i detta sammanhang. Ytterligare fältmätningar och experiment förväntas bli nödvändiga i samband med en eventuell konstruktionsfas för ett slutförvar.

Enligt SSM:s bedömning är SKB:s kvantifiering av effektiv matrisdiffusivitet måttligt konservativ i förhållande till flertalet mätningar och bör därför utgöra ett försvarbart parameterintervall i sammanhanget risk/dosberäkningar. SSM anser även att SKB på ett acceptabelt sätt har visat att ett begränsat penetrationsdjup i bergmatrisen (10 cm) inte har någon avgörande påverkan på risk/dosberäkningar. SSM anser också det är rimligt att omvandlingar och utfällningar orsakade av långsamma kemiska reaktioner i vattenförande sprickor generellt förstärker snarare än försvagar matrisdiffusionseffekter i enlighet med SKB:s senast framtagna beräkningar. Ett möjligt undantag som påpekats av SKB utgörs av beläggningar av tät kalcit på sprickväggarnas ytor och det finns därför anledning att undersöka detta fall närmare. SSM anser att SKB:s nya beräkningar utnyttjar platsspecifik information i högre grad än beräkningarna som genomfördes inom ramen för SR-Site, även om det saknas tydliga beräkningsfall som belyser hur graden av variabilitet påverkar matrisdiffusion.

7.4 Beräkningsresultat

I detta kapitel granskas de beräkningsresultat som SKB kommit fram till (SKB TR-11-01, TR-10-50, TR-10-08, TR-13-23) genom att använda sig av de metoder, modeller och indata som diskuterats i kapitel 7.1–7.3 ovan. Dels granskas de beräkningar som gjorts för olika scenarier (avsnitt 7.4.1–7.4.2), inklusive ett kompletterande beräkningsfall för radionuklidtransport med kolloider (avsnitt 7.4.3), dels granskas SKB:s genomförda osäkerhets- och känslighetsanalys (avsnitt 7.4.4), och slutligen granskas hur beräkningarna förhåller sig till de specifika frågeställningarna kring risk under de första 1 000 åren (avsnitt 7.4.5) respektive riskutspädning (avsnitt 7.4.6).

SKB delar upp kapselsbrottsscenarier i följande tre kategorier: troliga, mindre sannolika, och restsценarier. Troliga (eller sannolika) och mindre sannolika scenarier utgör SKB:s valda scenarier (scenarier som SKB anser vara riskbetydande), och dessa scenarier ingår i risksummeringen som görs för att påvisa uppfyllelse av riskkraven. Valda scenarier för konsekvensanalys är scenarier relaterade till kapselbrott genom korrosion (på grund av buffererosion orsakad av hög flödes hastighet) respektive skjuvlast (på grund av mekaniska belastningar härrörande från seismiska händelser). Som restsценarier ingår två osannolika scenarier; isostatlastscenariot och växande pinnhålsscenariot. För varje scenario har beräkningar utförts för ett antal olika beräkningsfall med något varierande förutsättningar. Risker för växter och djur har utvärderats utifrån huvudscenariot med kapselbrott orsakat av korrosion.



SKB redovisar i stor utsträckning resultaten i form av olika typer av doskurvor. Dessa omvandlas till risk genom att använda en riskräkningsfaktor på $0,073 \text{ Sv}^{-1}$ så att riskkriteriet 10^{-6} motsvarar en effektiv dos på ca $14 \mu\text{Sv}$.

7.4.1 Konsekvensanalys av valda scenarier

7.4.1.1 Underlag från SKB

I scenariot för kapselbrott till följd av kopparkorrosion (SKB TR-10-50, avsnitt 4) ansätter SKB att kapselbrott sker efter det att buffertmaterialet eroderats bort av snabba vattenflöden i ett begränsat antal deponeringshål, förutbestämda av en detaljerad hydrologisk modellering. Korrosion orsakas då av ämnen, såsom svavelväte, som transporteras i grundvattnet. Efter kapselbrott orsakat av korrosion förbikopplas kapseln (dvs. den ger inget motstånd alls mot utsläpp) i påföljande beräkningar av utsläpp och transport av radionuklider.

Sex varianter av beräkningsfall utförs för korrosionsscenarioet för att illustrera osäkerheter förknippade med erosionsprocessen och de hydrogeologiska DFN-modellerna. Dessa sex varianter fås genom att kombinera de tre hydrogeologiska DFN-modellerna med två erosionsfall. De tre hydrogeologiska DFN-modellerna är okorrelerad, semikorrelerad respektive fullständigt korrelerad hydrogeologisk DFN-modell. De två erosionsfallen är fallet med SR-Sites erosionsmodell och fallet med ett starkt pessimistiskt antagande om initial advektion för varje given hydrogeologisk DFN-modell.

När det gäller kapselbrott till följd av skjuvlast (SKB TR-10-50, avsnitt 5) modellerade SKB det scenariot genom att (i) anta kapselbrott vid en godtycklig tidpunkt mellan 1 000 och 1 000 000 år, (ii) anta att buffertmaterialet fortsätter att fungera som en diffusionsbarriär mot radionuklidtransport, och (iii) inte tillskriva någon fördröjningsfunktion hos närvaron av kapseln eller radionuklidretention i geosfären.

För skjuvlastscenariot utförs två beräkningsfall. Det ena utgår från en intakt buffert medan det andra fallet utgår från ett pessimistiskt antagande att det efter 10 000 år råder advektiva förhållanden i deponeringshålet på grund av buffeterosion.

Eftersom riskkurvan för summan av risker förknippade med skjuv- och korrosionsscenarioer i figur 13-69 (TR-11-01, s.724) ligger under riskkriteriet för hela analysperioden på en miljon år, bedömer SKB att det analyserade KBS-3-förvaret i Forsmark uppfylla föreskrifternas riskkriterium.

SKB rapporterar vidare att de beräknade doshastigheterna till växter och djur med marginal understiger de nivåer där effekter kan befaras (SKB TR-13-23). Detta gäller samtliga beräkningsfall (se avsnitt 7.1.3 ovan). SKB:s slutsats är därmed att det planerade slutförvaret inte heller utgör någon risk för miljön i Forsmark.

7.4.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att de beräkningsresultat som SKB kommit fram till utifrån av SKB angivna förutsättningar (metoder, modeller och indata) är rimliga. Denna bedömning baseras på granskning av SKB:s redovisning (SKB TR-10-50, TR-13-23, samt underliggande rapporter) men också till stor del på reproducerande beräkningar utförda av SSM och SSM:s externa experter (SSM2011-2306-30; SSM2011-2306-32; SSM Technical Note 20104:17; SSM Technical Note 2014:33; 2014:34; SSM Technical Note 2014:54; SSM technical Note 2015:45, Xu m.fl., 2014).

Generellt har SKB beskrivit sina modelleringsmetoder och beräkningar på ett sätt som är tillräckligt transparent och detaljerat för att möjliggöra för en erfaren granskare att



reproducera beräkningarna. SKB anger tydligt när parametervärden eller modellantaganden är pessimistiska eller hypotetiska.

SSM har reproducerat SKB:s beräkningar och jämfört resultaten med de av SKB redovisade resultaten för två olika beräkningsfall. Detaljerna i beräkningarna finns i SSM SSM2011-2306-30. Dessa fall omfattar dels det centrala korrosionsfallet där kapseln snabbt fylls med vatten efter kapselbrott och bufferten inte antas utgöra något transportmotstånd, och dels skjuvlaster scenariot med intakt buffert.

Målet med denna fördjupade utvärdering är att få insikt i huruvida SKB:s konsekvensberäkningar är lämpliga för att stödja SKB:s slutsatser om förvarets säkerhet. SSM:s beräknade resultat stämmer väl överens med SKB:s beräkningar för dessa två fall. Även SSM:s externa experter har reproducerat SKB:s beräkningar för dessa två fall (SSM Technical Note 2014:33). Deras reproducerade resultat är också i god överensstämmelse med SKB:s och SSM:s resultat. Dessutom reproducerade de externa experterna ett annat beräkningsfall bland de sex varianterna för korrosionsscenarioet, nämligen det centrala korrosionsfallet med initial advektion i deponeringshålet. I detta fall stämmer deras beräknade resultat ganska väl med SKB:s resultat (SSM Technical Note 2014:33).

Baserat på resultaten från våra begränsade utvalda beräkningsfall (tre av SKB:s åtta beräkningsfall), framstår SKB:s beräknade resultat för huvudscenariot som rimliga. Denna kontroll avser dock endast själva beräkningarna utifrån angivna förutsättningar. Denna del av granskningen inkluderar alltså inte frågor kring sannolikheter för scenarierna eller tillämpbarhet av indata, antaganden och stödmodeller.

Eftersom antalet förväntade kapselbrott (sannolikheten för de olika scenarierna) spelar en viktig roll i konsekvensberäkningarna (t.ex. SSM Technical Note 2012:58; SSM2011-2306-30; SSM Technical Note 2014:55) har SSM reproducerat beräkningen av förväntat antal kapselbrott i korrosion- och skjuvlaster scenarier (Xu m.fl., 2014; SSM2011-2306-32). En bra överensstämmelse med SKB:s redovisade resultat erhöles för både korrosions- och skjuvlaster scenariot.

Förutom att dessa oberoende beräkningar utgör en kontroll av själva beräkningarna som SKB har genomfört, så ger de SSM en bättre förståelse för SKB:s metodik för korrosion och skjuvlaster beräkningar. Ett antal nyckelparametrar och -frågor har därmed kunnat identifieras för vidare granskning. SSM:s analys av osäkerheten för dessa nyckelparametrar vad gäller att beräkna sannolikheten för korrosionsscenarioet redovisas i avsnitt 7.4.4.2 i denna granskningsrapport. SSM:s analys av osäkerheter för nyckelparametrar relevanta för beräkningen av sannolikheten för skjuvlaster scenariot redovisas i avsnitt 7.4.5.2

SSM noterar att SKB har inkluderat gränssättande beräkningsfall, såsom ett ”what-if”-fall med antagande av initial advektion kring alla kapslar. Detta gjordes för att illustrera effekten på risken av osäkerheter kring buffertens erosionsprocess. SSM anser att tillvägagångssättet med gränssättande beräkningar är ett bra sätt att utvärdera robustheten hos förvarssystemet. Dock har detta tillvägagångssätt tillämpats endast på en del av scenarioanalysen. Till exempel har osäkerheten för korrosionsmodellen inte fullständigt analyserats på motsvarande sätt.

När det gäller effekter på växter och djur så framgår det av avsnitten ovan (7.1.3 och 7.2.3) att SSM bedömer att den övergripande metodiken, inklusive modeller och bedömningsgrund, är väl lämpad för ändamålet att bedöma om det föreligger någon långsiktig miljörisk med det föreslagna slutförvaret. Den ytterligare bedömning som görs i



detta avsnitt gäller om metodiken tillämpats på ett sådant sätt så att slutsatsen från utvärderingen kan anses vara korrekt och tillräckligt underbyggd.

Sammantaget anser SSM att den genomförda utvärderingen av risker för växter och djur ger tillräckligt stöd för bedömningen att det finns förutsättningar för att det planerade slutförvaret kan uppföras utan att oacceptabla långsiktiga risker för växter och djur uppstår. Denna bedömning grundar sig främst på granskning av den reviderade utvärdering av risker för växter och djur (SKB TR-13-23) vilken SKB tagit fram som ett svar på SSM:s begäran av kompletterande information (SSM2011-2426-91), vilken i stor utsträckning ersätter den ursprungliga utvärderingen (SKB TR-10-08) snarare än kompletterar mindre delar. Den granskning som SSM:s externa experter utfört (SSM Technical Note 2014:17) avser den ursprungliga utvärderingen.

Avgörande för vilket resultat SKB:s utvärdering enligt ERICA Tools metodik kommer fram till, är vilka ingående data som ansatts i modellen för dosberäkning. Viktiga aspekter att granska har därför varit vilka utsläppscenarier, vilka radionuklider och vilka organismer som ingått, och inte minst vilka parametervärden som ansatts, främst rådande aktivitetskoncentrationer i olika miljömatriker samt överföringsfaktorer mellan miljö och olika organismer (CR-värden). De senare diskuteras mer utförligt i avsnitt 7.3.4, medan rådande aktivitetskoncentrationer diskuteras nedan då dessa själva utgör modelleringsresultat från närliggande delar inom SR-site.

Som framgår av avsnitt 7.1.3 är det en deterministisk beräkning av basfallet för det centrala korrosionsscenario som utvärderats med hänsyn till effekter på växter och djur. Detta val bedömdes i nämnda avsnitt ge en robust bild av förväntade aktivitetskoncentrationer i miljön vid ett kapselbrott som uppstår i de mindre sannolika men möjliga scenarier som SKB utvärderar avseende dos till människa. I den uppdaterade utvärderingen (SKB TR-13-23) inkluderar SKB samtliga radionuklider som ingår i transportberäkningen och dosberäkningen för människa i dosberäkningen för växter och djur, och alla totala doser som rapporteras för växter och djur omfattar samtliga ingående radionuklider. Denna utökning av ingående radionuklider jämfört med den ursprungliga utvärderingen (SKB TR-10-08) innebär att resultaten i form av beräknade totaldoser för såväl referensorganismer som representativa arter nu är relevanta att jämföra med bedömningsgrunden 10 μ Gy/h. Då SKB:s dosberäkning nu omfattar alla ingående radionuklider för alla ingående organismer, bedömer SSM att urvalet av organismer som faktiskt utvärderas är i linje med föreskriftskraven och internationell vägledning. SKB:s metoder för att hantera att parametervärden, t.ex. CR-värden, för vissa kombinationer av organismer och radionuklider saknas såväl i litteraturen som i resultaten från platsundersökningar diskuteras och bedöms i avsnitt 7.3.4 ovan.

För att verifiera att SKB:s beräkning av dosrater med ERICA Tool, vid de aktivitetskoncentrationer som beräknats för det centrala korrosionsscenario, är rimliga, så har SSM:s externa experter genomfört en parallell utvärdering (SSM Technical Note 2015:45) med det oberoende verktyget Resrad-Biota (USDoE, 2004). Detta verktyg används som ett standardverktyg i USA för att genomföra utvärderingar av radiologiska risker för växter och djur i enlighet med där gällande lagstiftning.

Vid denna jämförelse framkom att det för enskilda referensorganismer inte sällan kan skilja en storleksordning (två storleksordningar för marint däggdjur) i beräknad dosrat mellan SKB:s beräkning och beräkningen gjord med resrad-biota. Det är vanligare att dosraten beräknas till ett högre värde med resrad-biota jämfört med SKB:s beräkning, men motsatsen förekommer också. De högsta, och därmed mest begränsande, dosraterna fås i SKB:s beräkning med ERICA Tool (lavar och mossor). Ingen av beräkningarna resulterar således i dosrater som skulle indikera att mer noggranna, realistiska och specifika

utvärderingar behöver göras för att utesluta effekter på organismer vid de aktivitetskoncentrationer i miljön som beräknats kunna uppstå vid kapselbrott i enlighet med det centrala korrosionsfallet.

En avgörande fråga är då om de aktivitetskoncentrationer i vatten, sediment och jord som SKB beräknar för olika biosfärsobjekt i och med att SKB beräknar doser till människa är rimliga och relevanta för utvärderingen av effekter på växter och djur. Dessa mellanresultat redovisas inte inom redovisningen av dos till människa utan bara i redovisningen av dos till växter och djur (SKB TR-13-23), men metodiken som leder fram till beräknade aktivitetskoncentrationer i miljön är densamma. För att bedöma rimligheten i de av SKB ansatta aktivitetskoncentrationerna i vatten och sediment som redovisas i SKB TR-13-23 har SSM och dess externa experter dels reproducerat SKB:s beräkningar för pulsutsläpp (SSM2011-2306-32), dels utfört alternativa beräkningar för så kallade referensbiosfärer (SSM Technical Note 2014:34; 2014:54). Dessa rapporter diskuterar doser snarare än aktivitetskoncentrationer i miljön, men miljökoncentrationerna utgör ett mellanresultat och har jämförts med de koncentrationer som beräknats av SKB (SSM2011-2306-32). Jämförelserna visar att aktivitetskoncentrationen i miljön ofta är betydligt högre i SKB:s beräkningsresultat jämfört med resultaten för referensbiosfärer. I första hand gäller det kortlivade nuklider där skillnaden till stor del förklaras med skillnader i diskretisering av marklagren i modellerna (se detaljer i SSM Technical Note 2014:34; 2014:54). SSM bedömer att de av SKB beräknade aktivitetskoncentrationerna är en rimlig utgångspunkt för beräkningen av doser till växter och djur.

Slutlig bedömning av SKB:s scenarioanalyser ges i avsnitt 7.5 genom att väga in alla faktorer som behandlas i detta kapitel.

7.4.2 Restscenarier som involverar hypotetisk förlust av säkerhetsfunktioner

7.4.2.1 Underlag från SKB

I restscenariot ingår två osannolika scenarier; isostatlastscenariot och växande pinn-hålscenariot (SKB TR-10-50, avsnitt 6). För bägge scenarierna har SKB analyserat ett referensfall samt flera varianter. Dessa varianter skapas genom att ändra i funktioner och processer samt genom att försämra barriärkomponenternas funktion och syftar till att utgöra känslighetsanalys respektive analys av barriärsfunktionerna.

För scenariot kapselbrott vid isostatisk belastning antar SKB som referensfall att (i) kapseln (både gjutjärnsinsatsen och kopparhöljet) har skadats och därför inte har någon skyddsfunktion, (ii) bufferten som omger kapseln är intakt, och (iii) geosfärens retentionsegenskaper kvarstår. SKB beräknade två kapselbrottsfall: (i) en kapsel skadas efter 10 000 år, och (ii) en kapsel skadas efter 100 000 år. I beräkningar använde SKB den semi-korrelerade hydrogeologiska DFN-modellen och beräknade flöden för alla tre utsläppsvägar (Q1, Q2 och Q3, se avsnitt 7.2.1.1) från närområdet till fjärrområdet.

SKB:s scenario för växande hål omfattar en hypotetisk initial defekt i form av ett penetrerande litet hål i kopparhöljet, som gradvis växer till en större defekt. Det lilla hålet ger motstånd mot vätskeflöde och radionuklidtransport på grund av sin storlek, men ökar så småningom i storlek till ett större hål med tillräcklig dimension för att inte längre erbjuda motstånd mot radionuklidutsläpp. För referensfallet antas att bufferten som omger kapseln är intakt, och geosfärens retentionsegenskaper kvarstår. SKB redovisade beräkningar för alla tre utsläppsvägar (Q1, Q2 och Q3) från närområdet till fjärrområdet.



SKB har också genomfört ett antal olika känslighetsstudier kring referensfallet för scenariot med det växande hålet: (i) advektiv transport i tunnlar och deponeringshål, (ii) sorption i tunnlar och deponeringshål, (iii) kronutrymme som bildas av komprimering av återfyllning i förvarstunnlar, (iv) varierande (sprick-)transmissivitet i EDZ, och (v) antagande av en eller flera transportvägar per deponeringshål.

SKB har också använt varianter av scenariot med växande hål där barriärfunktioner antas vara helt förlorade i syfte att utföra barriärfunktionsanalys, så kallade "what-if"-fall. SKB har på så sätt analyserat fem fall enligt nedan.

- Fall A - initial avsaknad av buffert i deponeringshål
- Fall B - initial genomgående/penetrerande håldefekt i alla kapslar
- Fall C - initial stor öppning i alla kapslar (såväl kopparskal som gjutjärnsinsats)
- Fall D - en kombination av fall A och C (initial stor öppning i alla kapslar och advektiva förhållanden till följd av buffertförlust för alla deponeringshål)
- Fall E - en kombination av fall C med ett antagande om snabb bränsleupplösning och metallkorrosion.

Dessutom kombineras förlorad geofärsretention med vart och ett av de fem fallen, vilket ger upphov till totalt tio beräkningsfall. Endast deponeringshål anslutna till vattenförande sprickor (1175 av 6916) ingick i dessa beräkningar.

Som underlag till SSM:s reproducerande beräkningar utnyttjades också beskrivningar i SKB TR-10-52, samt information rörande hydrogeologiska modelleringsdata (SKB R-09-20, SKBdoc1286751).

7.4.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att de beräkningsresultat som SKB kommit fram till utifrån av SKB angivna förutsättningar (metoder, modeller och indata) är rimliga. Denna bedömning baseras på granskning av SKB:s redovisning (SKB TR-10-50 samt underliggande rapporter) men också till stor del på reproducerande beräkningar utförda av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:33; SSM Technical Note 2014:54)

SKB har utfört fem "what-if"-beräkningsfall för analyser av barriärfunktionsförlust som illustrerar funktionen av kapsel och buffert genom att selektivt ta bort dem från modellen. Resultaten är inte avsedda för jämförelse med säkerhetskriterier då beräkningsfallen utgör osannolika situationer, men de tjänar till att illustrera betydelsen av de tekniska komponenterna för systemets funktion. SSM konstaterar att de beräkningsfall som valts ut av SKB täcker alla barriärerna i slutförvarssystemet men att SKB inte definierar kriterier för att välja "what-if"-beräkningsfall vare sig för huvud- eller restscenarier. Som noterats i föregående avsnitt tillämpades t.ex. pessimistiska gränssättande fallberäkningar för korrosionssceniots "what-if"-analys avseende buffertererosionsprocessen, men inte avseende korrosionsmodellen.

SSM gav två oberoende modelleringsuppdrag avseende beräkningarna av SKB:s restscenarier och "what-if" analyser av förlust av barriärfunktion till SSM:s externa experter. Syftet med uppdragen inkluderade att försöka reproducera beräkningar som genomförts av SKB för att ge inblick i alla de antaganden, modellbeskrivningar och parametervärden som ligger bakom beräkningarna.

Det första uppdraget inkluderade att reproducera beräkningarna för restscenarierna (dvs., växande hål och isostatisk last) och, några av SKB:s "what-if" beräkningsfall förknippade med dessa. Dessutom analyserade de externa experterna två egendefinierade "what-if" fall



(SSM Technical Note 2014: 33, nr 5 och nr 6 i listan nedan). Totalt sex beräkningsfall utfördes:

- isostatisk last (referensfall)
- växande hål (referensfall)
- ett ”what-if”-fall förknippat med växande hål-scenario med ett kronutrymme orsakat av förlust av svälltrycket för återfyllningen i deponeringstunneln
- ett ”what-if”-fall förknippat med det centrala korrosionsscenariot genom att lägga till initial advektion
- samma fall som fall 3 men med ett kortare transportavstånd i deponeringstunnel än vad som används av SKB
- ett ”what-if” fall förknippat med det centrala korrosionsscenariot varieras genom att accelerera hastigheten av bränsleupplösning från 1×10^{-7} / år till 1×10^{-6} / år.

För varje fall utfördes både deterministiska och probabilistiska beräkningar.

Modellerna de externa experterna använde i detta uppdrag konstruerades utifrån breda beskrivningar av SKB:s modeller och implementerades i programvaran GoldSim (GoldSim, 2012). Data som användes i deterministiska beräkningar erhöles från SKB TR-10-50. Hydrogeologiska modelleringsdata som användes i probabilistiska beräkningar tockades från information av kumulativa fördelningsfunktionen som gavs SKB R-09-20.

De externa experternas oberoende beräkningar (SSM Technical Note 2014:33) kunde återskapa resultaten för SKB:s beräkningar (fall 1-4 ovan) med avvikelser inom en faktor fem för både deterministiska och probabilistiska beräkningar. De beräknade doserna från de av de externa experternas egendefinerade fallen (fall 5-6 ovan) var inte signifikant högre än doserna förknippade med de fall som redan hade behandlats av SKB. Det bör noteras att de externa experternas modeller konstruerades baserat på generella beskrivningar av SKB:s modeller, och att efterforskningar rörande detaljer och implementering av dessa endast har gjorts om det varit absolut nödvändigt. Det är sannolikt att skillnaderna mellan de externa experternas resultat och SKB:s kan bli mindre genom att likt SKB använda diskreta värden i multipla realiseringar för stokastiska simuleringar istället för att tolka hydrodata från den kumulativa fördelningsfunktionen. Analysen för fall (6) visade ett linjärt förhållande mellan bränsleupplösningshastigheten och den slutliga dosen.

Det andra uppdraget var att reproducera de probabilistiska beräkningarna för fem fall, fall A till E, som nämnts ovan. De modeller och data de externa experterna använde i detta uppdrag var baserade på SKB:s beskrivningar (SKB TR-10-50 och SKB TR-10-52) och implementerades i programvaran AMBER (Quintessa 2013). De hydrogeologiska modelleringsdata som användes i de probabilistiska beräkningarna har hämtats direkt från SKB (SKBdoc1286751). De flesta resultaten från de externa experternas beräkningar ligger inom en faktor 2-5 jämfört med SKB:s resultat vid tidpunkten för maximal dos (SSM Technical Note 2014:55). De externa experternas beräkningar överensstämde med SKB:s i det att de viktigaste faktorerna som styr modellberäkningarnas resultat avseende utsläpp/dos är: i) kapselns integritet; ii) bränsleupplösningshastighet och löslighetsgränser, vilka styr utsläpp från en skadad kapsel; och iii) den effektiva utsläppshastigheten från bufferten till sprickor (den "ekvivalenta flödes hastigheten" även känd som Q_{eq}). Sammantaget bedöms resultaten från de fem olika beräkningsfallen ge en god bild av de viktigaste aspekterna av slutförvarets barriärfunktioner.

SSM:s externa experter har reproducerat de flesta av SKB:s restsценарier och dess tillhörande ”what-if” -beräkningsfall. Baserat på resultaten från dessa oberoende beräkningar framstår SKB:s beräknade resultat för restsценариerna som rimliga. Denna kontroll avser dock endast själva beräkningarna utifrån angivna förutsättningar. Denna del



av granskningen inkluderar alltså inte frågor kring tillämpbarhet av indata, antaganden och stödm modeller. Dessa frågor diskuteras vidare i avsnitt 7.1–7.3.

Slutlig bedömning av SKB:s scenarioanalyser ges i avsnitt 7.5 genom att väga in alla faktorer som har behandlats i detta kapitel.

7.4.3 Kolloidbefrämjad transport av radionuklider

7.4.3.1 Underlag från SKB

SKB anger att bentonitkolloider kan finnas i grundvattnet och att vissa radionuklider kan sorberas till dessa kolloider. Därmed påskyndas radionuklidtransport genom geosfären (SKB TR-10-50, avsnitt 4.5.6). SKB konstaterar att modellering av radionuklidsorption på bentonitkolloider som en reversibel process är mest rimlig. SKB har ändå genomfört två alternativa beskrivningar för att modellera radionuklidsorption till kolloider och transport genom geosfären (SKB TR-10-50). I den första beskrivningen modelleras radionuklidsorption till bentonitkolloider som en linjär jämviktssorption, dvs en metod att med K_d -värden beräkna radionuklidkoncentrationen i suspenderade kolloider som proportionell mot radionuklidkoncentrationen i lösning. I den andra beskrivningen använder SKB första ordningens kinetiska process för sorption och desorption av radionuklider till kolloider, inklusive hänsyn tagen till begränsad sorptionsyta/platser på kolloiderna. SKB analyserar det extrema fallet där desorptionshastigheten från kolloider är noll, dvs. irreversibel sorption till kolloider.

SKB använder MARFA för att beskriva kolloidbefrämjad transport genom att två grupper av transportparametrar ersättes med ekvivalenta värden som är beroende av kolloidhalt, kolloidretardationsfaktor och jämviktsfördelningskoefficient för radionuklidsorption på kolloider. SKB har på så sätt analyserat effekten av reversibel sorption till kolloider vid en rad koncentrationer av kolloider i grundvattnet i scenariot för kapselbrott till följd av korrosion (SKB TR-10-50, avsnitt 4.5.6). SKB har också analyserat betydelsen av irreversibel sorption till kolloider i det hypotetiska restscaenariot växande hål (SKB TR-10-50, avsnitt 6.4.5). SKB konstaterar att kolloidbefrämjad transport endast marginellt skulle kunna påverka dosuppskattningarna.

Huvudskälet till att kolloider inte ökar dosuppskattningen signifikant i beräkningsfallet med irreversibel sorption är att de dosdominerande radionukliderna inte påverkas av denna extra transportmöjlighet. I-129 och C-14 modelleras redan utan sorption till geosfären under transport, och Ra-226 förväntas inte sorberas irreversibelt och ingår inte i beräkningsfallet som endast inkluderar aktinider och övergångsmetaller (SKB TR-10-50, avsnitt 6.4.5).

SKB har inte utvärderat effekten av reversibel sorption på kolloider i scenariot för kapselbrott till följd av skjuvlast, eftersom SKB ändå inte har tagit hänsyn till radionuklidens retention i geosfären i detta scenario.

7.4.3.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att den möjliga omfattningen av kolloidbefrämjad transport av radionuklider inte har någon avgörande betydelse för uppskattningen av doser till följd av utsläpp från det föreslagna slutförvaret. Denna bedömning grundar sig på granskning av SKB:s underlag enligt ovan, samt på de beräkningar som har utförts av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:29).

SSM anser att SKB:s redovisning av betydelsen av kolloidbefrämjad transport som beskrivet ovan är rimlig. Men SKB har inte tagit hänsyn till andra typer av kolloider med ursprung inuti kapseln, t.ex. urankolloider. SSM gav därför ett uppdrag till externa



experter att utföra oberoende modellering i syfte att utvärdera om kolloidbefrämjade transporter kan ha någon avgörande betydelse för uppskattningen av radiologiska konsekvenser (SSM Technical Note 2014: 29).

SSM:s externa experter har beaktat urankolloider som bildats till följd av upplösning eller kemisk förändring av det använda kärnbränslets uranoxidmatris, samt bentonitkolloider med ursprung i erosion av buffert och återfyllningsmaterial. De externa experterna har utvärderat två fall: i) effekten av urankolloider och bentonitkolloider på radionuklidutsläpp i när- och fjärrområdet i enlighet med korrosionsscenarioet och ii) effekten av ofullständig filtrering av urankolloider i scenarioet för kapselbrott med skjuvlast.

När det gäller det första fallet (korrosionsscenarioet) använde de externa experterna förenklade beräkningar genom att justera löslighetsgränser för U och Th för att ta hänsyn till möjligheten att U och Th kan mobiliseras som kolloider. Modelleringsresultaten visade att kolloidbefrämjad transport företrädesvis minskar dosuppskattningar i scenarioet för kapselbrott till följd av korrosion. Detta beror på att SKB i sin analys konservativt ansatt löslighetsgränser för U och Th till praktiskt taget lika med noll, i syfte att behålla U och Th i närområdet och därmed maximera källan till produktion av Ra-226 som dominerar dosuppskattningen. Om kolloider effektivt mobiliserar Th och U (genom ökade löslighetsgränser i vatten inuti kapseln och som vektorer för transport i fjärrfältet) minskar källan till Ra-226 i närområdet. Resultaten från detta uppdrag indikerar därmed att SKB:s dosuppskattningar är konservativa jämfört med alternativ som uttryckligen tar hänsyn till kolloidbefrämjad transport i scenarioet för kapselbrott till följd av korrosion.

För skjuvlastscenarioet använde de externa experterna liknande beräkningar som har beskrivits tidigare, men justerade löslighetsgränserna för alla relevanta radioelement för att modellera möjligheten att radionuklider kan mobiliseras som kolloidala partiklar eller som radionuklider sorberade på kolloider. För att utvärdera en situation med ofullständig filtrering av kolloider vid passage genom bufferten beräknades utsläppen med antagandet att diffusionskoefficienter för kolloider är samma som för radionuklider lösta i buffertens porvatten. Vidare beaktades två beräkningsvarianter. I den ena beräkningen användes vanliga Kd-värden för bufferten och i den andra beräkningen sattes Kd-värdena till noll för bufferten. Det senare skulle motsvara det extrema fallet i vilket ingenting adsorberar till bufferten ($K_d=0$) då alla radionuklider diffunderar genom bufferten fastlagda till kolloiderna. Det första, basfallet, motsvarar det andra gränssättande fallet där alla radionuklider diffunderar genom bufferten i löst form och därmed kan sorberas till bufferten i enlighet med Kd-värdena. För att hålla modellen enkel beräknades det mest rimliga fallet som ett viktat medelvärde av utsläppshastigheterna från dessa två extremfall (10% bundet till kolloider). De beräknade resultaten med beaktande av ofullständig filtrering av urankolloider i scenarioet för kapselbrott till följd av skjuvlast ligger nära SKB:s resultat som presenteras i SR-Site säkerhetsanalys. Därav drog de externa experterna slutsatsen att det är osannolikt att beräkningar med hänsyn tagen till kolloidtransport och ofullständig filtrering i scenarioet för kapselbrott till följd av skjuvlast väsentligt kan ändra SKB:s dosuppskattningar i samma scenario.

7.4.4 Osäkerhets- och känslighetsanalys

7.4.4.1 Underlag från SKB

I SR-Site har tre typer av osäkerheter definierats inom säkerhetsanalysen; systemosäkerhet, konceptuell osäkerhet och dataosäkerhet (SKB TR-11-01, avsnitt 2.8). Systemosäkerhet gäller frågan om alla aspekter som är viktiga för säkerhetsbedömningen har identifierats och om analysen fångar de identifierade aspekterna på ett kvalitativt



korrekt sätt, t.ex. genom val av en lämplig uppsättning scenarier och faktorer (FEP). Konceptuell osäkerhet avser i huvudsak förståelsen av den typ av processer som ingår i förvarets utveckling. Dataosäkerhet gäller alla kvantitativa indata som används i säkerhetsanalysen.

Osäkerhets- och känslighetsanalys för korrosionsscenarioet har utförts som en kombination av deterministiska och stokastiska beräkningar. Osäkerheter i flöden modellerade med hydro Discrete Fracture Network (DFN)-modeller utvärderades genom jämförelse av resultat från tre varianter av modeller; okorrelerade, semikorrelerade och fullt korrelerade avseende relationen mellan sprickors storlek och transmissivitet. Dessutom har flera realiseringar av den underliggande DFN-modellen genererats för varje modellvariant. Osäkerheter i buffertdensiteten utvärderades genom beräkningar för tre deterministiska fall. De tre fallen var basfallet med SR-Site erosionsmodell (SKB TR-10-64), och de två gränssättande fallen med initial advektion i alla deponeringshål respektive ingen advektion alls under hela beräkningsperioden. Fallet där initiala advektiva förhållanden uppstår i varje deponeringshål bedöms oralistiskt, men det illustrerar effekten av de osäkerheter som omfattas av detta fall. Figur 12-18 i (SKB TR-11-01) sammanfattar osäkerheten i det beräknade genomsnittliga antalet kapselbrott för korrosionsscenarioet för de ovan beskrivna fallen.

Ingen osäkerhetsanalys avseende korrosionsmodeller utfördes, utom vissa känslighetsanalyser utifrån pessimistiska antaganden om korrosionsgeometrin eller sulfidkoncentrationen (SKB TR-11-01, figur 12-17).

Känslighetsanalys utfördes med hjälp av resultaten från de probabilistiska simuleringarna av radionuklidtransport i när- och fjärrområdet, vilka utfördes med koderna COMP23 och FARF31, samt fördelningar av indata relaterade till kapselbrottstider, bränsleupplösningshastigheten, IRF och geosfärtransport samt flödesrelaterade data enligt tabell 13-3 i (SKB TR-11-01). Metoden standardiserad rankregressionskoefficient (SRRC) användes i känslighetsanalysen. Användning av SRRC-metoden motiveras av monoton i det modellerade systemet. En SRRC-analys avseende den totala dosen vid 10^6 år ger att de parametrar som mest påverkar dosresultatet i fallande ordning är, bränsleupplösningshastigheten, flödesrelaterade transportmotståndet (F) i geosfären och kapselbrottstider. En analys av dosen från Ra-226 vid 10^6 år ger ett liknande resultat på grund av att dosen från Ra-226 dominerar den totala dosen.

SKB har även analyserat effekten av varierande flödesförhållanden och andra klimatrelaterade geosfärdata med hjälp av MARFA-modellen. Modelleringsresultaten tyder på att förändringar i flödet inte leder till någon betydande ökning av maximal dos (SKB TR-11-01, figur 13-33).

Även förenklade, analytiska modeller är tillgängliga för modellering av radionuklidtransport i när- och fjärrområdet (Hedin, 2002). Dessa modeller har använts av SKB för att jämföra resultaten med de numeriska beräkningarna i syfte att ge en kvalitetssäkring samt att demonstrera förståelse för modellkonceptets grundläggande drag.

Osäkerhet relaterad till biosfäranalysen har delats in i tre typer: i) systemosäkerheter på grund av oförmåga att göra korrekta förutsägelser om den långsiktiga utvecklingen av biosfären och människans framtida användning av biosfären, ii) modellosäkerheter på grund av ofullständig kunskap om de processer som påverkar radionuklidernas egenskaper och transport i biosfären, iii) parameterosäkerheter på grund av den naturliga variationen samt ofullkomliga och otillräckliga mätdata (SKB TR-10-06, avsnitt 5).



Systemosäkerheter undersöktes dels genom olika scenarier för biosfärsutveckling, bl.a. genom att testa olika starttider för utsläpp för varje biosfärsobjekt deterministiskt, dvs från början av den marina perioden (som används för att härleda grundläggande LDF), efter slutet av den marina perioden, samt efter övergångsperiodens slut, och dels genom att anta olika sätt för människan att utnyttja brunnsvatten och möjlig livsmedelsproduktion i området.

Modellosäkerheter undersöktes bl.a. genom en alternativ finare diskretisering av den nedre regoliten och genom att undersöka betydelsen av att bortse från föroreningar från uppströms belägna biosfärsobjekt.

Parametrar som ingår i biosfärsmodellering kan indelas i tre kategorier: i) tidsberoende parametrar som anses vara säkra, ii) tidsberoende parametrar med osäkra värden, iii) tidsberoende parametrar. Parametrar tillhörande den första kategorin är de som representerar vanor och egenskaper hos utsatta individer, såsom inandningshastighet, totalt vatten- och matintag och doskoefficienter. Alla andra tidsberoende parametrar anses falla in under den andra kategorin och ingår i probabilistiska beräkningar av LDF-värden. Dessa beräkningar utfördes med hjälp av Monte Carlo-metoder (SKB TR-10-06, figur 5-36). Tidsberoende parametrar kunde inte studeras med probabilistiska simuleringar. Känslighetsanalys avseende parametervärden utfördes med First Order Sensitivity Index (FOSI) och SRRC-metoder med hjälp av resultaten från de probabilistiska beräkningar som har nämnts ovan.

Den relativa betydelsen av olika parametrar för den resulterande osäkerheten i LDF-värden varierade mellan radionuklider. De tre mest betydelsefulla parametrarna när det gäller LDF-värde för Ra-226 är i fallande ordning brunnskapacitet, kon-centrationsfaktor från jord till grönsaker och fördelningskoefficienten (K_d-värde) för den nedre regoliten.

Osäkerhetsanalysen visar att hanteringen av system, modell och parameterosäkerheter är balanserad, och att effekterna av kvantifierade osäkerheter är begränsade (SKB TR-10-06, sid. 91). Följaktligen dras slutsatsen att de maximala LDF-värdena härrörande från de deterministiska beräkningar som används i SR-Site kan betraktas som bästa uppskattning för en representativ individ i den mest exponerade gruppen.

7.4.4.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s övergripande metodik för osäkerhetsanalys är rimlig. Bedömningen baseras på att metodiken generellt stämmer överens såväl med internationella rekommendationer för långsiktig säkerhetsanalys avseende förvar av använt kärnbränsle (NEA, 1997) som med kraven i SSMFS 2008:21.

SSM håller med om SKB:s utgångspunkt att ”tänk om detta händer”-fall behöver tas upp inom säkerhetsanalysen, och de osäkerheter som är förknippade med dessa fall behöver belysas. Detta hanteras generellt med hjälp av en uppsättning scenarier och beräkningsfall. SSM observerar att metoderna för osäkerhetsanalys som har använts i olika delar av SKB:s konsekvensanalys skiljer sig något, vilket kan bero på att olika modelleringsgrupper har bedrivit osäkerhetsanalys på olika sätt inom konsekvensanalysen. Ett exempel är att för radionuklidtransport i när- och fjärrområdet har SKB:s beräkningar baserats på sannolikhetsfördelningar av de flesta parametervärden, medan i området för dosberäkningar har bästa uppskattningar använts för att fastställa parametervärden för beräkningen av LDF-värden. SSM förväntar sig att SKB:s metoder för osäkerhets- och känslighetsanalyser kommer att vara konsekventa i alla delar av konsekvensanalysen i framtida säkerhetsredovisningar.



Osäkerheter i de nyckelparametrar som gäller för att härleda sannolikheten för skjuvlastscenariot diskuteras i avsnitt 5.12.

SSM bedömer att robustheten i SKB:s uppskattning av förväntat antal kapselbrott till följd av korrosion är rimlig. Bedömningen baseras främst på SSM:s egna beräkningar kring gränssättande fall (Xu m.fl., 2015; SSM2011-2306-32).

Visserligen har SKB undersökt osäkerheten vad avser advektiva förhållanden i korrosionsscenariet genom att ansätta det gränssättande fallet med initial advektion i alla deponeringshål för de tre olika hydrogeologiska modellvarianterna. Men osäkerheter förknippade med SKB:s själva korrosionsmodell är inte inkluderad i SKB:s osäkerhetsanalys. En av SSM:s farhågor är att potentiellt viktiga effekter av rumsliga och tidsmässiga variationer av både grundvattenflux och sulfidkoncentration i grundvattnet inte har undersökts fullt ut (Strömberg m.fl., 2015; SSM Technical Note 2015:05).

Eftersom det inte finns någon alternativ korrosionsmodell tillgänglig har SSM utfört beräkningar med gränssättande fall. Osäkerheter förknippade med korrosionsmodellen studerades genom att välja ett fall med det mycket pessimistiska antagandet momentant kapselbrott genom korrosion så fort advektiva förhållanden uppstår. De tre varianterna av SKB:s hydrogeologiska DFN-modell; den okorrelerade, den korrelerade respektive den semi-korrelerade hydrogeologimodellvarianten, ledde i kombination med SKB:s buffererosionsmodell till ett medelvärde av 280, 68 och 19 deponeringshål med advektiva förhållanden (SKB TR-11-01, avsnitt 12.2.3). Därför baseras SSM:s gränssättande beräkningar på antagande om 280, 68 och 19 kapselbrott till följd av korrosion för de tre hydrogeologiska modellvarianterna. Beräkningarna utförs sedan med kapselbrottstider samplade från enhetliga distributioner mellan 50 000, 70 000 och 90 000 år och 1 miljon år för de tre DFN modellvarianter. Detaljer för SSM:s beräkningar av gränssättande fall ges i Xu m.fl. (2015), och SSM2011-2306-32.

Generellt ligger de beräknade effektiva doserna under dosgränsen utom för varianten med SKB:s okorrelerade hydrogeologiska DFN-modell, dvs. 280 deponeringshål med advektiva förhållanden och i denna beräkning därmed 280 kapslar med kapselbrott. I det fallet är den beräknade totala effektiva dosen något över gränsdosen (en faktor två) vid tiden 700 000 år efter förslutning av förvaret. Man bör dock ha i åtanke att antagandet av momentant kapselbrott genom korrosion direkt vid uppkomsten av advektiva förhållanden bedöms oralistiskt. SSM:s beräkningar för gränssättande fall ger en kontroll av SKB:s beräkningsresultat och robustheten i barriärsystemet. Detta ger oss stöd i vår bedömning av kravuppfyllelse av SKB:s säkerhetsredovisning avseende korrosionsscenarioet.

I motsats till SKB:s beräkningar visar den här analysen att antalet deponeringshål med advektiva förhållanden och buffererosionstider är viktiga för korrosionsscenarioet. De frågor som rör buffererosion diskuteras i avsnitt 5.8 och 5.13 i samband med utvecklingen av systemet med tekniska barriärer.

SSM bedömer att SKB:s osäkerhets- och känslighetsanalys inom transporter i när- och fjärrområdet är tillfredsställande. Denna bedömning baseras på granskning av SKB:s underlag enligt ovan samt på SSM:s fördjupade förståelse av SKB:s beräkningar vilken erhållits genom reproducerande beräkningar (avsnitt 7.4.1.2 och 7.4.2.2 i denna granskningsrapport).

Baserat på SSM:s försök att upprepa SKB:s beräkningar (avsnitt 7.4.1.2 och 7.4.2.2) konstaterar SSM att SKB:s beräkningar för radionuklidtransport i när- och fjärrområdet är transparenta, att modellbeskrivningar är tillräckliga, och att data är någorlunda komplett, vilket möjliggör för en modellerare med erfarenhet av radionuklidtransport att reproducera



beräkningarna. SSM konstaterar att SKB har utvärderat konceptuell osäkerhet för modellen för radionuklidtransport i när- och fjärrområdet genom benchmarking av den analytiska modellen mot numeriska modellresultat och analyserat dataosäkerheter med probabilistiska beräkningar för både numeriska och analytiska modeller. SSM håller med sin externa expert (SSM Technical Note 2015:05) om att SKB:s val av SRRC-metoden för att utföra känslighetsanalys bygger på tidigare kunskap om den monotona modellens egenskaper och förefaller vara lämplig. De resultat som erhållits från SKB:s känslighetsanalys är rimliga och stöds dessutom av fysikaliska och kemiska resonemang. SSM uppskattar att SKB använt förenklade analytiska modeller för benchmarking mot de numeriska koder för modellering av radionuklidtransport i när- och fjärrområdet, vilket ger förtroenden för SKB:s beräkningar. SSM uppskattar också att SKB har använt en alternativ modell, MARFA, för att undersöka effekten av transienta flödesförhållanden på radionuklidtransport genom geosfären.

SSM konstaterar dock att det endast finns mycket begränsade illustrationer och redovisning av probabilistiska resultat, eftersom de flesta figurer bara visar medeldosen. SSM håller med sina externa experter om att en mer detaljerad presentation av sådana resultat skulle vara bra t.ex. för att förstå resultatens känslighet för långa svansar i ingående parameterfördelningar (SSM Technical Note 2015:05).

SSM bedömer att de LDF-värden som SKB använder i SR-Site är rimliga. Denna bedömning baseras i huvudsak på resultat från oberoende beräkningar av SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2014:34; SSM Technical Note 2014:54; SSM Technical Note 2015:22; Walke m.fl., 2015; Kłos m.fl., 2015), och de konservativa antaganden som finns inbyggda i LDF-konceptet. SSM anser att den dataosäkerhetsanalys som har utförts av SKB avseende parametrar från kategorin osäkra tidsberoende parametrar är rimlig, liksom även SKB:s val av metoder för känslighetsanalyser.

SKB:s metodik för biosfärsmodellering i SR-Site är komplex och innehåller många beräkningssteg och modeller som stöds av information från ett stort antal rapporter. SSM har identifierat några svagheter rörande osäkerhetsanalysen av SKB:s biosfärsmodellering och härledning av LDF-värden (se avsnitt 7.2.2.2). En begränsning avseende SKB:s metod för biosfärsmodellering är den fasta beskrivningen av landskapsutvecklingen vilken används som grund för alla beräkningar av LDF-värden. Detta innebär att alla egenskaper inom biosfärsobjekten är fixerade i tid, vilket inte tillåter någon studie av för LDF-värdena potentiellt viktiga aspekter av osäkerhet, såsom längre tidsperioder för ackumulation av radionuklider i sediment eller förändringar av storleken av ett avrinningsområde.

SKB:s analys av modellosäkerhet bygger i huvudsak på att analysera effekterna på LDF-värden av olika modelldiskretiseringar avseende den nedre regoliten, dvs. om den representeras av en enda eller av flera boxar eller ”kompartiment” i modellen. SSM bedömer å ena sidan att SKB:s slutsats att grov diskretisering (en enda box) leder till konservativa uppskattningar av grundläggande LDF-värden är korrekt, åtminstone i fallet mera kortlivade radionuklider. SSM håller å andra sidan med sina externa experter att grov diskretisering innebär att tidsskalor för radionuklidackumulation och inväxt inte blir lämpligt representerade. Denna grova diskretisering är oförenlig med den metod som används av SKB för att studera och modellera landskapets evolution och därmed tillhörande tidsskalor.

SSM har följt SKB:s utveckling av biosfärsmodellering under det senaste decenniet. Parallellt med SKB:s utveckling har SSM:s modelleringstekniker inom biosfärsområdet utvecklats så att de tillåter numerisk granskning av licensansökan med användning av alternativa konceptuella modeller (Kłos m.fl., 2011; Kłos m.fl., 2013; Kłos and Wörman, 2015). SSM:s externa experter har för SSM utfört två benchmarkingberäkningar med



alternativa modeller för att utvärdera lämpligheten av SKB:s biosfärmodellering samt modellosäkerheter (SSM Technical Note 2014:34; SSM Technical Note 2014:54; SSM Technical Note 2015:22; Walke m.fl., 2015; Kłos m.fl., 2015). Den första beräkningen innefattade en jämförelse av förenklade referensbiosfärmodeller mot LDF-modellen (SSM Technical Note 2014:34), och den andra beräkningen involverade en jämförelse av LDF-modellen med en modell som inkluderar biosfärens evolution (GEMA-Site, Kłos and Wörman, 2015).

Som nämnts i avsnitt 7.2.2.2 i denna granskningsrapport ger den förenklade referensbiosfärmodellen dosfaktorer liknande de grundläggande LDF-värden som har använts i SR-Site (SSM Technical Note 2014:54). En anledning till att den enkla modellen ger liknande resultat som LDF-modellen beror på att exponering på grund av användning av brunnsvatten som dricksvatten dominerar dosen mot bakgrund av de antaganden som SKB har använt. Exponeringsvägen via användning av brunnsvatten är oberoende av modellering av radionuklidtransport och brunnsvattnets betydelse överskuggar de andra aspekterna av modelleringen. Den andra modelljämförelsen visar att effekterna av kvantifierade osäkerheter avseende tid för övergång till jordbruk samt storleken av objekt och avrinningsområde är begränsade (se mer i avsnitt 7.2.2.2 och Kłos, m.fl., 2015). Trots ovan nämnda brister i SKB:s biosfärmodellering och dosberäkning kan SSM, baserat på de två ovan nämnda oberoende modelleringarna och de pessimistiska antaganden som har byggts in i LDF-konceptet som nämns i avsnitt 7.2.2.2, dra slutsatsen att LDF-värden som SKB använt i SR-Site är rimliga.

7.4.5 Risk avseende utsläpp under de första 1000 åren

Enligt SSM:s föreskrifter och allmänna råd (SSMFS 2008:37) krävs det en mer detaljerad redovisning av förvarets skyddsförmåga under de första tusen åren efter förslutning. Dessutom efterfrågas en beräkning av kollektivdos från utsläpp som sker under de första tusen åren efter förslutning. Eftersom de radiologiska riskerna med avfallet är högst för denna tidsperiod är det särskilt viktigt att ta hänsyn till förvarets utveckling, säkerhetsfunktioner och risk inom denna tidsram. Kollektivdos till följd av uppskattat läckage av radioaktiva ämnen under 1 000 år efter förslutningen av slutförvar för använt kärnbränsle bör beräknas som summan över 10 000 år av den årliga kollektivdosen. Enligt kraven i SSM:s föreskrifter har många aspekter av förvarsutvecklingen modellerats i detalj för de inledande 1 000 åren. Detta gäller de termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska förändringarna, samt effekter på bufferten och kapseln.

I detta avsnitt diskuteras risker och konsekvenser kopplade till kapselbrott under de första 1000 åren. Granskningen av SKB:s detaljerade redovisning av skyddsförmågan hos förvaret under de första tusen åren efter förslutning, såsom de termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska förändringarna, samt effekter på buffert och kapsel diskuteras i kapitel 4 i denna rapport, liksom SKB:s val av scenario och sannolikheten för kapselbrott inom de första 1 000 åren.

7.4.5.1 Underlag från SKB

Uppskattad omfattning av korrosion, med hänsyn tagen till bidrag från kvarvarande syre i förvaret och eventuell mikrobiell sulfatreduktion samt bidraget från sulfider i bentoniten och återfyllningen under driftsskedet, förväntas inte leda till kapselbrott på grund av korrosion under de inledande första tusen åren. Utan istäcke de första tusen åren blir inte heller trycket så högt att kapselbrott kan förväntas pga. hög isostatisk last. Eftersom sannolikheten för stora jordskalv inte helt kan uteslutas under de inledande tusen åren kan dock skjувlaster på kapseln uppträda som en följd av stora jordskalvsinducerade sekundära skjувrörelser i sprickor som skär deponeringshålen. Sannolikheten för att ett



brott på en av de 6 000 kapslarna har inträffat i slutet av den första tusenårsperioden är dock låg och har uppskattats till $2,4 \times 10^{-5}$ (SKB TR-11-01, avsnitt 10.4.5).

En detaljerad beräkning av risk för kapselbrott till följd av skjuvlaster under de första tusen åren har därför gjorts. Eftersom LDF bygger på ett kontinuerligt utsläpp under en interglacial period skulle användningen av LDF leda till en överskattning av doser i detta fall (SKB TR-11-01, avsnitt 13.6.2). Därför användes i denna beräkning utsläpp från närområdet inklusive IRF-utsläpp som direkt indata till biosfärsmodelleringen eftersom ingen hänsyn tas till geosfärsretention i skjuvlaster scenariot. Eftersom det inte är möjligt att bestämma en plats för utsläppen bland de identifierade potentiella objekten, matades utsläppen som en funktion av tiden till varje objekt, och därefter beräknades doserna i landskapet för varje objekt. Den högsta dosen för varje nuklid och tidpunkt noterades sedan oavsett objekt. Denna värdemängd är pessimistiskt definierad som den beräknade doskonsekvensen för scenariot med kapselbrott till följd av skjuvlaster under de inledande tusen åren. Den beräknade maximala dosen är nästan fyra tiopotenser lägre än den som motsvarar riskkriterium av föreskrifterna (SKB TR-11-01, figur 13-49).

Utsläppet under de första tusen åren domineras av C-14 och det är också det viktigaste bidraget till den kollektiva dosen. Det integrerade utsläppet av C-14 under de inledande tusen åren är cirka 0,5 MBq. Detta ger en kollektiv dos summerat över 10 000 år för skjuvlaster scenariot på ca 4×10^{-5} manSv (SKB TR-11-01, avsnitt 13.6.5).

Baserat på ovanstående drar SKB slutsatsen att det analyserade förvaret i Forsmark uppfyller föreskrifternas riskkriterium under de inledande tusen åren efter förslutning med en betydande marginal.

7.4.5.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att metoderna som redovisats av SKB för att uppskatta såväl individuella doser som den kollektiva dosen är rimliga och ändamålsenliga. Denna bedömning baseras på en värdering av SKB:s underlag enligt ovan samt beräkningsresultat från två oberoende beräkningar utförda av SSM (SSM2011-2306-32).

Detta avsnitt är begränsat till det scenario i SKB:s konsekvensanalys som rör kapselbrott till följd av skjuvlaster under de första tusen åren efter förslutning. SKB:s beräkning av den radiologiska konsekvensen för skjuvlaster scenariot för de första tusen åren efter förslutning är baserad på flera pessimistiska antaganden såsom försummelse av geosfärens retention, omedelbar vattenkontakt med bränslet utan att ta hänsyn till Zirkaloykapslingens inneslutningsfunktion, och med användning av den högsta dosen för varje tidpunkt och radionuklid oavsett objekt. SSM anser att dosberäkningar baserade på utsläpp från närområdet direkt till biosfären, istället för att använda LDF-värden, är rimliga. Som nämnts tidigare har SKB:s beräkningar baserats på utsläpp som en funktion av tid matad till varje objekt i landskapet, där 16 biosfärsobjekt ingår. De exakta beräkningar som SKB gjorde är mycket tid- och resurskrävande. Därför är den första SSM-beräkningen ett stickprov av SKB:s beräkningar av den genomsnittliga årliga effektiva dosen för skjuvlaster scenariot för de första tusen åren efter förslutning (SKB TR-11-01, figur 13-49). Objekt 118 valdes för denna stickprovsberäkning eftersom Objekt 118 har den högsta dosomräkningsfaktorn för C-14 av alla objekt i SKB:s LDF beräkningar och eftersom beräknad C-14 dos dominerar de initiala tusen åren. Reproducering av SKB:s beräkning av skjuvlaster scenariot för de första 1 000 åren utfördes med hjälp av radionuklidtransportmodellen för närområdet kombinerat med biosfärsmodellen för Objekt 118. Den beräknade maximala effektiva dosen härrörande från Objekt 118 är cirka 0,0037 mikrosievert 600 år efter förslutning, vilket stämmer väl överens med SKB:s resultat (figur 5 i SSM2011-2306-32).



Eftersom utsläppet under de första tusen åren domineras av C-14, beräknas den kompletta, dvs. integrerade över 50 000 år, kollektiva dosinteckningens bidrag från utsläppet av C-14 under de första tusen åren genom att multiplicera det integrerade utsläppet av C-14 under den inledande tusenårsperioden med en omräkningsfaktor på 109 000 manSv/PBq, vilket rekommenderas av UNSCEAR (UNSCEAR 2000, bilaga A). För att uppskatta den ofullständigt integrerade kollektiva dosen, dvs. integrerad över 10 000 år, multipliceras den kompletta kollektiva dosåtagandet med 0,75, vilket är den andel av den totala dosen som erhålls under de första 10 000 åren vid en halveringstid på 5730 år när man även tar hänsyn till förändrade halter stabilt kol i atmosfären till följd av förbränning av fossila bränslen (UNSCEAR 2000, bilaga A). Metoden SKB använder för att uppskatta den kollektiva dosen är enkel och rak. SSM har kontrollerat SKB:s beräkning av det integrerade utsläppet av C-14 under den inledande tusenårsperioden med hjälp av radionuklidtransportmodellen för närområde i fallet med skjuvlasts scenariot. SSM:s beräknade utsläpp av C-14 under de första tusen åren är i god överensstämmelse med SKB:s resultat, det vill säga 0,43 MBq (SSM2011-2306-32). Enligt SSMFS 2008:37 bör den kollektiva dosen också användas vid jämförelser mellan alternativa förvarskoncept och lokaliseringar. Men bedömning av kravuppfyllelse av dessa föreskrifter för denna specifika fråga ligger utanför ramen för detta avsnitt. Dock bedömer SSM att metoden som redovisats av SKB för att uppskatta den kollektiva dosen är rimlig och ändamålsenlig.

7.4.6 Riskutspädning

Enligt SSM:s föreskrifter (SSMFS 2008:37) ska ett slutförvar för använt kärnbränsle utformas så att den årliga risken för skadeverkningar efter förslutning blir högst 10^{-6} för en representativ individ i den grupp som utsätts för den största risken.

Utöver detta påpekas i SSM:s allmänna råd till denna föreskrift att för exponeringssituationer då riskutspädning kan förväntas bör effekterna av spridning av risk mellan framtida generationer belysas genom en beräkning av risken för de individer som antas leva efter det att händelsen har inträffat och som påverkas av dess beräknade maximala konsekvenser. Beräkningen kan göras t.ex. genom att illustrera betydelsen av att händelsen inträffar vid olika tidpunkter (T_1, T_2, \dots, T_n), under beaktande av sannolikheten för att händelsen har inträffat under respektive tidsintervall (T_0 till T_1, T_0 till T_2, \dots, T_0 till T_n , där T_0 motsvarar tidpunkten för förslutning av slutförvaret).

I detta avsnitt diskuteras SKB:s redovisning kopplad till hantering av potentiell riskutspädning.

7.4.6.1 Underlag från SKB

Riskutspädning är en oundviklig konsekvens av riskkriteriet såsom det anges i SSM:s föreskrifter, dvs ett riskkriterium som ska tillämpas som funktion av tid och där kvantiteten som ska fastställas är medelvärdet med hänsyn tagen till alla relevanta osäkerheter. Därför efterfrågas enligt SSM:s allmänna råd (SSMFS 2008:37) också att frågan om riskutspädning tas upp när konsekvenserna av utsläpp från förvaret analyseras. Frågan om riskutspädning diskuteras av SKB i SR-Site huvudrapporten (SKB TR-11-01, avsnitt 2.6.2) och fler kvantitativa analyser redovisas i avsnitt 13.9.4 i samma rapport.

Två typer av riskutspädning är identifierade i riskberäkningarna. Den första typen beror på otillräcklig kunskap om en parameters osäkerhet, dvs. om en bredare indatafördelning leder till ett lägre medelvärde för en resulterande kvantitet, exempelvis medeldos eller risk. Den andra typen av riskutspädning kan uppstå om en osäkerhet beträffande tidpunkten för en händelse som skulle leda till ett kapselbrott inkluderas. Då kommer sannolikheten för att händelsen inträffar vid en viss tidpunkt att vara mindre än ett och

därmed kommer även den beräknade risken vid en viss tidpunkt att reduceras. Flera metoder vidtas för att undvika dessa två typer av riskutspädning i SR-Site;

- Beträffande den första typen av riskutspädning orsakad av parameterosäkerhet, krävs noggrannhet vid tilldelning av indatafördelningar, så att indatafördelningar som skulle kunna påverka beräkningsresultatet på detta sätt inte breddas i onödan.
- För att hantera den andra typen av riskutspädning används i SR-Site en metod som innebär att probabilistiska indata för exempelvis tidpunkter för kapselbrott ersätts med kapselbrott vid en fastställd tidpunkt.
- För vissa fall med kortvariga utsläpp används en "ackumulerad kortsiktig risk" för att hantera riskutspädning enligt bilaga 1 till SSMFS 2008:37 (se nedan).
- Ett annat alternativ för att fånga upp effekterna av riskutspädning i linje med SSM:s föreskrifter är att använda en "riskutspädningskvot" dvs. kvoten mellan "maximum av medelvärdet" och "medelvärdet av maximivärdena".

Den beräknade risken eller dosen i de bägge scenarierna kapselbrott till följd av kopparkorrosion respektive kapselbrott till följd av skjuvlast består av ett kontinuerligt bidrag samt relativt korta pulsbidrag. Den totala dosen från de kontinuerliga bidragen har, för en fast brotttid, ett initialt högsta värde med begränsad varaktighet följt av en ökande kurva som generellt växer förbi värdet på den initiala toppen. Det innebär att den maximala dosen sker i slutet av tidsskalan på en miljon år, så att den maximala risken upplevs av samma hypotetiska generation som lever i slutet av analysperioden oavsett brott-tid. Detta verifieras genom att jämföra riskutspädningskvot nämnd ovan dvs det maximala medelvärdet (0,177 $\mu\text{Sv}/\text{år}$) med medelvärdet av de maximala värdena (0,179 $\mu\text{Sv}/\text{år}$) för det centrala korrosionsfallet. För skjuvlastscenariot är det maximala medelvärdet 0,15 $\mu\text{Sv}/\text{år}$ och medelvärdet av de maximala värdena 0,28 $\mu\text{Sv}/\text{år}$. Eftersom det beräknade maximala medelvärdet och medelvärdet av de maximala värdena för båda scenarierna är relativt lika, är riskutspädningen begränsad.

Beträffande kortsiktiga utsläpp från pulsbidrag från bränsleupplösning är situationen annorlunda. Doser uppstår direkt efter utsläppen men varar endast under en i sammanhanget kort period på 1 000 år i jämförelse med hela analysperioden. Den probabilistiska behandling av medeldosen, där sannolikheten för att en enskild individ ska exponeras minskar med en faktor 100, vilket innebär en tydlig riskutspädning. En faktor 100 kommer sig av sannolikheten för att som individ leva under just den 1000-årsperiod då ett pulsutsläpp sker istället för under någon av de 99 andra 1000-årsperioderna under analysperioden. För att belysa riskerna på ett alternativt sätt i detta fall när riskutspädning är betydande, jämför SKB riskkriteriet med en "ackumulerad kortsiktig risk" (SKB:s terminologi) vilken erhålls genom uttrycket nedan och som bygger på tolkningen av bilaga 1 till SSMFS 2008:37:

$$D_{TotPulse}(T) \cdot \int_{T_0}^T f(\tau) d\tau \cdot 0.073 \text{Sv}^{-1}$$

där T_0 är tidpunkten för förslutning av förvaret, och f är den tidsberoende frekvensen för kapselbrott. Resultatet av en sådan beräkning för korrosion- (korrelerat fall med initial advektion) och skjuvlastscenarierna visas i figur 13-70 i SKB TR-11-01. Det som beräknats i figuren är inte jämförbart med riskkurvorna för de kontinuerliga utsläppen och kan inte sägas representera en verklig risk i samma mening som de kontinuerliga utsläppen. Snarare utgör de ett formellt sätt att hantera frågan om riskutspädning för kortsiktiga utsläpp. Summakurvorna i figur 13-70, och deras totala värde om de skulle adderas, ligger under riskgränsen och därmed är riskkriteriet uppfyllt även för detta gränssättande sätt att ta hänsyn till riskutspädning. Således är SKB:s slutsats att



riskutspädning inte är en fråga som riskerar att kullkasta slutsatserna i SR-Site för de båda scenarierna.

I granskningsprocessen begärde SSM ett förtydligande från SKB angående beskrivningen av hur beräkningen av the mean of the peaks gått till (SSM 2011-2426-225). Ett sådant förtydligande lämnades sedan till SSM (SKBdoc 1475753).

7.4.6.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s övergripande slutsats, att riskutspädningen inte är en fråga som riskerar att kullkasta de generella slutsatserna om tillräckligt skydd för människors hälsa i SR-Site, är motiverad. Denna bedömning baseras på de beräkningar av "ackumulerad kortsiktig risk" som SKB redovisar i SR-Site (SKB TR-11-01).

I dess vidaste bemärkelse, uppstår riskutspädning när en ökning av osäkerhet leder till en minskning och därmed en utspädning av beräknad risk. Beträffande den första typen av riskutspädning, orsakad av parameterosäkerhet, återfinns SSM:s kommentarer i avsnitten om granskning av av indata (kapitel 4 och 5 samt avsnitt 7.3 i denna granskningsrapport). Beträffande den andra typen av riskutspädning, orsakad av osäkerhet för tidpunkten för en händelse, konstaterar SSM att effekten är tydligast för händelser vars konsekvenser är kortlivade i jämförelse med tidsskalan för analysperioden (diskuteras nedan).

Vid beräkningar av det årliga medelvärdet för risken försummar SKB pulsutsläpp i de probabilistiska riskberäkningarna. SKB hanterar istället kontinuerliga utsläpp och pulsutsläpp separat. SSM instämmer med sin externa expert att SKB:s resonemang kring att försumma pulsutsläpp av IRF i probabilistiska beräkningar av årligt medelvärde för risk är rimligt. Detta eftersom pulsutsläpp spelar en minimal roll i det beräknade medelvärdet av årlig risk vid probabilistiska beräkningar med slumpmässig tid för kapselbrott, under förutsättning att varaktigheten av pulserna är kort i förhållande till den totala analysperioden (SSM Technical Note 2012:58). Den högsta beräknade årliga risken för de kontinuerliga utsläppen uppträder alltid i slutet av analysperioden. Tidpunkten för kapselbrott spelar därför nästan ingen roll. SSM förväntar sig av detta skäl inte någon avsevärd riskutspädning till följd av osäkerhet för tidpunkten då kontinuerliga utsläpp till följd av kapselbrott initeras.

Anledningen till att riskerna blir högst i slutet av analysperioden är att konsekvenserna av kapselbrott i både korrosion- och skjuvlastscenarierna domineras av inväxt av Ra-226 som i huvudsak styrs av ackumulation av modernukliden Th-230, vilken fortgår ända tills slutet av analysperioden. Denna utveckling vid ett kapselbrott bedömer även SSM som sannolik. Risken som på detta sätt tas från den probabilistiskt beräknade riskkurvas maxvärde utgör det s.k. maximala medelvärdet.

SSM instämmer med SKB att riskutspädningskvot är ett bra verktyg för att adressera frågan om riskutspädning. Men det är värt att notera att de riskutspädningskvoter SKB beräknar endast är giltiga för kontinuerliga utsläpp eftersom pulsutsläpp inte har inkluderats i de probabilistiska beräkningar som är grunden till att räkna ut medelvärdet av de maximala värdena från de beräknade riskkurvorna för alla realiseringar. SSM är därför positiv till att SKB har tolkat kraven i bilaga 1 till SSMFS 2008:37 i ett matematiskt uttryck för att belysa risken förknippad med pulsutsläppen på ett mycket konservativt sätt i fall där riskutspädning är en realitet (se matematiskt uttryck ovan). SSM instämmer med SKB att det matematiska uttrycket för "ackumulerad korttidsrisk" som SKB har tagit fram kan användas för gränssättande hantering av riskutspädning samtidigt som det inte representerar risk i samma mening som den vanliga riskberäkningen eftersom uttrycket räknar en ackumulerad risk och inte en årlig risk. SKB:s redovisade resultat av en sådan



beräkning för korrosions- och skjuvlasts scenariona pekar på låg dos/risk (SKB TR-11-01, figur 13-70).

Även med hänsyn tagen till osäkerheter kring IRF (avsnitt 4.2) och kring total risk i samband med pulsutsläpp beräknad för ett integrerat system dvs. kontinuerligt utsläpp och pulsutsläpp bedöms den beräknade risken enligt SKB:s matematiska uttryck vid slutet av analysperioden vara i samma storleksordning som riskkriteriet för årlig risk till individer (SSM2011-2306-32). SSM anser att SKB:s analys också behandlar frågan som SSM tog upp i avsnitt 7.2.1.2 angående SKB:s argument om att försumma dosbidrag från pulsutsläpp av IRF i probabilistiska beräkningar. SSM bedömer därför att det enligt analysen i SR-Site finns förutsättningar för att ett planerat slutförvar uppfylla kravet på skydd av människors hälsa. SSM anser dock att SKB i samband med kommande säkerhetsanalyser behöver hantera pulsutsläpp i ett integrerat system, dvs att kontinuerliga utsläpp och pulsutsläpp hanteras tillsammans i en probabilistisk beräkning.

7.4.7 Risksummering

SSM:s föreskrifter och allmänna råd (SSMFS 2008:37) specificerar att risken från slutförvaret beräknas genom att väga samman riskbidragen från ett antal scenarier som tillsammans belyser mer eller mindre sannolika betydelsefulla förlopp i slutförvaret och i det omgivande berget. Den beräknade risken bör redovisas och värderas mot föreskrifternas kriterium för individrisk, separat för varje antagen klimatutveckling. Slutförvaret bör således kunna visas uppfylla riskkriteriet för de alternativa klimatutvecklingarna.

I detta avsnitt diskuteras SKB:s redovisning kopplade till en summering av riskbidragen från de analyserade scenarierna.

7.4.7.1 Underlag från SKB

SKB redovisar ett antal riskkurvor framtagna i analyserna av korrosions- och skjuvlasts scenarierna i figur 13-69 (SKB TR-11-01, avsnitt 13.9).

Beträffande korrosionsscenario har konsekvenser beräknats för sex korrosionsvarianter som en kombination av osäkerheter i erosionsprocesser och osäkerheter i den hydrogeologiska DFN-modellen. Osäkerheter förknippade med erosionsprocessen illustreras genom skillnaderna mellan två fall, fallet med erosionsmodellen i SR-Site och fallet med det mycket pessimistiska antagandet om initial advektion. Osäkerheter förknippade med den hydrogeologiska DFN modell illustreras av skillnaderna mellan fallen med de tre olika hydrogeologiska DFN-modellerna utifrån ett givet antagande om buffererosion. De tre fallen med olika hydrogeologiska DFN-modellerna är okorrelerade, semikorrelerade och helt korrelerade DFN-modeller. Korrosionsfallet med den semikorrelerade hydrogeologiska DFN-modellen och SR-Site:s erosionsmodell samt basfallet med avseende på transportförhållanden kallas för det centrala korrosionsbasfallet. Ytterligare fem fall för den centrala korrosionsvarianten har beräknats för att undersöka alternativa transportförhållanden och data. Men resultaten ingår inte i figur 13-69 (SKB TR-11-01) eftersom de alternativa transportförhållandena och data endast ger begränsade skillnader jämfört med det centrala korrosionsbasfallet.

Beträffande skjuvlasts scenariot har konsekvenser beräknats för två skjuvlastsvarianter vilka illustreras i figur 13-69 i SKB TR-11-01. De två skjuvlastsvarianterna är fallet med intakt buffert och fallet med advektiva förhållanden i deponeringshålet, tillämpat efter en pessimistiskt kort ansatt tid för att uppnå advektiva förhållanden genom buffererosion (10 000 år).



Summan av riskbidragen för skjuv- och korrosionsscenarioer med pessimistiska antaganden, dvs, skjuvlastsvarianter med advektiva förhållanden i deponeringshålet och korrosionsvarianter med korrelerad DFN-modell och initialt advektiva förhållanden i deponeringshålet, är 10 gånger lägre än riskkriteriet i slutet av analysperioden på en miljon år.

7.4.7.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB har redovisat risken enligt SSM:s föreskrifters krav genom att sammanväga beräknade riskbidrag från de analyserade scenarierna. SSM noterar att de summerade riskbidragen från analyserade scenarioer med mest pessimistisk antaganden har stor marginal till riskkriteriet. Men som nämns tidigare (avsnitt 7.4.4) har osäkerheter förknippade med SKB:s korrosionsmodell inte undersökts fullt ut. SSM anser att SKB behöver vidareutveckla metoden för att propagera osäkerheter i samband med analys av scenarioer på ett mer strukturerat och fullständigt sätt i kommande säkerhetsanalyser.

7.5 SSM:s bedömning av konsekvensanalysen

SSM:s bedömning utifrån granskningen av SKB:s konsekvensanalys är att det finns förutsättningar för att det planerade slutförvaret kan uppföras utan att det uppstår oacceptabla risker för människa och miljö på lång sikt. Bedömningen grundar sig på SSM:s granskning av SKB:s metodik, modeller, indata, LDF-värden och beräknade resultat för de scenarioer som SKB använder i säkerhetsanalysen och som redovisas nedan. SSM:s granskning och bedömning av konsekvensanalysen inkluderar inte SKB:s val av, och sannolikheter för, scenarioer. I kapitel 9 görs den sammantagna bedömningen av slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet.

7.5.1 Granskning av metodik och modeller

Granskningen av SKB:s metodik och modeller för konsekvensanalys har utförts genom dokumentgranskning med stöd av modellering både av SSM och av SSM:s externa experter (se avsnitt 7.1 och 7.2). SSM bedömer att SKB:s modeller för radionuklidtransport i när- och fjärrområdet är väl utvecklade och i linje med transportmodeller som används i konsekvensanalyser internationellt. SSM är positiv till att SKB använder alternativa modeller (MARFA och analytiska modeller) för att bekräfta de beräknade resultaten från de modeller som används i konsekvensanalysen i SR-Site. De biosfärsmodeller SKB använder är nya och utvecklade av SKB. SSM bedömer att de grundläggande elementen i SKB:s metodik för biosfärsmodellering och dosberäkning är förenliga med internationella riktlinjer för biosfärsmodellering. Men SSM bedömer att metodik och modeller är komplexa, bl.a. genom att de omfattar många steg. På grund av komplexiteten har SSM kompletterat dokumentgranskning med modellering och på det sättet kunnat granska SKB:s konsekvensanalys med en högre detaljeringsgrad. Modelleringen har omfattat reproduktion av SKB:s LDF-värden för att få inblick i den metodik och de modeller som har använts i SR-Site. Den har också omfattat beräkningar med alternativa modeller för att utforska konceptuell modellosäkerhet. Dessa två granskningsmetoder baserade på modellering ligger till grund för SSM:s slutliga bedömning av LDF-värden (se avsnitt 7.5.3).

7.5.2 Granskning av indata

Viktiga indata som SKB använder i konsekvensanalysen är radionuklid inventarium, bränslupplösningshastighet, löslighetsgräns, Kd- och diffusivitetvärden för bentonit och berg, Kd- och CR-värden för ytmiljö, och flödesrelaterade parametrar såsom transportmotstånd (F), advektiv transporttid (tw), och ekvivalent flödeshastighet (Qeq)



samt IRF (Instant Release Fraction). SKB:s känslighetsanalyser visar att scenariot för kapselbrott till följd av kopparkorrosion är mest känsligt för variationer i bränsleupplösningshastighet och F. Scenariot för kapselbrott till följd av skjuvlast är mest känsligt för variationer i bränsleupplösningshastighet. Den granskning som SSM:s externa experter gjort av SKB:s känslighetsanalys kommer fram till i stort sett samma resultat som SKB gör (SSM Technical note 2012:58).

7.5.2.1 Urval av radionuklider och aktivitetsinventarium

Med hjälp av externa experter har SSM genomfört en särskild granskning av SKB:s urval av radionuklider (avsnitt 7.3.1.2 i denna granskningsrapport). SSM gör bedömningen att SKB:s metod för urval av radionuklider för säkerhetsanalysen är lämplig och välmotiverad. För analysen av förvarets långsiktiga strålsäkerhet måste det anses mycket osannolikt att det finns betydande dosbidrag från nuklider som inte har beaktats. SSM bedömer också att SKB:s beräkning av aktivitetsinventarium för radionuklider i bränslematrisen är ändamålsenlig och att beräkningsresultaten är trovärdiga (se avsnitt 3.3.5.2). SSM bedömer att den variation som finns i osäkerhetsberäkningarna för aktivitetsinventariet är acceptabel för konsekvensberäkningarna i den långsiktiga säkerhetsanalysen för slutförvaret.

7.5.2.2 Bränsleupplösning

Såsom nämnts tidigare är bränsleupplösningshastigheten den mest känsliga parametern i konsekvensanalysen. För scenarier med kapselbrott på grund av korrosion konstaterar SSM att det är ett linjärt samband mellan bränsleupplösningshastigheten och beräknade effektiva doser. För dessa scenarier antar SKB att löslighetsgränser för radionuklider inte behöver beaktas med motiveringen att vattenflödet genom deponeringshålet ofta är för högt för att fasta faser ska fällas ut med undantaget fasta faser med uran. För andra scenarier, t.ex. för pin-hål scenariot finns inget linjärt samband mellan bränsleupplösningshastigheten och beräknade effektiva doser för vissa radionuklider eftersom att SKB beaktar löslighetsgränser för dessa radionuklider (SSM Technical note 2015:55). I avsnitt 5.1 bedömer SSM att den fördelning som SKB föreslår för bränslematrisens upplösningshastighet f , dvs. mellan 10^{-8} och 10^{-6} andelar per år, är försvarbar i detta steg av SKB:s program. Det finns dock enligt SSM ett antal osäkerheter både beträffande experimentella undersökningar och teoretiska förklaringsmodeller som SKB behöver adressera i kommande steg av programmet.

7.5.2.3 Hydrodata

Flödesrelaterade data som används i konsekvensanalysen har tagits fram med hjälp av de hydrogeologiska flödesmodellerna (SKB R-09-20). För att granska SKB:s flödesrelaterade data genomfördes en grundlig dokumentgranskning, kvalitetskontroll av SKB:s flödesmodellering och flera oberoende modelleringsstudier (se avsnitt 5.4.2 i denna granskningsrapport). De flödesrelaterade parametrar som beräknades av SSM:s externa expert är av samma storleksordning som de som SKB har beräknat (SSM Technical note 2012:67; 2015:40). SSM anser att flödesrelaterad data som beräknas baserat på 10 realiseringar för år 2000 AD och tre olika transmissivitets sprickstorleks-korrelationer är lämplig som indata till radionuklidtransportberäkningarna. Det gäller t.ex. för parametrarna F , tw och Q_{eq} . SKB anser att ett hydrogeologiskt system där vattenflödet i berget är begränsat till glest förekommande smala kanaler på sprickytorna skulle utgöra den alternativa variant av grundvattenflöde inom slutförvarsområdet som skiljer sig mest från modelleringen av vattenflödet i SR-Site. SSM delar denna uppfattning, men anser samtidigt att ytterligare undersökningar av det hydrogeologiska systemet från markytan inte nämnvärt kan minska osäkerheter vare sig kring denna alternativa variant eller kring spricknätverkets geometri i största allmänhet. SSM anser dock att osäkerheterna bör bli mer grundligt undersökta t.ex. inför en eventuell ansökan om provdrift av slutförvarsanläggningen.



SKB har använt diskreta värden (F , tw och Q_{eq}) upprepade gånger i multipla realiseringar av stokastiska simuleringar. SSM:s externa experter undersökte en annan strategi för stokastiska simuleringar med syfte att täcka ett brett spektrum för indatafördelningarna. Kumulativa fördelningsfunktioner för F , tw , och Q_{eq} fastställdes baserat på indata som presenterats av SKB. De stokastiska simuleringarna genomfördes genom att utföra kontinuerlig interpolering till ”sample” värden för indataparametrar. Resultaten presenteras i grafer och dessa visar en rimlig visuell överensstämmelse med SKB:s resultat när det gäller storlek och trender för beräknade effektiva doser från stokastiska simuleringar (SSM Technical note 2012:58).

7.5.2.4 Kd-värden för bentonit och berg

SSM har som underlag för sin bedömning av SKB:s hantering av sorption genomfört två externa expertgranskningar (se avsnitt 7.3.3.2). SSM:s granskning innefattade både sorption på bentonitlera och berg med större fokus på berg. Anledningen till denna inriktning är att SSM bedömde att osäkerheterna för sorption på berg är mera betydande eftersom detta är ett mera heterogent och svårkaraktäriserbart material. SSM:s fördjupade granskning skulle dels täcka in något eller några radionuklider för vilka platsspecifika mätningar har genomförts, dels något eller några radionuklider för vilka K_d -värden i huvudsak har baserats på litteraturdata. Vissa osäkerheter har identifierats t.ex. med avseende på kontroll av redoxbetingelser under labförsök samt för metoder för korrektion av reaktiva ytor efter krossning av bergprover. SSM bedömer dock att de identifierade osäkerheterna inte är av den karaktären att de på ett väsentligt sätt undergräver tilltron till de intervall av K_d -värden som SKB föreslår. Denna slutsats har baserats på att SKB bedöms ha använt ett flertal konservativa antaganden och de har även beaktat och inkluderat information som finns tillgänglig i den vetenskapliga litteraturen.

7.5.2.5 Kd och CR-värden för biosfären

En grundlig granskning av K_d - och CR -värden har genomförts, vilken baseras på externa expertgranskningar samt SSM:s oberoende beräkningar med avseende på ett antal tveksamma K_d -värden (se avsnitt 7.3.4.2). SKB:s inriktning är att ta så stor hänsyn som rimligt möjligt till platsspecifika data, samtidigt som generiska data från litteratursammanställningar beaktas som ett komplement med varierande inflytande på parametervärdena beroende på hur mycket platsspecifika data som finns för respektive parameter. SSM bedömer att detta är en lämplig inriktning. SSM har beräknat LDF-värden med 5:e och 95:e percentilen av fördelningar av K_d -värden, som sammanställts utifrån IAEA:s K_d databas, för att utvärdera effekten av de tveksamma K_d -värdena på den beräknade dosen. Vid denna utvärdering påverkades LDF-värdena (och därmed doserna från motsvarande nuklid) endast marginellt. SSM:s bedömning är därför att det är osannolikt att en alternativ tillämpning av tillgängliga data eller att en ökad tillgång på platsspecifika data för K_d - och CR -värden kommer att få en så stor inverkan på valda parametervärden och beräknade LDF-värden, så att de övergripande resultaten av konsekvensanalysen förändras avsevärt.

7.5.2.6 Löslighetsgränser för radionuklider

SSM granskade SKB:s hantering av lösligheter för radioaktiva ämnen med hjälp av två externa expertgranskningar (se avsnitt 7.3.2.2). SSM:s granskning fokuserar på SKB:s beräkningsmetoder och datahantering. SSM har vidare genomfört ett antal oberoende beräkningar för att verifiera ett urval av SKB:s resultat. Löslighetsgränser har en begränsad betydelse i SR-Site eftersom SKB har avstått från att använda dessa för scenariot korrosion med advektiva förhållanden i deponeringshålen. SSM bedömer att detta är ett lämpligt val med tanke på de osäkerheter som finns kring vilken betydelse en avsaknad av buffertens filtreringsförmåga skulle kunna ha. I motsats till beräkningsfallen för korrosionsscenarioet ingår däremot löslighetsgränser i basfallet för skjuvlastscenariot eftersom bufferten fortfarande ger ett bidrag till strålsäkerheten även efter att en betydande skjuvning har ägt rum. SKB har dock för jämförelsens skull tagit fram ett beräkningsfall

för skjuvlastscenariot utan buffert, dvs. i vilket varken sorption eller löslighetsgränser ingår i beräkningarna. Resultatet blev en måttlig ökning av den genomsnittliga dosen med en faktor två i jämförelse med basfallet. SSM bedömer att trots att beräkning av löslighetsgränser har liten eller ingen betydelse för de scenarier som dominerar beräknade riskbidrag i SR-Site, bör SKB höja sin ambitionsnivå kring dokumentation av beräkningar kopplade till löslighetsgränser för radionuklider. Detta beror på att löslighetsgränser har betydelse som alternativ säkerhetsfunktion i förhållande till begränsad bränsleupplösning och har betydelse för alternativa beräkningsfall som t.ex. innefattar hypotetiska förluster av barriärfunktioner och scenarier för mänsklig påverkan/intrång.

7.5.2.7 IRF

SSM konstaterar att trots god kännedom om korrelationen med utsläpp av fissionsgaser, finns det få tillgängliga direkta mätdata av radionuklider som ingår i IRF (se avsnitt 4.2.1.2). Detta har hittills omöjliggjort en fullständig verifikation av relationen mellan pulsutsläpp av gap- och korngränsinventariet och utsläpp av fissionsgaser. SSM bedömer dock att de parametervärden som SKB föreslår ändå är godtagbara och osäkerheterna bedöms vara begränsade. SSM bedömer vidare att SKB:s argumentation för att försumma IRF pulsutsläpp i probabilistiska beräkningar av en årlig medelvärdesrisk är rimlig. Men SSM anser att härledningen av sannolikheten för exponering per definition kan innebära riskutspädning. En detaljerad granskning av riskutspädning redovisas i avsnitt 7.4. SSM bedömer att SKB:s övergripande slutsats, att riskutspädningen inte är en fråga som riskerar att kullkasta de generella slutsatserna om tillräckligt skydd för människors hälsa i SR-Site, är motiverad. Denna bedömning baseras på de gränssättande beräkningar av "ackumulerad kortsiktig risk" som SKB redovisar i SR-Site. Dock anser SSM att SKB behöver hantera pulsutsläpp i ett integrerat system, dvs. att kontinuerliga utsläpp och pulsutsläpp inte hanteras separat i kommande säkerhetsanalyser.

7.5.2.8 Matrisdiffusion och diffusion i buffert och återfyllnad

SSM:s granskning av matrisdiffusion har delvis baserats på synpunkter från extern expertis (se 7.3.5.2). I SSM Technical Note 2012:44 beskrivs exempelvis frågor kring elektriska mätmetoder och betydelsen av begränsat penetrationsdjup för matrisdiffusion. SSM har efter granskningen begärt kompletterande information om dessa frågor. I kompletteringen anger SKB att felkällan för de elektriska mätmetoderna kan ha viss betydelse men att de experimentella resultaten sammantaget pekar på relativt små osäkerheter. SKB redovisar ett fall med ett hypotetiskt antaget maximalt penetrationsdjup på 10 cm för matrisdiffusion i samband med radionuklidtransportberäkningar i berg. SSM bedömer att felkällorna är väl utredda och av begränsad omfattning, med reservationen för att felkällan kopplad till elektronisk och elektrolytisk ledning vid ledande mineralkorn är den svåraste att gränssätta. SSM bedömer även att SKB på ett acceptabelt sätt har visat att ett begränsat penetrationsdjup i bergmatrisen inte har någon avgörande påverkan på risk/dosberäkningar.

7.5.3 Granskning av LDF-värden

Doser för varje givet scenario beräknas genom att multiplicera LDF-värden med modellerade utsläpp från geosfären. SKB:s metodik för biosfärsmodellering i SR-Site är komplex, och innehåller många beräkningssteg och modeller, som stöds av ett stort antal rapporter. Granskningen av LDF-värden genomfördes genom en grundlig dokumentgranskning och flera oberoende modelleringsstudier av såväl externa experter som SSM:s egen personal (se avsnitt 7.1.2.2, 7.2.2.2 och 7.4.4.2). SSM har identifierat några frågor kring osäkerhetsanalysen av SKB:s biosfärsmodellering och härledning av LDF-värden. SSM:s slutsats är att SKB:s biosfärsmodellering och dosberäkningar i allmänhet är mycket bra vad gäller biosfärsbeskrivningar, men att kvaliteten på arbetet med dosberäkningar har svagheter. Dessa består främst av bristande dokumentation och kvalitetssäkringsproblem, vilket inte bidrar till att bygga upp förtroendet för kvaliteten på

utfört arbete. Med hjälp av modellering som bygger på enkla referensbiosfärsmodeller och alternativ modellering har SSM dock analyserat osäkerheterna i LDF-värdena och kan dra slutsatsen att de LDF-värden som SKB har härlett är rimliga. SSM anser att SKB:s LDF-modellering är konservativ genom att SKB använder den högsta dosfaktorn som modellerats i alla objekt och för alla tidpunkter. Ytterligare en orsak till denna bedömning är att SKB:s dosberäkningsmodell inkluderar konsumtion av grundvatten från en djup brunn, vilket utgör en dominerande exponeringsväg i många fall. Detta bidrar till att kompensera för några av svagheterna i dosberäkningsmodellerna. SSM förväntar sig att SKB:s standard för radiologiska beräkningsmodeller kommer att förbättras i kommande säkerhetsanalyser, särskilt med avseende på tydligheten i dokumentationen och motiveringar till modelleringsmetoder/antaganden.

7.5.4 Granskning av valda scenarier och restscenarier

Granskningen av SKB:s beräknade resultat utifrån SKB:s valda scenarier och restscenarier har genomförts baserat på oberoende modelleringar utförda av såväl externa experter som SSM:s egen personal (se avsnitt 7.4). SSM:s egna beräknade resultat stämmer väl överens med SKB:s beräkningar. Ett antal av SKB:s beräkningsfall för de flesta av SKB:s restscenarier och tillhörande ”what-if”-beräkningsfall har reproducerats av SSM:s externa experter. Resultaten från de externa experternas beräkningar ligger inom en faktor 2-5 jämfört med SKB:s resultat vid tidpunkten för maximal dos (SSM Technical note 2014:33, 2014:55). Därför bedömer SSM att SKB:s beräknade resultat för valda scenarier och restscenarier är rimliga.

SSM:s bedömning av SKB:s sannolikhetsfördelningar för valda scenarier ligger utanför detta kapitel (se kapitel 9 i denna granskningsrapport). En granskning av SKB:s beräknade värden för sannolikheter för två valda scenarier och kapselbrottstider för korrosionsfallet har dock utförts av SSM (se avsnitt 7.4.1.2) med stöd från SSM:s externa experter (SSM Technical Note 2015:49). Baserat på modeller och data som ges i SR-Site är SSM:s oberoende beräkningar av sannolikheter för de två valda scenarierna i god överensstämmelse med SKB:s resultat (se avsnitt 7.4.1.2). De externa experterna har reproducerat SKB:s beräkningar för bufferterosion. Det genomsnittliga antalet erosionspositioner med 10 realiseringar beräknade utifrån SKB:s analys jämförs med den oberoende analysen för den semikorrelerade DFN-modellen och resultaten överensstämmer med varandra (SSM Technical Note 2015:49). Utgående från denna granskning bedömer SSM att SKB:s beräkningar för sannolikheter, för de två valda scenarierna och för kapselbrottstiderna för korrosion, är rimliga med de data som SKB använder i SR-Site.

7.5.5 Behov av förbättringar

Nedan bedömer SSM vad SKB behöver förbättra i kommande säkerhetsanalyser med avseende på exempelvis metoder för konsekvensanalys av valda scenarier för skydd av människa och miljö.

I avsnitt 7.1.1.2 nämner SSM att SKB:s metodik för konsekvensanalys innebär att dosberäkningarna är frikopplade från modellen för när- och fjärrområdet. SSM anser att detta förfaringssätt har både för- och nackdelar. Fördelen är att konsekvensanalysen för olika scenarier underlättas. Nackdelen är att en rad frågor och processer som är viktiga för konsekvensanalysen blir svåra att analysera. SSM anser att SKB behöver kombinera metodiken för konsekvensanalys med ett integrerat beräkningssystem i kommande säkerhetsanalys, t.ex. genom att kontinuerliga utsläpp och pulsutsläpp hanteras integrerat, så att en riskutspädningskvot, som härleds från ett integrerat beräkningssystem, används och inväxt från modernuklider kan hanteras på ett lämpligt sätt.



I avsnitt 7.1.2.2 nämner SSM att SKB:s metodik för biosfärsanalyser i SR-Site är komplex och omfattar många steg. SSM anser att SKB behöver förbättra redovisningen av biosfärsanalysen och använda alternativa modeller för att undersöka biosfärsanalysresultat i kommande säkerhetsanalyser.

SSM anser att SKB behöver utveckla en tydligare beskrivning av metoden för att välja ut beräkningsfall för analysen av valda scenarier, så att analysen tillräckligt väl kan visas täcka in relevanta beräkningsfall i kommande säkerhetsanalyser.

8. Restscenarier för mänskliga handlingar

SSM bedömer i detta kapitel SKB:s hantering av framtida mänskliga aktiviteter inverkan på ett slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark. SSM:s utvärdering av SKB:s strategi för mänskligt intrång omfattar en utvärdering av scenariernas lämplighet och en kontroll av redovisade konsekvensberäkningar. Kapitlet inleds med en övergripande bedömning av SKB:s strategi för hantering av framtida mänskliga handlingar vilken även ligger till grund för en efterföljande scenariobeskrivning. Därefter följer mer detaljerade bedömningar av följande punkter:

- utvärdering av framtida mänskliga aktiviteter i samband med ett övergivet oförslutet förvar
- utvärdering av direkta och indirekta framtida mänskliga aktiviteter vid ett förslutet förvar
- strategi för förebyggande åtgärder mot framtida mänskliga aktiviteter

Enligt 9 § i SSMFS 2008:37 ska konsekvenserna av ett intrång i ett slutförvar redovisas för de olika relevanta tidsperioderna och slutförvarets skyddsförmåga efter intrång ska redovisas. I de allmänna råden till 4, 8 och 9 §§ i SSMFS 2008:37 rekommenderas att hänsyn bör tas till möjligheten att begränsa sannolikheten för, och konsekvenserna av, oavsiktlig framtida mänsklig påverkan på slutförvaret t.ex. oavsiktligt intrång. Vidare bör en strategi för informationsbevarande tas fram så att åtgärder kan vidtas inför förslutning av slutförvaret. Exempel på information som bör beaktas är uppgifter om slutförvarets läge, innehåll av radioaktiva ämnen och konstruktion.

Enligt 9 § i SSMFS 2008:21 ska säkerhetsanalysen omfatta förhållanden, händelser och processer vilka kan leda till spridning av radioaktiva ämnen efter förslutning. Enligt de allmänna råden till 9 § och bilaga i SSMFS 2008:21 bör restscenarier för mänskliga handlingar omfatta fall för att belysa konsekvenserna av ett ej förslutet slutförvar som lämnats utan övervakning samt fall för att åskådliggöra skador på människor som gör intrång i slutförvar.

5-7 §§ i SSMFS 2008:37 ställer krav på skydd av människors hälsa och miljön. I de allmänna råden till 5-7 §§ i SSMFS 2008:37 rekommenderas att bedömningen av slutförvarets skyddsförmåga bör baseras på en lämplig uppsättning scenarier. Vidare definieras scenarier för framtida oavsiktlig mänsklig påverkan på slutförvaret som bör redovisas. Scenarierna bör omfatta ett fall av direkt intrång i samband med borring i förvaret, och några exempel på andra aktiviteter som indirekt försämrar säkerhetsfunktionerna, t.ex. genom att förändra de hydrologiska eller grundvattenkemiska förhållandena i slutförvaret eller dess omgivning. Urvalet av intrångsscenarioer bör baseras på dagens levnadsvanor och tekniska förutsättningar, och ta hänsyn till slutförvarets egenskaper. Konsekvenserna för det störda slutförvarets skyddsförmåga bör illustreras med beräkningar av stråldoser för individer i den mest exponerade gruppen, och redovisas separat utanför riskanalysen för det ostörda slutförvaret. Resultaten bör användas för att belysa tänkbara motåtgärder och ge ett underlag till tillämpning av bästa möjliga teknik.

Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om arkivering vid kärntekniska anläggningar (2008:38) beskriver överskådligt i Bilaga 1 vilken dokumentation som ska sparas respektive kan gallras. Vidare hänvisar SSMFS 2008:38 i stor utsträckning till Riksarkivets föreskrifter publicerade i Riksarkivet författningssamling (RA-FS).

8.1 Allmänt om framtida mänskliga handlingar

Framtida mänskliga handlingar riskerar att leda till spridning av radioaktiva ämnen, exempelvis om slutförvaret penetreras genom borrning. Framtida handlingar kan även inverka på slutförvarets skyddsförmåga indirekt, exempelvis genom tunnelbyggen i närheten av slutförvaret som skulle kunna påverka de hydrogeologiska eller grundvattenkemiska betingelserna. Därmed kan framtida mänskliga handlingar leda till förändringarna i förutsättningarna för slutförvarets skyddsförmåga.

Framtida mänskliga handlingar kan kategoriseras som avsiktliga eller oavsiktliga. De allmänna råden till SSMFS 2008:37 ger uttryck för att endast oavsiktliga mänskliga handlingar bör ligga till grund för scenarier för att beräkna doskonsekvenser. De allmänna råden till SSMFS 2008:21 behandlar inte frågan om intrång görs avsiktligt eller inte i rekommendationen att skador på människor som gör intrång i slutförvar bör redovisas.

Anledningen till att SSM inte ställer krav på redovisning av scenarier som grundar sig i avsiktliga intrång är att sådana scenarier skulle bli spekulativa både vad gäller sannolikhet och konsekvenser. Detta synsätt stämmer överens med befintliga internationella riktlinjer (en sammanställning av dessa görs i SKI Rapport 2008:19, bilaga 3; se även ICRP 2013, avsnitt 4.6.2). Det finns i dagsläget internationella avtal som ska säkerställa att befattning med kärnämne endast sker i fredligt syfte, s.k. safeguards. Sådana krav förväntas även bli tillämpliga på en slutförvarsanläggning i drift samt ett slutligt förslutet förvar för använt kärnbränsle.

8.1.1 Underlag från SKB

SKB:s hantering av framtida mänskliga handlingar FHA ("Future Human Actions") beskrivs i FHA-rapporten (SKB TR-10-53) med en sammanfattning i SR-Site huvudrapport (avsnitt 14.2). Centralt i FHA-rapporten är tiden efter att institutionell kontroll inte är verksam, eftersom risken för oavsiktligt mänskligt intrång då ökar. Huvuddelen av FHA-rapporten har baserats på SKB:s redovisning av FHA inför säkerhetsredovisningen av SR-Can (SKB TR-06-24) med tillägg av scenariot ofullständigt förslutet förvar samt beräkning av skador på människor som gör intrång i förvaret. Denna rapport (SKB TR-06-24) har i sin tur huvudsakligen baserats på en engelsk översättning av rapporten R-98-54.

Beträffande platsvalet och förvarsutformningen bedömer SKB att de har beaktat tillgängliga möjligheter att begränsa sannolikheten för framtida avsiktliga eller oavsiktliga mänskliga handlingars effekter på slutförvaret genom att förlägga förvaret i en vanligt förekommande bergartstyp utan naturresurser, genom att förlägga förvaret på ett djup som generellt sett är förbehållet gruvindustrin samt genom att ha avsikten att slutligt försluta förvaret, vilket försvårar framtida mänskliga intrång. Genom förvarets utformning anser SKB att det finns förutsättningar att bygga slutförvaret på ett sådant sätt att väsentliga restriktioner på den framtida markanvändningen inte blir nödvändiga (SKB TR-10-53, avsnitt 2.4). Detta ligger i linje med ICRP:s rekommendationer med innebörden att intrång efter slutlig förslutning primärt förhindras genom utformningen av slutförvaret (ICRP, 2000). SKB uppger även att de planerar att vidta åtgärder för informationsbevarande och



överföring till framtida generationer och för att upprätthålla övervakning av förvaret så länge som möjligt (SR-Site huvudrapport, avsnitt 14.2.1).

En summering av SKB:s strategi för analys och hantering av FHA ges i SR-Site huvudrapporten (avsnitt 14.2.2). Strategin består av fyra steg:

- En teknisk analys för att identifiera mänskliga handlingar som kan påverka förvarets säkerhetsfunktioner. Denna beskriver sådana handlingar och ger en teknisk motivering till varför de kan förekomma. Baserat på aktiviteternas huvudsakliga påverkan delar SKB in FHA i olika kategorier: termisk (T); hydraulisk (H); mekanisk (M); kemisk (C).
- En analys av samhällsfaktorer för att identifiera s.k. ramsscenarier som beskriver tänkbara samhällsförhållanden som kan leda till framtida mänskliga handlingar som kan påverka ett slutförvars radiologiska säkerhet.
- Sammanställning av teknisk och samhällsvetenskaplig analys, vilket används för att välja ett eller flera representativa scenarier för att beskriva mänskliga handlingar.
- Fördjupad beskrivning och konsekvensanalys av de valda scenarierna.

Detta arbete har resulterat i att SKB tagit fram flera FHA scenarier vilka utgörs av ett fall med ett oförslutet eller ofullständigt förslutet förvar samt tre fall med ett förslutet förvar: (i) direkt påverkan, (ii) intrång genom borring, samt (iii) indirekt påverkan. Det sistnämnda fallet exemplifieras med uppförandet av en berganläggning ovanför förvaret samt gruvbrytning i närheten av förvaret.

8.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s arbetssätt för identifiering av FHA scenarier har resulterat i ett antal rimligt representativa fall som kan inverka på förvarets säkerhetsfunktioner. Dessa fall bedöms vara i linje med myndighetens föreskrifter och allmänna råd. Myndigheten anser även att SKB under platskaraktäriseringen av slutförvarsplatsen i tillräcklig omfattning visat att kandidatområdet huvudsakligen består av granitiska berggrund har försumbar malmpotential. SSM konstaterar dock att dessa slutsatser behöver verifieras under en eventuell kommande uppförandefas (avsnitt 3.1.2 i denna rapport). Beträffande val av förvarsdjup instämmer SSM med SKB att det valda förvarsdjupet är godtagbart med hänsyn till behovet att minimera risk för oavsiktliga mänskliga intrång i slutförvaret (avsnitt 3.2.9). Baserat på dessa slutsatser bedömer SSM att SKB även följt myndighetens allmänna råd med avseende på bästa möjliga teknik i förhållande till mänsklig påverkan (SSMFS 2008:37, AR till 4,8,9 §§).

SSM har i granskningen utgått från SKB:s redovisning som sammanfattas ovan. Förutom detta material har SSM i granskningen av SR-Site beaktat resultat från granskningen av FHA som togs fram vid SSI:s och SKI:s granskning av SR-Can (SKI Rapport 2008:19).

SSM bedömer att SKB:s tekniska analys av FHA är tillräckligt omfattande för att identifiera de viktigaste typerna av mänskliga aktiviteter som väsentligt kan påverka förvarssystemet. SKB presenterar även en analys av samhällsfaktorer som kan påverka framtida mänskliga handlingar. Denna analys drar slutsatsen att vissa samhälleliga omständigheter, som rör samhällsutveckling, förlust av kunskap om slutförvaret och allmän vetenskaplig och teknisk kunskap, kan medföra en förhöjd risk för framtida mänskligt oavsiktligt intrång. SSM delar SKB:s bedömning kring vilka omständigheter som har en relevans för framtida mänskliga intrång. I likhet med den bedömning som myndigheterna gjorde vid den tidigare granskningen av SR-Can (SKI Rapport 2008:19, avsnitt 14.2) anser SSM att den exakta kedjan av händelser som resulterar i ett intrång av nödvändighet blir mycket spekulativ och har mindre betydelse. Det är mera betydelsefullt



att kunna bedöma effekter av olika typer av mänskliga aktiviteter på slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet. SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s principiella hantering av scenarier för mänskliga handlingar och intrång följer myndigheternas föreskrifter.

8.2 Övergivet oförslutet slutförvar

I de allmänna råden till SSMFS 2008:21 9§ rekommenderas att fallet med ett oförslutet slutförvar som lämnas utan övervakning belyses som ett restscenario. I detta avsnitt finns en beskrivning av SKB:s analys och SSM:s bedömning av detta fall.

8.2.1 Underlag från SKB

Fallet med ett oförslutet förvar utgår ifrån att deponeringstunnlarnas pluggar med tiden förlorar sin funktion, vilket kan leda till en minskning av buffertdensiteten i upp till fem deponeringshål närmast stamtunneln. De öppna bergvolymerna utanför deponeringstunnlarna främjar även syresättningen av grundvattnet på förvarsdjup (SKB TR-10-53, avsnitt 6.6.3). Detta påverkar flera säkerhetsfunktioner som att: (i) kapseln ska utgöra en korrosions barriär (Can1), (ii) buffertens densitet ska begränsa mikrobiell aktivitet och advektiv transport (Buff1 och Buff2), (iii) återfyllnaden ska motverka buffertexpansion (BF1), (iv) geosfären ska tillhandahålla gynnsamma kemiska, hydrologiska och transportrelaterade förhållanden (R1 och R2) (SR-Site huvudrapport, avsnitt 14.2.8).

Fallet med ett ej förslutet slutförvar utgår ifrån att alla kapslar har deponerats och alla deponeringstunnlar har återfyllts och förslutits, medan alla övriga förvarsvolymer fortfarande är öppna. SKB bedömer att det är mindre sannolikt att förvaret skulle överges mitt i processen med kapseldeponering, och anser därför att detta scenario är troligare än ett oförslutet förvar med ofullständigt förslutna deponeringstunnlar. Därtill skulle det sistnämnda scenariot innebära att kapslar lämnas kvar på markytan vilket skulle utgöra en större risk än om de först deponerades i förvaret (SKB TR-10-53, avsnitt 6.6.1). SKB:s analys antar vidare att pluggen i en intilliggande deponeringstunnel går förlorad och att omfattningen av svällningen från alla dessa tunnlar är ungefär lika stor. SKB anger att en situation där endast en plugg tas bort skulle leda till att några kapslar till i deponeringstunneln utsätts för en återfyllnadsdensitet som är lägre än konstruktionsförutsättningen. SKB anger vidare att detta inte skulle ha någon betydelse för det tillämpade beräkningssättet.

SKB har även undersökt vilken hydraulisk effekt de öppna bergvolymerna i ett oförslutet förvar har jämfört med ett förslutet förvar (SKB R-10-41). Undersökningen baseras på ett fall med tempererade förhållanden och ett fall med glaciala förhållanden. SKB:s resultat indikerar att under den tempererade fasen sker en mindre ökning av Darcyflödet vid deponeringspositionerna. Den generella flödesriktningen under den temperade fasen styrs av inströmning via ventilationsschakten i deponeringsområdena och utströmning via rampen och schakten ovanför centralområdet mot markytan. Denna generella flödesriktning reverseras under glaciala förhållanden och närvaron av isfronten ovanför förvaret leder till kraftigt höjda vattenflöden i de öppna bergvolymerna och en kraftigare ökning av Darcyflödet vid deponeringshålspositionerna.

SKB redovisar stiliserande beräkningar för att åskådliggöra konsekvenser för kapselkorrosion som orsakas av syre upplöst i vattnet i de öppna förvarsvolymer. Beräkningarna har baserats på antagandet att vattnet i de återfyllda deponeringstunnlarna ovanför ett deponeringshål är mättad med löst syre och att syret når kapsellocket genom diffusion genom det 1,5 m tjocka ovanliggande lagret av bentonitbuffert (SKB TR-10-53,

avsnitt 6.6.3 och Bilaga B). Diffusion av syre genom bentonitbufferten förutsätts antingen äga rum genom en tvärsnittsarea motsvarande deponeringshålets diameter eller genom en tvärsnittsarea som motsvarar kapsellokets diameter. I dessa beräkningsfall antas vidare att syrekoncentrationen ovanför deponeringshålet antingen motsvarar syrekoncentrationen i glacialt smältvatten ($1,5 \text{ mol/m}^3$; SKB TR-10-57, avsnitt 5.7) eller syrekoncentrationen i jämvikt med syre atmosfären ($0,3 \text{ mol/m}^3$; TR 10-53, avsnitt 6.3). Dessutom har SKB i sina beräkningar utgått från två olika värden på den effektiva diffusiviteten; en representativ för diffusion av syre genom bufferten och en representativ för diffusionen i fritt vatten. SKB:s beräkningar visar att bara under glaciala förhållanden med antagandet att den effektiva diffusiviteten är hög kommer kapselns integritet att gå förlorad under de första 100 000 åren (SKB TR-10-53, tabell B-3). Beroende på vilken tvärsnittsarea som är tillgänglig för syrediffusionen förväntas det ta mellan 20 000 till 60 000 år innan kapseln fallerar som ett resultat av korrosionsangrepp. SKB betonar att denna tid ska ses som en pessimistisk uppskattning eftersom beräkningsfallet under glaciala förhållanden bygger på flera konservativa antaganden gällande bl.a. storleken och riktningen på den hydrauliska gradienten samt att syre inte utarmas utan att koncentrationen förblir konstant under mycket långa tidperioder (SKB TR-10-53, avsnitt 6.6.5).

SKB har analyserat radionuklidutsläpp och doskonsekvenser för ett ofullständigt förslutet förvar. Denna analys har baserats på att korrosionsbrott sker för en kapsel i ett deponeringshål vars omgivande berg skärs av en spricka med betydande grundvattenflöde. Detta förutsätts inträffa under nästa glaciation, vilket enligt referensglaciationen är om runt 60 000 år. Efter kapselbrott transporteras läckande radionuklider via rampen och schakten ovanför centralområdet upp mot markytan. Detta vatten brukas sedan för konstbevattning och som dricksvatten av människor bosatta inom området. Den beräknade totala effektivdosen sjunker efter de första 1 000 åren efter kapselbrott från $56 \mu\text{Sv}/\text{år}$ till $25 \mu\text{Sv}/\text{år}$ under tiden fram till nästa glaciation om omkring 90 000 år (SKB TR-10-53, figur 6-19). Dessa doser motsvarar en risk som överstiger SSM:s riskkriterium för skydd av människors hälsa. Jämfört med bakgrundsstrålningen på cirka $1 \text{ mSv}/\text{år}$ är dock den ovan beräknade totala effektivdosen cirka två storleksordningar lägre och cirka 20 fallerade kapslar krävs för att den totala effektivdosen ska bli jämförbar med bakgrundsstrålningen (SKB TR-10-53, avsnitt 6.6.4).

8.2.2 SSM:s bedömning

SSM anser sammanfattningsvis att SKB:s scenario för att belysa effekten av ett oförslutet övergivet slutförvar kan anses vara rimligt väl underbyggt och godtagbart med bakgrund av SSM:s föreskriftskrav (SSMFS 2008:21, AR till 9 §). SSM bedömer att SKB:s hydrogeologiska modellering för fallet är väl beskriven och att SKB:s resultat från beräkningarna av konsekvenserna av ett övergivet inte fullständigt förslutet förvar är rimliga.

SSM har i granskningen förutom SKB:s redovisning beaktat det granskningsarbete som har utförts av externa experter på uppdrag av SSM (SSM Technical Note 2015:41).

SSM bedömer baserat på en extern expertgranskning att den hydrogeologiska modelleringen för fallet med oförslutna deponeringstunnlar är väl genomförd (SSM Technical Note 2015:41). SSM:s externa expert diskuterar effekten av att endast en deponeringstunnel lämnas oförsluten och ofullständigt återfylld och kommer, likt SKB, till slutsatsen att fler kapslar i en enskild deponeringstunnel skulle påverkas av en återfyllnadsdensitet som är lägre än konstruktionsförutsättningarna jämfört med antalet kapslar per tunnel för fallet att närmast liggande tunnlar saknar pluggar (SSM Technical Note 2015:41). SSM noterar att det är möjligt att konstruera ett scenario med ett visst antal

pluggar som plockas bort och leder till att fler kapslar påverkas av låg återfyllnadsdensitet i jämförelse med det av SKB definierade scenariot.

SSM konstaterar att huvudsyftet med att inkludera ett scenario för ett oförslutet övergivet slutförvar är att illustrera betydelsen av att en slutlig förslutning av slutförvaret verkligen kommer till stånd. Därutöver noterar SSM att scenariot är spekulativt och att det därmed är möjligt att definiera ett stort antal möjliga skeenden. SKB har baserat sin analys på flera konservativa antaganden gällande syretillförsel till kapselytan där det enklaste beräkningsfallet helt negligerar transportmotståndet i både buffert och återfyllnad (SKB TR-10-53, tabell B-3). SSM bedömer att SKB har illustrerat betydelsen av materieöverföring med ett godtagbart scenario. SSM har genomfört egna överslagsberäkningar baserat på SKB:s redovisning och har erhållit resultat som skiljer sig något från SKB:s, samtidigt som SSM är osäker på hur vissa detaljerade antaganden i SKB:s beräkningar har formulerats. Skillnaderna är dock inte så stora att de är betydelsefulla för slutsatserna. SKB:s övergripande slutsats är att slutförvaret inte bör överges innan det är slutligt förslutet och att riskkriteriet inte kan uppfyllas för det antagna scenariot. Mot bakgrund av scenariots syfte och SKB:s valda scenarier och tillhörande slutsatser bedömer SSM att SKB:s redovisning av ett oförslutet slutförvar som lämnas utan övervakning är i linje med SSM:s rekommendationer i allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21.

8.3 Mänskligt intrång på förvaret

Oavsett samhällsutveckling så går det inte på lång sikt att garantera att kunskap om förvaret kan bevaras för all framtid. En sådan urholkning av samhällets medvetenhet om förvaret, både på nationell och på lokal nivå, kan medföra en framtida oavsiktlig mänsklig påverkan på slutförvaret. SKB:s tekniska analys har visat att de mänskliga handlingarna som har störst potential att påverka förvarets säkerhetsfunktioner är borrhning till stora djup och/eller berguttag. I SR-Site redovisar SKB en utvärdering av konsekvenserna av följande fall: (i) direkt påverkan genom ett intrång i förvaret genom borrhning, (ii) indirekt påverkan genom uppförandet av en tunnel ovanför förvaret, samt (iii) indirekt påverkan genom uppförandet av gruva i förvarets omedelbara närhet.

8.3.1 Konsekvenser av oavsiktliga mänskliga intrång som involverar genomborrhning av en kopparkapsel

För att kunna leva upp till föreskrifternas krav på redovisning av konsekvenser av intrång i ett slutförvar erfordras en konkretisering av intrånget eftersom det annars inte är möjligt att härleda tänkbara doskonsekvenser för berörda individer. SKB har i SR-Site belyst hur ett intrång pga. genomborrhning av en kapsel påverkar berörda individer. I detta avsnitt redogörs för SKB:s beskrivning och SSM:s bedömning av detta fall.

8.3.1.1 Underlag från SKB

Flera säkerhetsfunktioner påverkas av en genomborrhning; (i) kapseln ska utgöra en korrosions barriär (Can1), (ii) buffertens densitet ska begränsa advektiv transport (Buff1), (iii) återfyllnaden ska motverka buffertexpansion (BF1), (iv) geosfären ska tillhandahålla gynnsamma kemiska, hydrologiska och transportrelaterade förhållanden (R1 och R2) (SR-Site huvudrapport, avsnitt 14.2.5).

Hur lång tid det skulle kunna ta innan förvaret kan helt falla i glömska är svårt att avgöra och flera åtgärder planeras för att så långt som möjligt förhindra en sådan utveckling (avsnitt 8.4 i denna granskningsrapport). Mot bakgrund av de planerade motåtgärderna bedömer SKB att det är ett rimligt antagande att det tar minst 300 år efter förslutningen (SKB TR-10-53, avsnitt 6.3.1). SKB har utvärderat konsekvenser av att en kapsel



genomborras (SKB TR-10-53, avsnitt 6.3 ; SR-Site huvudrapport, avsnitt 14.2.5). I borrhningsscenario utgår SKB ifrån att kunskap om förvaret har gått förlorad och att de som gör intrång inte är medvetna om vilka konsekvenser deras borrhningsaktiviteter kan medföra. Strax efter upptag av en borrhkärna med radioaktivt material avslutas borrhningen och runt en månad senare flyttar en familj till borrhplatsen och använder det öppna borrhålet som vattenkälla. Med utgångspunkt från detta scenario har SKB beräknat den stråldos som borrhningspersonalen utsätts för i samband med penetration och upptag av använt kärnbränsle samt den stråldos som en familj som bosätter sig på den övergivna borrhplatsen utsätts för.

SKB redovisar en medelkapsels radionuklidinnehåll efter 300 år (SKB TR-10-53, tabell 6.1). Vid beräkning av frigörelse av radionuklider från en genomborrad kapsel delas radionuklidinnehållet upp i tre delar; en del som förväntas frigöras så gott som omedelbart vid penetration av kapseln IRF ("Instant Release Fraction"), en del som frigörs mycket långsamt från bränslematrisen, samt en del som frigörs långsamt från övriga metalldelar. SKB antar att borrhningen utförs vertikalt med en borrhålsdiameter på 56 mm, vilket är den diameter som har använts under platsundersökningarna i Forsmark. SKB kommer baserat på en förenklad analys fram till att cirka 3 % av kapselns innehåll av radioaktiva ämnen förs upp till ytan inom ett cirkelformat område med diametern 3 m (SKB TR-10-53, bilaga B1). SKB förutsätter att hela mängden IRF förs upp till markytan tillsammans med 3 % av radionuklidinventariet från metalldelar respektive 3 % av det använda kärnbränslet. De koncentrationer som anges av SKB (SKB TR-10-53, tabell 6-1) har baserats på antagandet att inget kapselmateriale transporteras bort från platsen.

Den fortsatta transporten av radionuklider till markytan efter genomborrhningen är avhängigt det använda kärnbränslets upplösningshastighet och övriga metalldelars korrosionshastighet. Med låga vattenflöden i deponeringshålen kan upplösningshastigheterna för vissa grundämnen, och därmed deras maximala koncentration på markytan, begränsas av deras löslighetsgränser (SKB TR-10-53, tabell 6-2). SKB har baserat på grundvattenflödesmodellering för tempererade klimatförhållanden (SKB R-09-20) ansatt grundvattenflödes hastigheter i deponeringshålen motsvarande 0,1 m³/år. Under dessa förutsättningar blir bl.a. uranisotoperna från det använda kärnbränslet löslighetsbegränsade (SKB TR-10-53, tabell 6-3).

Vid en genomborrhning ca 300 år efter förslutning kommer dosen som borrhningspersonalen utsätts för att domineras fullständigt av Ag-108m, med doshastigheter på ca 130 mSv/timme (SKB TR-10-53, tabell 6-5). SKB betonar att denna mycket höga doshastighet förutsätter att Ag-108m är en av de radionuklider som frigörs omedelbart vid penetration av kapseln. SKB anser att detta är ett pessimistiskt antagande eftersom att Ag-108m sitter i styrstavarna vilket innebär att mängden Ag-108m som transporteras till markytan bör motsvara 3 % av det totala innehållet och inte 100 %. Eftersom doshastigheten efter 300 år utgörs av Ag-108m skulle en sänkning till 3 % av dess koncentration leda till en doshastighetsminskning till ca 4 mSv/timme. Dessutom förekommer styrstavar bara i kapslar med PWR-bränsle, vilka utgör ca 25 % av alla kapslar. Om borrhningen istället sker drygt 4000 år efter förslutningen kommer doshastigheten vara ca 1 mSv/timme.

Borrhningsscenario inkluderar även att en familj bosätter sig på borrhplatsen strax efter att den övergivits av borrhpersonalen. Familjemedlemmarna kommer att erhålla dos från dels det övergivna borrhålet som används som vattenkälla dels från alla de radionuklider som kontaminerat marken i samband med borrhningen och upptaget av borrhkärnan med fragment av kapselns olika delar. Huvudelen av den beräknade årliga dosen på ca 10 Sv/år kommer från markanvändningen och vistelse i det radionuklidkontaminerade området (SKB TR-10-53, figur 6-3). Dosen domineras av intag av växter som kontaminerats av Tc-99 och extern strålning från Ag-108m. Förutom den ovan angivna osäkerheten med



koncentrationen av Ag-108m uppger SKB flera andra osäkerheter som alla samverkar på så sätt att de beräknade doshastigheterna i borrhågs scenariot blir mycket pessimistiska, som exempelvis effekten av en lägre borrhågs vinkel, samt tidpunkten för intrånget och för den efterföljande inflyttningen av människor till borrhågs platsen (SKB TR-10-53, avsnitt 6.3.4).

SKB har modellerat vilken effekt ett öppet borrhål har på grundvattenflödet i den omgivande återfyllnaden, bufferten och bergvolymen (SKB R-09-20, avsnitt 6.3.6). Modelleringen visar att borrhålet kommer att agera en sänka för grundvattenflödet där flödet kommer att riktas uppåt i borrhålet, vilket innebär att det kommer vara reducerande förhållanden i den öppna kapseln. SKB bedömer vidare att närvaron av det öppna borrhålet inte kommer att ändra på de generella transportegenskaperna hos flödesvägarna och att dess inverkan på både övriga kapslar och på geosfärens fördröjningsegenskaper är försumbar (SKB TR-10-53, avsnitt 6.3.3).

8.3.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s val att belysa direkt påverkan genom ett intrång på ett slutförvar genom ett fall med borrhågs vid olika tidpunkter är godtagbart och ger ett rimligt underlag för att bedöma betydelsen av detta fall. SSM noterar att SKB förutom att beräkna konsekvenser för närboende följer rekommendationerna i de allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21 och redovisar konsekvenser för människor som gör intrång i slutförvaret genom att uppskatta doskonsekvenser till borrhågs personalen som orsakar intrånget. SSM konstaterar, liksom SKB, att tiden för genomborrhågs är av stor betydelse för de beräknade doserna för ett intrång vid den tidigaste antagna tidpunkten. SKB underbygger inte närmare antagandet att intrånget sker först efter 300 år efter förslutning. SSM bedömer dock att detta antagande kan anses vara rimligt i syfte att illustrera följderna av ett intrång. SKB:s antaganden om spridningen av material från borrhågs som tas upp till ytan anser SSM vara godtagbara.

SSM har försökt reproducera dosuppskattningarna till borrhågs personalen utifrån de data som SKB redovisar i underlaget till ansökan och får resultat som i stort överensstämmer med SKB:s. SSM noterar dock att det är vissa skillnader mellan redovisade halveringstider i SKB TR-10-52 (tabell 3-5) och SKB TR-10-07 (tabell 6-1) när det gäller Ag-108m, Se-79 och Mo-93. SSM är medveten om att halveringstiderna för vissa radionuklider är behäftade med osäkerheter, men myndigheten anser att SKB bör sträva efter att tillämpa en konsekvent uppsättning indata för olika beräkningar. SSM noterar även en skillnad mellan C-14 inventariet som är redovisat i FHA-rapporten (SKB TR-10-53) och radionuklidtransportrapporten (SKB TR-10-50). SSM noterar därutöver små skillnader i inventariet för materialet som förs till ytan pga. borrhågs och inventariet som ges för kapslarna för vissa radionuklider (Cs-137, Nb-94, Ni-59, Ni-63, Mo-93 and Sr-90). När det gäller värden för utsläppsrater och utsläppskoncentrationer (SKB TR-10-53, tabell 6-2, tabeller 6-3) förefaller värdet för Se-97 vara inkonsekvent med inventariet som ges i samma rapport (tabell 6-1). SSM noterar därutöver vissa inkonsekvenser mellan beräknade dosrater (SKB TR-10-53, tabell 6-5) och respektive koncentration och doskoefficient, med den största skillnaden för Am-241m. SSM bedömer att dessa inkonsekvenser inte har någon större påverkan på den slutliga dosuppskattningen. De har också mindre betydelse eftersom scenariots karaktär endast är att illustrera möjliga effekter. SSM anser dock att SKB generellt bör eftersträva transparens och konsekvent användning av indata vid beräkningar i kommande steg i SKB:s program. SSM bedömer att SKB:s beräkningar av doskonsekvenser till en familj som bor i närheten av borrhågs med beaktande av markanvändningen och dricksvattenförsörjningen genom borrhågs är ändamålsenliga. SSM noterar att de tillämpade värdena för brunnskapaciteten överensstämmer med de tillgängliga mätvärdena. SKB:s uppskattade flöde i det genomborrade deponeringshålet kan anses konservativa (SSM Technical Note 2015:41). SSM:s externa expert noterar att SKB:s beräkningar representerar en situation där



grundvattenflödet och tryckgradienterna regleras av utflödesvägarna från deponeringshålet. Borrhålet bör dock minska flödesmotståndet ut från deponeringshålet påtagligt, så att flödena istället styrs av tillflödena till deponeringshålet (SSM Technical Note 2015:41). SSM bedömer att detta kan vara värt att beakta i kommande redovisningar men att det inte påtagligt påverkar slutsatserna som kan dras av SKB:s beräkningar. SSM har även för fallet med familjen som bosätter sig i närheten av borrhålet genomfört dosuppskattningar utifrån SKB redovisade antaganden och data. SSM erhåller resultat som i stort överensstämmer med SKB:s. SSM bedömer att redovisningen i ansökan är godtagbar, men anser att SKB i kommande redovisningar behöver mer utförligt belysa viktiga antaganden och deras betydelse för den resulterande dosen. Skillnader och likheter till härledning av LDF-värden som innefattar dricksvattenbrunn behöver beskrivas. SSM bedömer i likhet med SKB att ett enskilt borrhål som skär ett deponeringshål kan förväntas ha en liten betydelse för slutförvarets utveckling i övrigt. SSM godtar därför SKB:s beskrivning av slutförvarets skyddsförmåga efter intrång. SSM:s föreskrifter anger inget kriterium för dos/risk i samband med oavsiktliga mänskligt intrång. I ICRP:s riktlinjer (2013, avsnitt 4.62) framgår det att framtida mänskliga handlingar kan resultera i att radioaktiva ämnen förs upp till ytan och, såsom fallet med genomborring av en kapsel, kan resultera i signifikanta doser till omgivningen. Vidare nämns det att detta är en ofrånkomlig konsekvens av valet att isolera och koncentrera det radioaktiva avfallet snarare än att späda ut eller sprida ut det. Det innebär att accepterandet av ett slutförvar också innebär accepterandet av en viss risk för höga doser i samband med ett framtida oavsiktligt intrång. I syfte att minska sannolikheten för oavsiktliga intrång efter förslutning bedömer SSM att det är viktigt att SKB tar fram strategier för bevarande av information så att åtgärder kan vidtas innan förslutning av förvaret sker (se avsnitt 8.4.2).

8.3.2 Konsekvenser av indirekt påverkan på förvaret som involverar uppförande av undermarksanläggning i förvarets närhet

De andra scenarierna för framtida oavsiktliga mänskliga handlingar gäller indirekt påverkan genom uppförandet av en undermarksanläggning ovanför förvaret eller uppförandet av en gruva eller någon annan form av undermarksanläggning i närheten av förvaret. Dessa fall har potential att påverka geosfärens säkerhetsfunktionen att tillhandahålla gynnsamma kemiska, hydrologiska och transportrelaterade förhållanden (R1 och R2) (SR-Site huvudrapport, avsnitt 14.2.6 och 14.2.7).

Liksom i genomborringensfallet antas det att kunskapen om förvaret gått förlorad och arbetet med uppförandet av undermarksanläggningarna påbörjas tidigast 300 år efter förslutningen av förvaret.

8.3.2.1 Underlag från SKB

Vilken påverkan uppförandet av en undermarksanläggning har beror på bl.a. dess storlek, vilken djup den förläggs till, med vilket syfte utgrävningen görs samt valda schaktningsmetoder. SKB bedömer att ifall en framtida anläggning är planerad att förläggas till förvarsdjup kommer det föranleda förundersökningar som har förutsättningar att lokalisera förvaret. Detta ger sannolikt det framtida samhället som har utfört undersökningarna en möjlighet att välja en annan plats för undermarksanläggningen. Baserat på nuvarande praxis gällande förläggingsdjup för tunnlar utgår SKB ifrån att eventuella anläggningar som uppförs vid förvarsplatsen kommer att placeras ovanför förvaret på ett djup upp till 150 m. De översta 150 m av berggrunden ovanför den planerade förvarsvolymen har vidsträckt bankningsplan med höga vattenflöden. SKB anser därför dels att den övre delen av berggrunden är mindre gynnsam som förläggingsplats för en undermarksanläggning. Även om så skulle ske kommer omfattande injektering behöva utföras vilket minskar anläggnings påverkan på de



hydrologiska förhållandena i det omliggande berget (SKB TR-10-53, avsnitt 6.4). Baserat på hydrogeologiska analyser av ett övergivet, delvis förslutet förvar bedömer SKB att om den uppförda anläggningen ovanför förvaret överges kommer det inte ha någon signifikant effekt på grundvattenflödet på försvarsdjup (SKB R-10-41).

SKB bedömer att utformning av en gruva samt djupet till en eventuell mineralresurs inte går att specificera eftersom det inte finns några exploaterbara malmfyndigheter runt förvaret att utgå ifrån. Baserat på de närmaste förekommande malmmineraliseringarna bedömer SKB att gruvan kommer att befinna sig på ett avstånd av ca 1 km från förvaret. SKB hävdar att konsekvenserna av en gruva som sträcker sig till samma djup som slutförvaret och ligger 1 till 1,5 km från närmaste delen av förvaret skulle vara marginella (SKB TR-10-53, avsnitt 6.5). Denna slutsats grundar sig på att SKB:s utförda hydrologiska modelleringar av grundvattenflödet i en försvarsvolym med ett öppet förvar visar att sänkningen av grundvattennivåerna i berget avtar snabbt med avståndet från det öppna förvaret (SKB R-10-18, figur 7-20). Detta förklarar SKB som ett resultat av det omgivande bergets låga hydrauliska konduktivitet.

8.3.2.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning av effekterna av underjordiska anläggningar ovanför förvaret eller av en gruva uppförd i närheten av förvaret är rimliga. SSM delar SKB:s uppfattning att tunnlar på djup ner till 150 m liksom gruvor i närliggande områden som kan anses intressanta för gruvdrift inte skulle påverka slutförvarets prestanda på ett betydande sätt.

SSM har i granskningen utgått från förutom SKB:s redovisning, granskningsarbete som har utförts av externa experter på uppdrag av SSM (SSM Technical note 2015:41).

Den utförda hydrogeologiska modelleringen som SKB stöder sin bedömning på vid utvärderingen av konsekvensen av en undermarksanläggning ovanför förvaret gjordes under antagandet av ett delvis öppet förvar vilket innebär andra hydrogeologiska förhållanden. Även om fallet med ett delvis öppet förvar kan förefalla mer pessimistiskt kan det resultera i att transporttunnlarna kortsluter grundvattenflödet förbi deponeringstunnlarna, vilka därigenom till viss del skyddas från hydrauliska gradienter ("hydraulic cage effect"). Denna hydrauliska effekt kan ge mycket låga tryckgradienter i deponeringstunnlarna och ett scenario där en övergiven tunnel på grundare djup ovanför förvaret kortsluter utströmningsvägarna för grundvatten som strömmar genom ett förslutet förvar och skulle därmed kunna ha en annan påverkan (SSM Technical note 2015:41). Baserat på att nutida tunnlar i allmänhet uppförs ner till ett djup på ca 50 m, antar SKB att undermarksanläggningen ovanför förvaret förläggs till ett djup på ca 150 m. Därmed har de inte utvärderat konsekvenserna av ett djupare förläggingsdjup, där berggrunden även har mer fördelaktigare hydrogeologiska förhållanden. SSM bedömer, i likhet med SKB, att eftersom de översta 150 m av berggrunden har mycket hög hydraulisk konduktivitet, är det troligt att en öppen tunnel i en berganläggning på grunt djup inte har någon större påverkan på vattenflödet på försvarsdjup. SSM anser att SKB:s argument att nutida tunnlar i allmänhet uppförs på djup grundare än 150 m är godtagbart och att detta är i linje med allmänna råden till SSMFS 2008:37 5 – 7 §§ som anger att analyser bör utgå från dagens levnadsvanor och tekniska förutsättningar. SSM bedömer att SKB på ett tillfredsställande sätt har beskrivit effekten av slutförvarets skyddsförmåga efter att intrånget har skett.

SKB:s bedömning av konsekvensen av en gruva i närheten av förvaret har baserats på modelleringar som utvecklats och tillämpats för andra hydrogeologiska situationer. SSM anser, i likhet med sin externa expert (SSM Technical Note 2015:41), att de av SKB framförda kvalitativa hydrogeologiska argumenten, exempelvis kring berggrundens låga vattengenomsläppligheten på försvarsdjup är rimliga.



8.3.3 Konsekvenser av indirekt påverkan på förvaret i samband med jordströmmar

Jordströmmar, även kallade läckströmmar, är elektriska strömmar vilka kan orsaka korrosion av kopparkapseln. SSM bedömer att inverkan av läckströmmar, som framkallats antropogent, bör tillhöra kategorin restsценарier eftersom de avser för framtida mänskliga handlingar och mänsklig påverkan. Ett sådant fall motsvaras av att en installation eventuellt skulle ske långt in i framtiden när kännedom om slutförvaret har gått förlorad.

8.3.3.1 Underlag från SKB

Beträffande läckströmskorrosion redovisar SKB att en helt torr bentonit kan elektriskt isolera kapseln medan en fullt vattenmättad buffert har ett mycket lågt elektriskt motstånd (SKB TR-10-46, avsnitt 3.5.6). För att bedöma en eventuell påverkan av läckströmskorrosion har därför SKB postulerat ett fall där en ojämn vattenmättnad av bufferten föreligger. Den maximala potentialskillnaden längs den 5 m långa kapseln bedöms pessimistiskt till 0,5 V. Dessa potentialskillnader bedöms inte kunna påverka kopparkorrosion beroende på att det elektriska motståndet för vattenmättad bentonit och omgivande bergmatris är lågt. Dessutom anses innehållet av korrosiva ämnen i grundvattnet begränsa effekter av läckströmmar vid förvarsdjup.

SKB anser dock att fallet med elektriska fält från monopolär högspänningslikström kan påverka korrosion av kopparhöljet. De tider som dessa fält anses kunna påverka slutförvaret bedöms emellertid vara för korta för att ge någon påtaglig kopparkorrosion. SKB har även i en komplettering (SKBdoc 1398013) redovisat ytterligare underlag från en fördjupad studie avseende inverkan av läckströmmar på kopparkorrosion (SKB TR-14-15). I studien analyseras dels befintliga installationer, dels framtida möjliga elektriska installationer som genom läckströmmar ner till förvarsdjup kan påverka korrosion av kopparkapslar. Baserat på potentiodynamiska mätningar redovisas att sambandet mellan korrosionens omfattning och spänningsfallet är linjärt upp till 0,5 V. För en möjlig framtida High Voltage Direct Current (HVDC) installation och ett spänningsfall upp till 0,5 V redovisar SKB att korrosionshastigheten beroende på läckströmskorrosion kan uppgå till som mest 0,2 $\mu\text{m}/\text{år}$ (SKB TR-14-15) om korrosion sker jämnt över kapselns lock eller botten. För den befintliga Fenno-Skan installationen och ett spänningsfall kring 0,008 V kan korrosionshastigheten på grund av läckströmskorrosion bli 0,003 $\mu\text{m}/\text{år}$. SKB antar för dessa beräkningar att korrosion sker jämnt över kopparkapselns nedre eller övre begränsningsyta. SKB anger att förutsättningar för gropfrätning inte anses föreligga i slutförvarsmiljön och att läckströmskorrosion därför anses föreligga i form av allmän korrosion.

Baserat på de av SKB analyserade befintliga och möjliga elektriska installationerna framgår att det mest pessimistiska fallet rör en högspänd likströmselektrod placerad precis ovanför förvaret ger en korrosionshastighet på 0,17 $\mu\text{m}/\text{år}$. SKB anger vidare att tidsrymden dessa anläggningar kan vara operativa med stor sannolikhet är ungefär 100 år, vilket är en kort tidsperiod i jämförelse med förvarets analysperiod. Detta medför att påverkan av läckström bedöms vara marginell. Mot denna bakgrund bedömer SKB att det inte finns någon anledning att förlägga förvaret på 700 m djup istället för 500 m djup, även om potentialfallet över kapseln är cirka 30 % lägre på 700 m djup.

8.3.3.2 SSM:s bedömning

SSM anser att SKB tagit fram en godtagbar redovisning kring inverkan av läckströmskorrosion på kopparkapslarnas integritet. Granskningen av SKB:s beräkningar av SSM:s externa experter pekar på att de av SKB genomförda beräkningsscenarierna ger en realistisk beskrivning av situationen i Forsmark (SSM Technical Note 2016:05; 2016:16). De små beräknade korrosionsangreppen motiveras av att det elektriska fältet ger en förhållandevis liten påverkan på korrosionshastigheten, av att hela kapselns övre eller

nedre begränsningsyta korroderar samt att tiden för denna korrosion i sammanhanget bedöms vara mindre än 100 år och därmed kort i säkerhetsanalysens tidsskala. SSM noterar att SKB inte motiverat orsaken till varför läckströmskorrosion skulle orsaka jämn korrosion över hela locket eller botten med arean 0.8 m² och myndigheten bedömer att SKB i kommande steg i programmet behöver redogöra för eventuella fall med mindre korrosionsyta. SSM anser att SKB i sin strategi för informationsbevarande bör beakta att information om påverkan av läckströmskorrosion kan vara betydelsefull för tiden efter förslutning.

8.4 Förebyggande åtgärder mot framtida mänskliga handlingar som negativt påverkar slutförvaret

Åtgärder för att minska sannolikheten för framtida mänskliga handlingar som negativt inverkar på slutförvarets strålsäkerhet är en del av strålskyddsoptimeringen av slutförvaret (allmänna råden till 4, 8 och 9 §§ SSMFS 2008:37). SSM bedömer i detta avsnitt SKB:s redovisning kring förebyggande åtgärder mot negativa effekter av framtida mänskliga handlingar.

8.4.1 Övervakning av ett förslutet slutförvar under perioden med institutionell kontroll

8.4.1.1 Underlag från SKB

Syftet med konceptet ett geologiskt förvar av använt kärnbränsle är att isolera och fördröja spridning av radionuklider under mycket lång tid. Utöver de förebyggande åtgärderna mot framtida mänskliga handlingar som vidtas i samband med platsvalet och utformningen av förvaret kan flera andra åtgärder genomföras för att förebygga påverkan av framtida mänskliga handlingar. Tiden efter förvarets förslutning kan med anledning av dessa förebyggande åtgärder delas upp i tre tidsperioder:

- en inledande period under vilken förvaret troligtvis kommer befinna sig under någon form av institutionell kontroll med aktiv övervakning
- en efterföljande period där den institutionella övervakningen upphört men där samhället fortfarande, på regional och/eller lokal nivå, har kunskap om förvaret
- en avslutande period där minnet om förvaret med tiden gått helt förlorat.

Avgörande för när minnet av förvaret går förlorat är hur kunskapen om förvaret ska kunna överföras till efterkommande generationer, dvs. den successiva informationsöverföringen från en generation till en annan. Arkivering med aktiv bearbetning av informationen är ett exempel på successiv informationsöverföring (SKB P-07-220). När framtida generationers medvetenhet om förvaret är borta kommer informationsöverföringen baseras på metoder att föra över informationen direkt till framtida generationer, exempelvis via någon slags form av markör eller liknande i naturen.

SKB anser att den långsiktiga säkerheten för ett förslutet förvar av använt kärnbränsle, som ska upprätthållas genom ett system av passiva barriärer, inte får vara beroende övervakning, underhåll eller andra aktiva åtgärder som framtida generationer måste utföra för att upprätthålla säkerheten. SKB uppger dock att åtgärderna för att infria kraven på kärnämneskontroll under driften av förvaret kommer troligtvis att fortsätta tiden efter förslutning när området är under institutionell kontroll (SKB TR-10-53, avsnitt 2.2). Baserat på en rapport av dåvarande kärnkraftinspektionen SKI (SKI report 2008:18) bedömer SKB att kärnämneskontrollen efter förslutning bör fungera under längre perioder och utan fysiskt tillträde till området och nämner bl.a. satellit och seismisk övervakning som potentiella övervakningsmetoder. SKB bedömer vidare att det i nuläget är svårt att vara mer detaljerad gällande övervakningen efter förslutningen. Dessa aktiviteter kommer



troligen att bli utförligare beskrivna under den framtida planeringen av förslutningen av förvaret (SKB TR-10-53, avsnitt 2.4).

SKB anser att närvaron av förvaret kommer att kräva någon form av markanvändningsrestriktioner i området. Detta inte bara för att förhindra aktiviteter som potentiellt kan ha en negativ inverkan på förvaret, utan även aktiviteter som kan störa övervakningen av området (SKB TR-10-53, avsnitt 2.4).

8.4.1.2 SSM:s bedömning

SSM bedömer att SKB:s redovisning gällande förebyggande åtgärder under tiden närmast efter förslutningen är tillräckligt omfattande i detta steg av SKB:s program. SSM anser, i likhet med SKB, att detaljplaneringen beträffande hur övervakningen och markanvändningsrestriktioner ska utformas inte behöver vara på plats redan nu utan behöver tas fram i god tid innan förslutningen av förvaret.

8.4.2 Informationsbevarande efter perioden med institutionell kontroll

8.4.2.1 Underlag från SKB

SKB framhåller vikten av informationsbevarande efter förslutning av slutförvaret och uppger att en strategi för bevarande av information efter förslutning av förvaret kommer att tas fram av SKB i rimlig tid innan förvaret slutligt försluts. SKB:s strategi baseras delvis på ett internationellt samarbete om frågan (SKB SR-Site huvudrapport, bilaga A2.2). Frågan om informationsbevarande har lyfts av Östhammars kommun, MKG, Riksarkivet och Kärnavfallsrådet inom ramen för mark- och miljödomstolens remissförfarande vars dokumentation även tillställts SSM. Med anledning av detta har SKB kompletterat ansökan gällande informationsbevarande (SKBdoc 1382754). Denna komplettering har baserats huvudsakligen på SKB:s redovisning i avsnittet "Informationsbevarande över generationer" från Fud-program 2013.

I kompletteringen framgår att så länge som SKB:s anläggningar är i drift kommer SKB att bevara alla data och all information av betydelse, exempelvis uppgifter om slutförvarets läge och innehåll av radioaktiva ämnen. SKB:s planer för informationshantering styr hanteringen av dokument och data fram till arkivering och är ett hjälpmedel i det dagliga arbetet. Planerna ger upplysningar om vilka dokument och data som kan gallras respektive ska bevaras. Lagring av dokument sker i handarkiven samt mellanarkiven så länge de är i produktion/användande (lagringsplats styrs av relevant informationshanteringsplan). Från mellanarkiven förs handlingarna efterhand över till respektive centralarkiv för arkivering under lämplig tid. När SKB:s verksamhet upphör ska arkivet, ordnat och förtecknat, överlämnas till Riksarkivet.

Bevarande av information till framtida generationer ställer krav inte bara på dokumenthantering, dataselektering och arkivering, utan även på hur en aktiv bearbetning av arkivinformatonen, eller andra former av successiva informationsöverföringar, ska kunna vara verksamma långt in i framtiden. Viktigt är även att informationen är lättillgänglig och lättförståelig, vilket är av vikt i synnerhet när informationen är riktad direkt till en avlägsen framtid. SKB har med anledning av detta startat upp flera egna forskningsprojekt, deltar i OECD-NEA projektet Records, Knowledge and Memory (RK&M) samt samarbetar med sin motsvarighet i Frankrike (Andra).

8.4.2.2 SSM:s bedömning

SSM ser positivt på att SKB arbetar med forskning och utveckling kring informationsbevarande på olika tidskalor. SSM anser det vara angeläget att hitta arbetssätt för att hålla frågan levande och att SKB bör ta fram en strategi för arbetet med informationsbevarande som omfattar tiden fram tills förslutningen av kärnbränsleförvaret.



SKB uppger att när deras verksamhet upphör ska arkivet i enlighet med 5 § i SSMFS2008:38 ordnat och förtecknat, överlämnas till Riksarkivet. Riksarkivet bedömer dock att 5 § inte förenlig med gällande lagregler eller att det inte förekommer något avtal med Riksarkivet som styrker detta. Riksarkivet framhåller att en dylik överlämning ändå kan bli aktuell i framtiden, men noterar att en sådan överlämning kommer att föregås av förhandling och är förenad med kostnader (SSM2011-3522-16). SSM har noterat detta och kommer att behöva se över regleringen.

SSM instämmer med SKB:s bedömning att en strategi kan tas fram i rimlig tid innan förvaret ska förslutas. SSM bedömer dock att en övergripande strategi bör tas fram innan slutförvaret tas i provdrift. Insamlingen och lagringen av de stora mängder information som genereras under slutförvarets uppförande och driftsfaser syftar till andra ändamål än informationsbevarandet för tiden efter förslutning. SSM anser därför att SKB i den övergripande strategin bör redogöra för hur det säkerställs att de delar av information som bedöms vara av betydelse för tiden efter förslutning kan sammanställas och behandlas på ett lämpligt sätt. Resultat från internationella arbeten i frågan, exempelvis inom OECD NEA bör beaktas.

9. Bedömning av val och utvärdering av scenarier i SR-Site

SSM bedömer i detta kapitel SKB:s val av scenarier i säkerhetsanalysen och SKB:s utvärdering av scenarierna inklusive risksummering och det sammanvägda resultatet från riskanalysen. Säkerhetsanalysen behöver omfatta beskrivningar av utvecklingen i biosfär, geosfär och slutförvaret för de valda scenarierna samt slutförvarets omgivningspåverkan för valda scenarier med hänsyn till felfunktioner hos tekniska barriärer och övriga identifierade osäkerheter. Kapitlets övergripande syfte är att bedöma om SKB med säkerhetsanalysen har förutsättningar att visa att det föreslagna slutförvaret inte innebär oacceptabla risker för skador på människors hälsa och upprätthåller skydd av miljö, baserat på de krav som SSM har definierat i sina föreskrifter. SSM:s bedömning om SKB:s analys har förutsättningar att uppfylla tillämpliga föreskriftskrav återfinns i del 1 i denna rapport.

SSM:s bedömningar i detta kapitel utgår till största delen ifrån resultat av granskningen av säkerhetsanalysmetodik (kapitel 2 i denna granskningsrapport), slutförvarets initialtillstånd (kapitel 3 i denna granskningsrapport) och slutförvarets utveckling i tidsperioderna som säkerhetsanalysen omfattar (kapitel 4, 5 och 6 i denna granskningsrapport). Därutöver är resultaten från SSM:s granskning av SKB:s konsekvensanalysberäkningar en viktig förutsättning för bedömningarna i detta kapitel (kapitel 7 i denna granskningsrapport). Resonemangen från dessa detaljgranskningar är mycket kort sammanfattade i detta kapitel och de detaljerade synpunkterna på SKB:s analyser återges generellt sett inte. SSM anser dock alltså att de detaljerade synpunkterna i de föregående kapitlen är betydelsefulla för att förbättra SKB:s analys till redovisningarna i kommande steg av slutförvarsprogrammet.

9.1 Underlag från SKB

SKB:s säkerhetsmetodik har byggts upp kring 11 olika moment varav steg 8 utgör val av scenarier. SKB väljer en representativ uppsättning scenarier med fokus på delar av slutförvarsutvecklingen som har störst betydelse för den långsiktiga strålsäkerheten. SKB anser att det är viktigt att kunna reducera antalet möjliga förvarsutvecklingar som behöver analyseras inom säkerhetsanalysen och senare propageras till riskanalysen. De valda scenarierna ska dock tillsammans täcka alla rimliga framtida utvecklingar som ger ett betydelsefullt bidrag till slutförvarets risk för omgivningskonsekvenser. Aspekter som är



viktiga för slutförvarets långsiktiga strålsäkerhet beskrivs på översiktlig nivå av barriärfunktionerna inneslutning och fördröjning, vilka specificeras genom att definiera säkerhetsfunktioner för var och en av de tre barriärerna berg, kapsel och buffert (SKB SR-Site huvudrapport, avsnitt 11.1 och 8.4). Uppfyllelse av dessa säkerhetsfunktioner utvärderas genom att definiera en eller flera relevanta tillståndsvariabler av betydelse för säkerhetsfunktionen eller säkerhetsfunktionsindikatorer.

Enligt SKB:s metod för säkerhetsanalys ska det finnas ett huvudscenario som har baserats på referensutvecklingen och som representerar en rimlig och förväntad utveckling av slutförvarssystemet baserad på den bästa tillgängliga informationen. SKB definierar att slutförvarets referensutveckling som återges i kapitel 10 i SR-Site huvudrapporten utgör huvudscenariot (SR-Site huvudrapport, avsnitt 11.3). Huvudscenariot täcker därmed in ett referensinitialtillstånd, en realistisk beskrivning av platsen med beaktande av osäkerheter och de processer som bedömts som relevanta för slutförvarets långsiktiga utveckling (SR-Site huvudrapport, avsnitt 2.8.4). SKB har delat upp huvudscenariot i två varianter vilka baseras på de två definierade klimatfallen Weichsel-basfallet och fallet för global uppvärmning. I referensutvecklingen utvärderar SKB förutom dessa två klimatfall även andra osäkerheter och vissa av dessa osäkerheter har förts vidare till scenarioanalysen. Referensutvecklingen innefattar därför ett flertal olika beräkningsfall, exempelvis med avseende på olika grundvattenflöden, olika sulfidkoncentrationer, förekomst eller avsaknad av den största zonen i berget EDZ samt förekomst eller avsaknad av bufferterosion som krävs för att uppnå advektiva förhållanden i deponeringshålen. En sammanställning av SKB:s beräkningsfall redovisas i SR-Site huvudrapporten (avsnitt 10.7, tabell 10-27). Samtliga dessa fall utvärderas dock inte i huvudscenariot utan SKB beaktar dessa fall i ytterligare scenarier som har baserats på säkerhetsfunktionerna. Efter utvärdering av de ytterligare fallen kommer SKB fram till att huvudscenariot kan representeras av den så kallade centrala korrosionsvarianten som har definierats som bestående av advektions-korrosionsfallet i kombination med den semikorrelerade varianten av den hydrogeologiska spricknätverksmodellen samt med tillämpning av den så kallade SR-Site-modellen för bufferterosion (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.3). SKB:s analys för huvudscenariot ger i medeltal inga kapselbrott efter 100 000 år och 0,12 kapselbrott efter en miljon år (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.3, figur 12-18). SKB beräknar konsekvenser av det centrala korrosionsfallet med såväl deterministiska och probabilistiska metoder och med fem ytterligare fall som beaktar alternativa transportförhållanden, exempelvis kolloidbefrämd transport av radionuklider (SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.5.6). En detaljerad redovisning kring detta fall återfinns i avsnitt 7.4.3 i denna granskningsrapport. SKB:s slutsats är att den centrala korrosionsvarianten är en rimlig försiktigtvis antagen representation av den risk för omgivningskonsekvenser som är förknippad med korrosionsscenarioet då hänsyn tas till osäkerheterna med avseende på transportförhållanden i berggrunden. SKB:s beräkningsresultat pekar på att slutförvarets risk med utgångspunkt från utvärderingen av huvudscenariot är ungefär två storleksordningar lägre än SSM:s riskkriterium för hela den analyserade perioden på en miljon år.

SKB har baserat urval och utvärdering av ytterligare ett antal scenarier med utgångspunkt från säkerhetsfunktioner för kapsel, buffert och berg som SKB har definierat som utgångspunkt för sin säkerhetsanalys. SSM:s redovisning och detaljerade granskning av SKB:s metodik för val av scenarier återges i avsnitt 2.4.3 i denna granskningsrapport. SKB klassar efter utvärderingen av de ytterligare scenarierna dem antingen som del av huvudscenariot, som mindre sannolika scenarier eller som restscenarier. Skillnaden mellan mindre sannolika scenarier och restscenarier är att den tidigare kategorin bidrar till slutförvarets långsiktiga risk. Utifrån säkerhetsfunktionerna för bufferten och kapseln har SKB definierat tre buffertscenarier och tre kapselscenarier som sedan kombineras med



varandra. SKB sammanställer resultatet av scenariovalet i SR-Site huvudrapporten (avsnitt 11.3, tabell 11-1).

I det första buffertscenariot analyseras förekomsten av advektiva förhållanden i bufferten. Advektiva förhållanden i en buffert påverkar inte direkt kapselns inneslutningsförmåga men kan på lång sikt påverka förekomst av mikrobiell aktivitet i buffertmaterialet och transport genom bufferten vilket i sin tur kan leda till mera omfattande kopparkorrosion och efter lång tid kapselbrott på grund av korrosion. SKB har i detta scenario utvärderat osäkerheter för relevanta initialtillståndsfaktorer, för interna processer samt för externa förhållanden som kan leda till att en relevant säkerhetsfunktion inte längre kan upprätthållas. Utöver de förlopp i referensutvecklingen som leder till advektiva buffertförhållanden och som omfattar sju olika fall som täcker in osäkerheter inom hydrogeologi, samt inom buffertförhållanden inklusive dess erosionsbenägenhet, definierar SKB två ytterligare gränssättande fall. Dessa två fall antar att alla deponeringshål antingen har intakta buffertförhållanden med transport som enbart styrs av diffusion under hela analysperioden eller att det föreligger advektiva förhållanden i alla deponeringshål redan vid den slutliga förslutningen av slutförvaret, det vill säga att buffertens säkerhetsfunktion inte upprätthålls under hela analysperioden. SKB har definierat kombinationer av de två gränssättande fallen för bufferten med de tre olika hydrogeologiska varianterna för korrelation mellan sprickstorlek och transmissivitet och får därmed sex olika gränssättande fall med avseende på buffertens skyddsförmåga. SKB beräknar dessutom för de sju övriga fallen från referensutvecklingen antalet deponeringshål som utsätts för advektiva förhållanden efter 100 000 år och en miljon år (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.2.2, figur 12-3 och avsnitt 12.2.3 figur 12-4). Alla dessa 13 fall har sedan förts vidare till scenarier och analys av kapsels långsiktiga integritet. SKB konstaterar att de valda fallen täcker in samtliga osäkerheter i buffererosionsberäkningarna inklusive osäkerheter med avseende på den konceptuella modellen för buffererosion. SKB har även diskuterat fallet med en sjunkande kapsel och dess påverkan på diffusionsbarriären och drar slutsatsen att detta fall redan täcks in av de övriga fallen eftersom den enda situation som kan leda till att kapslar sjunker är en omfattande förlust av buffertmaterial.

I det andra buffertscenariot analyseras förekomst och betydelse av en frusen buffert. Buffertens temperatur behöver enligt experimentella data överstiga -4 °C för att säkerställa att den inte fryser. SKB konstaterar att buffertfrysning kan leda till mekaniska skador på kapseln eller en försämrad av potential för barriärfunktionen retardation av radionuklider i fall att kraftig islinsbildning förekommer. Utöver de förlopp som har utvärderats i referensutvecklingen med tillhörande osäkerheter och som redogörs för i avsnitt 5.2 och 5.7 i denna granskningsrapport, omfattar scenariot en utvärdering av hur kraftig permafrostbildning påverkar risken för buffertfrysning. En sådan kraftig permafrostbildning uppstår under förutsättning att det inte förekommer någon inlandsis under hela glaciationscykeln och att utbredning av haven gynnar permafrostbildning. SKB drar slutsatsen att varken resultat från analys av referensutvecklingen eller känslighetsfallet med kraftig permafrostutveckling leder till att bufferten fryser. Återfyllnaden i ramp, i schakt samt i borrhålsförslutningar ned till 200 m fryser däremot med ett osäkerhetsintervall som mest sträcker sig till 384 m djup. SKB drar dock slutsatsen att detta inte medför någon negativ påverkan på slutförvarets skyddsförmåga. SKB framhåller att de utvärderade klimatfallen med beaktade osäkerheter är gränssättande eftersom det är orealistiskt att så kalla förhållanden kan bli bestående under analysperioden på en miljon år. SKB kategoriserar scenariot som ett restscenario eftersom sannolikheten för att bufferten kommer frysa är mycket liten baserat på tillgänglig information. Konsekvenser av detta restscenario har inte utvärderats som ett eget fall men SKB bedömer att fallet liknar en situation där alla kapslar går sönder på grund av hög



isostatiskt belastning på kapslarna vilket har beskrivits i SR-Site huvudrapport (avsnitt 13.7.1).

I det tredje buffertscenariot analyseras buffertomvandlingar som leder till att montmorillonitleran omvandlas till andra icke-svällande mineral eller att föroreningar ackumuleras som avsevärt förändrar buffertens materialegenskaper (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.4). Exempel på processer som skulle kunna vara relevanta i detta sammanhang är en omfattande omfördelning av kiseldioxid i buffertmaterialet på grund av temperaturgradienten eller omfattande interaktion med metalliskt järn som skulle kunna påverka montmorillonitleran. SKB utgår i scenariot från säkerhetsfunktionsindikatorer relevanta för buffertomvandlingar som avser buffertens temperatur och buffertens pH-värde. Buffertomvandlingar kan påverka barriärfunktionerna för både inneslutning och fördröjning genom påverkan på buffertens säkerhetsfunktioner som begränsad advektion och mikrobiell aktivitet. Ett sänkt svälltryck kan exempelvis påverka inneslutningsförmågan indirekt genom uppkomst av mikrobiell aktivitet och en ökad transport genom bufferten vilket har en betydelse för omfattningen av kopparkorrosion. SKB beaktar i detta scenario de förlopp, förhållanden och processer med tillhörande osäkerheter som har analyserats i referensutvecklingen (avsnitt 4.7 och 5.7 i denna granskningsrapport). SKB konstaterar att det inte kan uteslutas att diffusionsbarriären påverkas av interaktionen mellan metalliskt järn och buffertmaterial för en situation där kopparhöljet har fallerat och där kapselns insats har blivit exponerad för omgivande grundvatten. SKB:s slutsats är dock att de beaktade processerna inte förväntas ha någon betydande effekt på buffertegenskaperna under rimliga förhållanden och tidsskalor. SKB bedömer dock att det är nödvändigt att studera ett fall där bufferten intill kapseln omvandlas eftersom det finns osäkerheter i samband med den kombinerade effekten av förhöjd temperatur och högt pH-värde. SKB bedömer dock att detta fall ska kategoriseras som restskenario.

I det första kapselscenariot analyseras kapselbrott till följd av korrosion (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6). SKB konstaterar att buffertförhållanden är centrala vid utvärdering av risken för kapselbrott till följd av korrosion. Fall med intakta buffertförhållanden, advektiva förhållanden som uppstår under slutförvarets utveckling i vissa deponeringshål och med initial advektion i alla deponeringshål ingår därför i utvärderingen av kapselkorrosion. SKB har i analysen av scenariot beaktat buffertscenariot med advektiva förhållanden och därmed de osäkerheter som har behandlats i referensutvecklingen samt i de två gränssättande fallen som beskrivs ovan. Därutöver har känslighetsanalyser inkluderats som beaktar osäkerheter med avseende på sulfidhalter, korrosionsgeometrier och urvalskriterier för deponeringshål. SKB diskuterar och analyserar även andra korrosionsformer som en del av referensutvecklingen inklusive även vissa ytterligare osäkerheter som inte ingår i referensutvecklingen och kommer till slutsatsen att det endast är sulfidkorrosion som behöver beaktas vidare i detta scenario samt i utvärderingen av risken för omgivningskonsekvenser. SKB:s slutsats efter utvärdering av de olika korrosionsförloppen för de olika sulfidkorrosionsfallen är att kapselbrott till följd av korrosion inte kan uteslutas under den en miljon år långa analysperioden och att det kan uppstå upp till 0,055 kapselbrott i medeltal efter 100 000 år (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.3, figur 12-18). Bland de analyserade fallen väljer SKB ut den centrala korrosionsvarianten som mest representativ för riskanalysen, vilken beaktar den semikorrelerade varianten av den hydrogeologiska spricknätverksmodellen och bufferterosionsmodellen för SR-Site. Denna variant bedömer SKB vara representativ för huvudscenariot. SKB betraktar de andra beaktade fallen som illustrativa fall som gränssätter inverkan av osäkerheter med avseende på de aspekter av korrosion som de representerar (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.6.3). SKB beaktar dock även dessa illustrativa fall i samband med huvudscenariot. SKB utvärderar konsekvenserna för scenariot med kapselkorrosion för den centrala korrosionsvarianten, dvs. huvudscenariot



(se ovan) och för de ytterligare fallen. SKB:s resultat som sammanfattas i SR-Site huvudrapport (avsnitt 13.5.9, figur 13-40) pekar på att risk i samtliga fall i korrosionsscenarioet ligger en till två storleksordningar under SSM:s kriterium för årlig risk för skadeverkningar, under hela den analyserade tidsperioden.

I det andra kapselscenarioet analyseras kapselbrott till följd av isostatisk last (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.7). Scenarioet kopplar till säkerhetsfunktionen för kapseln att kunna motstå isostatisk last och står i direkt samband med barriärfunktionen inneslutning eftersom inneslutningsförmågan går förlorad om kapselns mekaniska integritet inte kan upprätthållas. Scenarioet utgår från analysen av referensutvecklingen med tillhörande osäkerheter och kombineras endast med buffertfallet med intakt buffert eftersom de andra buffertfallen med advektiva förhållanden är förknippade med lägre svälltryck vilket leder till en lägre isostatisk last på kapseln. Utöver referensutvecklingens analys av den maximala tjockleken för en inlandsis vid Forsmark analyseras även effekten av en ännu tjockare is i linje med de förhållanden som kan ha förekommit under de senaste två miljoner åren. SKB:s utvärdering av motståndskraften mot isostatisk kollaps vid den dimensionerande isostatiska lasten på 45 MPa pekar på att det finns betydande marginal till både lokal plastisk kollaps av insatsen till följd av variationer i materialegenskaperna och avseende tillåtna defektstorlekar i förhållande till förväntade och detekterbara defekter. SKB bedömer att kapseln med god marginal sannolikt även motstår lokal plastisk kollaps för det tryck som förknippas med ett mycket tjockare istäcke än det för referensglaciationen. SKB framhåller att total eller global plastisk kollaps är det relevanta brottkriteriet och att marginalen till total kollaps av insatsen är fullt tillräcklig även för de mest extrema lastsituationerna. SKB kategoriserar scenarioet kapselbrott till följd av isostatisk kollaps som ett restscenario utan påverkan på slutförvarets långsiktiga risk med hänvisning till kapselns motståndskraft mot denna typ av belastning (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.7.5). SKB genomför dock en hypotetisk utvärdering av konsekvenser för scenarioet kapselbrott till följd av isostatisk last i samband med de ytterligare scenarierna som illustrerar betydelsen av barriärfunktioner. I konsekvensanalysen antar SKB hypotetiskt att kapseln helt har förlorat sin inneslutande funktion antingen efter 10 000 år eller efter 100 000 år men att buffertens och bergbarriärens retentionsegenskaper samtidigt förblir intakta. I analysen ingår dels fallet med en skadad kapsel, dels fallet att samtliga kapslar fallerar vid dessa två tidpunkter. SKB redovisar att fallet med en skadad kapsel ger en dos på 0,6 μSv per år som motsvarar en risk väsentligt lägre än SSM:s kriterium för skydd av människors hälsa, medan fallet att alla kapslar skadas ger en dos som mest på ungefär halva bakgrundsstrålningen och som på sikt stabiliseras runt 200 μSv per år.

I det tredje kapselscenarioet analyseras kapselbrott till följd av skjuvlast över ett deponeringshål som förmodas uppstå som ett resultat av sekundära rörelser från stora jordskalv (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.8). SKB redovisar att scenarioet förutom kraven på kapselns hållfasthet kopplar till säkerhetsfunktioner för bufferten och berget. Dessa representeras av säkerhetsfunktionsindikatorer som fastställer att skjuvrörelser över ett deponeringshål ska vara mindre än 5 cm och att buffertdensiteten inte får överstiga 2050 kg per kubikmeter. Säkerhetsfunktionen kopplade till skjuvning i berget relaterar direkt till kapselns inneslutningsförmåga eftersom inneslutningen antas bli bruten om något av kriterierna inte uppfylls. En detaljerad redovisning och analys av SKB:s hantering av skjuvlastfallet ges i avsnitt 4.13, 5.12 och 6.3 i denna granskningsrapport. SKB konstaterar att även buffertens och bergets retardationsegenskaper för radionuklider påverkas av en större skjuvrörelse i direkt anslutning till en deponeringshålsposition. SKB beaktar endast fallet med intakt buffert eftersom det ger de minst fördelaktiga omgivningskonsekvenserna i fallet skjuvlastbrott av kapseln. Scenarioet utgår från förutsättningar i referensutvecklingen med beaktande av tillhörande osäkerheter. SKB:s slutsats från utvärderingen av scenarioet är att osäkerheterna behandlas uttömmande i



referensutvecklingen och att scenariot därför enbart behöver baseras på denna utveckling. Resultaten från analysen i referensutvecklingen är bland annat den årliga kapselbrottsfrekvens över analysperioden som återges i SR-Site huvudrapporten (avsnitt 10.4.5, figur 10-124). Det genomsnittliga antalet kapselbrott pga. jordskalvsinducerad skjuvlast efter en miljon år blir enligt SKB:s analys 0,079. SKB klassar scenariot som mindre sannolikt baserat på denna analys. Sannolikheten för scenariot baseras på att det genomsnittliga antalet kapselbrott vid en miljon år, dvs. 0,079, är betydligt mindre än ett och därför kan tolkas som sannolikheten för att det förekommer en eller fler kapselbrott vid slutet av den angivna analysperioden (SR-Site huvudrapport, avsnitt 10.4.5). SKB analyserar dessutom konsekvenser av skadliga skjuvlaster för ett antal andra fall som innefattar ett postulerat kapselbrott vid 100 000 år, ett fall med en fördelning av kapselbrott mellan 1000 år och 100 000 år samt ett fall med en fördelning av kapselbrott fram till 1000 år. SKB analyserar även effekter av riskutspädning för relevanta fall, effekter av kombinationen skadliga skjuvlaster samt advektion i bufferten som leder till snabbare kapselkorrosion samt även alternativa transportförhållanden i berggrunden och/eller alternativa data för att kvantifiera transport av radionuklider i buffert och i berggrunden. SKB drar slutsatsen att risken för omgivningskonsekvenser som kan förknippas med skjuvlastscenariot ligger mer än två storleksordningar under SSM:s riskkriterium (SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.9.3).

SKB redogör för behovet av kombinationer av de analyserade scenarierna (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.9). SKB:s slutsats är att relevanta kombinationer och gradvisa utvecklingar av olika företeelser har behandlats i tidigare delar av analysen eller har hanterats i konsekvensanalysberäkningarna. För vissa kombinationer visar SKB att de inte ger upphov till några ytterligare fall som behöver beaktas vidare vid utvärderingen av slutförvarets långsiktiga risk (SR-Site huvudrapport, avsnitt 12.9.3).

SKB definierar ytterligare tre hypotetiska restscenarier för att illustrera betydelsen av barriärfunktionerna för den långsiktiga säkerheten (SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.7). Dessa utgörs av kapselbrott till följd av isostatisk last (beskrivs ovan), kapselbrott orsakad av en initial genomgående kapseldefekt i form av ett pinnhål som växer sig större samt ett scenario med ett antal fall där olika barriärer eller kombinationer av barriärer antas helt ha förlorat sina säkerhetsfunktioner.

SKB redogör i pinnhålsscenarioet för hur en genomgående defekt i kapseln i form av ett pinnhål som initialt ger betydande transportmotstånd växer sig större med minskade transportmotstånd till följd samtidigt som säkerhetsfunktionerna för bufferten och bergbarriären förblir intakta. SKB analyserar fall som förutsätter att termisk spjälkning har förekommit i deponeringshålens väggar samt fall där deponeringshålens väggar förblir intakta. SKB:s motsvarande riskanalyser pekar på att risken ligger under SSM:s riskkriterium för alla undersökta fall.

SKB analyserar i de ytterligare fallen som illustrerar barriärfunktioner vilken betydelse olika barriärer har när andra barriärer förutsätts inte uppfylla sina respektive säkerhetsfunktioner. SKB definierar tio fall med olika kombinationer av barriärer som inte uppfyller sina barriärfunktioner (SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.7.3, tabell 13-10). En detaljerad redovisning av SKB:s beräkningar i samband med dessa fall återfinns i avsnitt 7.4.2 i denna granskningsrapport.

SKB summerar slutförvarets sammanlagda risk utifrån det fall i korrosionsscenarioet som medför den högsta risken med risken från skjuvlastscenariot och konstaterar att den sammanlagda risken för omgivningskonsekvenser ligger ungefär två storleksordningar under SSM:s riskkriterium. SKB anger vidare att hänsyn är tagen till huvudscenarioet i det gränssättande fallet i korrosionsscenarioet. SKB anser att den redovisade summerade risken



utgör ett gränssättande fall och drar slutsatsen att en mer realistisk risk kan ligga var som helst i området under den gränssättande riskkurvan och en situation med nollrisk.

SKB redogör för de aspekter av säkerhetsanalysen som är behäftade med betydande osäkerheter (SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.10, tabell 13-13). I redogörelsen kopplas osäkerheterna till bedömningar av om de skulle kunna minskas i senare stadier av slutförvarsprogrammet. SKB:s redovisning av betydande osäkerheter utgår från de två scenarierna som bidrar till slutförvarets risk, dvs. huvudscenariot och det mindre sannolika scenariot om kapselbrott pga. skjuvlast till följd av stora jordskalv. SKB diskuterar möjligheten att minska osäkerheterna med hjälp av expertutfrågningar och kommer till slutsatsen att ingen fråga har identifierats som lämpar sig för en formell expertutfrågning (SR-Site huvudrapporten, avsnitt 13.10.2).

SKB belyser scenarier som beaktar framtida mänskliga handlingar som oavsiktligt påverkar slutförvarets skyddsförmåga. Dessa scenarier behandlas separat i SKB:s analys (SR-Site huvudrapporten, avsnitt 14.2) och i SSM:s granskning (kapitel 8 i denna granskningsrapport).

9.2 SSM:s bedömning

9.2.1 Befintliga analyser

SSM bedömer att SKB har beskrivit hur olika givna kombinationer av yttre och inre betingelser inverkar på slutförvarets långsiktiga funktion och skyddsförmåga samt att dessa beskrivningar generellt sett motsvarar det som i de allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21 benämns scenarier. Vidare bedömer SSM att de definierade scenarierna illustrerar betydelsefulla förlopp som SKB har identifierat med utgångspunkt i FEP-analysen och referensutvecklingen för aspekter av slutförvarsutvecklingen, dess omgivning och biosfären av betydelse för slutförvarets omgivningspåverkan. SSM redogör dock i nästa avsnitt för bedömningar som innebär att ytterligare FEP behöver integreras inom scenarioanalysen inom de kommande stegen av SKB:s program, för att förtydliga betydelsen av vissa aspekter av slutförvarets och de tekniska barriärernas utveckling. SSM bedömer att SKB har följt de allmänna rådens rekommendationer med avseende på kategorisering av scenarierna i ett huvudscenario, ett mindre sannolikt scenario och ett antal restscenarier.

SSM bedömer att SKB:s huvudscenario utförligt beskriver relevanta aspekter på utvecklingen i biosfär, geosfär och själva slutförvaret. SSM bedömer vidare att SKB med utgångspunkt från referensutvecklingen överlag på ett lämpligt sätt har beaktat ett rimligt initialtillstånd med utgångspunkt från Forsmarksplatsens egenskaper och processer betydelsefulla för slutförvarets långsiktiga säkerhet samt relaterade osäkerheter. En utförlig granskning av platsens egenskaper återges i kapitel 3 och av slutförvarets långsiktiga utveckling i kapitel 4 till 6 i denna granskningsrapport. SKB bedöms även ha beaktat en rad möjliga felfunktioner hos de tekniska barriärerna (avsnitt 3.4 och 3.5 i denna granskningsrapport). SSM bedömer att det är godtagbart att SKB har baserat referensutvecklingen dels på en klimatutveckling som motsvarar en upprepning av Weichselglaciationen, dels en klimatutveckling som belyser global uppvärmning. SSM bedömer att detta tillvägagångssätt bidrar till att belysa de rimligt förutsägbara sekvenserna av framtida klimattillstånd. SSM:s granskning och bedömning av SKB:s definierade klimatutvecklingar redovisas i avsnitt 5.2 i denna granskningsrapport.

SSM bedömer att den s.k. centrala korrosionsvarianten i SR-Site utgör en betydelsefull grund för analysen av huvudscenariot. SSM anser dock att metoden för att beräkna



omgivningskonsekvenserna från slutförvaret behöver utökas och förtydligas i kommande steg av slutförvarsprogrammet med ett bredare och mera fullständigt angreppssätt för en integrerad bedömning av erosionsprocesser för bufferten och korrosionsprocesser för kopparkapseln (se nedan). SSM redovisar i andra delar av denna rapport en utförlig granskning och bedömning av SKB:s korrosionsanalys i allmänhet (avsnitt 5.11 i denna granskningsrapport) och advektions-korrosionsfallet i synnerhet (avsnitt 5.11.3 i denna granskningsrapport). SSM bedömer att SKB:s analys av konsekvenserna för huvudscenariot är i huvudsak väl genomförd och att SKB:s beräknade resultat för risken förknippad med huvudscenariot är rimlig (avsnitt 7.5.4 i denna granskningsrapport). SSM konstaterar att SKB i SR-Site inte har tagit fram ett tydligt redovisat underlag för att definiera en sannolikhet för huvudscenariot men noterar samtidigt att det gränssättande fallet med initial advektion i beräkningarna antas ha sannolikheten ett.

SSM har i andra delar av denna rapport bedömt att SKB:s metod för att välja ytterligare scenarier med hjälp av på förhand definierade säkerhetsfunktioner för var och en av barriärerna som lämplig i förhållande till SSM:s krav och i linje med internationell praxis (avsnitt 2.4.4.2 i denna granskningsrapport). Det finns dock aspekter som behöver förtydligas ytterligare i samband med kommande steg av SKB:s program så som att scenarierna och de ingående fallen bör visas innefatta ett tillräckligt stort antal för att täcka in rimliga kombinationer av samverkande processer och händelser under slutförvarets tidiga utveckling, kopplingen mellan olika barriärfunktioner samt att ytterligare uppmärksamhet kan krävas för demonstrationen att scenarierna är internt konsekventa, och rimligt fullständiga med avseende på de aspekter som de har definierats för.

SSM bedömer att det första buffertscenariot som analyserar förekomst och risk för advektiva förhållanden i bufferten och eroderade buffertförhållanden har stor betydelse för slutförvarets långsiktiga funktion. SSM bedömer i den detaljerade granskningen om förekomst av advektiva förhållanden i bufferten (avsnitt 5.13 i denna granskningsrapport) att det finns vissa osäkerheter i SKB:s redovisning i förhållande till en realistisk uppskattning av uppkomst av advektiva förhållanden i deponeringshålen i synnerhet med avseende på de tider i klimatutvecklingen under vilka erosion kan förutsättas inträffa. SSM noterar dock att SKB i första buffertscenariot, förutom referensutvecklingen, förlitar sig på två ytterligare fall som gränssätter effekter av samtliga möjliga buffertförhållanden. Inom ramen för utvärderingen av risk bedömer SSM därför att SKB har på ett rimligt om än oprecist sätt beaktat relevanta osäkerheter. SSM anser också att det är positivt att SKB har beaktat en rad olika fall som belyser betydelsen av olika osäkerheter som har identifierats vid utvärderingen av referensutvecklingen i linje med allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21. SSM bedömer att SKB:s slutsats är rimlig med beaktande av kunskapsläget, nämligen att en konservativ skattning av förekomsten av advektiva förhållanden förs vidare till kapselscenarierna eftersom analysen av korrosion i stor utsträckning påverkas av buffertens tillstånd. För att förtydliga slutförvarets förväntade säkerhetsfunktioner behöver dock SKB i kommande steg av sitt program ta fram en mindre grov uppskattning av buffertens skyddsförmåga. Vidare bedömer SSM att SKB:s slutsatser i förhållande till kapselsjunkning och den i samband med kapselsjunkning ofrånkomliga förlusten av buffertmaterial är godtagbar. SSM konstaterar liksom SKB att buffertens förmåga att upprätthålla diffusiva förhållanden går förlorad vid betydligt mindre buffertförluster än de som krävs för att kapselsjunkning ska inträffa.

SSM bedömer även att buffertscenariot som analyserar betydelsen av en frusen buffert är relevant och har en betydelse för att säkerställa att slutförvarets referensutformning inkluderar ett tillräckligt förvarsdjup. SSM bedömer att SKB:s beräkningar av permafrostdjup i referensutvecklingen är tillräckligt tillförlitliga och omfattande för detta steg i prövningsprocessen (avsnitt 5.2.5.2 i denna granskningsrapport). SSM bedömer vidare att SKB:s kvantifiering av den temperatur som krävs för buffertfrysning baserad på



experimentella data är tillförlitlig (avsnitt 5.7.2 i denna granskningsrapport). SSM bedömer även att det ytterligare fall med kraftig permafrost som SKB utvärderar inom ramen för scenariot ger ett bra underlag för en känslighets- och osäkerhetsanalys. Det kan konstateras att isotermer för -4°C som behövs för buffertfrysning sannolikt inte kommer att nå ned till förvarsdjup. SSM delar därför SKB:s slutsats att scenariot kan kategoriseras som ett restskenario utan betydande risk för omgivningskonsekvenser. SSM noterar dock att SKB inte explicit utvärderar konsekvenser för detta restskenario utan hänvisar till att det ungefärligen motsvarar restskenariot för kapselbrott pga. isostatisk last. SSM anser därför att SKB i kommande steg av slutförvarsprogrammet behöver utveckla analogin mellan konsekvenserna för detta scenario och scenariot för isostatisk last. Ett syfte med att inkludera och belysa en tillräckligt stor uppsättning scenarier är att säkerställa att aspekter som kan vara betydelsefulla vid förvarsutformningen beaktas och att säkerställa att förutsättningar och osäkerheter som innebär att restskenarierna blir mer sannolika så långt som möjligt går att undvika. Dessa aspekter har en betydelse vid förutom riskanalysen utvärderingen av optimering och bästa möjliga teknik.

SSM bedömer att SKB:s val av buffertscenariot som analyserar buffertomvandlingar är relevant, har en betydelse för den termiska dimensioneringen av slutförvaret och buffertens funktion under de mycket långa tidsperioder som täcks in av säkerhetsanalysen. SSM bedömer inom ramen för granskningen och bedömningen av referensutvecklingen att det är osannolikt att omfattande buffertomvandlingar av stor betydelse för buffertens skyddsförmåga kommer att äga rum så länge som temperaturkriteriet på maximalt 100°C kan uppfyllas (avsnitt 4.7.1.2 och 5.6.2 i denna granskningsrapport). SSM delar SKB:s slutsats att de beaktade processerna inte förväntas ha någon betydande effekt på buffertens säkerhetsfunktioner under förhållanden som kan anses vara troliga givet SKB:s nuvarande förvarsutformning och scenarioanalys. SSM delar dock SKB:s bedömning att vissa buffertomvandlingar kan orsakas av förhöjda temperaturer och höga pH-värden, vilket behöver belysas ytterligare i kommande steg av slutförvarsprogrammet. SSM anser vidare att fallet interaktion av järn med buffertmaterialet behöver belysas ytterligare särskilt med beaktande av betydelsen av en eventuell risk för tidiga brott av kopparhöljet med en förhållandevis tidig exponering och korrosion av segjärnsinsatsen. Eftersom SKB inte kan utesluta att järn-buffert-interaktioner kan inverka på buffertens säkerhetsfunktion kopplad till fördröjning av radionuklider anser SSM att processen behöver integreras i analysen av samtliga fall både hypotetiska och realistiska som involverar en viss risk för eller analys av tidig förlust av kapselns isolerande förmåga. SSM konstaterar att SKB inte har redovisat någon konsekvensanalys av det definierade restskenariot för buffertomvandlingar. SSM noterar dock att fallet med järn-buffert-interaktion nämns i samband med utvärderingen av kombinationen av skjuvlastscenariot och scenariot med advektion i bufferten (SR-Site huvudrapport, avsnitt 13.6.3). SSM anser att en redovisning av samtliga tänkbara konsekvenser av buffertomvandlingar behöver tillföras analysen av de båda barriärfunktionerna isolering och fördröjning i kommande steg i slutförvarsprocessen. SSM noterar att fallet med järn-buffert-interaktion endast påverkar fördröjningspotentialen efter att kapselbrott har ägt rum. SSM konstaterar också att scenarier som utgår ifrån att bufferten saknas gränssätter betydelsen av buffertomvandlingars påverkan på buffertens bidrag till barriärfunktionen fördröjning.

SSM bedömer att SKB:s scenario som analyserar kapselbrott till följd av korrosion är relevant för barriärfunktionen isolering och betydelsefullt för utvärdering av kopparhöljets dimensionering och definition av urvalskriterier för deponeringshåll. SKB:s redovisning kring samtliga korrosionsprocesser med en möjlig inverkan på kapselns säkerhetsfunktioner sammanfattas och granskas av SSM i andra delar av denna granskningsrapport (avsnitt 4.10 och 5.11). SSM:s bedömning som återges i detta stycke speglar SSM:s syn på de förhållanden, processer och händelser som SKB har beaktat i scenarioanalysen, dvs. framförallt sulfidkorrosion under mättade buffertbetingelser.



Beträffande inverkan av andra korrosionsprocesser, omättade buffertförhållanden och lokala korrosionsmekanismer kan SSM inte utesluta att dessa har en betydelse för barriärfunktionen isolering under relevanta tidsskalor. Ett flertal av dessa processer och mekanismer behöver därför enligt SSM:s bedömning integreras i scenarioanalysen. SSM sammanfattar dessa processer och förhållanden samt SSM:s bedömning av deras betydelse i förhållande till scenarioanalysens fullständighet och slutförvarets skyddsförmåga i kommande avsnitt (9.2.2 i denna granskningsrapport). SSM anser dock att SKB:s definition av sulfidkorrosionsfallen med beaktande av olika bufferttillstånd omfattar relevanta frågeställningar som SKB:s referensutveckling och FEP-analyser pekar på. SSM anser vidare att det är positivt att SKB har genomfört ytterligare känslighetsanalyser i förhållande till referensutvecklingen, exempelvis använt alternativa antaganden gällande advektiva buffertförhållanden, erosions- och korrosionsgeometrier och fördelningen av sulfidhalter i grundvatten vid Forsmark. SSM:s granskning av betydelsen av korrosion med syre från glacialt smältvatten pekar på att SKB:s slutsats är rimlig, nämligen att denna process har en liten betydelse för slutförvarets skyddsförmåga eftersom fallet sannolikt omfattar ett fåtal deponeringshål och har baserats på att ett flertal pessimistiska premisser med avseende på inlandsisens läge och omfattningen av syreinträngning i berggrunden (avsnitt 5.11.4.2 i denna granskningsrapport). SSM:s granskning av sulfidkorrosion med intakt buffert och med eroderad buffert pekar på att SKB:s resultat i förhållande till kapselns inneslutningsförmåga i huvudsak är rimliga (avsnitt 5.11.3.2 i denna granskningsrapport). SSM anser dock att mikrobiella processer och mikrobiell sulfatreduktion i synnerhet kan ha en betydelse för korrosionens omfattning för omättade och eroderade buffertförhållanden som behöver utredas ytterligare. Reaktivitet och löslighet av organiska material i grundvatten, buffert och återfyllnadsmaterial behöver undersökas ytterligare och beaktas vid val av buffert och återfyllnadsmaterial. Arbete utfört av SSM:s externa experter visar att det går att reproducera SKB:s beräkningar och att erhållna resultat i huvudsak överensstämmer med SKB:s (SSM Technical note 2015:49). SSM bedömer även att SKB:s konsekvensanalysberäkningar kopplade till kapselkorrosion är rimliga (avsnitt 7.5.4 i denna granskningsrapport). SKB ansätter sannolikheten ett för den s.k. centrala korrosionsvarianten och övriga beräkningar i samband med korrosionsscenarioet anses endast illustrera gränssättande fall.

SSM bedömer att kapselscenarioet med avseende på kapselbrott till följd av isostatisk last har stor betydelse för bedömning av kapselns referensutförande bland annat gällande segjärnsinsatsens utformning och tillverkning. SSM bedömer att analysen av kapselbrott pga. isostatisk last har stor betydelse för utvärderingen av slutförvarets långsiktiga skyddsförmåga eftersom fallet potentiellt skulle kunna leda till att insatsen kollapsar för ett stort antal kapslar i samband med att den isostatiska belastningen når en viss nivå, vilket skulle kunna leda till relativt stora samtida utsläpp av radioaktiva ämnen. SSM konstaterar att kopparhöljets deformationsegenskaper inte har kategoriserats som en av kapselns säkerhetsfunktioner och att fall som involverar fallerade kapslar på grund av tidig deformation av kopparhöljet orsakad av buffertens svälltryck således inte har analyserats som ett specifikt fall inom scenarioet isostatisk last eller inom ett specifikt scenario för kopparhöljets deformation. Detta medför även att kapselns detaljutformning förutom insatsens hållfasthet och skadetålighet inte blivit föremål för analys inom ett konstruktionsstyrande fall eller för utvärdering i förhållande till krav på optimering och bästa möjliga teknik. SSM noterar att SKB tolkar det befintliga kunskapsunderlaget kring kopparhöljets krypduktilitet på ett annat sätt än SSM (avsnitt 4.12 i denna granskningsrapport). SSM anser att vissa kunskapsluckor kvarstår i förhållande till denna materialegenskap vilket enligt SSM:s bedömning föranleder ett behov av att inkludera och analysera ytterligare egenskaper och processer för kapsel och buffert i isostatlastfallet. SSM anser därför att ytterligare riskbidrag från samverkande processer som låg krypduktilitet och väteförsprödning inte kan uteslutas baserat på befintligt kunskapsunderlag. SSM sammanfattar dessa ytterligare processer och egenskaper

inklusive SSM:s bedömning av deras betydelse i det efterföljande avsnittet (9.2.2 i denna granskningsrapport). SSM:s granskning av SKB:s antaganden och beräkningar i samband med isostatlastfallet, givet de processer och egenskaper som SKB beaktar, pekar dock på att kapslarna har tillräcklig integritet mot plastisk kollaps (avsnitt 5.9.1.2 i denna granskningsrapport). Marginalerna minskar betydligt för fall med stora tillverkningsfel och extrema istjocklekar, vilka SSM dock bedömer vara exempel på osannolika fall. Utifrån förutsättningarna i SKB:s scenarioformulering bedömer SSM att det är rimligt att isostatlastfallet kategoriseras som ett restskenario. Som framgår av nästföljande avsnitt finns dock behov av att komplettera detta scenario och behov av att ytterligare utvärdera sannolikheten föreligger efter att scenariot har kompletterats. SSM bedömer dock att SKB har redovisat samtliga relevanta fall inom ramen för konsekvensanalysberäkningar med tanke på att dessa omfattar allt ifrån att en kapsel till att samtliga kapslar fallerar som ett resultat av isostatiska laster. De analyserade fallen innefattande hypotetiska isostatiska kapselbrott gränssätter effekterna av samtliga tillkommande riskbidrag på grund av kvarvarande osäkerheter.

SSM bedömer att SKB:s val av scenario som analyserar kapselbrott till följd av skjuvlast är relevant och av stor betydelse för bedömningen av SKB:s övergripande strategi för att hantera och minimera risk för påverkan från jordskalv. SSM har genomfört en omfattande granskning av SKB:s beräkningar av sannolikheten för kapselbrott till följd av skjuvlast som orsakas av jordskalv (avsnitt 4.13, 5.12 och 6.3 i denna granskningsrapport). SSM bedömer sammanfattningsvis att SKB:s analyser av inverkan av jordskalv i förvarets närhet är rimliga och tillräckligt tillförlitliga för detta skede i SKB:s program. SSM har dock identifierat ett antal osäkerheter i SKB:s redovisning bland annat med avseende på jordskalvsfrekvens i samband med postglaciala betingelser, termiskt inducerad seismicitet, tillförlitlighet vid användning av kriterier för val av deponeringshål, tillämpning av korrelationen mellan sprickstorlek och maximal skjuvrörelse, samt variationer av brottseghetsegenskaper för den gjutna insatsen. SSM konstaterar att dessa frågeställningar behöver belysas ytterligare i kommande steg av SKB:s program (avsnitt 4.13, 5.12 och 6.3 i denna granskningsrapport). SSM bedömer dock att SKB:s kategorisering av scenariot som mindre sannolikt är rimligt. SSM har visserligen inom ramen för egna analyser med hjälp av externa experter erhållit en högre sannolikhet för kapselbrott (SSM Technical note 2014:22), men skillnaderna har bedömts vara av liten betydelse för SKB:s övergripande slutsatser. SSM bedömer att SKB:s konsekvensanalysberäkningar beaktar relevanta förutsättningar i form av olika tidpunkter och tidsperioder för jordskalvsrisk samt effekten av riskutspädning. Utvärderingen av kombinationen av skjuvlastscenariot och scenariot för advektion i bufferten anser SSM vara relevant som grund för bedömning av slutförvarets långsiktiga skyddsförmåga. SSM bedömer att resultat från konsekvensanalysberäkningar kopplade till dessa fall är rimliga (avsnitt 7.5.4 i denna granskningsrapport).

SSM bedömer att SKB har valt relevanta övriga restskenarier som omfattar gränssättande fall, händelseförlopp och förhållanden som belyser betydelsen av enskilda barriärer och barriärfunktioner. SSM noterar att scenarierna för analys av kapselbrott pga. isostatisk last och pinnhålfallet har baserats på möjliga tänkbara förlopp, händelser och processer. I SKB:s analys har dessa bedömts ha så pass låg sannolikhet att leda till kapselbrott att de tillhörande scenarierna kan kategoriseras som restskenarier. Till skillnad från dessa scenarier utvärderar SKB även ett antal fall som belyser olika barriärfunktioners betydelse för slutförvarets skyddsförmåga utan att försöka identifiera förlopp, händelser och processer som skulle kunna leda till sådana situationer. SSM bedömer att detta är rimligt och konsekvent med SSM:s allmänna råd 9 § SSMFS 2008:21. SSM har i detalj granskat och bedömt SKB:s konsekvensanalysberäkningar i samband med restskenarierna (avsnitt 7.4.2 i denna granskningsrapport). SSM har därvid låtit externa experter genomföra egna beräkningar som i stort bekräftade SKB:s resultat (SSM Technical note



2014:33, 2014:55). SSM bedömer att SKB:s resultat är rimliga och på ett godtagbart sätt illustrerar olika barriärfunktioners betydelse under de antagna förutsättningarna. SSM anser dock att SKB kan behöva ta fram flera scenarier som är internt konsekventa med avseende på processer och omgivningsbetingelser och med avseende på de två huvudsakliga barriärfunktionerna isolering och fördröjning (se avsnitt 9.2.1).

SSM bedömer att SKB givet resultaten från SKB:s analys av referensutvecklingen, analys av händelser, processer och egenskaper FEP, samt definition och utvärdering av säkerhetsfunktioner för kapsel, buffert och berg har tagit relevanta scenarier för utvärdering av risken för skadeverkningar för människors hälsa och miljö. Därutöver bedömer SSM att SKB har utvärderat scenarierna och beräknat konsekvenser för människors hälsa och miljö på ett godtagbart sätt baserat på de förutsättningar som har givits av de utvalda scenarierna. SSM bedömer dock att SKB:s risksummering är ottydligt redovisad. SKB anger att scenariot med kapselbrott till följd av korrosion är ett mindre sannolikt scenario (SR-Site huvudrapporten, avsnitt 12.6.3). Samtidigt noterar SSM att korrosionsfallet med initial advektion som ingår i detta scenario i risksummeringen ansätts sannolikhet ett, medan den centrala korrosionsvarianten ansätts sannolikhet noll eftersom den inte ingår i risksummeringen. SSM anser att om ett mindre sannolikt scenario definieras så behöver det ingå i risksummeringen, vilket innebär att en sannolikhet behöver anges för scenariot. SSM:s tolkning av SKB:s risksummering är dock att hela korrosionsscenarioet ingår i huvudscenariot i linje med rekommendationerna i de allmänna råden till 9 § SSMFS 2008:21 att analysen av huvudscenariot kan inrymma ett antal beräkningsfall. Det mest troliga fallet kan anses vara den centrala korrosionsvarianten, men risksummeringen utgår från ett gränssättande fall som är del av huvudscenariot. SSM bedömer att SKB:s ottydliga redovisning av risksummeringen inte påverkar analysens slutsats, nämligen att den resulterade risken från SKB:s analys ligger ungefär två storleksordningar under SSM:s riskkriterium. SSM bedömer att den beräknade risken är rimlig under beaktande av SKB:s scenarioval. SSM bedömer dock att SKB i kommande steg av sitt program behöver inkludera en mera omfattande uppsättning scenarier och belysa fler förhållanden och processer som skulle kunna ha betydelse för kapselns långsiktiga integritet. SSM redogör i följande avsnitt (9.2.1 i denna granskningsrapport) för behovet av ytterligare analyser i kommande steg av SKB:s slutförvarsprogram och hur detta behov förhåller sig till bedömningen av säkerhetsanalysens fullständighet och resultatens tillförlitlighet.

9.2.2 Behov av tillkommande analyser

Enligt SSM:s bedömning har SKB:s urval och analys av scenarier givit ett godtagbart underlag för bedömning av förvarsutvecklingen och förvarets skyddsförmåga från en bred uppsättning aspekter som SSM bedömer som centrala för förvarets skyddsförmåga så som buffertens kemiska stabilitet och erosionsbeständighet, kapselns långsiktiga integritet under mättade förhållanden i sulfidmiljö, barriärsystemets tålighet mot stora jordskalv, samt förutsättningar för fördröjning och transport av radionuklider om kapselns isolerande förmåga av någon anledning skulle brytas under slutförvarets långsiktiga utveckling.

SSM anser dock att scenarioanalysen behöver kompletteras inför kommande steg av slutförvarsprogrammet för att vidareutveckla säkerhetsanalysen samt ytterligare belysa vissa aspekter av betydelse inför en slutlig bedömning av slutförvarsutformningen inklusive dess optimering. Den viktigaste frågan i detta sammanhang är enligt SSM:s bedömning de långa återmättnadstiderna för ett förvar vid Forsmarksplatsen med täta bergförhållanden och deras konsekvenser för utveckling av de tekniska barriärerna. I syfte att minimera konsekvenserna från förväntade klimatförändringar har SKB dessutom utvecklat en metod för att så långt som möjligt undvika deponeringshål med betydande grundvattenflöden och stora strukturer i berget. SSM har vid bedömning av platsvalet

konstaterat att den låga sprickfrekvensen i tilltänka förvarsvolymer vid Forsmark innebär många stora fördelar med tanke på begränsningar av materietransport i berggrunden i förhållande till en normalsprickig berggrund för de båda barriärfunktionerna isolering och fördröjning av radioaktiva ämnen. Detta hindrar dock inte att specifika frågor uppstår kring långa återmättnadstider som behöver hanteras ingående i scenarioanalysen. SSM anser att SKB har förbättrat redovisningen med avseende på fördelning av tider för fullständig återmättnad av deponeringshålerna som en del av kompletteringsförfarandet men att vissa osäkerheter kvarstår bland annat med avseende på fördelning av hydraulisk konduktivitet för det intakta berget och det eventuella bidraget från matrisvatten till buffertens återmättnad.

SSM anser dessutom att långsam återmättnad kan ha en inverkan på ett antal kombinationer av förhållanden, händelser och processer i samband med kopparkapselns integritet som behöver förtydligas och belysas ytterligare. Dessa sammanfattas i följande punktlista som innefattar hänvisningar till de avsnitt i denna granskningsrapport där frågorna behandlas mer ingående:

- Lokal korrosion av kopparhöljet med sulfid under omättade buffertförhållanden. Det i detta fall ingående processerna kopplar antingen till att mikrobiell sulfatreduktion i en omättad återfylld bildar gasformig sulfid som sedan kan transporteras till kapselytorna, eller att det i avsaknad av svälltryck bildas en biofilm av sulfatreducerande bakterier direkt på kapselytan. En betydande tillförsel av sulfid under omättade betingelser i förhållande till mättade innebär möjligen en risk för att en passiverande sulfidfilm kan bildas på kapselytan. Gropkorrosion skulle kunna uppstå om det bildas en passivfilm på kapselytan som sedan delvis bryts ned. Processens betydelse förutsätter att bufferten är omättad och intakt. SSM redovisar en beskrivning och bedömning av dessa processer i avsnitt 4.10.7, 5.11.2 och 5.11.3 i denna granskningsrapport.
- Spänningskorrosion av koppar under reducerande förhållanden vid last- och förskjutningsstyrda fall. Spänningskorrosion under dessa förhållanden förutsätter sannolikt att en passiverande sulfidfilm har bildats på kapselytan. Vidare krävs att buffertens svälltryck leder till dragspänningar i kopparhöljet. Förekomst av omättade förhållanden har en betydelse för risken för uppkomst av en passiverande sulfidfilm genom tillförsel av sulfid i gasfas, och sulfatreducerande mikrobiell aktivitet i bufferten och i återfyllnaden. SSM redovisar en beskrivning och bedömning av dessa processer i avsnitt 4.10.7 i denna granskningsrapport.
- Krypdeformation av kopparhöljet vid last- och förskjutningsstyrda fall. Kopparhöljet behöver kunna deformeras i samband med att buffertens svälltryck byggs upp och att höljet kommer i kontakt med segjärnsinsatsen. Med ett långsamt återmättnadsförlopp och en långsam pålastning ökar svårighetsgraden att säkerställa en tillräcklig brottförlängning och krypduktilitet under långsamma deformationshastigheter. Detta förlopp påverkas förutom av uppbyggnaden av svälltryck av aktuell kapseltemperatur. SSM anser att den nuvarande fundamentala processförståelsen för fosfors inverkan på krypduktiliteten inte är tillräcklig för att helt utesluta förekomsten av en spröd krypmekanism. Därutöver konstaterar SSM att en eventuell påverkan av väte på koppars deformationsegenskaper, s.k. väteförspädning behöver beaktas för detta fall. Förekomst av väte i koppar kopplar till processer som gammaradiolys, sulfidkorrosion och anoxisk korrosion i rent syrgasfritt vatten. SSM redovisar en beskrivning och bedömning av dessa processer i avsnitt 4.12 i denna granskningsrapport.
- Allmän korrosion under inverkan av höga kloridhalter som uppstår under omättade buffertförhållanden. SSM bedömer det ytterst osannolikt att mycket höga kloridhalter och låga pH-värden skulle uppstå samtidigt men anser dock att ytterligare experimentella studier av kopparkorrosion vid höga kloridhalter i



kombination med sulfider är berättigade. Enligt SSM:s bedömning behövs även ytterligare studier av hur kopplade processer i närheten av kapselytorna påverkar kemiska förhållanden. SSM redovisar en beskrivning och bedömning av dessa processer i avsnitt 4.10.6 i denna granskningsrapport.

SSM konstaterar visserligen att ovanstående processer har beskrivits inom ramen för sammanställningar i kapselprocessrapporten (SKB TR-10-46) och andra referenser samt att relevant ytterligare information har tillkommit som en del av kompletteringsförfarandet under granskningen av SKB:s ansökan. SSM anser dock att ovanstående punkter dels bör bli föremål för ytterligare utredningar, dels att SKB i högre detaljeringsgrad behöver integrera hanteringen av enskilda kapselprocesser under återmättnadsprocessen med övrig förvarsutvecklingen inom ramen för en scenarioanalys. SSM saknar ett scenario i SKB:s säkerhetsanalys som analyserar och värderar risken för eventuella tidiga kapselbrott och utvärderar under vilka förutsättningar sådana tidiga kapselbrott skulle kunna förekomma som ett resultat av ovanstående processer eller eventuella andra processer som kan ha en betydelse under förvarets tidiga utveckling. Ett sådant scenario behöver också värderas i termer av scenariokategorisering, scenariosannolikhet och om det behöver beaktas i risksummeringen. SSM konstaterar att SKB inom ramen för den befintliga konsekvensanalysen redan har redovisat konsekvenser av tidiga kapselbrott men att även denna del kan vidareutvecklas för att med bättre precision kunna bedöma potentiella konsekvenser i termer av dos/risk.

De processer som SSM har identifierat som relevanta ovan och som SSM anser behöver ingå i en utökad scenarioanalys pekar också på att SKB behöver komplettera uppsättningen av kapselns säkerhetsfunktioner och tillhörande säkerhetsfunktionsindikatorer. SSM anser att koppars tålighet mot långsamma kryptodeformationer behöver hanteras inom ramen för säkerhetsfunktionerna liksom kombinationen med en eventuell väteförsprödning av kopparmaterialet. SSM konstaterar att modifierade säkerhetsfunktioner och säkerhetsfunktionsindikatorer inklusive tillhörande kriterier kan påverka uppsättningen scenarier som härleds ur dem och vilka processer och händelser som behöver behandlas inom huvudscenariot/mindre sannolika scenarier/restscenarier. I förlängningen kan detta påverka definitionen av de konstruktionsstyrande fallen samt konstruktionsförutsättningarna med tillhörande kriterier samt därmed slutförvarets och slutförvarskomponenternas utformning.

Förutom frågor kring långa återmättnadstider konstaterar SSM att betydelsen av vissa processer och egenskaper hos förvaret och dess komponenter med koppling till effekter av kvarvarande syre behöver klargöras i kommande steg av slutförvarsprogrammet. Det finns för närvarande en viss osäkerhet kring det tidsintervall under vilket oxiderande betingelser kan förekomma i förvarsmiljön men SSM bedömer ändå baserat på befintligt underlag att det sannolikt är en förhållandevis kort period. SSM konstaterar därför att det är lättare att bedöma strålsäkerhetsbetydelsen för dessa frågor än i jämförelse med frågorna kopplade till långa återmättnadstider. Frågor med koppling till kvarvarande syre behöver därför inte nödvändigtvis hanteras inom ramen för en integrerad scenarioanalys. Frågor med koppling till kvarvarande syre sammanfattas i följande punktlista som innefattar hänvisningar till de avsnitt i denna granskningsrapport där frågorna behandlas mer ingående:

- Korrosion av kopparhöljet på grund av syre som förekommer efter driftsförlutningen av en deponeringstunnel. SKB behöver redovisa åtgärder för att med hög tillförlitlighet utesluta risken för att ytterligare syre skulle kunna tränga in i deponeringstunnlarna om dessa inte är helt täta i förhållande till transporttunnlarna. Transport av syre skulle även kunna ske genom icke vattenfyllda sprickor som förbinder deponeringstunneln med transporttunneln, vilket skulle kunna innebära att tiden för oxiderande betingelser sammanfaller



- med hela slutförvarets driftsperiod. SSM redovisar en beskrivning och bedömning av dessa processer i avsnitt 4.10.2 och 4.10.3 i denna granskningsrapport.
- Lokal korrosion av koppar under oxiderande förhållanden. Detta fall skulle bli relevant om en passiverande oxidfilm bildas på kapselytan och leder till gropkorrosion under perioden med oxiderande betingelser. SSM redovisar en beskrivning och bedömning av dessa processer i avsnitt 4.10.2.2 och 4.10.4 i denna granskningsrapport.
 - Spänningskorrosion i kopparhöljet från insidan beroende på förekomst av kvarvarande syre och kväve i spalten mellan insats och kopparhölje efter förslutning av kapseln. SSM anser att denna process inte helt kan uteslutas. SSM redovisar en beskrivning och bedömning av dessa processer i avsnitt 4.10.3.1 i denna granskningsrapport.

Förutom dessa frågor anser SSM att det finns behov av vissa ytterligare utredningar kring frågeställningar för deponeringshål som har eroderats respektive har blivit exponerade för syre på grund av infiltration av glaciala smältvatten (se avsnitt 5.11.5 i denna granskningsrapport). Eftersom dessa frågeställningar avser tider mycket långt in i framtiden och sannolikt endast ett fåtal deponeringshålspositioner, konstaterar SSM dock att den tänkbara inverkan på förvarets skyddsförmåga kan förväntas vara liten. SSM redogör i sin granskningsrapport även för frågeställningar inom en rad andra områden kopplade till säkerhetsanalysen SR-Site som behöver ytterligare belysas i kommande steg av slutförvarsprogrammet. Dessa har dock ingen uttalad inverkan på SKB:s val av scenarier.

SSM bedömer sammanfattningsvis att det finns behov för SKB av att utöka scenarioanalysen så att de tidiga faserna av slutförvarets utveckling särskilt långa återmättnadstider för bufferten representeras och analyseras mera utförligt. Det bör finnas ett scenario i SKB:s säkerhetsanalys som analyserar och värderar risken för eventuella tidiga kapselbrott och utvärderar under vilka förutsättningar sådana tidiga kapselbrott skulle kunna förekomma. SSM anser dock att det inför de kommande stegen i slutförvarsprogrammet finns goda förutsättningar att med den ytterligare ovan specificerade redovisningen slutligt demonstrera uppfyllelse av SSM:s föreskriftskrav. Enligt säkerhetsanalysen och SSM:s granskning (avsnitt 7.4.2 i denna granskningsrapport) medför hypotetiska fall för tidiga kapselbrott förhållandevis små omgivningskonsekvenser, vilket demonstrerar att barriärsystemets tålighet och att förvarets skyddsförmåga måste anses vara god. Detta gäller i synnerhet för deponeringshål i intakt berg med mycket lång återmättnadstid.





Referenser

Alexanderson H., Eskola K. O, Helmens K. F. 2008. Optical dating of a Late Quaternary sediment sequence from Northern Finland. *Geochronometria* 32, 51–59.

Allen A. O., 1961. *The Radiation Chemistry of Water and Aqueous Solutions*. D. van Nostrand Company, Inc.

Alonso E. E., Alcoverro J., Coste F., Malinsky L., Merrien-Soukatchoff V., Kadiri I., Nowak T., Shao H., Nguyen T. S., Selvadurai A. P. S., Armand G., Sobolik S. R., Itamura M., Stone C. M., Webb S. W., Rejeb A., Tijani M., Maouche Z., Kobayashi A., Kurikami H., Ito A., Sugita Y., Chijimatsu M., Börgesson L., Hernelind J., Rutqvist J., Tsang C.-F., Jussila P., 2005. The FEBEX benchmark test: case definition and comparison of modelling approaches. *International Journal of Mechanics & Mining Sciences*, 42, pp. 611-638.

Alonso E. E., Gens A., Josa A., 1990. A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique*, 40, pp. 405-430.

Altaner S. P., Ylagan R. F., 1997. Comparison of structural models of mixed-layer illite/smectite and reaction mechanisms of smectite illitisation. *Clays and Clay Minerals*, 45, pp. 517-533.

Andersen K., Azuma N., Barnola J-M., Bigler M., Biscaye P., Caillon N., Chappellaz J., Clausen H-B., Dahl-Jensen D., Fischer H., Flückiger J., Fritzsche D., Fujii Y., Goto-Azuma K., Grønvold K., Gundestrup N-S., Hansson M., Huber C., Hvidberg C-S., Johnsen S-J., Jonsell U., Jouzel J, Kipfstuhl S, Landais A, Leuenberger M, Lorrain R, Masson-Delmotte V., Miller H., Motoyama H., Narita H., Popp T., Rasmussen S-O., Raynaud D., Röthlisberger R., Ruth U., Samyn D., Schwander J., Shoji H., Siggaard-Andersen M-L., Steffensen J P, Stocker T, Sveinbjörnsdóttir A E, Svensson A, Takata M, Tison J-L., Thorsteinsson T., Watanabe O., Wilhelms F., White J. W. C. 2004. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period. *Nature*, 431, pp 147–151.

Anderson B. L., Sheaffer M. K., Fischer L. E. 2000. *Hydrogen Generation in TRU Waste Transportation Packages*. NUREG/CR-6673 UCRL-ID-13852, U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington DC, USA.

Anderson D. M., 1966. Phase composition of frozen montmorillonite-water mixtures from heat capacity measurements. *Soil Science Society of America Journal*, 30, pp 670–675.

Anderson D. M., Tice A. R. 1972. Predicting unfrozen water contents in frozen soils from surface area measurements. *Highway Research Record*, 393, pp 12–18.

Andersson K., Ketteler G., Bluhm H., Yamamoto S., Ogasawara H., Pettersson L. G. M., Salmeron M., Nilsson A., 2008. Autocatalytic Water Dissociation on Cu(110) at Near Ambient Conditions, *Journal of American Chemical Society*, 130, 2793-2797.

Andrews J.T., Milliman J.D., Jennings A.E., Rynes N., Dwyer J. 1994. Sediment thickness and Holocene glacial marine sedimentation rates in three East Greenland fjords (ca 68° N): *Journal of Geology*, v. 102, pp. 669–683.

Apted M. J., Bennett D. G., Saario T., “A Review of Evidence for Corrosion of Copper by Water”, *SSM Report 2009:30*, ISSN: 2000-0456.



Ari-Lahti E., Lehtikuusi T., Olin M., Saario T., Varis P., 2011. Evidence for internal diffusion of sulphide from groundwater into grain boundaries ahead of crack tip in Cu OFP copper. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46, 134–137.

Ari-Lahti E., Mattilla M., Lehtikuusi T., Saario T., Varis P., 2012. Sulphide-induced embrittlement of Cu OFP – Intermediate report 2. Research Report VTT-R-00291-12, VTT, Finland.

Arvidsson R., 1996. Fennoscandian earthquakes: whole crustal rupturing related to postglacial rebound. *Science*, 274, pp. 744–746.

ASME, 2000, Quality Assurance Requirements for Computer Software for Nuclear Facility Applications, NQA-1-2000, Subpart 2.7, New York, New York: ASME.

ASME XI, IWB-3600, Analytical evaluation of flaws, 2010, Rules for inservice inspection of nuclear power plant components, ASME Boiler & Pressure Vessel Code, The American Society for Mechanical Engineers, Atkinson B. (1984). Subcritical crack growth in geological materials, *JGR* 89: B6 4077-4114.

Atkinson B., 1984.. Subcritical crack growth in geological materials, *JGR* 89: B6 4077-4114.

Auerkari P., Rantala J., Salonen J. 2009. Effect of defects on low temperature creep of OFP copper. In Shibli I A, Holdsworth S R (eds). *Creep and fracture in high temperature components: proceedings of the 2nd ECCO Conference*, Zurich, Switzerland, 21–23 April, 2009, 287–297.

Ault C. R. Jr. 1998. Criteria of excellence for geological inquiry: The necessity of ambiguity. *Journal of Research in Science Teaching*, 35(2), s. 189-212.

Autio J., Hjerpe T., Siitai-Kauppi M. 2005. Porosity, diffusivity and permeability of EDZ in crystalline rock and effect on the migration in a KBS-3 type repository. In EU, 2005. . Impact of excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories. Proc European Commission Cluster Conf and Workshop. 149–155. Luxembourg Nov 3–5, 2003. European Commission EUR 21028 En.

Backers T., 2005. Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock under Mode I and Mode II Loading. PhD thesis, University of Potsdam, Germany.

Backers T, Antikainen J, Rinne M, 2006. Time dependent fracture growth in intact crystalline rock: laboratory procedures and results. In: *GeoProc2006 - 2nd International Conference on Coupled T-H-M-C Processes in Geosystems: Fundamentals, Modelling, Experiments and Applications*. HoHai University, Nanjing, pp. 261 - 266.

Bath A., 2002. Geochemical Parameters Required from the SKB Site Characterisation Programme. SKI report 02:13. Statens kärnkraftinspektion, Stockholm.

Becker D.-A., Buhmann D., Storck R., Alonso J., Cormenzana J.-L., Hugl M., van Gemert F., O’Sullivan P., Laciok A., Marivoet J., Sillen X., Nordman H., Vieno T., Niemeyer M., 2002. Testing of safety and performance indicators (SPIN). EUR 19965 EN, European Commission.



Becker R., Hermansson H-P., 2011, "Evolution of hydrogen by copper in ultrapure water without dissolved oxygen". SSM Report 2011:34. Swedish Radiation Safety Authority.

Benbow S., Metcalfe R., Watson C., Bond A., 2012. SSM Technical Note 2012:18. SR-Site independent modelling of engineered barrier evolution and coupled THMC: Contribution to the Initial Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

Beresford, N.A., Brown, J., Copplestone, D., Garnier-Laplace, J., Howard, B.J., Larsson, C-M., Oughton, O., Pröhl, G. och Zinger, I. (red), 2007. D-ERICA: An integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionizing radiation. Description of purpose, methodology and application. Erica Project, contract number FI6R-CT-2004-508847, European Commission.

Beresford, N.A., Barnett, C.L., Beaugelin-Seiller, K., Brown, J.E., Cheng, J.-J., Copplestone, D., Gaschak, S., Hingston, J.L., Horyna, J., Hosseini, A., Howard, B.J., Kamboj, S., Kryshev, A., Nedveckaite, T., Olyslaegers, G., Sazykina, T., Smith, J.T., Telleria, D., Vives I Batlle, J., Yankovich, T.L., Heling, R., Wood, M.D., Yu, C. 2009. Findings and recommendations from an international comparison of models and approaches for the estimation of radiological exposure to non-human biota (Conference Paper). *Radioprotection* 44(5); 565-570.

Bergaya F., Lagaly G., 2006. General introduction: clay, clay minerals, and clay science. In Bergaya F., Theng B.K.G. and Lagaly G. (ed.), *Handbook of Clay Science*. Elsevier.

Bergh A. 1965. Atomic hydrogen as a reducing agent. *Bell Labs Technical Journal* 44, 261-271.

Betova I, Heinonen J, Kinnunen P, Lilja C, Ruokola E, Saario T, 2004. Application of an on-line corrosion probe and a reference electrode for copper corrosion studies in repository conditions. In: Oversby V M, Werme L O (eds). *Scientific basis for nuclear waste management XXVII: symposium held in Kalmar, Sweden, 15–19 June 2003*. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 807), pp 429–434.

Birgersson M., Karnland O., Nilsson U., 2008. Freezing in saturated bentonite – a thermodynamic approach. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33, pp S527–S530.

Birgersson, L., Neretnieks, I. Diffusion in the Matrix of Granitic Rock: Field Test in the Stripa Mine. *Water Resources Research (Impact Factor: 3.55)*. 11/1990; 26(11):2833-2842. DOI: 10.1029/WR026i011p02833.

Blink, J.A., Greenberg, H.R., Caporuscio, F.A., Houseworth, J.E., Freeze, G.A., Mariner, P. and Cunnane, J. C., 2010. Features, Events and Processes for the Used Fuel Disposition Campaign, Lawrence Livermore National Laboratory, LLNLCONF-464257 December 20, 2010.

Bojinov M., Betova I. and Lilja C., 2010. A mechanism of interaction of copper with a deoxygenated neutral aqueous solution. *Corrosion Science* 52, 2917-2927.

Bray, J.-W., 1987. Chapter 2: Some applications of elastic theory. *Analytical and Computational Methods in Engineering Rock Mechanics*, E.T. Brown (ed.), Allen & Unwin, London, pp. 32-94.



Broczkowski M. E., Noël J. J., Shoesmith D. W., 2004. The inhibiting effects of hydrogen on the corrosion of uranium dioxide under nuclear waste disposal conditions. In: International Youth Nuclear Congress, Canadian Nuclear Society, Toronto, Ontario, Canada. May 9-13, 2004.

Broczkowski M. E., Noël J. J., Shoesmith D. W., 2005. The inhibiting effects of hydrogen on the corrosion of uranium dioxide under nuclear waste disposal conditions. *Journal of Nuclear Materials*, 346, pp 16–23.

Broczkowski M., Zagidulin D., Shoesmith D. W., 2010. The role of dissolved hydrogen on the corrosion/dissolution of spent nuclear fuel, In *Nuclear Energy and the Environment*, ACS Symposium Proceedings, Vol. 1046, Chapter 26, pp. 349-380.

Brown E.T., Hoek E., 1978. Trends in relationships between measured in situ stresses and depth. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15: 211–215.

Brown, J.E., Alfonso, B., Avila, R., Beresford, N.A., Copplestone, D., Pröhl, G., Ulanovsky A. 2008. The ERICA Tool. *J. Environ. Radioact.*, 99, 1371-1383.

Budnitz R.J., Apostolakis G., Boore D.M., Cluff L.S., Coppersmith K.J., Cornell C.A., Morris P.A., 1997. Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts: Main Report and Appendices, NUREG/CR-6372, Volume 1 and 2, Lawrence Livermore National Laboratory, California (USA).

Byfut A., Backers T., Schroeder A., Carstensen C., 2009. Appliance of the Extended Finite Element Method in Geomechanics. 71st EAGE Conference and Exhibition 2009, Amsterdam, The Netherlands.

Bäckblom G., Martin C.D., 1999. Recent experiments in hard rocks to study the excavation response. Implications for the performance of a nuclear waste geological repository. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol 14, No 3, 377–394.

Capron E, Landais A, Chappellaz J, Schilt A, Buiron D, Dahl-Jensen D, Johnsen S J, Jouzel J, Lemieux-Dudon B, Loulergue L, Leuenberger M, Masson-Delmotte V, Meyer H, Oerter H, Stenni B, 2010. Millennial and sub-millennial scale climate variations recorded in polar ice cores over the last glacial period. *Climate of the Past* 6, 345–365.

Carlson L., 2004. Bentonite mineralogy Part 1: Methods of investigation - a literature review, Part 2: Mineralogical research of selected bentonites. Posiva Working Report, 2004-02. POSIVA OY.

Carlson L., Karnland O., Oversby V. M., Rance A. P., Smart N. R., Snellman M., Vähänen M., Werme L. O., 2007. Experimental studies of the interactions between anaerobically corroding iron and bentonite. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 32, pp 334–345.

Chandler N.A., Cournut A., Dixon D.A., Fairhurst C., Hansen F., Gray M., Hara K., Ishijima Y., Kozak E., Martino J., Matsumoto K., McCrank G., Sugita Y., Thompson P., Tillerson J., Vignal B., 2002. The five-year report of the Tunnel Sealing Experiment: An international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP. Atomic Energy of Canada, Limited Report AECL-12727.



Chen J, Qin Z, Shoesmith D W, 2010. Kinetics of corrosion film growth on copper in neutral chloride solutions containing small concentrations of sulfide. *Journal of The Electrochemical Society* 157, C338–C345.

Chen J, Qin Z, Shoesmith D W, 2011a. Rate controlling reactions for copper corrosion in anaerobic aqueous sulphide solutions. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46, 138–141.

Chen J, Qin Z, Shoesmith D W, 2011b. Long-term corrosion of copper in a dilute anaerobic sulfide solution. *Electrochimica Acta* 56, 7854–7861.

Chen J, Qin Z, Shoesmith D W, 2012. Copper corrosion in aqueous sulfide solutions under nuclear waste repository conditions. In *Scientific basis for nuclear waste management XXXV: symposium held in Buenos Aires, Argentina, 2–7 October 2011*. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1475), 465–470.

Christiansson R, Butron C, Hansson K, Lehtimäki T, 2014. Characterization of the Excavation Damaged Zone by means of geological, geophysical and hydrogeological co-interpretation, 8th Asian Rock Mechanics Symposium ARMS8, 14-16 October 2014, Sapporo, Japan.

Christiansson R, Ericsson L O, Gustafson G, 2009, Hydraulic characterisation and conceptual modelling of the Excavation Disturbed Zone (EDZ). *Proceedings from SINOROCK 2009, International Symposium on Rock Mechanics “Rock Characterization, Modelling and Engineering Design Methods”* 19–22 May 2009, Hong Kong.

Cleveland C, Moghaddam S, Orazem M E, 2014. Nanometer-Scale Corrosion of Copper in De-Aerated Deionized Water, *J. Electrochem. Soc.* 161, C107.

Cimne 2002. Code_Bright. Version 2.2. User’s manual. Departamento Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.

Colleoni F., Krinner G., Jakobsson M., Peyaud V., Ritz C., 2009. Influence of regional parameters on the surface mass balance of the Eurasian ice sheet during the peak Saalian (140 kya). *Global and Planetary Change*, 68, pp 132–148.

Cowton T., Nienow P., Bartholomew I., Sole A., Mair D., 2013. Evolution of drainage system morphology at a land-terminating Greenlandic outlet glacier. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118: 1–13.

Craig R. F., 2004. *Craig’s Soil Mechanics*, 7th edition. Spon Press

Crawford J. 2008 R-08-48. Bedrock transport properties Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. Kemakta Konsult AB.

Crawford J. 2013. Memorandum: Retardation of radionuclide transport in cement affected groundwater – response to the request by SSM for supplementary information on retention of radionuclides (SSM2011-2426-110), item 1. Kemakta Konsult AB2013-12-02PDF rendering: Doc1421672, Version 1.0, Status Godkänd, Sekretessklass Öppen.

Cuadros J., Linares J., 1996. Experimental kinetic study of the smectite-to-illite transformation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, pp.439-453.



Cui D., Ekeröth E., Fors P., Spahiu K., 2008. Surface mediated processes in the interaction of spent fuel or α -doped UO_2 with H_2 . Materials Research Society Symposium Proceedings, 1104, pp. 87–99.

Dahl-Jensen D., Mosegaard K., Gundestrup N., Clow G. D., Johnsen S. J., Hansen A. W. and Balling N., 1998. Past temperature directly from the Greenland ice sheet, *Science*, 282, pp. 268–271.

Damjanac B., Fairhurst C., 2010. Evidence for a Long-Term Strength Threshold in Crystalline Rock, *Rock Mech Rock Eng* 43:513–531 DOI 10.1007/s00603-010-0090-9.

Das B. M., 2008. *Advanced Soil Mechanics*, 3rd ed. Taylor & Francis Group.

Dassault Systemes, 2012. *Abaqus 6.12, Abaqus/CAE User's Manual*. Dassault Systemes.

Dassault Systèmes, 2015. <http://www.3ds.com>

Davis J. R. (ed.), *Cast Iron ASM Speciality Handbook*, ASM International, 1996.

Davis R. O., Selvadurai A. P. S., 2002. *Plasticity and Geomechanics*. Cambridge University Press.

DeHart M. D. and Hermann O. W., 1996. An Extension of the Validation of SCALE (SAS2H) Isotopic Predictions for PWR Spent Fuel, ORNL/TM-13317, Lockheed Martin Energy Research Corp., Oak Ridge National Laboratory, september 1996.

Delmas M., Calvet M., Gunnell Y. 2009. Variability of Quaternary glacial erosion rates—A global perspective with special reference to the Eastern Pyrenees, Quaternary. *Science Reviews*, 28, 484–498.

Desch CH, 1944. *Metallography*. 6. ed. London: Longmans, Green and co.

Desgranges L., Ripert M., Piron J. P., Kodja H., Gallier J. P., 2003. Behaviour of fission gases in anirradiated nuclear fuel under α external irradiation. *Journal of Nuclear Materials*, 321, pp 324–330.

Dieter G. E., Kuhn H. A., Semiatin S. L., *Handbook of Workability and Process Design*, ASM International, 2003.

Dillström, P. et al, 2008, A combined deterministic and probabilistic procedure for safety assessment of components with cracks – handbook, SSM Research Report 2008:01.

Doe J., Geier J., 1990. Analyzing fracture network geometry from well tests, Stripa Project Report 91-03. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. Ericsson L-O,

Drake H., Tullborg E.L., MacKenzie A.B., (2009), Detecting the near-surface redox front in crystalline bedrock using fracture mineral distribution, geochemistry and U-series disequilibrium. *Applied Geochemistry*, 24(5), pp.1023-1039.

Dueck A., 2004. Hydro-mechanical properties of a water unsaturated sodium bentonite. Laboratory study and theoretical interpretation. Doctorial Dissertation. Division of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University. Clay Technology AB.



Dvinskikh S. V., Szutkowski K., Furó I., 2009. MRI profiles over very wide concentration ranges: application to swelling of a bentonite clay. *Journal of Magnetic Resonance*, 198, pp. 146-150.

Engels S., Helmens K. F., Väiliranta M., Brooks S. J., Birks H. J. B. 2010. Early Weichselian (MIS 5d and 5c) temperatures and environmental changes in Northern Fennoscandia as recorded by chironomids and macroremains at Sokli, Northeast Finland. *Boreas*, 39, pp 689–704.

Ericsson L-O, Christiansson R, Butron C, Hansson K, Lehtimäki T, 2014. Characterization of the Excavation Damaged Zone by means of geological, geophysical and hydrogeological co-interpretation, 8th Asian Rock Mechanics Symposium ARMS8, 14-16 October 2014, Sapporo, Japan.

Eriksen T. E., Shoesmith D. W., Jonsson M., 2012. Radiation induced dissolution of UO₂ based nuclear fuel-A critical review of predictive modelling approaches. *Journal of Nuclear Materials*, 420, pp. 409–423.

Eshelby J.D., 1957. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 241, s 376–396.

Evins L., Spahiu K., 2013-11-27, What if criticality in the final repository, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Fabel, D., and Harbor, J. 1999, The use of in-situ produced cosmogenic radionuclides in glaciology and glacial geomorphology: *Annals of Glaciology*, v. 28, p.

Fastook J. L., Prentice M. 1994. A finite-element model of Antarctica: sensitivity test for meteorological mass-balance relationship. *Journal of Glaciology*, 40, pp 167–175.

FENCAT: Katalog över jordskalv i norra Europa, Institute of Seismology University of Helsinki, Finland, 2007.

Fenton C., Adams J., Halchuk S. 2006. Seismic hazards assessment for radioactive waste disposal sites in regions of low seismic activity. *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, pp 579–592.

Fernandez, R. A., Anderson, J. B., Wellner, J. S., Hallet, B. 2011. Timescale dependence of glacial erosion rates: a case study of Marinelli Glacier, Cordillera Darwin, southern Patagonia. *Journal of Geophysical Research*. 116, F01020.

Ferry C., Poinssot C., Broudic V., Cappelaere C., Desgranges L., Garcia P., Jégou C., Lovera P., Marimbeau A., Piron J. P., Poulesquen A., Roudil D., Gras J. M., Bouffieux P., 2005. Synthesis on the spent fuel long term evolution. Report CEA-R-6084, Commissariat à l'Énergie Atomique.

Ferry C., Piron J.-P., Poulesquen A., Poinssot C., 2008. Radionuclides release from spent fuel under disposal conditions: re-evaluation of the Instant Release Fraction. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 1107, pp 447–454.

Foster, D.A., Staubwasser, M. and Henderson, G.M., 2004. ²²⁶Ra and Ba concentrations in the Ross Sea measured with multicollector ICP mass spectrometry, *Mar. Chem.*, 87, 59-71.



Fredlund D.G. och Rahardjo H., 1993. Soil Mechanics for Unsaturated Soils. John Wiley and Sons Inc.

Freeze, G. and Swift, P., 2010. Comprehensive Consideration of Features, Events, and Processes (FEPs) for Repository Performance Assessments. PSAM 10 Conference Proceedings. Seattle, Washington, 7-11 June 2010.

Ganchenkova M G, Yagodzinskyy Y N, Borodin V A, Hänninen H, 2014. Effects of hydrogen and impurities on void nucleation in copper: simulation point of view. Philosophical Magazine 94, 3522–3548.

Glynn P D, Voss C I, Provost A M, 1999. Deep penetration of oxygenated meltwaters from warm based ice-sheets into the Fennoscandian Shield. Proceedings NEA/OECD Workshop on “Use of Hydrochemical Information in Testing Groundwater Flow Models”, Borgholm, Sweden, Sept. 1–3, 1997.

GoldSim Technology Group, LLC. GoldSim Version 10.5 and Radionuclide Transport Module. Issaquah, Washington. www.goldsim.com. 2012.

Gournis D., Mantaka-Marketou A. E., Karakassides M. A., and Petridis D., 2000. Effect of γ -irradiation on clays and organoclays: a Mossbauer and XRD study. Physics and Chemistry of Minerals, 27 (7), pp. 514–521.

Grambow B., Bruno J., Duro L., Merino J., Tamayo A., Martin C., Pepin G., Schumacher S., Smidt O., Ferry C., Jegou C., Quiñones J., Iglesias E., Rodriguez Villagra N., Nieto J. M., Martínez-Esparza A., Loida A., Metz V., Kienzler B., Bracke G., Pellegrini D., Mathieu G., Wasselin-Trupin V., Serres C., Wegen D., Jonsson M., Johnson L., Lemmens K., Liu J., Spahiu K., Ekeroth E., Casas I., de Pablo J., Watson C., Robinson P., Hodgkinson D., 2010. MICADO: Model uncertainty for the mechanism of dissolution of spent nuclear fuel in a waste repository. Final report. EUR 24597 EN, European Commission.

Grambow B., Loida A., Martínez-Esparza A., Díaz-Arocas P., de Pablo J., Paul J.-L., Marx G., Glatz J.-P., Lemmens K., Ollila K., Christensen H. 2000. Source term for performance assessment of spent fuel as a waste form. EUR 19140, European Commission.

Grandia 2013, Reply to comments and questions from SSM concerning Ba-Ra sulphate co-precipitation in canister, Amphos 21 R2211.4.

Gray M., 1993. OECD/NEA International Stripa Project 1980–1992. Overview Volume III, Engineered Barriers. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Grivé, M., Garcia, D., Campos, I., Idiart, A., Duro, L. (2013). Simple Function Spreadsheet tool: Phosphates update and Temperature assessment. Final report Amphos21.

Gu B. X., Wang L. M., Minc L. D., Ewing R. C., 2001. Temperature effects on the radiation stability and ion exchange capacity of smectites. Journal of Nuclear Materials, 297, pp. 345-354.



Guilbert S., Sauvage T., Erramli H., Barthe M.-F., Desgardin P., Blondiaux G., Corbel C., Piron J. P., 2003. Helium behavior in UO₂ polycrystalline disks. *Journal of Nuclear Materials*, 321, pp 121–128.

Gustafson G., 2009. *Hydrogeologi för bergbyggare*, Formas.

Gustafson L., Ljungberg A., 2010. Forsmark site investigation. A deformation analysis of the Forsmark GPS monitoring network from 2005 to 2009, SKB P-10-29. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Hallet, B., Hunter, L., Bogen, J. 1996. Rates of erosion and sediment evacuation by glaciers: a review of field data and their implications. *Global Planet. Change* 12, pp. 213–235.

Hamada S., Kudo Y., Tojo T., 1992. Preparation and reduction kinetics of uniform copper particles from copper(I) oxides with hydrogen. *Colloids and Surfaces*, 67, 45-51.

Havel F., 2004. *Creep in Soft Soils*. Doctoral Dissertation. The Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, Norwegian University of Science and Technology.

Hedin A., 2002. Integrated analytic radionuclide transport model for a spent nuclear fuel repository in saturated fractured rock. *Nuclear Technology*, 138, pp 179–205.

Helmens K. F., Bos J. A. A., Engels S., Van Meerbeeck C. J., Bohncke S. J. P., Renssen H., Heiri O., Brooks S. J., Seppä H., Birks H. J. B., Wohlfarth B. 2007. Present-day temperatures in northern Scandinavia during the last glaciation. *Geology*, 35, pp 987–990.

Helmens K F., Engels S., 2010. Ice-free conditions in eastern Fennoscandia during early Marine Isotope Stage 3: lacustrine records. *Boreas*, 39, pp 399–409.

Helmens K F., 2013. The Last Interglacial-Glacial cycle (MIS 5e2) re-examined based on long proxy records from central and northern Europe. *Quaternary Science Reviews* 86, pp 115-143.

Hermann O. W. and DeHart M. D., 1998. Validation of SCALE (SAS2H) Isotopic Predictions for BWR Spent Fuel, ORNL/TM-13315, Lockheed Martin Energy Research Corp., Oak Ridge National Laboratory, September 1998.

Hermann O. W., Bowman S. M., Brady M. C. and Parks C. V., 1995. Validation of the Scale System for PWR Spent Fuel Isotopic Composition Analyses, ORNL/TM-12667, Lockheed Martin Energy Research Corp., Oak Ridge National Laboratory, March 1995.

Hetzel F., Doner H. E., 1993. Some colloidal properties of beidellite: comparison with low and high charge montmorillonite. *Clays and Clay Minerals*, 41, pp. 453–460.

Hiemenz P. C., Rajagopalan R., 1997. *Principles of Colloid and Surface Chemistry*, 3rd ed, revised and expanded. Marcel Dekker, Inc.

Hiroki A., LaVerne J. A., 2005. Decomposition of hydrogenperoxide at water-ceramic oxide interfaces. *Journal of Physical Chemistry B*, 109, pp. 3364-3370.

Holmboe M., Jonsson M., Wold S., 2012. Influence of γ -radiation on the reactivity of montmorillonite towards H₂O₂. *Radiation Physics and Chemistry*, 81(2), pp. 190–194.



- Holmboe M., Norrfors K. K., Jonsson M., Wold S. 2011. Effect of γ -radiation on radionuclide retention in compacted bentonite. *Radiation Physics and Chemistry*, 80(12), p. 1371–1377.
- Holmboe M., Wold S., Jonsson M., García-García S., 2009. Effects of γ -irradiation on the stability of colloidal Na^+ -Montmorillonite dispersions. *Applied Clay Science*, 43, pp. 86-90.
- Holmlund P., 2008. Review of climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Can, I: Review of SKB's Safety Assessment SR-Can: Contributions in support of SKI's and SSI's review by external consultants, SKI report 2008:16, SSI report 2008:06. Swedish Nuclear Power Inspectorate.
- Hora S., Jensen M., 2006. Formella expertbedömningar av jordskalv efter nedisning i Sverige, Statens strålskyddsinstitut (SSI).
- Horinouchi H, Shinohara M, Otsuka T, Hashizume K, Tanabe T. 2013. Determination of hydrogen diffusion and permeation coefficients in pure copper at room temperature by means of tritium tracer techniques. *Journal of Alloys and Compounds* 580 (2013) S73–S75.
- Houmark-Nielsen M. 2010. Extent, age and dynamics of Marine Isotope Stage 3 glaciations in the Southwestern Baltic Basin. *Boreas* 39, 343–359.
- Howle, J.F., Bawden, G.W., Schweickert, R.A., Finkel, R.C., Hunter, L.E., Rose, R.S. and von Twisten, B., 2012, Airborne LiDAR analysis and geochronology of faulted glacial moraines in the Tahoe-Sierra frontal fault zone reveal substantial seismic hazards in the Lake Tahoe region, California-Nevada USA: *Geological Society of America Bulletin*, 2012, doi: 10.1130/B30598.1.
- Huang W. L., Longo J. M., Pevear D. R., 1993. An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. *Clays and Clay Minerals*, 41, pp. 162-177.
- Huang W. H., Chen W. C., 2004. Swelling behavior of a potential buffer material under simulated near field environment. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 41, pp. 1271–1279.
- Huber C., Leuenberger M., Spahni R., Flückiger J., Schwander J., Stocker T. F., Johnsen S., Landais A., Jouzel J. 2006. Isotope calibrated Greenland temperature record over Marine Isotope Stage 3 and its relation to CH_4 . *Earth and Planetary Science Letters*, 243, pp 504–519.
- Hultquist G. et al., 2008. Detection of hydrogen in corrosion of copper in pure water, Proceedings, Paper no. 3884, ICC, Las Vegas, USA, NACE International (2008).
- Hultquist G., Hydrogen evolution in corrosion of copper in pure water. *Corrosion Science*, Volume 26, Issue 2, 1986, pp. 173–177.
- Hultquist G., Chuah G.K., Tan K.L. Comments on hydrogen evolution from the corrosion of pure copper. *Corrosion Science*, Volume 29, Issues 11–12, 1989, pp. 1371–1377.



Hultquist, G. m fl, 2009, Water Corrodes Copper, Cat. Lett. DOI 10.1007/s10562-009-0113-x.

Hultquist, G. m fl, 2011, Hydrogen gas production during corrosion of copper by water, Corrosion Science Volume 53, Issue 1, pp. 310-319.

Hultquist M.J., Graham O., Kodra S., Moisa R., Liu U., Bexell J.L., Smialek., Corrosion of copper in distilled water without O₂ and the detection of produced hydrogen, Corrosion Science, Volume 95, June 2015, pp. 162-167.

Hummel W., Berner U., Curti E. (2002) Nagra/Psi Chemical Thermodynamic Data Base 01/01, Universal Publishers.

Hunter R. J., 2001. Foundations of Colloid Science, 2nd ed. Oxford University Press.

Hunter L.E., Howle J.F., Rose R.S. and Bawden G.W., 2011, LiDAR-Assisted Identification of an Active Fault near Truckee, California: Bulletin of the Seismological Society of America, v. 101, no. 3, pp. 1162-1181.

Huybrechts P., 2010. Vulnerability of an underground radioactive waste repository in Northern Belgium to glaciotectionic and glaciofluvial activity during the next 1 million years. Report 10/01, Departement Geografie VUB.

Hwang Y.S., Kang C.H., Soo E.J., 2006. Development of the KAERI FEP, Scenario, and Assessment Method Database for Permanent Disposal of HLW in Korea. Progress in Nuclear Energy Volume 48, Issue 2 pp 165-172. Daejeon, South Korea: Korea Atomic Energy Research Institute.

IAEA, 2003. "Reference Biospheres" for Solid Radioactive Waste Disposal. In: Report of BIOMASS Theme 1 of the BIOSphere Modelling and ASSEssment (BIOMASS) Programme 2003. IAEA-BIOMASS-6. International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria.

IAEA, 2010a. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer to humans in terrestrial and freshwater environments, Technical Report Series 472, International Atomic Energy Agency, Vienna.

IAEA, 2010b, SSG-9. Seismic hazards in site evaluation for nuclear installations, Specific Safety Guide No. SSG-09, Vienna, 60 p. inferences from borehole temperature profiles, Bulletin of Geography-Physical Geography Series, V.5(1), 7-28.

IAEA, 2010c. Handbook of parameter values for the prediction of radionuclide transfer in temperate environments. Technical Report Series 422, IAEA, Vienna.

IAEA, 2011. Disposal of Radioactive Waste, International Atomic Energy Agency Safety Standards Series No. SSR-5.

IAEA, 2011. Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. Specific Safety Guide. SSG-14, IAEA, Vienna.

ICRP, 2000. Radiation protection recommendations as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste. Oxford: Pergamon. (ICRP Publication 81, Annals of the ICRP 28:4)



- ICRP, 2003. A framework for assessing the impact of ionising radiation on non-human species. ICRP publication 91, Annals of the ICRP 33(3).
- ICRP, 2007. 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection (Users Edition). ICRP Publication 103 (User's Edition). Ann. ICRP 37 (2-4).
- ICRP 2008. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP publication 108, Annals of the ICRP 38(4-6).
- ICRP, 2014. Protection of the environment under different exposure situations. ICRP publication 124, Annals of the ICRP 43(1).
- Impact of excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories. Proc European Commission Cluster Conf and Workshop.
- Ingevald K., Strindell L., 1981. Mätning av bergspänningar (bergtryck) i djupa vertikala borrhål. Rapport L-543:2, Statens Vattenfallsverk.
- INSITE M-06-02, Chapman N, Geier J, Tsang C-F, Tirén S, Stephansson O, Bath A, 2006, Tracking issues list (incorporating consolidated review issues). Swedish Nuclear Power Inspectorate.
- INSITE M-09-06, Chapman N, Geier J, Tsang C-F, Tirén S, Stephansson O, Bath A, 2009. SDM-Site Forsmark, Review of SKB TR-08-05 (Site description of Forsmark at Completion of the Site Investigation Phase) and supporting documentation. Swedish Radiation Safety Authority.
- Isaev E. I., Lilja C., Johansson B., 2012. Exploring monovalent copper compounds with oxygen and hydrogen. Proceedings of National Academy of Sciences 109, 686–689.
- Itasca, 2003. 3DEC – 3-Dimensional Distinct Element Code, User's Guide, Version: 3. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, USA.
- Itasca, 2007. 3DEC – 3-Dimensional Distinct Element Code. User's guide. Minneapolis: Itasca Consulting Group.
- Itasca, 2009. PFC2D version 4.0. Theory and Background. Itasca Consulting Group Inc. Minneapolis, USA.
- Jakobsson et al., 2014, Major earthquake at the Pleistocene-Holocen transition in Lake Vättern, Southern Sweden, Geology.
- Jakobsson M., Björck S., O'Regan M., Flodén T., Greenwood S.L., Swärd H., Lif A., Ampel L., Koyi H., Skelton A. 2014. Major earthquake at the Pleistocene-Holocene transition in Lake Vättern, Southern Sweden, Geology, published online on 17 March 2014 as doi:10.1130/G35499.1
- Jiao Y., Hudson J.A., 1995. The fully-coupled model for rock engineering systems, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 32, Issue 5, s. 491–512.
- JNC, 2000. H12 Project to Establish the Scientific and Technical Basis for HLW Disposal in Japan. Supporting Report 3: Safety Assessment of the Geological Disposal System, April 2000.



- Jonsson M., Nielsen F., Roth O., Ekeroth E., Nilsson S., Hossain M. M., 2007. Radiation induced spent nuclear fuel dissolution under deep repository conditions. *Environ. Sci. Technol.*, 41, pp. 7087-7093.
- Johnsen S. J., Dahl-Jensen D., Dansgaard W., Gundestrup N. 1995. Greenland palaeotemperatures derived from GRIP bore hole temperature and ice core isotope profiles. *Tellus*, 47B, pp 624–629.
- Johnson L. H., McGinnes D. F. 2002. Partitioning of radionuclides in Swiss power reactor fuels. Nagra Technical Report 02-07. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Switzerland.
- Johnson L. H., Shoesmith D. W., 1988. Chapter 11, spent fuel. In: Lutze W. and Ewing R. C. (ed.), *Radioactive Waste Forms for the Future*. Elsevier Science Publishers B. V.
- Johnson L., Poinssot C., Ferry C., Lovera P. 2004. Estimates of the instant release fraction for UO₂ and MOX fuel at t=0. A report of the Spent Fuel Stability (SFS) Project of the 5th Euratom Framework Program. Nagra Technical Report 04-08. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste, Switzerland.
- Johnston A.C., 1996. A wave in the Earth. *Science*, 274, p. 735.
- Jones A. R., 1959. Radiation-induced reactions in the N₂-O₂-H₂O system. *Radiation Research*, 10, pp. 655-663.
- Jonsson M., 2012. Radiation effects on materials used in geological repositories for spent nuclear fuel. *ISRN Material Science*, volume 1012, article ID 639520.
- Joyce S., Hartley L., Applegate D., Hoek J., Jackson P., 2014. Multi-scale groundwater flow modeling during temperate climate conditions for the safety assessment of the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden, *Hydrogeology Journal*, 22(6), pp. 1233-1249.
- Karnland O., Muurinen A., Karlsson F., 2005. Bentonite swelling pressure in NaCl solutions – experimentally determined data and model calculations. In: Alonso E, Ledesma A (eds). *Advances in understanding engineered clay barriers: proceedings of the International Symposium on Large Scale Field Tests in Granite, Sitges, Barcelona, 12–14 November 2003*. Taylor & Francis Group, pp 241–256.
- Kelm M., Bohnert E. 2004. A kinetic model for the radiolysis of chloride brine, its sensitivity against model parameters and a comparison with experiments. *FZK Wissenschaftliche Berichte FZKA 6977*, Forschungszentrum Karlsruhe.
- Kelm M., Bohnert E. 2005. Gamma radiolysis of NaCl brine: effect of dissolved radiolysis gases on the radiolytic yield of long-lived products. *Journal of Nuclear Materials*, 346, pp. 1–4.
- Khaled E. M., Stucki J. W., 1991. Iron oxidation state effects on cation fixation in smectites. *Soil Science Society of America Journal*, 55, pp 550–554.
- Kienzler B., Metz V., Duro L., Valls A. 2014. FIRST-Nuclides (Contract Number: 295722). Deliverable (D-No: 5.4). Final (3rd) Annual Workshop Proceedings. European Commission, Community Research.



- Kim S S., Chun K S., Kang K C., Baik M H., Kwon S H., Choi J W., 2007. Estimation of the corrosion thickness of a disposal container for high-level radioactive wastes in a wet bentonite. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 13, 959–964.
- King F., Ahonen L., Taxén C., Vuorinen U., Werme L., 2002. Copper corrosion under expected conditions in a deep geologic repository. Posiva 2002-01, Posiva Oy, Finland.
- Kitzes A. S., 1950. Uranium hydride: A survey. ORNL-649. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA.
- Kjellander R., Marcelja S., Quirk J. P., 1988. Attractive double-layer Interactions between calcium clay particles. *Journal of Colloid and Interface Science*, 126, pp. 194–211.
- Kjellander R., Åkesson T., Jönsson B., Marcelja S., 1992. Double layer interactions in mono- and divalent electrolytes: A comparison of the anisotropic hypernetted chain theory and Monte Carlo simulations, *Journal of Chemical Physics*, 97, pp. 1424-1431.
- Kleman J., Hättestrand C., 1999. Frozen-based Fennoscandian and Laurentide ice sheets during the last glacial maximum. *Nature*, 402, pp 63–66.
- Kłos, R., Limer, L., Shaw, G., Pérez-Sánchez, D. and Xu, S. (2013). Advanced spatio-temporal modeling in long-term radiological assessment models - Radionuclides in the soil column. *Journal of Radiological Protection*. 34, 31-50.
- Kłos, R. and Wörman, A. 2015. Site specificity in advanced dose assessment modelling. Proceedings of the 15 th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRPMC), Charleston, SC, USA, April 12-16, 2015. pp.447-454.
- Kłos, R., Pérez-Sánchez, D., Xu, S. and Nordén, M. (2015). Results from post-closure dose assessment models with alternative levels of detail. Proceedings of the 15 th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRPMC), Charleston, SC, USA, April 12-16, 2015. pp.784-791.
- Ko Y., Kemeny J., 2011. Subcritical crack growth in rocks under shear loading. *JGR*, Vol. 116, B01407, doi:10.1029/2010JB000846.
- Koppes M., Montgomery D., 2009. The relative efficacy of fluvial and glacial erosion over modern to orogenic timescales. *Nature Geoscience*. 2, pp. 644–647.
- Koppes, M., Hallet, B., Rignot, E., Mouginit, J., Wellner, J.S., Boldt, K., 2015. Observed latitudinal variations in erosion as a function of glacier dynamics. *Nature* 526, 100–103.
- Korpisalo, A., Suppala, I., Kukkonen, I. & Koskinen, T., 2013. Thermal Conductivities and Diffusivities of Rocks in Four Shallow ONKALO Holes and Drillholes OL-KR46 and OL-KR56, Posiva Workreport 2013-36.
- Korzhavyi P A., Soroka I L., Boman M., Johansson B., 2011. Thermodynamics of stable and metastable Cu-O-H compounds. *Solid State Phenomena* 172–174, 973–978.
- Kumpulainen S., Kiviranta L., 2010. Mineralogical and chemical characterisation of various bentonite and smectite-rich clay materials - Part A: Comparison and development of mineralogical characterization methods, Part B: Mineralogical and chemical characterization of clay materials. Posiva Working Report 2010-52. POSIVA OY.



Kumpulainen S., Kiviranta L., Carlsson T., Muurinen A., Svensson D., Sasamoto H., Yui M., Wersin P., Rosch D., 2010. Long-term alteration of bentonite in the presence of metallic iron. SKB R-10-52, Svensk Kärnbränslehantering AB, Posiva Working Report 2010-71, Posiva Oy, Finland.

La Pointe P R., Cladouhos T., Follin S., 2002. Development, application, and evaluation of a methodology to estimate distributed slip on fractures due to future earthquakes for nuclear waste repository performance assessment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, pp 923–944.

Lagerbäck, R., and Sundh, M., 2008. Early Holocene faulting and paleoseismicity in northern Sweden: Geological Survey of Sweden Research Paper C 836, p 80.

Lambeck K., Purcell A., Funder S., Kjær K H., Larsen E., Möller P., 2006. Constraints on the Late Saalian to early Middle Weichselian ice sheet of Eurasia from field data and rebound modelling. *Boreas*, 35, pp 539–575.

Lambeck K., Purcell A., Zhao J., and Svensson N.-O., 2010. The Scandinavian ice sheet: from MIS 4 to the end of the last glacial maximum, *Boreas*, 39, 410–435.

Lambeck K., Smither C., Johnston P., 1998. Sea-level change, glacial rebound and mantle viscosity for northern Europe. *Geophysical Journal International*, 134, pp 102–144.

Lantenois S., Lanson B., Muller F., Bauer A., Jullien M., Plançon A., 2005. Experimental study of smectite interaction with metal Fe at low temperature: 1. Smectite destabilization. *Clays and Clay Minerals*, 6, pp 597–612.

Lantmäteriet (2010) Produktbeskrivning: GSD-Höjddata, grid 2+

LaVerne J. A., 2005. H₂ Formation from the Radiolysis of Liquid Water with Zirconia. *The Journal of Physical Chemistry, B. Letters*. 109, pp. 5395-5397.

LaVerne J. A., Tandon L., 2002. H₂ Production in the Radiolysis of Water on CeO₂ and ZrO₂. *J. Phys. Chem. B*, 106, pp. 380-386.

LaVerne J. A., Tandon L., 2003. H₂ Production in the Radiolysis of Water on UO₂ and Other Oxides. *J. Phys. Chem. B*, 107, pp. 13623-13628.

Leonard M., 2010. Earthquake Fault Scaling: Self-Consistent Relating of Rupture Length, Width, Average Displacement, and Moment Release. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100(5A), p. 1971-1988, doi: 10.1785/0120090189.

Leuenberger M.C., Lang, C., Schwander, J., 1999. Delta 15N measurements as a calibration tool for the paleothermometer and gas-ice age differences: a case study for the 8200 B.P. event on GRIP ice, *Journal of Geophysical Research* 104 (D18) 22163–22170.

Li J. Z., Xie Y., 2013. Creep property of undisturbed reticulated red clay under constant-load creep test. In: av Chang S.-Y., Al Bahar S. K., Zhao J. (ed.). *Advances in Civil Engineering and Building Materials*. Pages 489-492. CRC Press, Taylor and Francis Group.

Liu L., Moreno L., Neretniek I., 2009. A dynamic force balance model for colloid expansion and its DLVO-based application. *Langmuir*, 25, pp. 679-687.



- Li Y., Lousada C M., Korzhavyi P A., 2014. Electronic structures and optical properties of cuprous oxide and hydroxide. In Craciun V, Guilloux-Viry M, Jain M, Jia Q X, Kozuka H, Kumar D, Mathur S, Obradors X, Singh K (eds). 2014 MRS Spring Meeting – Symposium K/RR – Synthesis, characterization and applications of functional materials – Thin films and nanostructures. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 1675). doi:10.1557/opl.2014.862.
- Li Y., Lousada C M., Soroka I L., Korzhavyi P A., Bond Network Topology and Antiferroelectric Order in Cuprice CuOH. 2015. *Inorganic Chemistry*, 54, 8969-8977.
- Little B J., Lee J S., 2007. Microbiologically influenced corrosion. Hoboken, NJ: Wiley.
- Loida A., Grambow B., Geckeis H., 1996. Anoxic corrosion of various high burnup spent fuel samples. *Journal of Nuclear Materials*, 238, pp 11–22.
- Loida A., Metz V., Kienzler B., 2007. Alteration behaviour of high burnup spent fuel in salt brine under hydrogen overpressure and in presence of bromide. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 985, pp. 15–20.
- Lousada C M., Johansson A J., Korzhavyi P A., 2015. Thermodynamics of H₂O splitting and H₂ formation at the Cu(110)-water interface. *The Journal of Physical Chemistry C*, 119, 14102-14113.
- Lousada C M., Soroka I L., Yagodzinskyy Y, Tarakina N V., Todoshchenko O., Hänninen H., Korzhavyi P A., Jonsson M., 2016. Gamma radiation induces hydrogen absorption by copper in water. *Nature Scientific Reports* 6, 24234.
- Louthan M., 2008. Hydrogen embrittlement of metals: a primer for the failure analyst. *J Fail. Anal. and Preven.* 8, 289-307.
- Lui T. S., Chao C. G., 1989. *Journal of Materials Science*, 24, 2503-2507
- Lund B., Zoback M. (1999). Orientation and magnitude of in situ stress to 6.5 km depth in the Baltic Shield. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36: 169–190.
- Lundgren K., 2006a. Ringhals 3 - FSAR Topical Report – Neutron induced activity in structural materials. Rapport 04-0030R rev. 3, ALARA Engineering AB.
- Lundgren K., 2006b. Ringhals 3 - FSAR Topical Report – Activated corrosion products. Rapport 04-0032R rev. 3, ALARA Engineering AB.
- Lundgren K., 2008a. Oskarshamn 3 – Projekt PULS – Referens till säkerhetsredovisning – Neutroninducerad aktivitet i komponenter. Rapport 04-0014R, rev. 4, ALARA Engineering AB.
- Lundgren K., 2008b. Oskarshamn 3 – Projekt PULS – Referens till säkerhetsredovisning – aktiverade korrosionsprodukter. Rapport 06-0013R, rev. 6, ALARA Engineering AB.
- Löfgren M., 2014. Artifacts associated with electrical measurements of the rock matrix formation factor. Niressa AB, 2014-01-29. SKBdoc 1417017.



- Löfgren M. and Crawford J., 2014. Modelling of radionuclide retention by matrix diffusion in a layered rock model - response to the request by SSM for supplementary information on retention of radionuclides, items 4 and 6. SKBdoc 1421960.
- MacDonald D., Sharifi-Asl S., 2011. Is Copper Immune to Corrosion When in Contact With Water and Aqueous Solutions? Swedish Radiation Safety Authority, SSM 2011:09.
- Majorowicz J., 2012. Permafrost at the ice base of recent Pleistocene glaciations- Inferences from Borehole Temperature Profiles. Bulletin of Geography, No. 5, 2012.
- Mao et al., Passivity Breakdown on Copper: Influence of Chloride Ion, *Electrochim. Acta*, 144 (2014) 391-399.
- Marschall P., Fein E., Kull H., Lanyon W., Liedtke L., Müller-Lyda I., Shao H., 1999. Conclusions of the Tunnel Near-Field Programme (CTN). Nagra Technical Report 99-07, NAGRA, Swiss National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste.
- Martin C.D., Christiansson R. 2009., Estimating the potential for spalling around a deep nuclear waste repository in crystalline rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* Vol. 46, pp. 219-228.
- Martin G., Maillard S., van Brutzel L., Garcia P., Dorado B., Valot C., 2009. A molecular dynamics study of radiation induced diffusion in uranium dioxide. *Journal of Nuclear Materials*, 385, pp 351–357.
- Martinsson Å., Sandström R. 2012. Hydrogen depth profile in phosphorus-doped, oxygen-free copper after cathodic charging. *Journal of Materials Science* 47, 6768-6776.
- Masurat P. A., Pedersen K., 2003. Microbial sulphide production in compacted bentonite at the commencement of long-term disposal of high-level radioactive waste. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, volume 807.
- Masurat P., Eriksson S., Pedersen K., 2010. Microbial sulphide production in compacted Wyoming MX-80 bentonite under in situ conditions relevant to a repository for high-level radioactive waste. *Applied Clay Science*, 47, pp 58–64.
- Masurat P., Eriksson S., Pedersen K., 2010. Evidence for indigenous sulphate-reducing bacteria in commercial Wyoming bentonite MX-80. *Applied Clay Science*. Vol. 47 1-2, pp. 51-57.
- Mathurin F. A., Åström M., Laaksoharju M., Kalinowski B.E., Tullborg E.L., 2012, Effect of tunnel excavation on source and mixing of groundwater in a coastal granitoidic fracture network, *Environ. Sci. Technol.* 46(23), pp 12779-12786
- Mattsson H., Li C., Olefjord I., 1990. Analysis of oxide formed on Ti during exposure in bentonite clay. II. The structure of the oxide. *Materials and Corrosion*, 41, pp. 578–584.
- Mattsson H., Olefjord I., 1990. Analysis of oxide formed on titanium during exposure in bentonite clay. I. The oxide growth. *Materials and Corrosion*, 41, pp. 383–390.
- Matzke H., 1980. Gas release mechanisms in UO₂ – A critical review. *Radiation Effects* 53, 219–242.



- Maul P., and Robinson P., 2005. Modelling Radionuclide Transport at Interfaces in the SKB Deep Repository Design, Quintessa Report to SKI, QRS-1097G-2 Version 1.0.
- Mazurek M., Pearson, J.F., Volckaert, G., and Bock, H., 2003. Features, Events and Processes Evaluation Catalogue for Argillaceous Media. OECD/NEA, Paris.
- McLellan R B., 1973. Solid solutions of hydrogen in gold, silver and copper. *Journal of Physics and Chemistry of Solids* 34, 1137–1141.
- Metz V., Bohnert E., Kelm M., Schild D., Reinhardt J., Kienzler B., Buchmeiser M. R., 2007. γ -radiolysis of NaCl brine in the presence of $\text{UO}_2(\text{s})$: effects of hydrogen and bromide. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 985, pp. 33–40.
- Mikko H., Smith C.A., Lund B., Ask M., Munier R., 2014. Neotectonic faulting in Sweden: Surface expressions from the LiDAR based digital elevation model, 31st Nordic Geological Winter Meeting, Geological Society of Sweden, Lund, 8-10 January 2014.
- Miller, W. and Nuria, M., 2007. Process Report – FEPs and Scenarios for a Spent Fuel Repository at Olkiluoto. POSIVA Report 2007-12, December 2007.
- Milne I., Ainsworth, R. A., Dowling, A. R., Stewart, A. T., 1988, Assessment of the integrity of structures containing defects, *The international Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 32, pp. 3-104.
- Mitrovica J. X., Milne G. A., 2003. On post-glacial sea level: I. General theory. *Geophysical Journal International*, 154, pp 253–267.
- Mosser-Ruck R., Cathelineau M., Guillaume D., Charpentier D., Rousset D., Barres O., Michau N., 2010. Effects of temperature, pH, and iron/clay and liquid/clay ratios on experimental conversion of dioctahedral smectite to berthierine, chlorite, vermiculite, or saponite. *Clays and Clay Minerals*, 2, pp 280–291.
- Motamedi M., Karnland O., Pedersen K., 1996. Survival of sulfate reducing bacteria at different water activities in compacted bentonite. *FEMS Microbiology Letters*, 141, pp 83–87.
- Muzeau B., Jégou C., Delaunay F., Broudic V., Brevet A., Catalette H., Simoni E., Corbel C., 2009. Radiolytic oxidation of UO_2 pellets doped with alpha emitters ($^{238/239}\text{Pu}$). *Journal of Alloys and Compounds*, 467, pp 578–589.
- Myers D., 1999. *Surfaces, Interfaces, and Colloids: Principles and Applications*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Mörner N.-A., 2003. Paleoseismicity of Sweden - A novel paradigm. Contribution to INQUA, Sub-commission on Paleoseismology, 320 pp. ISBN-91-631-4072-1.
- Nadeua P.H., Wilson M. J., McHardy W. J., Tait J. M., 1985. The conversion of smectite to illite during diagenesis: evidence from some illitic clays from bentonites and sandstones. *Mineralogical Magazine*, 49, pp. 393-400.



Nagra, 2002. Project Opalinus Clay: FEP Management for Safety Assessment - Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis). Nagra Technical Report NTB 02-23.

NEA, 1991. Disposal of radioactive waste: review of safety assessment methods: a report of the Performance Assessment Advisory Group of the Radioactive Waste Management Committee, OECD Nuclear Energy Agency. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.

NEA, 1995. Future human actions at disposal sites: a report from the NEA Working Group on Assessment of Future Human Actions at Radioactive Waste Disposal Sites. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.

NEA, 1997. Lessons learnt from ten performance assessment studies. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.

NEA, 2004a. Geological Disposal: Building Confidence Using Multiple Lines of Evidence, First AMIGO Workshop Proceedings, Yverdon les Bains, Switzerland, 3-5 June 2003, OECD Nuclear Energy Agency.

NEA, 2004b. Management of uncertainty in safety cases and the role of risk. Workshop proceedings Stockholm, Sweden 2-4 February 2004.

NEA 2005: International Peer Reviews for Radioactive Waste Management: General Information and Guidelines, NEA Report No. 6082, OECD/NEA, Paris, France. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.

NEA, 2007. Linkage of Geoscientific Arguments and the Line of Evidence supporting the Safety Case, Second AMIGO Workshop Proceedings, Toronto, Canada, 20-22 September 2005, OECD Nuclear Energy Agency.

NEA, 2012. Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste, OECD/NEA, Paris, France. Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development.

NEA, 2012. The Post-closure Radiological Safety Case for a Spent Fuel Repository in Sweden: An International Peer Review of the SKB License-application Study of March 2011, OECD Nuclear Energy Agency, Paris.

NEA, 2012. Updating the NEA International FEP List: An IGSC Technical Note, Technical Note 1: Identification and Review of Recent Project specific FEP Lists. NUCLEAR ENERGY AGENCY Report NEA/RWM/R(2013)7, OECD/NEA, Paris, September 2012.

Negron A., Ramos S., Blumenfeld A. L., Pacheco G., Fripiat J. J., 2002. On the structural stability of montmorillonite submitted to heavy γ -irradiation. *Clays and Clay Minerals*, 50, pp. 35–37.

Newman A. C. D., Brown G., 1987. Chapter 1. The chemical constitution of clays. In. Newman A. C. D. (ed.), *Chemistry of Clays and Clay Minerals*. Mineralogical Society Monograph No. 6. Longman Science & Technical.



Nieh T G., Nix W D., 1980. The formation of water vapor bubbles in copper and their effect on intergranular creep fracture. *Acta Metallurgica* 28, 557–566.

Nielsen F., Jonsson M., 2008. Simulations of H₂O₂ concentration profiles in the water surrounding spent nuclear fuel taking mixed radiation fields and bulk reactions into account. *Journal of Nuclear Materials*, 374, pp. 281–285.

Nilsson S. and Jonsson M., 2011. H₂O₂ and radiation induced dissolution of UO₂ and SIMFUEL pellets. *Journal of Nuclear Materials*, 410, pp. 89-93.

Näslund J.-O., Brandefelt J., and Claesson Liljedahl L., 2013. Climate considerations in long-term safety assessments for nuclear waste repositories. *AMBIO*.

Ochs M., Lothenbach B., Wanner H., Sato H., Yui M., 2001. An integrated sorption-diffusion model for the calculation of consistent distribution and diffusion coefficient in compacted bentonite. *Journal of Contaminated Hydrology*, 47, p. 283-296.

OECD NEA, 2012. The post-closure radiological safety case for a spent fuel repository in Sweden. An international peer review of the SKB license-application study of March 2011 (Final report). Organisation for Economic Co-operation and Development / Nuclear Energy Agency.

Olesen O., Bungum, H., Dehls J., Lindholm C., Pascal C. & Roberts D., 2010. Neotectonics, seismicity and contemporary stress field in Norway – mechanisms and implications. In: Roberts, D., Nordgulen, Ø. & Olsen, L. (eds.) *Geology of Norway*, NGU Special Publications pp. 145-173.

Ollila K., 2013. Copper corrosion experiments under anoxic conditions. SKB R-13-34. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

Olsson M., Ouchterlony F., 2003. Ny skadezonformel för skonsam sprängning. *SveBeFo Rapport 65*, Stockholm ISSN 1104 – 1773.

ONDRAF/NIRAS, 2009. The Long-Term Safety Assessment Methodology for the Geological Disposal of Radioactive Waste. ONDRAF/NIRAS report NIRON-TR 2009-14 E, 2009.

ORNL, 2006. SCALE: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluations, ORNL/TM-2005/39, Version 5.1, Vols. I-III, November 2006. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, USA.

Oughton, D.H., Strømman, G., Salbu, B., 2013. Ecological risk assessment of Central Asian mining sites: application of the ERICA assessment tool. *Journal of Environmental Radioactivity* 123; 90-98.

Oversite review of SKB's site investigations, SSI P 1530.06, SSI Dnr 2006/1248-05, 2006b.

Oversite, Pre-study, Site Characterisation at Forsmark, SSI P 1506.05, SSI Dnr 2005/182.

Painter S., Mancillas J., 2013. MARFA version 3.2.3 user's manual: migration analysis of radionuclides in the far field. Posiva Working Report 2013-01, Posiva Oy.



- Parks G. A., Pohl D. C., 1988. Hydrothermal solubility of uraninite. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52, pp. 863–875.
- Pastina B., Isabey J., Hickel B., 1999. The influence of water chemistry on the radiolysis of primary coolant water in pressurized water reactors. *Journal of Nuclear Materials*, 264, pp 309–318.
- Pastina B., LaVerne J. A., 2001. Effect of molecular hydrogen on hydrogen peroxide in water radiolysis. *Journal of Physical Chemistry A*, 105, pp. 9316-9322.
- Payne A J, Huybrechts P, Abe-Ouchi A, Calov R, Fastook J L, Greve R, Marshall S J, Marsiat I, Ritz C, Tarasov L, Thomassen M P A, 2000. Results from the EISMINT model intercomparison: the effects of thermomechanical coupling. *Journal of Glaciology* 46, 227–238.
- Pedersen K., 2002. Chapter 10. Microbial processes in the disposal of high level radioactive waste 500 m underground in Fennoscandian shield rocks. In: Keith-Roach M. J., Livens F. R. (ed.) *Interactions of Microorganisms with Radionuclides*. Elsevier.
- Pedersen K., Motamedi M., Karnland O., Sandén T., 2000a. Cultivability of microorganisms introduced into a compacted bentonite clay buffer under high-level radioactive waste repository conditions. *Engineering Geology*, 58, pp 149–161.
- Pedersen K., Motamedi M., Karnland O., Sandén T., 2000b. Mixing and sulphate-reducing activity of bacteria in swelling, compacted bentonite clay under high-level radioactive waste repository conditions. *Journal of Applied Microbiology*, 89, pp 1038–1047.
- Peltier W. R., 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32, 111–149.
- Perronnet M., Jullien M., Villieras F., Raynal J., Bonnin D., Bruno G., 2008. Evidence of a critical content in Fe(0) on FoCa7 bentonite reactivity at 80°C. *Applied Clay Science*, 38, pp 187–202.
- Petrik N., Alexandrov A., Vall A., 2001. Interfacial energy transfer during gamma radiolysis of water on the surface of ZrO₂ and some other oxides. *Journal of Physical Chemistry B*, 105, pp. 5935-5944.
- Pettersson K., A study of grain boundary sliding in copper with and without an addition of phosphorus, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 405, Issue 2, 15 October 2010, pp. 131-137.
- Plötze M., Kahr G., Stengele R. H., 2003. Alteration of clay minerals-gamma-irradiation effects on physicochemical properties. *Applied Clay Science*, 23, pp. 195– 202.
- Poinssot C., Ferry C., Kelm M., Granbow B., Martinez A., Johnson L., Andriambololona Z., Bruno J., Cachoir C., Cavedon J. M., Christensen H., Corbel C., Jegou C., Lemmens K., Loida A., Lovera P., Miserque F., de Pablo J., Poulesquen A., Quinones J., Rondinella V., Spahiu K., Wegen D.H., 2004. Poinssot C., Ferry C. (ed.). Spent fuel stability under repository conditions – Final report of the European Project. 5th Euratom Framework Programme 1998-2002. European Commission.



- Poinssot C., Ferry C., Poulesquen A., 2007. New Perspectives for the Spent Nuclear Fuel Radionuclides Release Model in a Deep Geological Repository. Materials Research Society Symposium Proceedings, 985, 0985-NN02-06.
- Pollastro R., 1985. Mineralogical and morphological evidence for the formation of illite at the expense of illite/smectite. Clays and Clay Minerals, 33, pp. 265-274.
- Posiva SKB Report 02. 2017. Evaluation of a gas shield for friction stir welding of copper canisters. Posiva Oy. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Pourbaix M., 1974. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. 2nd ed. Houston, TX: National Association of Corrosion Engineers.
- Pryor R. W., 2011. Multiphysics Modeling Using COMSOL®: A First Principle Approach, Mercury Learn and Information Llc., Canada.
- Pushkareva R., Kalinichenko E., Lytovchenko A., Pushkarev A., Kadochnikov V., Plastynina M. 2002. Irradiation effect on physico-chemical properties of clay minerals. Applied Clay Science, 21, p. 117–123.
- Pytte A. M., Reynolds R. C., 1989. The thermal transformation of smectite to illite. In: Naeser N. D. and McCulloh T. H. (ed.) Thermal History of Sedimentary Basins. Springer-Verlag.
- Quintessa, 2013. AMBER 5.7 Reference Guide. Report QE-AMBER-1. Quintessa Limited, Henley-on-Thames, UK.
- Rai D., Felmy A. R., Ryan J. L., 1990. Uranium(IV) hydrolysis constants and solubility product of $\text{UO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}(\text{am})$. Inorganic Chemistry, 29, pp. 260–264.
- Rai D., Yui M., Moore D. A., 2003. Solubility and solubility product at 22°C of $\text{UO}_2(\text{c})$ precipitated from aqueous U(IV) solutions. Journal of Solution Chemistry, 32, pp. 1–17.
- Rantala J., Auerkari P., Laukkanen A., Andersson T., Saukkonen T. Material integrity of welded copper overpack-Annual report 2014, VTT_R-00773-15, 2015.
- Regeringsbeslut angående komplettering av Fud-program 98, 2001-11-01, nr 22.
- Romero L., 1995. The near-field transport in a repository for high-level nuclear waste. Ph. D. thesis. Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- Rondinella V. V., Cobos J., Wiss T., 2004. Leaching Behaviour of Low -Activity Alpha-Doped UO_2 . Mater. Res. Soc. Symp. Proc., 824, p. 167-173.
- Ropital F., 2009. Corrosion and degradation of metallic materials: Understanding of the Phenomena and Applications in Petroleum and Process Industries. p. 121. IFP Publications. Paris (2009).
- Rosborg B., Pan J., Eden D., Karnland O., Werme L., 2004a. Real-time monitoring of copper corrosion at the Äspö hard rock laboratory. Corrosion2004, 04687, InterCorr International, Houston, TX.



Rosborg B., Eden D., Karnland O., Pan J., Werme L., 2004b. The corrosion rate of copper in a test parcel at the Äspö Hard Rock Laboratory. In Oversby V M, Werme L O (eds). Scientific basis for nuclear waste management XXVII: symposium held in Kalmar, Sweden, 15–19 June 2003. Warrendale, PA: Materials Research Society. (Materials Research Society Symposium Proceedings 807), 489–494.

Rosborg B., Eden D., Karnland O., Pan J., Werme L., 2004c. Real-time Monitoring of Copper Corrosion at the Äspö Laboratory, presented at Eurocorr 2004, Nice, September, 2004; Published in a separate volume: pg. 10 in Prediction of Long Term Corrosion Behaviour in Nuclear Waste Systems, Proceedings of 2nd International Workshop, Nice, September 2004, Eurocorr 2004, published by Andra in Science and Technology Series.

Rosborg B., Pan J., Leygraf C., 2005. Tafel slopes in monitoring of copper corrosion in a bentonite/groundwater environment. *Corrosion Science* 47, 3267-3279.

Rosborg B., Pan J., 2008. An electrochemical impedance spectroscopy study of copper in a bentonite/saline groundwater environment. *Electrochimica Acta*, 53, 7556-7564.

Rosborg B., Kranjc A., Kuhar V., Legat A., 2011a. Corrosion rate of pure copper in an oxic bentonite/aqueous groundwater environment. *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46, 148-152.

Rosborg B., Kosec T., Kranjc A., Pan J., Legat A., 2011b. Electrochemical impedance spectroscopy of pure copper exposed in bentonite under oxic conditions. *Electrochimica Acta* 56, 7862-7870.

Roudil D., Deschanel X., Trocellier P., Jégou C., Peugeot S., Bart J.-M., 2004. Helium thermal diffusion in a uranium dioxide matrix. *Journal of Nuclear Materials*, 325, pp 148–158.

Räsänen M. E., Huitti J. V., Bhattarai S., Harvey J., Huttunen S., 2015. The SE sector of the Middle Weichselian Eurasian Ice Sheet was much smaller than assumed. *Quaternary Science Reviews* Volume 122, 15, pp. 131–141.

Röhlig K.-J., Andersson J., Bennett D.G., Forinash E., Gierszewski P., Griffault L., Mönig J., Navarro M., Noseck U., Plischke E., Schneider J., Van Luik A., 2012. OECD/NEA Project on Methods for Safety Assessment for Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste (MeSA): Results and Conclusions, PSAM 11 & ESREL 2012, 25-29 June 2012, Helsinki, Finland.

Safanda J., Szewczyk J. & Majorowicz J., 2004: Geothermal evidence of very low glacial temperatures on a rim of the Fennoscandian ice sheet. *Geophysical Research Letters* 31, L07211.

Sánchez M., Villar M. V., Lloret A., Gens A., 2007. Analysis of the expansive clay hydration under low hydraulic gradient. In Schanz T., (ed.), *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*. Springer Proceeding in Physics, volume 112, pp. 309-318.

Sandström R., Wu R., 2013. Influence of phosphorus on the creep ductility of copper. *J. Nucl. Mater.* 441:364-71.

Savolainen K., Saukkonen T., Mononen J., and Hänninen H., 2008. Entrapped Oxide Particles in Copper Friction Stir Welds. 7th International Symposium on Friction Stir Welding, May 20-22, Awaji Island, Japan.



Schatz T., 2004. Update on artificial fracture tests at B-Tech. The 2nd Annual Workshop of BELBaR project. June 16-18, 2014, Meiringen, Switzerland.

Schmidt P., Lund B., Näslund J-O., Fastook J., 2014. Comparing a thermomechanical Weichselian Ice Sheet reconstruction to reconstructions based on the sea level equation: aspects of ice configurations and glacial isostatic adjustment. *Solid Earth* 5:371–388.

Schofield A., Wroth P., 1968. *Critical state soil mechanics*. McGraw Hill.

Schäfers A., Gaus I., Johnson L., Liu Y., Mayor J. C., Selin P., Wiczorek K., 2014. PEBS Final Scientific Report. Deliverable D5-D16. European Commission.

Scully J R., Edwards M., 2013. Review of the NWMO copper corrosion allowance. NWMO TR-2013-04, Nuclear Waste Management Organization, Canada.

Selroos J-O., Follin S., 2014 Overview of hydrogeological safety assessment modeling conducted for the proposed high-level nuclear waste repository site at Forsmark, Sweden. *Hydrogeology Journal*, 22(6), pp. 1229-1232.

Senior N A., Newman R C., Abghari B., Keech P G., 2013. Influence of pH, temperature, and salinity upon anoxic copper corrosion. In *Proceedings of 16th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*, Asheville, North Carolina, 11–15 August 2013.

Serco, 2008. *ConnectFlow Release 9.6 Technical Summary Document*. SA/ENV/CONNECTFLOW/15, Serco Assurance, Hook.

SHARE, Seismic Hazard Harmonization in Europe, a Collaborative Project in the Cooperation programme of the Seventh Framework Program of the European Commission coordinated by the Swiss Seismological Service, see www.share-eu.org.

Shaw D. J., 1992. *Introduction to Colloid and Surface Chemistry*. 4th ed. Butterworth-Heinemann, Elsevier Science.

Shen B., Rinne M., Stephansson O., 2006. *FRACOD2D. User's Manual ver. 2.21*. Fracom Ltd., Finland.

Shoosmith D. W., Sunder S., Hocking W. H., 1994. Chapter 6. Electrochemistry of UO₂ Nuclear Fuel. In: Lipkowski J., Ross P. N. (ed.). *Electrochemistry of Novel Materials*, *Frontiers of Electrochemistry*. VCH Publishers, Inc.

Shoosmith D. W., Sunder S., Tait J. C., 1998. Validation of an electrochemical model for the oxidative dissolution of used CANDU fuel. *Journal of Nuclear Materials*, 257, p. 89-98.

Singh A., Mitchell J. K., 1968. General stress-strain-time function for soils. *American Society of Civil Engineers Proceedings*, vol. 94, No. SM1.

Siren, T., 2011. *Fracture Mechanics Prediction for Posiva's Olkiluoto Spalling Experiment (POSE)*, Posiva Workreport 2011-23, Posiva OY, Finland.

Siren, T., 2012. Presentation at the Mini-Sam Meeting at Olkiluoto and Vuojoki, March 28-29, 2012, Posiva OY, Finland.



SKB ansökan, 2011. Ansökan om tillstånd enligt lagen (1984:3) om kärnteknisk verksamhet till uppförande, innehav och drift av en kärnteknisk anläggning för slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB Art814. Fud-program 2010. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB Art819. Fud-program 2013. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1058498, version 1.0. Hughes I., 2006. Encapsulation plant, System 351 – Fuel drying system. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (sekretessbelagt dokument).

SKBdoc 1077122, version 2.0. Karlsson M., 2011. Strålskärmsberäkningar för kopparkapslar innehållande BWR, MOX och PWR bränsleelement. ALARA 07-0014R Rev1- Final 2009-11-19 Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-1137-11).

SKBdoc 1078000. Använt bränsle -förutsättningar för ansökan om uppförande av slutförvaret, version 1, Svensk Kärnbränslehantering AB, (SSM2015-279-12)

SKBdoc 1082128, 2007a. Instruction for Model and Data Quality Assurance for the SR-Site Project - Appendix 3 to 1064228 – Quality Assurance Plan for the Safety Assessment SR-Site (Preliminary), Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-40).

SKBdoc 1082130, 2007b. SR-Site MSR Instruction (Preliminary), Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1091959, ver. 3.0, 2010-06-10. Bilaga SR Drift, kap. 4. Kvalitetssäkring och anläggningens drift. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-1135-1).

SKBdoc 1175162 ver. 4.0. Svetsning vid tillverkning och förslutning. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2009-10-29 (SSM 2010/2116-16).

SKBdoc 1175208. Tillverkning av kapselkomponenter. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2009-01-09 (SSM 2010/2116-17).

SKBdoc 1175235 ver. 3.0. 2009. NDT Reliability – Data Report FSW. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (Referens i SKBdoc 1179633).

SKBdoc 1175236 ver. 2.0. Reliability in friction stir welding of canister. 2009-10-30 Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2010/4132-51).

SKBdoc 1177857, ver. 1.0, Alverlind, L., 2010. Designanalys av stållock till kapsel för använt kärnbränsle – geometriuppdatering, Inspecta Technology AB. (Referens i SKB TR-10-28).

SKBdoc 1179234, ver. 1.0. Eriksson T., 2008. SKB – Referensrapport till SAR allmän del kapitel 6 – Källtermer. Svensk Kärnbränslehantering AB. (Referens i SKB TR-10-13).

SKBdoc 1179633. Oförstörande provning av kapselkomponenter och svetsar. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2009-02-27 (SSM2010/2116-18).



SKBdoc 1180131 ver. 1.0. NDT Reliability – Data report copper. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (referens i SKBdoc 1179633).

SKBdoc 1180132. NDT Reliability – Data report insert. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1187725, ver. 1.0, 2008. Fracture toughness testing of copper cylinder T#1 and lidweld FSWL27, Bodycote Testing Ltd. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2008-11-17 (SSM 2010/2116-21).

SKBdoc 1193244, ver. 4.0. Agrenius L. Criticality safety calculations of disposal canisters. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2010-12-16 (SSM 2010/2116-16, SSM2011-1137-11).

SKBdoc 1199888 ver. 1.0. Verksamhet, ledning och styrning – Uppförande. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-1135-1, Bilaga till SKB ansökan).

SKBdoc 1200854, ver. 2.0. Spahiu K., 2009. Korrosionsprodukter från R1 bränsle – Konsekvenser för långsiktigt säkerhet. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2009-03-20 (SSM2011-2852-7).

SKBdoc 1206894, ver. 1.0. Börgesson, L., Johannesson, L-E., Raiko, H., 2009. Uneven swelling pressure on the canister simplified load cases derived from uneven wetting, rock contours and buffer density distribution. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2009-08-27 (SSM2011-2426-168).

SKBdoc 1207429, ver. 1.0. Alverlind L., 2009, Canister bottom structural integrity, Inspecta Technology AB. (SSM 2010/2116-23).

SKBdoc 1221567, ver. 2.0. Agrenius L, 2010. Simulering av inkapsling av använt kärnbränsle för slutförvaring i KBS-3-förvar. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2009-09-10 (SSM2011-1137-11).

SKBdoc 1221579, ver. 2.0. Agrenius L, 2010. Aktivitetsinnehåll i kapslar för slutförvar. Svensk Kärnbränslehantering AB. (Referens i SKB TR-10-13).

SKBdoc 1286751. Sources of tabulated triples used by FARF31 (produced by ConnectFlow). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1288288, ver. 2.0. Dillström P., Bolinder T., Bonnaud E., 2014, Analysis of PWR canister inserts using data acquired from PWR material 2014-01-31 Inspecta Technology AB. (SSM2011-2426-167, SSM2011-2426-168).

SKBdoc 1288292, ver. 1.0. 2014. Summary of important characteristic parameters for the BWR- and PWR-insert, based on performed strength and damage tolerance analyses. Inspecta Technology. 2014-02-27 (SSM2011-2426-178).

SKBdoc 1291379. Klarläggande angående konstruktionsförutsättningar för kapsel. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2011-08-25 (SSM2011-2426-2).

SKB doc 1292468. SKB's response to NEA's second questionnaire on post-closure safety in SKB's licence application, Svensk kärnbränslehantering AB (SSM2010-4132-32).



SKBdoc 1292956. SKB's handling of the regulatory review of the safety assessment SR-Can. Svensk Kärnbränslehantering AB. 25 (SSM2011-2426-97).

SKBdoc 1292468. SKB:s response to NEA's second questionnaire on post-closure safety in SKB's license application. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2011-09-06 (SSM2010/4132-32, SSM2010/4132-33).

SKB doc 1314716. SKB's response to NEA's third questionnaire on post-closure safety in SKB's licence application, Svensk kärnbränslehantering AB (SSM2010-4132-51).

SKBdoc 1319608, Selroos J.-O., Svensson U., Follin S., Joyce S., 2011. Klarlägganden avseende hydromodellering, 2011-12-07 Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-10).

SKBdoc 1323497. Additional information requested by the IRT at December hearings. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2010/4132-70).

SKBdoc 1333208. Inre övertryck i kapseln. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1333256. 2012-02-09. Svar till SSM på begäran om kompletteringar angående kapselfrågor. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1334853. Svar på SSM:s begäran om förtydligande information angående parametervärden i digital form till alla parametrar som anges i Appendix B i SKB TR-10-06. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-19).

SKBdoc 1338712. Komplettering kring data till radionuklidmodellen för biosfären. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2012-04-08 (SSM2011-2426-33).

SKBdoc 1339123, 2012. Svar på begäran om förtydligande information angående postulerade defekters position och orientering. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2012-04-16 (SSM2011-2426-38).

SKBdoc 1339613, Evins L. Z. Svar till SSM angående förtydligande om information i ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfallbränslets initialtillstånd. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2012-04-13 (SSM2011-2426-36).

SKBdoc 1339716. Kompletterande information om kopparkorrosion. 2012. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2012-04-16 (SSM2011-2426-39).

SKBdoc 1339835, ver. 2.0. Faleskog J., 2012. Förstudie – Duktilitetssänkning på grund av treaxliga spänningstillstånd. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-168).

SKBdoc 1339902, ver. 1.0. Hernelind J., 2014. Global simulation of copper canister – final deposition. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2013-11-28 (SSM2011-2426-168).

SKBdoc 1339994. Svar till SSM på begäran om förtydligande information angående "Distributed LDF". Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-41).

SKBdoc 1343309. Additional hydrogeological model realisations. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2012-05-03 (SSM 2010/4132-86, SSM 2010/4132-87).



SKBdoc 1344208. Svar till SSM på begäran om förtydligande information avseende grundvattenkemi och termodynamiska data. 2012-05-15. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-46).

SKBdoc 1345898, Hughes I, 2005. Design justification statement: system 351, RP_0103754_PROC_00004_P1. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (sekretessbelagt dokument).

SKBdoc 1346686, Svar till SSM på begäran angående förtydligande information om sulfidhalter och sulfatreduktion. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1353646, ver. 2.0. Dragprovning och skjuvprovning av gjutjärn, KTH, Hållfasthetslära. Svensk Kärnbränslehantering AB. (Opublicerat dokument).

SKBdoc 1355363, ver. 2.0. Rydén H., 2012. Förtydligande information angående belastningshastighetens inverkan på brottsegheten för insatsen. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-62).

SKBdoc 1355674, Mätning av kontraktion (Z) på dragprovstavar från segjärnsinsats I53 och I57. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1365182, Jonsson E., Morén L., 2013. Plan för implementering av kvalitetsstyrning och kontroll av KBS-3-förvaret. Bilaga 1 till SKBdoc1371850. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2012-09-05 (SSM2011-2426-119).

SKBdoc 1371849. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kapselns mekaniska integritet. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-02-05. (SSM2011-2416-168).

SKBdoc 1371850, 2013. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kontroll och provning för fastställande av kapselns initialtillstånd Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-02-28 (SSM2011-2426-130, SSM2011-2426-177, SSM2011-2426-203).

SKBdoc 1371851, 2013. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande tillverkningsaspekter för ingående delar i kapseln. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-12-09 (SSM2011-2426-120, SSM2011-2426-130, SSM2011-2426-157, SSM2011-2426-167, SSM2011-2426-206).

SKBdoc 1371890, Andersson J.. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande buffert och återfyllning under driften av slutförvarsanläggningen. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-02-01 (SSM2011-2426-119, SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1372546. Andersson J., 2013. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande termiskt inducerad seismisk aktivitet. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-134).

SKBdoc 1372558, 2013. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande förvarsdjup. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-02-25 (SSM2011-2426-111).

SKBdoc 1372560, Andersson J. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kritiska faktorer för val av deponeringspositioner. 2012-12-13 (SSM2011-2426-112).

SKBdoc 1372575. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande bergspänningar i Forsmark. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-04-18 (SSM2011-2426-130).



SKBdoc 1372882. Svar på SSM:s begäran om förtydligande information rörande hydrogeologiska utredningar. Svensk Kärnbränslehantering AB 2012-12-17 (SSM20211-2426-93).

SKBdoc 1372883, Selroos J.-O., Follin S., Svensson U., Joyce S., Hartley L., Vidstrand P. Reply to questions by SSM. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2012-12-10 (SSM2011-2426-93).

SKBdoc 1372969. Svar till SSM på begäran om komplettering om inverkan av vätgas på bränsleupplösning. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2012-12-18 (SSM2011-2426-94).

SKBdoc 1377246, ver. 2.0, 2013-10 – ”Main study – Copper tube extrusion”. Bilaga 1 till

SKBdoc 1378827, Luterkort D., Gugala J., Thurner E., 2013. Komplettering angående tillverkning och installation av buffertringar och buffertblock. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-02-07 (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1382754. Bilaga K:2 Ämnesvisa svar på kompletteringsönskemålen. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-199).

SKBdoc 1385067, Sallin P. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande lång återmättnadsfas. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-01-02 (SSM2011-2426-122, SSM2011-2426-154).

SKBdoc 1385068. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kemisk erosion av buffert. 2013. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-01-02 (SSM2011-2426-114).

SKBdoc 1385070. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande radionuklidtransport och dosberäkningar. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-01-02 (SSM2011-2426-113).

SKBdoc 1385099, ver 1.0. Kemirapport 2013-01 Sulfidanalys av bentonitvattenblandning. Svensk Kärnbränslehantering AB. (ref i SKBdoc 1437441).

SKBdoc 1385747. BELBaR D4.2. Protocol for rheological measurements within the BELBaR project. Bilaga till SKBdoc 1385068. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-114)

SKBdoc 1387920. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande radionuklidtransport och Dosberäkningar. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-145).

SKBdoc 1388095. Kvalitetsledningssystem för kapselproduktion. Bilaga 2 till SKBdoc 1371850. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-03-14 (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1391374, ver. 2.0. Determination of oxygen content in creep test specimens. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1392898, Andersson J. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande planer för demonstrationsdeponering. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-02-19 (SSM2011-2426-130).



SKBdoc 1393179. Version 2.0, Mattias Unosson, TrueStress Engineering
2014-05-07. Revision 3, 2015-02-23.

SKBdoc 1393791, Luterkort D., Kristensson O. Komplettering angående den avfasade överkanten ("bevel") av deponeringshåll. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-05-03 (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1394657, Kristensson O., 2013. Beräkning av volymer relaterade till deponeringshåll designade enligt KBS-3V. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1395038, Andersson J., 2015. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande konstruktionsförutsättningar. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2015-01-09 (SSM2011-2426-130, SSM2011-2426-214).

SKBdoc 1395834, Evins Z. L., Hedin A., 2013. Uppskattning av riskbidrag från bränslerester. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-05-21 (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1395837, 2013. Bränslerester från Studsvik fördelade i kapslar för kärnbränsleförvaret. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1396040, Johansson F, Evins L Z, 2013. Svar till SSM på begäran om redovisning av bränslerester från Studsvikanläggningen. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-05-23 (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1396324. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande osäkerheter i hydrogeologiska beräkningar. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-05-24 (SSM2011-2426-130 och SSM2011-2426-146).

SKBdoc 1396325. 2013. Responses to SSM on hydrogeology. Bilaga till SKBdoc 1396324. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1396328. Hydrogeological base case r_0 velocity. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1396389. Svar till SSM på begäran om förtydligande angående radionuklidtransport. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1396392. Responses to SSM on radionuclide transport. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1396558. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande löslighetsberäkningar. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-153).

SKBdoc 1396559. Treatment of redox in SR-Site solubility calculations. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1396560. Handling of uncertainty in thermodynamic data. Final report. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1396561. Treatment of silver in solubility calculations. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKBdoc 1396568, Lägesrapport om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1396660, Svar till SSM på begäran om komplettering rörande dokumentation och kvalitetssäkring av koder. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1396663, Documentation of the code for erosion and corrosion calculations in SR-Site, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1396703. 2013. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande långsiktig utveckling av grundvattenkemi på förvarsdjup. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1396704. Betydelsen av mikrobiell sulfatreduktion med organiskt upplöstmateriel. 2013. Bilaga 1 till SKBdoc 1396703. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1396705. Jämförelser av beräknade haltintervall som funktion av djup i berget med koncentrationer som uppmätts under platsundersökningarna. Bilaga 2 till SKBdoc 1396703. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-130).

SKBdoc 1396769. Svar till SSM på begäran om komplettering angående klimatfrågor Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-05-17 (SSM2011-2426-130, SSM2011-2426-201).

SKBdoc 1396957. Svar till SSM på begäran om komplettering avseende radionuklidretardation. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-166).

SKBdoc 1397007. Variation of LDF during a sea period. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1398013. Svar till SSM på begäran om komplettering avseende degraderingsprocesser för kapseln Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-09-25 (SSM2011-2426-130, SSM2011-2426-164, SSM2011-2426-179, SSM2011-2426-200).

SKBdoc 1398014. Influence of high chloride concentration on copper corrosion. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1399615. Svar till SSM på begäran om förtydligande rörande krypdeformaiton for kapseln. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-174).

SKBdoc 1399768. Analysis of creep in the KBS-3 copper canister due to internal and external loads. Bilaga 10 till SKBdoc 1371849. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-168).

SKBdoc 1403906. Fälth B., Hökmark H., 2013. PM Termisk inducerade skalv, Svensk Kärnbränslehantering AB (SSM-2011-2426-134).

SKBdoc 1403930. Shearing of copper canister at top and base. Bilaga 11 till SKBdoc 1371849. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-168).

SKBdoc 1404369. Modelling of a canister with broken insert subjected to earthquake induced shear nad subsequent glacial load. Bilaga 25 till SKBdoc 1371849. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2416-168).



SKBdoc 1407337, ver. 1.0. Börgesson, L., Hernelind, J., 2013. Earthquake induced rock shear through a deposition hole – part 2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-168).

SKBdoc 1411196. Creep of copper with different NDT sound attenuation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1411243, ver. 1.0. Kompositions- och syrehaltsmapping av göt. Svensk Kärnbränslehantering AB. (Opublicerat dokument).

SKBdoc 1411328, Attenuation dependent detectability at ultrasonic inspection of copper. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1414374, Kravbild för oförstörande provning av kopparkapselns rör, lock och botten. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1414464. Kvalificering av oförstörande provning. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1414760, 2014. Kravbild för oförstörande provning av segjärnsinsats. Bilaga 5 till SKBdoc 1371850. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-01-23 (SSM2011-2426-177).

SKBdoc 1415152, 2014. Detailed models for PWR- and BWR-canisters for Earthquake induced rock shearing. Bilaga 16 till SKBdoc 1371849. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-183).

SKBdoc 1415307. Kravbild för oförstörande provning av kopparkapselns svetsar. Bilaga 6 till SKBdoc 1371850. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-02-17 (SSM2011-2426-177).

SKBdoc 1415408. Metal alloy particles in spent nuclear fuel. Bilaga till SKBdoc 1418271. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2013-11-14 (SSM2011-2426-155).

SKBdoc 1415870, Kristensson O., Börgesson L., Hernelind J. 2013. Supplementary material in addition to SR-Site modelling report TR-10-11 as requested by SSM. 1.2. Water uptake in the CRT experiment. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-154).

SKBdoc 1415872, Kristensson O., 2013. Supplementary material in addition to SR-Site modelling report TR-10-11 as requested by SSM. 1.3. Description of how the CRT-model was used and how THM and TH models differ in terms of analyzing the hydration process. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-154).

SKBdoc 1415873, Kristensson O., 2013. Supplementary material in addition to SR-Site modelling report TR-10-11 as requested by SSM. 3.1. Analysis of saturation intervals concerning long time safety during the hydration process. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-154).

SKBdoc 1415874, Åkesson M., 2013. 1.1. Conceptual uncertainties and their influences on bentonite hydration. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-154).



SKBdoc 1415875, Åkesson M., 2013. 1.4. Bentonites other than MX-80. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-154).

SKBdoc 1415876, Börgesson L., Hernelind J. 2013. 4.1. Analysis of how a buffer with brittle shear properties may affect the rock shear case. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-154).

SKBdoc 1415878, Börgesson L., Åkesson M., Hernelind J. 2013. 3.2. Analysis of risks and consequences of uneven wetting in a dry deposition hole. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-154).

SKBdoc 1415879, Malmberg D., Åkesson M., Kristensson O. 2013. Supplementary material in addition to SR-Site modelling report TR-10-11 as requested by SSM. 2.0. The distribution of saturation times in the Forsmark repository. 1.5. The effect of hydraulic connections between deposition holes. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-154).

SKBdoc 1415886, Karnland O., Birgersson M., Dueck A. 2013. Supplementary material in addition to SR-Site modelling report TR-10-11 as requested by SSM. 4.2. Analys av i vilken mån en långsam återmättnad kan förvärta försämringar av buffertens materialegenskaper pga. kemiska och strukturella omvandlingar i förhållande till ett fall med snabb återmättnad. Tillgängliga observationer och pågående studier. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-154).

SKBdoc 1416510. Hartley L., Follin S., Selroos J-O. Responses to SSM on Uncertainties in Hydrogeological Calculations, Question 1. (SSM2011-2426-146)

SKBdoc 1416697, ver. 1.0, Shipsha A., 2014. Evaluation of residual stress measurements. Effect of measured residual stresses on damage tolerance of cast iron PWR- and BWR-inserts, Inspecta Technology AB. (SSM2011-2426-168).

SKBdoc 1416862, Selin P., 2013. Interaktion mellan kopparkorrosionsprodukter och bentonit. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-11-25 (SSM2011-2426-156).

SKBdoc 1416882. Why components that have been measured during the site investigations have been excluded from the SR-Site calculations. Bilaga 3 till SKBdoc 1396703. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM-2011-2426-152).

SKBdoc 1416908. Future evolution of groundwater composition at Forsmark during an extended temperature period. Bilaga 5 till SKBdoc 1396703. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM-2011-2426-152).

SKBdoc 1416954. Response to SSM on Hydrogeological conditions during glacial effects. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-12-10 (SSM2011-2426-147)

SKBdoc 1417006. Effects of weathering of silicate minerals and cation-exchange on the geochemical safety indicators during the hydrogeochemical evolution at Forsmark. Bilaga 4 till SKBdoc 1396703. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM-2011-2426-152).

SKBdoc 1417069. The role of phosphorus for mechanical properties in copper. Bilaga 18 till SKBdoc 1371849. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-168).



SKBdoc 1417199, Ver 1.0. What if criticality in the final repository. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1417733, 2015-01-14, Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kriticitet. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-12-19 1 (SSM2011-2426-151, SSM2011-2426-213, SSM2011-2426-223).

SKBdoc 1418263. Evaluation of the effect of triaxial stress state on damage tolerance of nodular cast iron inserts. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-145).

SKBdoc 1418271. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande metallegeringar i bränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-12-13 (SSM2011-2426-155).

SKBdoc 1418363. Combustion of peat. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-145).

SKBdoc 1418468 Svar till SSM på begäran daterad 2013-02-11 om komplettering rörande radionuklidtransport och dos. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-149).

SKBdoc 1418486. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande radionuklidtransport och dos. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-02-11. (SSM2011-2426-230).

SKBdoc 1418702. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande hydrogeologiska förhållanden under glacial påverkan, Svensk Kärnbränslehantering AB. 2013-12-09 (SSM2011-2426-147).

SKBdoc 1418966 ver 1.0. Lägesrapport om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1419643, ver. 1.0, Hernelind J., 2014. Analysis of canister with unfavourable pressure load. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2014-01-21 (SSM2011-2426-168).

SKBdoc 1419961. Corrosion of the copper canister inside due to radiolysis of remaining water in the insert. 2014. Bilaga 4 till SKBdoc 1398013. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2013-11-27 (SSM2011-2426-164).

SKBdoc1420051. Sandström R. The role of hydrogen in copper. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-164).

SKBdoc1422182. Sulphide mass-transport limited corrosion. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-164).

SKBdoc 1422106 ver. 1.0, Johansson F., Kierkegaard J., Johansson A., 2014-05-12, Kriticitetsanalys för KBS-3-systemet och slutförvaring av använt kärnbränsle, Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-05-12 (SSM2011-2426-213).

SKBdoc 1427787, 2014. Svar till SSM på begäran om förtydligande rörande EFPC. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-02-12 (SSM2011-2426-170).



SKBdoc 1429433. Svar till SSM med anledning av begärande om förtydliganden och kompletteringar - Radionuklidtransport och dosberäkningar samt effekter på andra organismer än människa. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1432361 ver 1.0. 2014. Manufacturing and testing of nodular cast iron inserts. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (Unpublished document).

SKBdoc 1434717, Luterkort D., Sellin P., 2014. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande konstruktionsförutsättning "inflöde till deponeringshål mindre än 150 kubikmeter". Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-07-03 (SSM2011-2426-191).

SKBdoc 1434744, 2015. Non-destructive testing of canister components and welds. Bilaga till SKBdoc1471002. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. 2015-02-04 (SSM2011-2426-203, SSM2011-2426-206, SSM2011-2426-222).

SKBdoc 1436245. Kapselmöte med SSM 2014-04-25. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-1137-61).

SKBdoc 1435653 ver. 1.0. 2014. Sealing of the canister. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1437441, Lilja C., Sellin P., Hedin A. 2013. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande grundvattenkemi på kort och medellång sikt. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-07-03 (SSM2011-2426-187).

SKBdoc 1439722. 2014. Detailed models for BWR-canisters for Earthquake induced rock shearing. Bilaga 2 till SKBdoc 1452923. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-219).

SKBdoc 1439730. 2015. Detailed models for PWR-canisters for Earthquake induced rock shearing. Bilaga 4 till SKBdoc 1452923. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-219).

SKBdoc 1402837, Estimation of oxide growth on joint surfaces during FSW. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 14403538, Olsson O. 2014. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande uppdatering av bränslets initialtillstånd m.h.t. förlängda reaktordriftider. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-07-03 (SSM2011-2426-188).

SKBdoc 1440564. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande radionuklidtransport och dosberäkning med koppling till yhydrologi. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-231).

SKBdoc 1448587. Steady state pressures in vials sealed with butyl rubber stoppers. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (ref i SKBdoc 1449620).

SKBdoc 1448717. Svar till SSM på begäran om förtydliganden om nedträngning av utspädda vatten. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-09-25 (SSM2011-2426-204).

SKBdoc 1448824. Lägesrapport om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten, september 2014. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-202).



SKBdoc 1449528, 2014. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande skadetålighetsanalys av stållock till gjutjärnsinsats. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-08-13 (SSM2011-2426-221).

SKBdoc 1450913. Damage tolerance analysis of BWR-canister inserts for spent nuclear fuel in the case of an earthquake induced. Bilaga 3 till SKBdoc 1452923. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-219).

SKBdoc 1451358. Canister Insert Steel Lid – Investigation into the need for damage tolerance analyses. Bilaga till SKBdoc 1449528. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-221).

SKBdoc 1452302. Svar till SSM på begäran om förtydligande angående bränsleupplösning. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-10-23 (SSM2011-2426-209).

SKBdoc 1452923, 2014. Svar till SSM på frågor i protokollet från kapselavstämningsmötet 25 juni. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2015-02-20 (SSM2011-2426-219).

SKBdoc 1454226. Hydrostatic pressure for detailed BWR/PWR-canisters. Bilaga till

SKBdoc 1395038. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1457514. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande fosfors inverkan på koppars krypegenskaper. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-216).

SKBdoc 1458607. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande krypprovning och modellering. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-1137-78).

SKBdoc 1459222. Damage tolerance analysis of PWR-canister inserts for spent nuclear fuel in the case of an earthquake induced shear load – Influence of using more detailed models. Bilaga 5 till SKBdoc 1452923. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-219).

SKBdoc 1462125. Svar till SSM på begäran om komplettering med samlad redovisning av kopparkorrosion i syrgasfritt vatten. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-226)

SKBdoc 1464317, 2015. Statistisk analys av brottförlängning och brottseghet för BWR- och PWR-insatser - Studie av inverkan av antal provstavar, gränsvärden och komponentstatistik. Bilaga 1 till SKBdoc 1452923. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2014-12-01 (SSM2011-2426-219).

SKBdoc 1469524. 2015. Modelling and analysis of BWR-canister and buffer for earthquake induced rock. Bilaga 1 till SKBdoc 1471540. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1470267, Copper in ultrapure water. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1471002, 2015. Svar till SSM på begäran om förtydligande rörande kontroll och provning. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2015-02-26 (SSM2011-2426-222).



SKBdoc 1471283, 2015. Samlad kravbild avseende kapseln. Bilaga 6 till SKBdoc 1452923. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-219).

SKBdoc 1471286, Samlad kravbild avseende kapseln. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1471540, 2015. Svar till SSM på begäran om komplettering rörande inverkan av koppartjocklek på kapselns designanalys. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBdoc 1472455, Study of H₂ gas emission in sealed compartments containing copper immersed in O₂-free water. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBdoc 1473304. Samlad redovisning om kopparkorrosion i syrgasfritt vatten. Bilaga 1 till SKBdoc 1462125. Svensk Kärnbränslehantering AB. 2015-03-12 (SSM2011-2426-226).

SKBdoc 1475753, 2015. Svar till SSM på begäran om förtydligande om "the-mean-of-the-peaks". Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-227).

SKBdoc 1476865, 2015. Svar till SSM på begäran om förtydligande avseende svar på tidigare begäran om komplettering rörande grundvattenkemi på kort och medellång sikt. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-229).

SKBdoc 1479486. Procedure for estimation of water fluxes and associated transfer rate coefficients in the Pandora Model. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-231).

SKBdoc 1480681. Reply to SSM question regarding homogeneous biosphere objects. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (SSM2011-2426-230).

SKBdoc 1496935. Svar till SSM på begäran om förtydligande angående kryppmodell för OFP-koppar och implementering av modellen i Abaqus. Svensk Kärnbränslehantering AB. (SSM2011-2426-234).

SKBdoc 1602640. Åldring, deformationsåldring blåsprödhet av segjärn. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB Fud-program 2013. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKBF/KBS Stripa Project 82-08. Börgesson L. 1982. Buffer Mass Test – Prediction of the behaviour of the bentonite-based buffer material. Swedish Nuclear Fuel Supply Co./Division KBS.

SKBF/KBS TR-80-19, Thunvik R., Braester C., 1980. Hydrothermal conditions around a radioactive waste repository. Part 1, A mathematical model for the flow of groundwater and heat in fractured rock. Part 2, Numerical solutions. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB/Avdelning KBS.

SKB Huvudrapport SR-Site. SKB, 2011. Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle. Huvudrapport från projekt SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB.



SKB IPR-01-17. Gunnarsson D., Börgesson L., Hökmark H., Johannesson L.-E., Sandén T. 2001. Äspö Hard Rock Laboratory, Report on the installation of the Backfill and Plug Test. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB IPR-02-19. Johannesson L.-E., 2004. Äspö Hard Rock Laboratory. Manufacturing of bentonite buffer for the Prototype Repository. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB IPR-02-23. Börgesson L., Gunnarsson D., Johannesson L.-E., Sandén T. 2002. Äspö Hard Rock Laboratory, Prototype Repository. Installation of buffer, canisters, backfill and instruments in Section 1. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB IPR-02-30. Thorsager P., Börgesson L., Johannesson L.-E., Sandén T. 2002. Äspö Hard Rock Laboratory. Canister Retrieval Test. Report on installation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB IPR-03-13. Dershowitz B., Winberg A., Hermanson J., Byegård J., Tullborg E.-L., Andersson P., Mazurek M. 2003. Äspö Task Force on modelling of groundwater flow and transport of solutes, Task 6c, a semi-synthetic model of block scale conductive structures at the Äspö HRL. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB IPR-04-13. Johannesson L.-E., Gunnarsson D., Sandén T., Börgesson L. Karlzén R., 2004. Äspö Hard Rock Laboratory, Prototype Repository, Installation of buffer, canisters, backfill, plug and instruments in Section II. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB IPR-06-08. Goudarzi R., Johannesson L.-E. 2005. Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype Repository. Sensors data report (Period 010917-051201), Report No:14. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB IPR-07-01. Kristensson O., Hökmark H. 2007. Äspö Hard Rock Laboratory, Prototype Repository. Thermal 3D modelling of Äspö Prototype Repository. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB IPR-08-01, Eriksson S., Äspö Hard Rock Laboratory. Prototype Repository. Analysis of microorganisms, gases, and water chemistry in buffer and backfill, 2004 – 2007. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB IPR-08-08. Lönnqvist M., Kristensson O., and Hökmark H., 2008. Äspö Hard Rock Laboratory. CAPS - Confining Application to Prevent Spalling. Scoping calculations - Field test at Äspö HRL. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB IPR-10-01. Ittner H., 2010. Äspö Hard Rock Laboratory. Evaluation of scaling records for TASA access tunnel, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB KBS TR-108. Behrenz P., Hannerz K., 1978, Criticality in a spent fuel repository in wet crystalline rock, Svensk kärnbränslehantering AB.

SKB P-06-54. Follin S., Ludvigson J.-E., Levén J., 2011. A comparison between standard well test evaluation methods used in SKB's site investigations and the generalised radial flow concept. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB P-06-162. Mattsson H. Interpretation of geophysical borehole measurements and petrophysical data from KLX10. Oskarshamn site investigation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-07-93. Jacobsson L., 2007. Boreholes KFM01A and KFM02B. Micro crack volume measurements and triaxial compression tests on intact rock. Forsmark site investigation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-07-138. Löfgren M., 2007. Formation factor logging in situ by electrical methods in KFM01D and KFM08C. Forsmark site investigation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-07-139. Selnert, E., Byegård, J., Widestrand, H. 2008. Laboratory measurements within the site investigation programme for the transport properties of the rock. Final report. Forsmark site investigation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-07-162. Vilks P., 2007. Forsmark site investigation. Rock matrix permeability measurements on core samples from borehole KFM01D. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-07-179 Selnert E., Byegård J., Widestrand H. 2009. Laboratory measurements within the site investigation programme for the transport properties of the rock. Final report. Oskarshamn site investigation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-07-206. Ask D., Cornet F., Brunet C., Fontbonne F. 2007. Forsmark site investigation. Stress measurements with hydraulic methods in boreholes KFM07A, KFM07C, KFM08A, KFM09A and KFM09B. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-07-220. Bowen-Schrire M., Jander H., Waniewska K., Kunskapsbevarande för framtiden - Fas 1. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB P-09-07. Lindgren M., Pers K., Södergren, Riggare S., Främmande material i slutförvaret Forsmark. Inventering för SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB P-10-29. Gustafson L., Ljungberg A., 2010. Forsmark site investigation. A deformation analysis of the Forsmark GPS monitoring network from 2005 to 2009. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB P-10-39. The geophysical response from a KBS-3 repository for spent nuclear fuel. Theoretical modelling based on physical properties of underground constructions at Forsmark. Isaksson H., Keisu M., Lindholm T., Martinsson O., Mattson H., Thunehed H., Trium C-A., Juhlin C., 2010. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB P-11-16. Lydmark S. Prototype repository – Microbes in the retrieved outer section. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB P-12-01, Hallbeck L., Edlund J., Eriksson L., 2012. Microbial analyses of groundwater and surfaces during the retrieval of experiment 3, A04, in MINICAN, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-12-13, Smart N., Reddy B., Rance A., 2012. Miniature Canister (MiniCan). Corrosion experiment progress report 4 for 2008-2011, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB P-13-16. Arlinger J., Bengtsson A., Edlund J., Eriksson L., Johansson J., Lydmark S., Rabe L., Pedersen K. Prototype repository – Analyses of microorganisms, gases and water chemistry in buffer and backfill. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB P-13-18. Gustafsson, C. Äspö Hard Rock Laboratory. BIPS and radar in KA3011A01 and KA3065A01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-13-37. Flansbjer M., Magnusson J. 2014. System design of Dome Plug. Creep properties at high stress levels of concrete for deposition tunnel plugs. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-13-38. Flansbjer M., Magnusson J., 2014. System design of Dome Plug. Mechanical properties of rock-concrete interface. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB P-13-50. Taxén C., Ytprofiler på kopparkapslar från deponeringshål 5 och 6 i försöksserien Prototyp. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-00-21. Axelsson C.-L., Follin S., Koyi S. 2000. Grundvattenavsänkning och dess effekter vid byggnation och drift av ett djupförvar. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-01-10. Platsundersökningar. Undersökningsmetoder och generellt genomförandeprogram. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-01-41. Påsse T., 2001. An empirical model of glacioisostatic movements and shore-level displacement in Fennoscandia. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-01-42. Program för platsundersökningar vid Forsmark. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-01-44. Geovetenskapligt program för platsundersökning vid Simpevarp. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-02-32. Forsmark - site descriptive model version 0. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-04-15. Preliminary site description Forsmark area - version 1.1. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-04-17. Munier R., Hökmark H. 2004. Respect distances. Rationale and means of computation, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-04-18. Lindroos H., Isaksson H., Thunehed H. The potential for ore and industrial minerals in the Forsmark area. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-04-51. Elert M, Gylling B, Lindgren M, 2004. Assessment model validity document FARF31. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-04-53. Gunnarsson D., Börgesson L., Keto P., Tolppanen P., Hansen J., 2004. Backfilling and closure of the deep repository. Assessment of backfill concepts. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB R-04-64. Cliffe K A., Kelly M., 2006. COMP23 version 1.2.2 user's manual. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-04-73. Olsson M., Niklasson B., Wilson L., Andersson C., Christiansson, R. Äspö HRL. Experiences of blasting of the TASQ tunnel. 2004. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-05-18. 2005. Preliminary site description. Forsmark area version 1.2. Updated 2005-10. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-05-26. 2006. Measurements of decay heat in spent nuclear fuel at the Swedish interim storage facility, Clab. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-05-35. Sjöberg J., Lindfors U., Perman F., Ask D., 2005. Evaluation of the state of stress at the Forsmark site. Preliminary site investigation Forsmark area – version 1.2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-05-50. Börgesson L., Sandén T., Fälth B., Åkesson M., Lindgren E., 2005. Studies of buffers behaviour in KBS-3H concept. Work during 2002–2004. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-05-51. Lagerbäck R., Sundh M., Svedlund J-O., Johansson, H. Searching for evidence of late- or postglacial faulting in the Forsmark region. Results from 2002-2004. Forsmark site investigation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-05-62. Measurements of decay heat in spent nuclear fuel at the Swedish interim storage facility, Clab. 2006. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-05-71. Martin C.D. 2005. Preliminary assessment of potential underground stability (wedge and spalling) at Forsmark, Simpevarp and Laxemar sites. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-05-89. Lanaro F. Rock mechanics site descriptive model - empirical approach. Preliminary site description Forsmark area - version 1.2. 2005. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-29, 2006. Programme for further investigations of bedrock, soil, water, and environment in Laxemar Subarea. Oskarshamn site investigation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-38. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.1. Feedback for completion of the site investigation including input from safety assessment and repository engineering. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-39. Cosgrove J., Stanfors R., Röshoff K., Geological characteristics of deformation zones and a strategy for their detection in a repository. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-48. Fälth B., Hökmark H., 2006. Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modeling. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB R-06-67. Bödvarsson R., Lund B., Roberts R., Slunga R., 2006. Earthquake activity in Sweden. Study in connection with a proposed nuclear waste repository in Forsmark or Oskarshamn. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-71. Gunnarsson D., Morén L., Sellin P., Keto P., 2006. Deep repository – engineered barrier systems. Assessment of backfill materials and methods for deposition tunnels. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-72. Sandén T., Börgesson L., 2008. Deep repository – engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill. Laboratory tests to understand processes during early water uptake. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-73, Johannesson L.-E., Nilsson U., 2006. Deep repository – engineered barrier systems, Geotechnical behaviour of candidate backfill materials, Laboratory tests and calculations for determining performance of the backfill. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-80. Börgesson L., Sandén T., 2006. Piping and erosion in buffer and backfill materials. Current knowledge. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-98. Hartley L., Hoch A., Jackson P., Joyce S., McCarthy R., Rodwell W., Swift B., Marsic N., 2006. Groundwater flow and transport modelling during the temperate period for the SR-Can assessment Forsmark area - version 1.2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-101. Vidstrand P., Svensson U., Follin S., 2006. Simulation of hydrodynamic effects of salt rejection due to permafrost. Hydrogeological numerical model of density-driven mixing, at a regional scale, due to a high salinity pulse. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-102, Svensson U., The Laxemar and Forsmark repositories, an analysis of the water inflow distribution. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-06-106. Grandia F., Domènech C., Arcos D., Duro L., Assessment of the oxygen consumption in the backfill. Geochemical modelling in a saturated backfill. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-24. 2007. Långsiktig säkerhet för slutförvar för använt kärnbränsle vid Forsmark och Laxemar - en första värdering. Förenklad svensk sammanfattning av säkerhetsanalysen SR-Can, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-07-26. Martin C.D. 2007. Quantifying in situ stress magnitudes and orientations for Forsmark Design Step D2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-31. Glamheden R., Fredriksson A., Röshoff K., Karlsson J., Hakami H., Christiansson R., 2007. Rock mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-33, 2007. Final repository facility. Underground design premises/D2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-34. Programme for long-term observations of geosphere and biosphere after completed site investigations. Forsmark site investigation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB R-07-38. Svensson U., Ferry M., Kuylenstierna H.-O., 2010. DarcyTools, Version 3.4. Concepts, methods and equations. SKB R-07-38. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-42. Back P.-E., Sundberg J., 2007. Thermal site descriptive model. A strategy for the model development during site investigations – version 2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-45. Stephens M.B., Fox A., La Pointe P., Simeonov A., Isaksson H., Hermanson J., Öhman J., 2007. Geology Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-46. Fox A., La Pointe P., Hermanson J., Öhman J., 2007. Statistical geological discrete fracture network model. Forsmark modelling stage 2.2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-47. Back P.-E., Wrafter J., Rosén L., Sundberg J., 2007. Thermal Properties. Site Descriptive modelling Forsmark stage 2.2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-48. Follin S., Levén J., Hartley L., Jackson P., Joyce S, Roberts D., Swift B. 2007b. Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains, Forsmark modelling stage 2.2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-49. Follin S., Johansson P-O., Hartley L., Jackson P., Roberts D., Marsic N. 2007c. Conceptual model development and numerical modelling using CONNECTFLOW, Forsmark modelling stage 2.2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-07-60. Emborg M., Jonasson J-E., Knutsson S. Långtidsstabilitet till följd av frysning och tining av betong och bentonit vid förvaring av låg- och medelaktivt kärnavfall i SFR 1. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-08-06. Nyman H., Sohlenius G., Strömgren M., Brydsten L., 2008. Depth and stratigraphy of regolith. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-08, Johansson P-O., 2008. Description of surface hydrology and near-surface hydrogeology. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-09. Bosson E., Gustafsson L-G., Sassner M. 2008. Hydrological and near-surface hydrogeological modelling in MIKE SHE. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-16. Avila, R. and Pröhl, G. 2008. Models used in the SFR 1, SAR-08 and KBS-3Hsafety assessments for calculations of 14C doses. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-23, Follin S., Hartley L., Jackson P., Roberts D., Marsic N., 2008a. Conceptual model development and numerical modelling using CONNECTFLOW, Forsmark modelling stage 2.3. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



- SKB R-08-28. Carlson L., Karnland O., Olsson S., Rance A., Smart N., 2008. Experimental studies on the interactions between anaerobically corroding iron and bentonite. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-40. Sandén T., Börgesson L., Dueck A., Goudarzi R., Lönnqvist M., Nilsson U., Åkesson M., 2008. KBS-3H. Description of buffer tests in 2005–2007. Results of laboratory tests. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-47. Laaksoharju M., Smellie J., Tullborg E-L., Gimeno M., Hallbeck L., Molinero J., Waber N. Bedrock hydrogeochemistry Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-59. Wimelius H., Pusch R., 2008. Backfilling of KBS-3V deposition tunnels – possibilities and limitations. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-64. Stephens M., Simeonov A., Isaksson H. Bedrock geology Forsmark. Modelling stage 2.3. Implications for and verification of the deterministic geological models based on complementary data. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-65. Sundberg J., Wrafter J., Ländell M., Back P.-E., Rosén L., 2008. Thermal properties Forsmark. Modelling stage 2.3. Complementary analysis and verification of the thermal bedrock model, stage 2.2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-66. Glamheden R., Lanaro F., Karlsson J., Lindberg U., Wrafter J., Hakami H., Johansson M., 2008. Rock Mechanics Forsmark. Modelling stage 2.3. Complementary analysis and verification of the rock mechanics model. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-82. Confidence assessment Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-83, SKB. Site engineering report Forsmark. Guidelines for underground design Step D2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-93. Laaksoharju M., Smellie J., Tullborg E-L., Wallin B., Drake H., Gascoyne M., Gimeno M., Gurban I., Hallbeck L., Molinero J., Nilsson A-C., Waber N. Bedrock hydrogeochemistry Laxemar. Site descriptive modelling SDM-Site Laxemar. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-95. Follin S., 2008. Bedrock hydrogeology Forsmark. Site descriptive modelling, SDM-Site Forsmark. Updated 2013-08. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-08-98. Byegård J., Selnert E. and Tullbort E.L. Bedrock transport properties Data evaluation and retardation model Site descriptive modelling. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-08-102. Sandström B., Tullborg E-L., Smellie J., MacKenzie A. B., Suksi J. Fracture mineralogy of the Forsmark site. SDM-Site Forsmark. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB R-08-105, 2009. Waber H. N., Gimmi T., Smellie J. A. T. Porewater in the rock matrix. Site descriptive modelling SDM-Site Forsmark. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-115, Eriksson M., Petersson J., Danielsson P., Leander M. 2009. Underground design Forsmark Layout D2. Rock mechanics and rock support. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-116, 2009. Underground design Forsmark. Layout D2. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-121, Gustafsson L.-G., Gustafsson A.-M., Aneljung M., Sabel U., 2009. Effects on surface hydrology and near-surface hydrogeology of an open repository in Forsmark. Results of modelling with MIKE SHE. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-122. Malmtorp J., Andersson C., Karlzén R., Berguttag i TASS-tunneln. Delresultat t o m september 2008. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-08-128. Stephens M. B., Bergman T., Isaksson H., Petersson J., Bedrock geology Forsmark. Modelling stage 2.3. Description of the bedrock geological map at the ground surface. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-131. Johannesson L.-E., 2008. Backfilling and closure of the deep repository. Phase 3 – pilot tests to verify engineering feasibility. Geotechnical investigations made on unsaturated backfill materials. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-132. Dixon D., Lundin C., Örtendahl E., Hedin M., Ramqvist G., 2008. Deep repository – engineered barrier systems. Half scale tests to examine water uptake by bentonite pellets in a block-pellet backfill system. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-134. Dixon D., Anttila S., Viitanen M., Keto P., 2008. Tests to determine water uptake behaviour of tunnel backfill. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-135. Sandén T., Börgesson L., Dueck A., Coudarzi R., Lönnqvist M., 2008. Deep repository – engineered barrier system. Erosion and sealing processes in tunnel backfill materials investigated in laboratory. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-136. Johannesson L.-E., Sandén T., Dueck A., 2008. Deep repository- Engineered barrier system. Wetting and homogenization processes in backfill materials. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-08-137. Wimelius H., Pusch R., 2008. Buffer protection in the installation phase. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-09-04. Hökmark H., Lönnqvist M., Kristensson O., Sundberg J., Hellström G. Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-09-07. Vogt C., Lagerblad B., Wallin K., Baldy F., Jonasson J.-E., 2009. Low pH self compacting concrete for deposition tunnel plugs. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



- SKB R-09-14. Sandström R., Hallgren J., Burman G., Stress strain flow curves for Cu-OFP. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-17. Jonsson M., Bäckström A., Feng Q., Berglund J., Johansson M., Mas I. D., Olsson M., Äspö Hard Rock Laboratory. Studies of factors that affect and controls the Excavation Damaged/Disturbed Zone. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-19. Svensson U., Follin S., 2010. Groundwater flow modelling of the excavation and operational phases – Forsmark. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-20. Joyce S., Simpson T., Hartley L., Applegate D., Hoek J., Jackson P., Swan D., Marsic N., Follin S., 2010. Groundwater flow modelling of periods with temperate climate conditions – Forsmark. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-21. Vidstrand P., Follin S., Zucec N., 2010. Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial climate conditions – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-22. Selroos J-O., Follin S., SR-Site groundwater flow modelling methodology, setup and results. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-25. Vidstrand P., Rhén I., Zucec N., 2010. Groundwater flow modelling of periods with periglacial and glacial climate conditions – Laxemar. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-09-29. Åberg A., 2009. Effects of water inflow on the buffer – an experimental study. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-34. Dahlström L.-O., Magnusson J., Johansson M., 2009. Feasibility study of a concrete plug made of low pH concrete. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-35. Lönnqvist M., Hökmark H., 2010. Assessment of potential for glacially induced hydraulic jacking at different depths. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-42. Börgesson L., Hernelind J., 2009. Mechanical interaction buffer/backfill. Finite element calculations of the upward swelling of the buffer against both dry and saturated backfill. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-45. Ericsson L., O., Brinkhoff P., Gustafson G., Kvartsberg S., Hydraulic Features of the Excavation Disturbed Zone - Laboratory investigations of samples taken from the Q- and S-tunnels at Äspö HRL. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-53. Olsson S., Karnland O., 2009. Characterisation of bentonites from Kutch, India and Milos, Greece – some candidate tunnel back-fill materials? Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-09-56. Painter S., Mancillas J., 2009. MARFA version 3.2.2 user's manual: migration analysis of radionuclides in the far field. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



- SKB R-10-02. Bosson E., Sassner M., Sabel U., Gustafsson L-G., 2010. Modelling of present and future hydrology and solute transport at Forsmark. SR-Site Biosphere. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-06. Svensson U., 2010. Evaluation of a new method to estimate the hydration time of the tunnel backfill. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-08. Ramprogram för detaljundersökningar vid uppförande och drift av slutförvar för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-10-11. Dillström P., Alverlind L., Andersson M., 2010. Framtagning av acceptanskriterier samt skadetålighetsanalyser av segjärnsinsatsen. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-10-14. Werner K., Hamrén U., Collinder P., 2010. Vattenverksamhet i Forsmark (del I). Bortledande av grundvatten från slutförvarsanläggningen för använt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-10-18. Mårtensson E., Gustafsson L.-G., 2010. Hydrological and hydrogeological effects of an open repository in Forsmark. Final MIKE SHE flow modelling results for the Environmental Impact Assessment. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-28. Tröjbom M., Nordén S., Chemistry data from surface ecosystems in Forsmark and Laxemar-Simpevarp. Site specific data used for estimation of CR and Kd values in SR-Site. Updated 2013-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-31. Karlzén R., Johansson E., Slutrapport från drivningen av TASS-tunneln. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-10-34. Wallroth T., Lokrantz H., Rimsa A., 2010. The Greenland Analogue Project (GAP). Literature review of hydrogeology/ hydrogeochemistry. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-10-36. Lönnqvist M., Kristensson O., Fälth B., 2010. Assessment of a KBS-3 nuclear waste repository as a plane of weakness. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-37. Components, processes and interactions in the biosphere. 2010. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-41. Bockgård N., Groundwater flow modelling of an abandoned partially open repository. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-44. Johannesson L-E., Sandén T., Dueck A., Ohlsson L., 2010. Characterization of a backfill candidate material, IBECO-RWC-BF, Baclo Project – Phase 3 Laboratory tests. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-48. Crawford J., 2010. Bedrock Kd data and uncertainty assessment for application in SR-Site geosphere transport calculations. Updated 2011-10. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



- SKB R-10-50. Grivé M., Domènech C., Montoya V., Garcia D., Duro L., 2010. Determination and assessment of concentration limits to be used in SR-Can. Supplement to TR-06-32. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-53. Hallberg B., Aquilonius K., Skoog S., Huutoniemi T., Torudd J., Radiologisk påverkan på växter och djur från Clink under drift. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-10-63. Winberg A., Säkerhetsrelaterade platsegenskaper - en relativ jämförelse av Forsmark med referensområden. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-10-69. Liu L., Moreno L., Neretnieks I., Gylling B., 2010. A safety assessment approach using coupled NEAR3D and CHAN3D – Forsmark, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-70. Sandén T., Börgesson L., 2010. Early effects of water inflow into a deposition hole. Laboratory test results. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-72. Svensson U., Ferry M., 2010. DarcyTools Version 3.4 – User's Guide Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-10-74. Vidstrand P., Rhén I., 2011. On the role of model depth and hydraulic properties for groundwater flow modelling during glacial climate conditions. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-11-04. Malm R., 2012. Low-pH concrete plug for sealing the KBS-3V deposition tunnels. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-11-11. Wu R., Seitisleam F., Sandström R., Jin L Z., 2011. Creep crack growth in phosphorus alloyed oxygen free copper. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-11-14. 2010. Framework programme for detailed characterisation in connection with construction and operation of a final repository for spent nuclear fuel. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-11-22. Persson J., Lydmark S., Edlund J., Pääjärvi A., Pedersen K., Microbial incidence on copper and titanium embedded in compacted bentonite clay. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-12-04. Hartley L., Roberts D., 2013, Summary of discrete fracture network modelling as applied to hydrogeology of the Forsmark and Laxemar sites, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-13-06. Christiansson R., Lehtimäki T., Pettersson S., Olsson M., Studie av vadersågning för deponeringstunnlar. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB R-13-11. Ekman L., Ekman M., 2013. Quality control of GPS deformation data from Forsmark and analysis of crustal deformation in the local scale. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB R-13-13. Rosborg B., 2013a. Recorded corrosion rates on copper electrodes in the Prototype repository at the Äspö HRL. Svensk Kärnbränslehantering AB.



SKB R-13-14. Rosborg B., 2013b. Post-test examination of a copper electrode from deposition hole 5 in the Prototype repository. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-13-15. Rosborg B., Kosec T., Kranjc A., Kuhar V., Legat A., 2012. The corrosion rate of copper in a bentonite test package measured with electric resistance sensors. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-13-21. Joyce S., Swan D., Hartley L., 2013. Calculation of open repository inflows for Forsmark. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-13-31. Boman M., Ottosson M., Berger R., Andersson Y., Hahlin M., Björefors F., Gustafsson T., Koppars korrosion i ultrarent vatten. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-13-38. Crawford J., Quantification of rock matrix Kd data and uncertainties for SR-PSU. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-13-42. Birgersson M., Goudarzi R., 2013. Studies of vapor transport from buffer to tunnel backfill (Sauna effects). Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-13-49. Pedersen K., The Microbe project. Achievements of a 10-year research programme. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-13-50. Olsson P., Chang Z., Yousfi A., Thuvander M., Boizot B., Brysbaert G., Metayer V., Gorse-Pomonti D., 2013. Electron irradiation accelerated Cu-precipitation experiment. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-15-14. Wu Rui, Hagström J., Sandström R., Grain boundary sliding in phosphorus alloyed oxygen-free copper under creep. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-98-54. Morén L., Ritchey T., Stenström M., Scenarier baserade på mänskliga handlingar Tre arbetsmöten om metod- och säkerhetsanalysfrågor. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB R-99-12. Johannesson L-E., Börgersson L., 1998. Compaction of bentonite blocks. Development of techniques for production of blocks with different shapes and sizes. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-99-66. Johannesson L-E., 1999. Compaction of full size blocks of bentonite for the KBS-3 concept. Initial tests for evaluating the technique. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB R-99-74. Håkansson R., 2000. Beräkning av nuklidinnehåll, resteffekt, aktivitet samt doshastighet för utbränt kärnbränsle. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB SR-Site huvudrapport. 2011. Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle. Huvudrapport från projekt SR-Site. Del I, II och III. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-00-08. La Pointe P R., Cladouhos T T., Outters N., Follin S., 2000. Evaluation of the conservativeness of the methodology for estimating earthquake-induced movements of fractures intersecting canisters. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-00-12. Andersson J., Ström A., Svemar C., Almén K-E., Ericsson L., 2000. What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation

SKB TR-00-22. Karnland O., Sandén T., Johannesson L-E., Eriksen T., Jansson M., Wold S., Pedersen K., Motamedi M., Rosborg B., Long term test of buffer material. Final report on the pilot parcels. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-01-05. Puigdomenech I., Ambrosi J-P., Eisenlohr L., Lartigue J-E., Banwart S A., Bateman K., Milodowski A E., West J M., Griffault L., Gustafsson E., Hama K., Yoshida H., Kotelnikova S., Pedersen K., Michaud V., Trotignon L., Rivas Perez J., Tullborg E-L., O₂ depletion in granitic media. The REX project. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-01-18. Birgersson L., Pers K., Wiborgh M., 2001. Project JADE Long-term function and safety. Comparison of repository systems. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-01-25. Korzhavyi PA., Johansson B., Lozovoi AY., 2001. Segregation of 3sp impurities to $\Sigma 5(310)$ tilt grain boundary in copper. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-02-24. Bäckblom G., Munier R., 2002. Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results,. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-03-06. Vidstrand P., 2003. Surface and subsurface conditions in permafrost areas - a literature review. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-03-09. Hökmark H., Fälth B., Thermal dimensioning of the deep repository. Influence of canister spacing, canister power, rock thermal properties and nearfield design on the maximum canister surface temperature. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-03-13. Ollila K., Albinsson Y., Oversby V., Cowper M., Dissolution rates of unirradiated UO₂, UO₂ doped with ²³³U, and spent fuel under normal atmospheric conditions and under reducing conditions using an isotope dilution method. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-04-02. Börgesson L., Johannesson L-E., Hernelind J., Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Effect on the canister and the buffer. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-04-06. Final disposal of fuel - electron radiation outside copper canister. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-04-08. Kellner E., Wetlands - different types, their properties and functions. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-04-11. Interim main report of the safety assessment SR-Can. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-04-15. Henskaw J., 1994. Modelling of nitric acid production in the Advanced Cold Process Canister due to irradiation of moist air. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-04-18. Ochs M., Talerico C., 2004. SR-Can Data and uncertainty assessment. Migration parameters for the bentonite buffer in the KBS-3 concept. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-04-19. Werme L. O., Johnson L. H., Oversby V. M., King F., Spahiu K., Grambow B., Shoesmith D. W., 2004. Spent fuel performance under repository conditions: A model for use in SR-Can. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-04-20. King F., Shoesmith D. W., Electrochemical studies of the effect of H₂ on UO₂ dissolution. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-04-25. Påsse T., 2004. The amount of glacial erosion of the bedrock. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-05-07. Ollila K., Oversby V M., Dissolution of unirradiated UO₂ and UO₂ doped with ²³³U under reducing conditions. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-05-09. Carbol P., Cobos-Sabate J., Glatz J-P., Ronchi C., Rondinella V., Wegen D H., Wiss T., Loida A., Metz V., Kienzler B., Spahiu K., Grambow B., Quiñones J., Valiente A M E., The effect of dissolved hydrogen on the dissolution of ²³³U doped UO₂(s), high burn-up spent fuel and MOX fuel. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-05-12. Preliminary safety evaluation for the Simpevarp subarea. Based on data and site descriptions after the initial site investigation stage. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-05-16. Preliminary safety evaluation for the Forsmark area. Based on data and site descriptions after the initial site investigation stage. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-05-18. Nilsson K-F, Lofaj F., Burström M., Andersson C-G. 2005. Pressure tests of two KBS-3 canister mock-ups. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-06-04. Börgesson L., Hernelind J., Canister displacement in KBS-3V. A theoretical study. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-06-05. Bergström U., Albrecht A., Kanyar B., Smith G., Thorne M. C., Yoshida H., Wasiolek M., BIOPROTA: Key issues in biosphere aspects of assessment of the long-term impact of contaminant releases associated with radioactive waste management. Theme 2 Task 1: Model review and comparison for spray irrigation pathway. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-06-09. Long-term safety for KBS-3 repositories at Forsmark and Laxemar - a first evaluation. Main report of the SR-Can project. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-06-11. Karnland O., Birgersson M., Montmorillonite stability. With special respect to KBS-3 conditions. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



- SKB TR-06-13. Börgesson L., Hernelind J., 2006. Consequences of loss or missing bentonite in a deposition hole. A theoretical study. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-14. Börgesson L., Fälth B., Hernelind J., 2006. Water saturation phase of the buffer and backfill in the KBS-3V concept. Special emphasis given to the influence of the backfill on the wetting of the buffer. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-16. Arcos D., Grandia F., Domènech C., Geochemical evolution of the near field of a KBS-3 repository. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-17. Duro L., Grivé M., Cera E., Domènech C, Bruno J., 2006. Update of a thermodynamic database for radionuclides to assist solubility limits calculation for performance assessment. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-20. 2006. FEP Report for the Safety Assessment SR-Can. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-21. Initial state report for the safety assessment SR-Can. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-23. Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Can. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-24. Handling of future human actions in the safety assessment SR Can. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-25. 2006. Data Report for the Safety Assessment SR-Can, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-30. Karland O., Olsson S., Nilsson U., 2006. Mineralogy and sealing properties of various bentonites and smectite-rich clay minerals. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-32. Duro L., Grivé M., Cera E., Gaona X., Domènech C., Bruno J., 2006. Determination and assessment of concentration limits to be used in SR-Can. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-36. Lokrantz H., Sohlenius G., 2006. Ice-marginal fluctuations during the Weichselian glaciation in Fennoscandia, a literature review. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-06-38. Harrington J. F., Birchall D. J., Sensitivity of total stress to changes in externally applied water pressure in KBS-3 buffer bentonite. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-07-01. Andersson C.J., 2007. Äspö Pillar Stability Experiment, Final report – Rock mass response to coupled mechanical thermal loading. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-07-02. Sandström, R., Wu R., Origin of the extra low creep ductility of copper without phosphorus. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-08-05. 2008. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase SDM-Site Forsmark, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-08-07. Grandia F., Merino J., Bruno J., 2008. Assessment of the radium-barium co-precipitation and its potential influence on the solubility on Ra in the near-field. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-08-08. Bäckblom G., Excavation damage and disturbance in crystalline rock - results from experiments and analyses. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-08-11. Fälth B., Hökmark H., Munier R., 2010. Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository. Evaluation of modelling results and their implications for layout and design. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-01. Site description of Laxemar at completion of the site investigation phase. SDM-Site Laxemar. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-04. Kjellström E., Strandberg G., Brandefelt J., Näslund J-O., Smith B., Wohlfarth B., 2009. Climate conditions in Sweden in a 100 000-year time perspective. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-05. Gomez J., Laaksoharju M., Skårman E., Gurban I., 2009. M3 version 3.0: Verification and validation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-11. Whitehouse P., 2009. Glacial isostatic adjustment and sea-level change. State of the art report. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-12. Wohlfarth B., 2009. Ice-free conditions in Fennoscandia during Marine Oxygen Isotope Stage 3? Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-14. Sundberg J., Back P-E., Ländell M., Sundberg A., 2009. Modelling of temperature in deep boreholes and evaluation of geothermal heat flow at Forsmark and Laxemar. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-15. Lund B., Schmidt P., Hieronymus C., 2009. Stress evolution and fault stability during the Weichselian glacial cycle. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-16. Helmens K. F., 2009. Climate, vegetation and lake development at Sokli (Northern Finland) during early MIS 3 at ~50 kyr: Revising earlier concepts on climate, glacial and vegetation dynamics in Fennoscandia during the Weichselian. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-17. Hartikainen J., Kouhia R., Wallroth T., 2010. Permafrost simulations at Forsmark using a numerical 2D thermo-hydro-chemical model. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-18. Olvmo M., 2010. Review of denudation processes and quantification of weathering and erosion rates at a 0.1 to 1 Ma time scale. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-22. Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. Updated 2013-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-09-25. Oldberg K., 2009. Distribution of fission gas release in 10x10 fuel. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-26. Nordström E., 2009. Fission gas release data for Ringhals PWRs. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-29. Karnland O., Olsson S., Dueck A., Birgersson M., Nilsson U., Hernan-Håkansson T., Pedersen K., Nilsson S., Eriksen T., Rosborg B., Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project. Final report on the A2 test parcel. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-31. Karnland O., 2011. Long-term test of buffer material at the Äspö HRL. LOT project. Final report on the A0 test parcel. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-32. Andersson-Östling H. C. M., Sandström R., 2009, Survey of creep properties of copper intended for nuclear waste disposal. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-34. Birgersson M., Börgesson L., Hedström M., Karnland O., Nilsson, U. Bentonite erosion. Final report. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-09-35. Neretnieks I., Liu L., Moreno L., 2009. Mechanisms and models for bentonite erosion. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-01. Löfgren A (ed.). ,The terrestrial ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. Updated 2013-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-02. Andersson E., The limnic ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. Updated 2013-08. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-03. Aquilonius K. (ed.), The marine ecosystems at Forsmark and Laxemar-Simpevarp. SR-Site Biosphere. Updated 2013-08. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-04. King F., Newman R., Stress corrosion cracking of copper canisters. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-05. Lindborg T. (ed), 2010. Landscape Forsmark – data, methodology and results for SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-06, Avila R., Ekström P.-A., Åstrand P.-G., 2010. Landscape dose conversion factors used in the safety assessment SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-07. Nordén S., Avila R., de la Cruz I., Stenberg K., Grolander S., 2010. Element-specific and constant parameters used for dose calculations in SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-08. Torudd J., 2010. Long term radiological effects on plants and animals of a deep geological repository. SR-Site Biosphere. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



- SKB TR-10-09. Biosphere analyses for the safety assessment SR-Site – synthesis and summary of results. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-11. Åkesson M., Kristensson O., Börgesson L., Dueck A., Hernelind J., 2010. THM modelling of buffer, backfill and other system components. Critical processes and scenarios. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-12. Design and production of the KBS-3 repository. Updated 2013-10, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-13. 2010. Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-14. Design, production and initial state of the canister. Updated 2013-10. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-15. Design, production and initial state of the buffer. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-16. Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-17. Design, production and initial state of the closure. Updated 2011-12. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-18. Design, construction and initial state of the underground openings. Updated 2013-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-19. Hallbeck, L. Principal organic materials in a repository for spent nuclear fuel. Updated 2010-10. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-21. Munier R., 2010. Full perimeter intersection criteria. Definitions and implementations in SR-Site. Updated 2013-02, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-23. Hökmark H., Lönnqvist M., Fälth B., 2010. THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. Updated 2011-10. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-28. Raiko H., Sandström R., Rydén H., Johansson M., 2010. Design analysis report for the canister. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-29. Dillström P., Bolinder T. 2010. Damage tolerance analysis of canister inserts for spent nuclear fuel in the case of an earthquake induced rock shear load. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-31. Börgesson L., Dueck A., Johannesson L-E., 2010. Material model for shear of the buffer – evaluation of laboratory test results. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.
- SKB TR-10-32. Börgesson L., Dueck A., Johannesson L-E. Stress-strain relation of bentonite at undrained shear. Laboratory tests to investigate the influence of material composition and test technique. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-10-33. Börgesson L., Hernelind J., 2010. Earthquake induced rock shear through a deposition hole. Modelling of three model tests scaled 1:10. Verification of the bentonite material model and the calculation technique. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-34. Hernelind J., 2010. Modelling and analysis of canister and buffer for earthquake induced rock shear and glacial load. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-36. Winberg A., Fault Rock Zones Characterisation - Final report. TRUE-1 Continuation Project. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-39. Tullborg E-L., Smellie J., Nilsson A-C., Gimeno M. J., Auqué L.F., Bruchert V., Molinero J., SR-Site – sulphide content in the groundwater at Forsmark. Updated 2013-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-40. Birgersson M., Karnland O., Nilsson U., 2010. Freezing of bentonite. Experimental studies and theoretical considerations. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-41. Dueck A., 2010. Thermo-mechanical cementation effects in bentonite investigated by unconfined compression tests. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-42. Neretnieks I., Liu, L., Moreno L. Mass transfer between waste canister and water seeping in rock fractures. Revisiting the Q-equivalent model. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-43. Bosbach D., Böttle M., Metz V., 2010. Experimental study on Ra²⁺ uptake by Barite (BaSO₄). Kinetics of solid solution formation via BaSO₄ dissolution and RaxBa_{1-x}SO₄ (re) precipitation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-44. Åkesson M., Börgesson L., Kristensson, O., 2010b. SR-Site Data report. THM modelling of buffer, backfill and other system components. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-45. FEP report for the safety assessment SR Site. Updated 2015-05. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-46. Fuel and canister process report for the safety assessment SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-47. 2010. Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-48. 2010. Geosphere process report for the safety assessment SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-49. Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-50. Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. Updated 2015-05. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-10-51. Model summary report for the safety assessment SR-Site. Updated 2015-05. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-52. Data report for the safety assessment SR-Site. Updated 2014-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-53. Handling of future human actions in the safety assessment SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-54. Comparative analysis of safety related site characteristics. Updated 2013-02. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-55. Dueck A., Nilsson U., 2010. Thermo-hydro-mechanical properties of MX-80. Results from advanced laboratory tests. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-56. Brydsten L., Strömgren M., 2010. A coupled regolith-lake development model applied to the Forsmark site. Updated 2011-10. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-57. Sidborn M., Sandström B., Tullborg E-L., Salas J., Maia F., Delos A., Molinero J., Hallbeck L., Pedersen K., 2010. SR-Site: Oxygen ingress in the rock at Forsmark during a glacial cycle. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-58. Salas J., Gimeno M. J., Auqué L., Molinera J., Gómez J., Juárez I., 2010. SR-Site – hydrogeochemical evolution of the Forsmark site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-59. Sena C., Salas J., Arcos D. Aspects of geochemical evolution of the SKB near field in the frame of SR-Site. Updated 2014-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-60. Karnland O., 2010. Chemical and mineralogical characterisation of the bentonite buffer for the acceptance control procedure in a KBS-3 repository. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-61. Grivé M., Domènech C., Montoya V., García D., Duro L., 2010. Simple Functions Spreadsheet Tool Presentation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBTR-10-62. Grandia F., Galindez J-M., Molinero J., Arcos D., 2010. Evaluation of low-pH cement degradation in tunnel plugs and bottom plate systems in the frame of SR-Site. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-64. Moreno L., Neretnieks, I., Liu, L., Modelling of erosion of bentonite gel by gel/sol flow. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-65. Sena C., Salas J., Arcos D., Thermo-hydro-geochemical modelling of the bentonite buffer. LOT A2 experiment. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-66. Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site. Updated 2012-01. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-10-67. King F., Lilja, C., Pedersen K., Pitkänen P., Vähänen M., An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository. Updated 2011-10. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-10-68. Jansson P., 2010. Ice sheet hydrology from observations. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-11-01 (Art818), 2011. Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle. Huvudrapport från projekt SR-Site. Uppdaterad 2012-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-11-01. Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project, Vol. I-III. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-12-03. Äspö Hard Rock Laboratory, Annual report 2011. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-12-04. Åkesson M., 2012. Temperature buffer test. Final report. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-12-06. Bhaskaran G., Carcea A., Ulaganathan J., Wang S., Huang Y., Newman R C., Fundamental aspects of stress corrosion cracking of copper relevant to the Swedish deep geologic repository concept. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-12-09. Smart N., Rance A., Reddy B., Fennell P., Winsley R., 2012. Analysis of SKB MiniCan. Experiment 3. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-13-02. Helmens K., The last interglacial-glacial cycle (MIS 5-2) re-examined based on long proxy records from Central and Northern Europe. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-13-03. Wohlfarth B., A review of Early Weichselian climate (MIS 5d-a) in Europe. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-13-09. Martinsson Å., Sandström R., Lilja C., Hydrogen in oxygen-free, phosphorus-doped copper: charging techniques, hydrogen contents and modelling of hydrogen diffusion and depth profile. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-13-13. Bengtsson A. et al., 2013. Development of a method for the study of H₂ gas emission in sealed compartments containing canister copper immersed in O₂-free water. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-13-17 Wersin P., 2013. LOT A2 test parcel, Compilation of copper data in the LOT A2 test parcel. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-13-22. Prototype repository – Opening and retrieval of outer section of prototype repository at Äspö Hard Rock Laboratory. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-13-27. King F., Lilja C., Localised corrosion of copper canisters in bentonite pore water. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-13-23. Jaeschke B., Smith K., Nordén S., Alfonso B., 2013. Assessment of risk to non-human biota from a repository for the disposal of spent nuclear fuel at Forsmark, Supplementary information, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-13-31. Boman M. et al., 2013. Koppars korrosion i ultrarent vatten. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-14-15. Taxén C., Sandberg B., Lilja, C. Possible influence from stray currents from high voltage DC power transmission on copper canisters. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-14-17. Äspö Hard Rock Laboratory, Annual report 2013. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-14-21. Florence C., Simona M., 2014. Long-term safety of a planned geological repository for spent nuclear fuel in Forsmark - estimate of maximum ice sheet thicknesses. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-15-03. Johansson J., Blom A., Chukharkina A., Pedersen K., 2015. Study of H₂ gas emission in sealed compartments containing copper immersed in O₂-free water. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-16-01. Ottosson M., Boman M., Berastegui P., Andersson Y., Hahlin M., Korvela M., Berger R., Copper in ultrapure water. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-84-19. Mattsson H., Olefjord I., 1984. General corrosion of Ti in hot water and water saturated bentonite clay. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-86-26. Börgesson L. 1986, Model shear tests of canisters with smectite clay envelopes in deposition holes. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-88-15. Pusch R., Karnland O., Hydrothermal effects on montmorillonite. A preliminary study. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-88-29. Börgesson L., Modelling of buffer material behaviour. Some examples of material models and performance calculations. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-88-30. Börgesson L., Hökmark H., Karnland O., Rheological properties of sodium smectite clay. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-90-01. Norman S., Kjellbert N., 1990. FARF31 – A far field radionuclide migration code for use with the PROPER package. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-90-30. Slunga R., 1990. The earthquakes of the Baltic shield. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-91-24. Andersson J-E., Nordqvist R., Nyberg G., Smellie J., Tirén S., 1991. Hydrogeological conditions in the Finnsjön area. Compilation of data and conceptual model. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-92-20. Final disposal of spent nuclear fuel. Importance of the bedrock for safety. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-92-31. Smellie J., Laaksoharju M., The Äspö Hard Rock Laboratory: Final evaluation of the hydrogeochemical pre-investigations in relation to existing geologic and hydraulic conditions. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-93-02. Pusch R., Karnland O., Lajudie A., Lechelle J., Bouchet A., Hydrothermal field test with French candidate clay embedding steel heater in the Stripa mine. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-93-03. Pusch R., Karnland O., Lajudie A., Decarreau A., 1992. MX-80 clay exposed to high temperatures and gamma radiation. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-93-13. Muir Wood R., 1993. A review of the seismotectonics of Sweden. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-94-02. Wersin P., Spahiu K., Bruno J., Time evolution of dissolved oxygen and redox conditions in a HLW repository. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-94-15. Henshaw, J., Modelling of nitric acid production in the Advanced Cold Process Canister due to irradiation of moist air. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-94-25, Wersin P., Spahiu K., Bruno J., 1994. Kinetic modelling of bentonite–canister interaction. Long-term predictions of copper canister corrosion under oxic and anoxic conditions. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-94-29. Börgesson L., Fredrikson A., Johannesson L.-E., 1994. Heat conductivity of buffer materials. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-95-16. Ahlbom K., Olsson O., Sehlstedt S., 1995. Temperature conditions in the SKB study sites. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-95-19. Johannesson L.-E., Börgesson L., Sandén T., 1995. Compaction of bentonite blocks. Development of technique for industrial production of blocks which are manageable by man. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-95-20. Börgesson L., Johannesson L.-E., Sandén T., Hernelind J., Modelling of the physical behaviour of water saturated clay barriers. Laboratory tests, material models and finite element application. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-96-07. Oversby V. M., 1996, Criticality in a high level waste repository – A review of some important factors of the lessons that can be learned from the Oklo reactors, Svensk kärnbränslehantering AB.

SKB TR-97-18. Johnson L H., Tait J C., 1997. Release of segregated nuclides from spent fuel. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-97-19. Bond A. E., Hoch A. R., Jones G D., Tomczyk, A. J., Wiggin R. M., Worraker W. J., Assessment of a spent fuel disposal canister. Assessment studies for a copper canister with cast steel inner component. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.



SKB TR-97-30. Emsley S., Olsson O., Stenberg L., Alheid H.-J., Falls S., 1997. ZEDEX – a study of damage and disturbance from tunnel excavation by blasting and tunnel boring, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-98-12. Äspö Hard Rock Laboratory – Annual Report 1997. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB TR-99-06. Deep repository for spent nuclear fuel. SR-97 - Post-closure safety. Main report - Vol. I, Vol. II and Summary. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-99-07, 1999. SR-97 Process in the Repository Evolution, Svensk Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-99-09. Andersson J., 1999. Data and data uncertainties. Compilation of data and data uncertainties for radionuclide transport calculations. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-99-20, 1999. SR-97 – Identification and Structuring of Process, Svensk Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-99-27. King F., Quinn M. J., Miller N. H., 1999. The effect of hydrogen and gamma radiation on the oxidation of UO_2 in $0.1 \text{ mol}\cdot\text{dm}^{-3}$ NaCl solution. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-99-41. Börgesson L., Hernelind J., 1999. Coupled thermo-hydro-mechanical calculations of the water saturation phase for a KBS-3 deposition hole. Influence of hydraulic rock properties on the water saturation phase. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKB TR-99-42. Laaksoharju M., Groundwater characterisation and modelling: problems, facts and possibilities. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.

SKBF/KBS TR-83-05, Bresle Å, Saers J, Arrhenius B., 1983. Studies in pitting corrosion on archeological bronzes copper. Svensk Kärnbränsleförsörjning AB/Avdelning KBS

SKB:s preliminära säkerhetsbedömningar för Forsmark och Laxemar. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKI-INSITE TRD-03-02. Bath A., 2003. Audit for SKI/INSITE of geochemistry procedures at SKB's Simpevarp site. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI-INSITE TRD-03-03. Geier J., Tirén S., 2003. INSITE field audit: site investigation methodology and application at the Forsmark site. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI-INSITE TRD-04-08. Bath A., 2004. INSITE document review of: hydrogeochemical site descriptive model – a strategy for the model development during site investigation (SKB R-02-49). Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI-INSITE TRD-04-10. Tsang C-F., 2004. INSITE review of: hydrogeological site descriptive model – a strategy for its development during site investigation (SKB R-03-08). Swedish Nuclear Power Inspectorate.



SKI-INSITE TRD-05-05. INSITE comments on: SKB Report R-05-14: Forsmark site. Site investigation: programme for further investigations of geosphere and biosphere, 2005. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI-INSITE TRD-05-10. INSITE Document Review, Preliminary Safety Evaluation: Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI-INSITE TRD-05-12. INSITE comments on Preliminary Site Description – Forsmark Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI-INSITE TRD-06-01. INSITE Field technical review. Field geochemistry activities at SKB's Forsmark site. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI-INSITE TRD-06-02. INSITE Document Review, Preliminary Safety Evaluation: Laxemar Area SKB Report TR-06-06, 2006. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI-INSITE TRD-06-03. INSITE Document Review, LAXEMAR, Preliminary Site Description: Laxemar Subarea – Version 1.2 SKB Report R-06-10, Programme for Further Investigations...Laxemar Subarea SKB Report R-06-29, 2006.

SKI-INSITE TRD-07-03. Bath A., Hermansson H-P., 2006. Variability and Uncertainties of Key Hydrochemical Parameters for SKB Sites. ISSN 1104-1374. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI-Rapport 2008:03, SSI rapport 2008:01. Myndigheternas granskning av SKB:s preliminära säkerhetsbedömningar för Forsmark och Laxemar. Statens kärnkraftinspektion, Statens strålskyddsinstitut.

SKI-Rapport 2008:19, SSI rapport 2008:04. Dverstorp B., Strömberg B., SKI:s och SSI:s granskning av SKB:s säkerhetsrapport SR-Can. Statens strålskyddsinstitut.

SKI Report 01:46. Arthur R C., 2001. A Comment on the Internal Consistency of Thermodynamic Databases Supporting Repository Safety Assessments. Statens kärnkraftinspektion.

SKI Report 2006:12. Bath A., Geochemical Investigations of Groundwater Stability. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI Report 2007:03. Bath A., Hermansson H-P., 2006. Variability and Uncertainties of Key Hydrochemical Parameters for SKB Sites. ISSN 1104-1374. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI Report 2008:08. Rutqvist J., Tsang C.-F., 2008. Review of SKB's work on coupled THM processes within SR-Can. External review contribution in support of SKI's and SSI's review of SR-Can. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI Report 2008:17. Stenhouse, M., Jégou, C., Brown, P., Meinrath, G., Nitsche, H., Ekberg, C., 2008. Review of SR-Can: evaluation of SKB's handling of spent fuel performance, radionuclide chemistry and geosphere transport parameters. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI Report 2008:18. Concerns when designing a safeguards approach for the back-end of the Swedish nuclear fuel cycle. Swedish Nuclear Power Inspectorate.



SKI Report 2008:23. SSI Report 2008:04 E. Dverstorp B., Strömberg B., SKI:s and SSI:s review of SKB:s safety report SR-Can. Swedish Nuclear Power Inspectorate, Swedish Radiation Protection Authority.

SKI Report 2008:25. Backers T., Stephansson O., 2008. Modelling of fracture initiation, propagation and creep of a KBS-3V and KBS-3H repository in sparsely fractured rock with application to the design at Forsmark Candidate Site. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

SKI Report 96:36. Deep Repository Performance Assessment Project. 1996. Swedish Nuclear Power Inspectorate.

Smith J. N., Smith I. J. N., 1988. Elements of Soil Mechanics. 7th edition. Blackwell Science.

Smith C.A., Sundh M., Mikko H., 2014. Surficial geology indicates early Holocene faulting and seismicity, Central Sweden, International Journal of Earth Sciences, September 2014, Volume 103, Issue 6, pp 1711-1724.

Smith J., Qin Z., King F., Werme L., Shoesmith D.W., Sulfide Film Formation on Copper under Electrochemical and Natural Corrosion Conditions, Corrosion. 2007;63(2):135-144.

SNL, 2011. Granite Disposal of U.S. High-Level Radioactive Waste. SNL Report SAND2011-6203, Sandia National Laboratories. August 2011.

SNL, 2008. Features, Events, and Processes for the Total System Performance Assessment. Analysis. SNL Report ANL-WIS-MD-000027 REV 01. Las Vegas, Nevada: Sandia National Laboratories.

Soroka I L, Shchukarev A., Jonsson M., Tarakina N V., Korzhavyi P A., 2013. Cuprous hydroxide in a solid form: does it exist? Dalton Transactions 42, pp. 9585–9594.

Soroka I L., Tarakina N V., Korzhavyi P A., Stepanenko V., Jonsson M., 2013. Effect of synthesis temperature on the morphology and stability of copper(I) hydride nanoparticles, Cryst. Eng. Comm. 15, pp. 8450-8460.

Speckmann H-D., Lohrengel M M., Schultze J W., Strehblow H-H., 1985. The growth and reduction of duplex oxide films on copper. Berichte der Bunsengesellschaft für physikalische Chemie 89, 392–402.

Spinks J. W. T., Woods R. J., 1990. An Introduction to Radiation Chemistry, 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc.

SS-EN 1997. Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner.

SS-EN 1997-1:2005. Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner - Del 1: Allmänna regler.

SSI/SKI Rapport 2007:1. Statens ansvar för slutförvaring av använt kärnbränsle. Strålskyddsinstitutet. Statens kärnkraftsinspektion.

SSI Report 2008:08. Xu S., Wörman A., Dverstorp B., Klos R., Shaw G. and Marklund L. (2008). SSI's independent consequence calculations in support of the regulatory review the SR-Can safety assessment. Swedish Radiation Protection Authority.



SSM2010/1454-10, Holmlund P., Clason C., Blomdahl K., 2013. Basala temperaturförhållanden under en inlandsis – implikationer kring erosion och vattenflöde vid Forsmark. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-1135-18. Granskningsrapport Systemövergripande frågor, Strålsäkerhetsmyndigheten 2018-01-23.

SSM2011-1135-19. Granskningsrapport Uppförande och drift av slutförvarsanläggningen, Strålsäkerhetsmyndigheten 2018-01-23.

SSM2011-1137-45. TPP Avstämningsmöte #2, SSM, SKB avseende kompletteringar av kapselfrågor. Strålsäkerhetsmyndigheten 2013-08-29.

SSM2011-1137-58. Avstämningsmöte kapselfrågor 2014-03-11 avseende mekanisk integritet, kontroll och provning och tillverkningsaspekter. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-1483. Ärende: TPP (Tillståndsprövningsprojektet) Remiss – Förfrågan från Nacka Tingsrätt om behov av komplettering avseende Svensk kärnbränslehanterings (SKB:s) ansökan om slutförvar för använt kärnbränsle och kärnavfall.

SSM2011-2306-30 Xu S. and Nordén M., 2012. Replication of SKB's calculations for two selected scenarios - Initial review phase. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM 2011-2306-31. Xu S. and Nordén M., 2012. Replication of SKB's LDF calculations - Initial review phase. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM 2011-2306-32. Xu S., Andersson P., Nordén M., 2016. Independent modelling in support of regulatory review of the SR-Site - main review phase. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM 2011-2306-34. García Roldán G., 2016. Granskning av SKB:s ansökan om långsiktig säkerhet, kapselns strukturintegritet – kontroll och provning. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-57. SSM:s Begäran om komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall – degraderingsprocesser för kapseln. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-63. Begäran om komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall: Frågor om kriticitet. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-71. SSM:s inledande granskning av långsiktig strålsäkerhet i SKB:s ansökan om tillstånd att uppföra, inneha och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-80. SSM:s begäran om komplettering – dokumentation och kvalitetssäkring av noder. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-83. SSM:s Begäran om komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall – Bergspänningar i Forsmark. Strålsäkerhetsmyndigheten.



SSM2011-2426-84. SSM:s Begäran om komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall – Kritiska faktorer för val av deponeringspositioner. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-90. Begäran om komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall – Termiskt inducerad seismisk aktivitet. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-91. Begäran om komplettering Effekter på andra organismer än människa. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-104. SSM:s begäran om komplettering angående planer för demonstrationsdeponering. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-107. Begäran om komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall – Klimat. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-109. Begäran om komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall – Osäkerheter i hydrogeologiska beräkningar. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-140. Begäran om komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle och kärnavfall – några frågor kring utveckling av grundvattenkemi på förvaringsdjup på kort och medellång sikt. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM 2011-2426-141. SSM:s begäran om komplettering – uppdatering av bränslets initialtillstånd med hänsyn till förlängda reaktordrifttider. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-2426-194. Begäran om förtydligande information angående nedträngning av utspädda vatten och tider till advektiva förhållanden i bufferten. 2014-08-13. Svensk Kärnbränslehantering AB.

SSM2011-2957-5. Samlad strålsäkerhetsvärdering SKB. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2011-4544-11. Slutrapport om ytterligare granskning av SKB:s dosberäkningsmetodik. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2012-110-3. Ärende: Samarbete mellan Strålsäkerhetsmyndigheten och Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) inom radiologiska konsekvenser för avfallshantering. Första kommentar av ”The biosphere modelling performed by SKB for the SR-Site license application”. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2012-140. Ärende: Avrop radionuklidtransport. Effekterna av kanaliserat flöde på radionuklidtransport i geosfären. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2012-142. Ärende: Avrop radionuklidtransport. Addendum 1, Independent radionuclide transport modelling. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2013-504-2. Samlad strålsäkerhetsvärdering av Svensk Kärnbränslehantering AB 2011-2012. 2013-06-14. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM2015-279-21. Granskningsrapport Inkapsling och fortsatt mellanlagring av använt kärnbränsle (Clink), Strålsäkerhetsmyndigheten 2018-01-23.



SSMFS 2008:1. Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i kärntekniska anläggningar. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSMFS 2008:21. Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om säkerhet vid slutförvaring av kärnämne och kärnavfall. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSMFS 2008:37. Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSMFS 2008:38. Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter om arkivering vid kärntekniska anläggningar.

SSM Rapport 2015:31. Ansvarsfull och säker hantering av använt kärnbränsle och radioaktivt avfall i Sverige – Nationell plan. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM Report 2009:08. Min K-B., Stephansson O., 2009. Shear-induced fracture slip and permeability change, Implications for long-term performance of a deep geological repository. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2009:28. Bath A., Hermansson H-P., Biogeochemistry of Redox at Repository Depth and Implications for the Canister. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2009:30. Apter M. J., Bennett D. G., Saario T., “A Review of Evidence for Corrosion of Copper by Water”. ISSN: 2000-0456. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2009:33. Meinrath G., Stenhouse M., Brown P., Ekberg C., Jégou C., Nitsche H. 2009. Workshop on spent fuel performance, radionuclide chemistry and geosphere transport parameters. Lidingö 2008: Overview and evaluation of recent SKB procedures. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2010:17. Hicks T., Quality Assurance Review of SKB’s Copper Corrosion Experiments, 2010. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2010:30. Chapman N., Bath A., Geier J., Stephansson O., Tirén S., Tsang CF., 2010. INSITE Summary Report. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2011:11. Robinson, P. and Watson, C. 2011. Handling Interfaces and Time-varying Properties in Radionuclide Transport Models. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2011:13. Geier J., Investigation of discrete-fracture network conceptual model uncertainty at Forsmark, Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2011:21. Brown P., Ekberg C., Jégou C., Meinrath G., Nitsche H., Strömberg B., 2011. Workshop on spent fuel performance and radionuclide chemistry. Rånäs 2010: Assessment of some outstanding issues. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2011:22. Bath A., Infiltration of dilute groundwaters and resulting groundwater compositions at repository depth. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2011:26. Backers T., Stephansson O., 2011. The influence of temperature and fluid pressure on the fracture network evolution around deposition holes of a KBS-3V concept at Forsmark, Sweden. Swedish Radiation Safety Authority.



SSM Report 2011:34. Backers T., 2005. Fracture Toughness Determination and Micromechanics of Rock under Mode I and Mode II Loading. PhD thesis, University of Potsdam, Germany.

SSM Report 2013:07. Hultquist G., Graham M.J., Kodra O., Moisa S., Liu R., Bexell U., Smialek J L., 2013. Corrosion of copper in distilled water without molecular oxygen and the detection of produced hydrogen. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Report 2013:28. Lindgren G.A., Voss C., Geier J., 2013. Brine intrusion by upconing for a high-level nuclear waste repository at Forsmark – scoping calculations. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM STYR2011-131. Inriktningsdokument: Beredning av tillstånd och prövning av tillståndsvillkor gällande kärntekniska anläggningar och andra komplexa anläggningar där strålning används. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM Technical Note 2012:10. Review of the Geomicrobiological Aspects of SKB's Licence Application for a Spent Nuclear Fuel Repository in Forsmark. Sweden Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:13. Pettersson K. A review of the creep ductility of copper for nuclear waste canister application. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:17. Szakálos P., Seetharaman S., 2012. Corrosion of copper canister. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:18. Benbow S., Metcalfe R., Watson C., Bond A., 2012. SR-Site independent modelling of engineered barrier evolution and coupled THMC: Contribution to the Initial Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:21. Scully J R., Hicks T W., 2012. Initial review phase for SKB's safety assessment SR-Site: Corrosion of Copper. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:24. Bennett D. G., Initial Review of SR-Site Main Report. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:30. Sällfors G., Initial review of physical properties and processes of the buffer and backfill. THM and other physical processes. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:32. Bath A., Groundwater Chemistry in SKB's Safety Assessment SR-Site: Initial Review. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:33. McMurry J., Bertetti F P., Review of Groundwater Chemistry in SKB's Safety Assessment SR-Site. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:35. Brient R. D., Trbovich T. R., 2012. Review of SKB's code documentation and QA for the SR-Site safety assessment. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:36. Baldwin T D., Hicks T W.. Documentation and Traceability of Data in SKB's Safety Assessment SR-Site: Initial Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.



SSM Technical Note 2012:37. Black J., Selective review of the hydrogeological aspects of SR-Site. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:39. Eberhardt E., Diederichs M., Review of Engineering Geology and Rock Engineering aspects of the construction of a KBS-3 repository at the Forsmark site – Initial Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:41. Geier J.E., 2012. Hydrogeological conditions at the Forsmark site. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:43. Stothoff S., Literature review of groundwater flow in permafrost. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:44. Haggerty R., Review of Matrix Diffusion and related properties of intact rock in SKB:s Licence Application for a Spent Nuclear Fuel Repository in Forsmark, Sweden. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:46. Egan M., Little R. and Walke R. 2012. Review of Landscape Models used in SR-Site. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:48. Trivedi D., 2012. Use of solubility limits in the SR-Site safety assessment. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:51. Min K.-M., Stephansson O., 2012. Rock Mechanics related to long-term repository and site evolution. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:52. Backers T., Stephansson O., 2012. Shear movement of near-field rock due to large earthquakes. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:54. Tirén S., 2012. Initial Review Phase for SKB's safety assessment SR-Site: Geological structures and deformation zones, from site investigation to safety assessment. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:55. Little R., Maul P., Robinson P. and Watson C., 2012. Review of SKB's Radionuclide Transport Methodology. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:56. Benke R. and LaPlane P., 2012. Biosphere Dose Assessment: Review of Dose Consequence of Radionuclides in the Uranium²³⁸ Series Decay Chain. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:58. Pensado O. and Mohanty S., 2012. Independent radionuclide transport modelling – Reproducing results for main scenarios. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:59. Kłos R. Limer L., Shaw G. och Wörman A., 2012. Initial review phase – Dose Assessment Methodology. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:60. Holmlund P., 2012. Handling of climate related issues in the safety assessment SR-Site. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:62. Robinson P. 2012. Review of the MARFA Code Swedish Radiation Safety Authority.



SSM Technical Note 2012:63. Randall M. 2012. Review of radionuclide sorption on bentonite and Forsmark bedrock material. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2012:67. Geier J.E., 2012. Hydrogeological modelling of the Forsmark site. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2013:28. Lindgren G., Voss C., Geier J., 2013. Brine intrusion by upconing for a high-level nuclear waste repository at Forsmark. Scoping calculations. Swedish Radiation Safety Authority

SSM Technical Note 2013:33. Bungum H., Lindholm C., 2013. Seismology – Frequencies and mechanisms – Initial Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2013:34. McCalpin J., 2013. Seismology – Post-glacial seismicity and paleoseismology at Forsmark. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2013:35. Ofoegbu G.I., Smart K. J., 2013. Rock Mechanics – Confidence of SKB's models for predicting the occurrence of a damage zone around the excavations – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2013:36. Stothoff S., Manepally C., 2013. Review and assessment of aspects of the Qeq concept – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2013:37. Min K.-B., Lee J., Stephansson O., 2015. Rock Mechanics – Evolution of fracture transmissivity within different scenarios in SR-Site – Main Review Phase, reviderad version. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:05. Geier J., 2014. Assessment of flows to deposition holes – main review phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:07. Eberhardt E., Diederichs M., 2014. SSM Review of the geological mapping and geophysical measurement techniques for the determination of critical properties around deposition holes – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:08. McMurry J., Bertetti F.P., Review of Long-Term Redox Evolution of Groundwater and Potential Influence of Oxygenated Glacial Meltwater in RSR-Site. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:10. Backers T., Meier T., Gipper P., Stephansson O., 2014. Rock Mechanics - Confidence of SKB's models for predicting the occurrence of spalling – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:11. Bennet D G., Radionuclide Solubility Limits in SKB's Safety Case. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:14. Backers T., Meier T., Gipper P., Stephansson O., 2014. Rock Mechanics - Confidence of SKB's models for predicting the occurrence of spalling – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:17. Howard B., Beresford N., Assessment of radiological effects on non-human biota. Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.



SSM Technical Note 2014:22. Chapman N., Stephansson O., Lanaro F., Sonnerfelt L., 2014. Workshop on seismic hazard at Forsmark – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:23. Stephansson O., Chapman N., 2014. Workshop on Rock Mechanics Issues and their Implications for Groundwater Flow – Main Review Phase, Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:29. Pensado O., Mohanty S. and Sagar B., Independent Modelling of Radionuclide Transport, Evaluation of Colloid Transport Modelling – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:32. Beresford N., Boyer P., and Howard B., 2014. Assessment of the derivation and use of distribution coefficients (Kd) and concentration ratios (CR) – Main Review Phase, Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:33. Mohanty S. and Pensado O., 2014. Reproduction of SKB:s Canister Failure Calculations - What-If and 'Residual' Scenario to Illustrate Barrier Functions. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:34. Walke R., Modelling Comparison of Simple Reference Biosphere Models with LDF Models. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:35. Klos R. Limer L., Shaw G., Wörman A., 2014. Modelling comparison of alternative biosphere models with LDF models and evaluation of selected parameter values used in the biosphere dose assessment - Main review phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:38. Bertetti F P., Detailed assessment of radionuclide Kd-values for the geosphere. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:40. Apted M., Review of Performance Confirmation Programs and Potential Roles in SSM's Current Review of SKB's License Application – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:41. Benke R. and Monhanty S., 2014. Review of radionuclide abstraction and selection in the SKB safety case. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:44. Geier J., 2014. Independent evaluation of the number of critical canister positions in the KBS-3 repository at Forsmark – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:46. Hicks T., 2014. QA in SKB's Groundwater Flow Modelling. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:47. Bath A., Assessment of groundwater salinity evolution at repository depth and especially the impact of dilute water infiltration - Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:48. Bath A., Independent assessment of groundwater sulphide content in the long-term. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:50. Lindahl H. A., Study of Availability of Fuel Data for Sweden's Spent Nuclear Fuel. Swedish Radiation Safety Authority.



SSM Technical Note 2014:54. Walke R., Limer L., Further Modelling Comparison of Simple Reference Biosphere Models with the LDF Modelling Approach – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:55. Penfold J., 2014. Further Reproduction of SKB's Calculation Cases and Independent Calculations of Additional "What If?" Cases. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:58. Backers T., Meier T., Gipper P., Stephansson O. Rock Mechanics - Assessing probability and extent of blind faults and fault-end growth around the KBS-3 repository at Forsmark – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2014:59. Yoon J.S., Stephansson O., Min K.-B., 2014. Relation between earthquake magnitude, fracture length and fracture shear displacement in the KBS-3 repository at Forsmark – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:01. Stephansson O., Gipper P., 2015. Rock Mechanics - Thermal properties and thermal modelling of the rock in a repository of spent nuclear fuel at Forsmark – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:05. Röhlig K.J., Review of uncertainty propagation and sensitivity analysis in SR-Site. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:06. Bennett D., 2015. Feasibility of backfilling deposition tunnels. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:08. Sällfors G., Rheological properties of the Bentonite Buffer – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:22. Klos R., Further modeling and sensitivity study using the GEMA-Site "alternative biosphere models" and review of material from SKB's RFI response. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:29. Hicks T., Quality assurance in SKB's copper corrosion experiments. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:30. Backers T., Meier T., Gipper P., Stephansson O., 2015. Rock Mechanics - Assessing the likelihood and extend of fracture growth in the KBS-3 repository at Forsmark – Main Review Phase. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:33. Sällfors G., 2015. Piping and erosion of bentonite in buffer and backfill. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:39. Granskning av KBS-3 avseende nukleär kriticitetssäkerhet, Mennerdahl D., 2015, E Mennerdahl Systems.

SSM Technical Note 2015:40. Geier J. E., Assessment of flow-related transport parameters used in SR-Site safety case. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:41. Geier J. E., Hydrogeological aspects of future human actions for a repository at Forsmark. Swedish Radiation Safety Authority.



SSM Technical Note 2015:45. Stark K., Parallel assessment of effects on non-human biota using RESRAD-BIOTA. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:47. Klos R. 2015. Main phase review – Supplementary review of SKB's further RFI response. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:49. Benbow S. J., Metcalfe R., Burrow J., Independent Modelling of Engineered Barrier Evolution and Coupled THMC: Canister Corrosion Calculations in SR-Site. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2015:51. Grape S., Hellesen C., Sjöstrand H., Lantz M., Jacobsson Svärd S., Review of SKB's reporting of initial state of spent nuclear fuel – main review phase.

SSM Technical Note 2015:52. Segle P., Review of SKB's creep model, its implementation into ABAQUS and an evaluation of SKB's analyses of the evaluation of SKB's analyses of the copper canister. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2016:02. Pettersson K., An updated review of the creep ductility of copper including the effect of phosphorus. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2016:05. Pedersen L. B., 2016. Assessment of SKB TR-14-15 Possible influence from stray currents from high voltage DC power transmission on copper canisters. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM Technical Note 2016:16. Lundmark F., Hermansson M., Edvinsson J., 2016. Possible influence from stray currents from high voltage DC power transmission on copper canisters – Main Review Phase. Strålsäkerhetsmyndigheten.

SSM Technical Note 2016:23. Yoon J. S., Stephansson O., Min K.-B., 2016. Modelling of the thermal evolution of the KBS-3 repository at Forsmark and associated induced seismic activity. Swedish Radiation Safety Authority.

SSM Technical Note 2017:15. Pensado O., Radionuclide release rates associated with bounding cases featuring relatively early canister failures in a spent fuel repository. Swedish Radiation Safety Authority.

SOU 2017:62 Kärnavfallsrådets yttrande över SKB:s Fud-program 2016. Kärnavfallsrådet.

Stacey T.R., 1981. A simple extension strain criterion for fracture of brittle rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 18: 469–474.

Stephansson O., Jing L., Tsang C-F. (Editors), 1996. Coupled thermo-hydro-mechanical processes of fractured media. Mathematical and experimental studies. Recent development of DECOVALEX project for radioactive waste repositories. Elsevier, Amsterdam.

Stephansson O., Ljunggren C., Jing L., 1991. Stress measurements and tectonic implications for Fennoscandia. *Tectonophysics*, 189, pp. 317–322.

Stern M. and A. L. Geary, 1957. Electrochemical polarization I. A theoretical analysis of the shape of polarization curves. *Journal of the Electrochemical Society*, 104, 56.



Stroes-Gascoyne S., Garisto F., Betteridge J. S., 2005. The effects of alpha-radiolysis on UO₂ dissolution determined from batch experiments with ²³⁸Pu-doped UO₂. *Journal of Nuclear Materials*, 346, pp. 5-15.

Strömberg B., Lindgren G.A., Dverstorp B., Anghel C., 2015. Regulatory Assessment of a Spent Fuel Repository at the Forsmark Site Sweden; Evolution of Groundwater Site Conditions, International High-Level Radioactive Waste Management Conference, April 12-16, 2015, Charleston, SC, ISBN: 978-0-89448-719-4.

Stucki J. W., Kostka J. E., 2006. Microbial reduction of iron in smectite. *Comptes Rendus Geoscience*, 338, pp. 468-475.

Stulz J., Paffet M., Joyce S., 2004. Thermal evolution of hydrogen following water adsorption on UO₂ (100). *Journal of Physical Chemistry B*, 108, pp. 2362-2364.

Sugita Y., Chijimatsu M., Suzuki H., 2003. Fundamental properties of bentonite pellets for Prototype Repository Project. In: *Advances in understanding engineered clay barriers. Proceedings of the international symposium on large scale field test in granite*. Sitges, Barcelona, Spain. November 12-14, 2003. Balkema Publishers.

Sugiyama D., Fujita T., 2006. A thermodynamic model of dissolution and precipitation of calcium silicate hydrates. *Cement and Concrete Research*, 36, pp. 227-237.

Sunder S., Boyer G. D., Miller N. H., 1990. XPS studies of UO₂ oxidation by alpha radiolysis of water at 100°C. *Journal of Nuclear Materials*, 175, pp. 163-169.

Szakálos P., Hultquist G. and Wikmark G., 2007. Corrosion of Copper by Water. *Electrochemical and Solid-State Letters*, 10 (11) C63-C67.

Szakálos P., Hultquist G., Wikmark G. 2008. Response to the Comment on 'Corrosion of Copper by Water', [*Electrochemical and Solid-State Letters*, 10 (11) C63-C67 (2007b)], *Electrochemical and Solid-State Letters*, 11 (4) S2-S2.

Szymkiewicz A., 2013. Chapter 2, Modelling water flow in unsaturated porous media. In: Rowiński P. (ed.), *GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences*. Springer-Verlag.

Tabor, R.W., Haugerud, R.A., Haeussler, P.J., and Clark, K.P., 2011, Lidar-revised geologic map of the Wildcat Lake 7.5' Quadrangle, Kitsap and Mason Counties, Washington: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3187, scale 1:24,000, 12 p..

Taniguchi N., Kawasaki M., 2008. Influence of sulfide concentration on the corrosion behaviour of pure copper in synthetic seawater. *Journal of Nuclear Materials* 379, 154–161.

Thackray G.D., Rodgers D.W. and Streutker D., 2013, Holocene scarp on the Sawtooth fault, central Idaho, USA, documented through lidar topographic analysis: *Geology*, April 16, 2013, doi: 10.1130/G34095.1.

Thomas H. R., Clear P. J., Chandler N., Dixon D., Mitchell H. P., 2003. Water infiltration into a large-scale in situ experiment in an underground research laboratory. *Géotechnique*, 53, pp. 207-224.



Tsang C.-F., Stephansson O., Jing L., Kautsky F., 2009. DECOVALEX project: from 1992 to 2007. *Environment Geology*, 57, pp.1221-1237.

Tushingham A M., Peltier W R., 1991. ICE-3G: a new global model of Late Pleistocene deglaciation based upon geophysical predictions of post-glacial relative sea-level change. *Journal of Geophysical Research*, 96, pp 4497–4523.

Trummer M., Jonsson M., 2010. Resolving the H₂ effect on radiation induced dissolution of UO₂-based spent fuel. *Journal of Nuclear Materials*, 396, pp.163-169.

UNSCEAR 2000. Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAQR 2000 report to the General Assembly with scientific annexes. Vol. I. Annex A: Dose assessment methodologies: New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.

USDoE, 2004. RESRAD-BIOTA: a tool for implementing a graded approach to biota dose evaluation. User's guide, version 1. DOE Report No. DOE/EH-0676; ISCORS Technical Report 2004-02, United States Department of Energy.

van Beek P., François R., Conte M., Reyss J.-L., Souhart M. and Charette M., ²²⁸Ra/²²⁶Ra and ²²⁶Ra/Ba ratios to track barite formation and transport in the water column. *Geochim. Cosmochim. Acta* 71, 71-86, 2007.

van Brutzel L., Crocombette J.-P., 2007. Atomic scale modelling of the primary damage state of irradiated UO₂ matrix. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 981E, paper JJ01-01.

Vandenhove H., Sweeck L., Van Hees M. and Wannijn J., 2010. Evaluation of the environmental risk associated with the radiological liquid discharges from the Belgian nuclear power plants. External Report, ER-132, SCK•CEN, Mol, Belgium.

Villar M. V., 2002. Thermo-hydro-mechanical characterization of a bentonite from Cabo de Gata. A study applied to the use of bentonite as sealing material in high level radioactive waste repositories. ENRESA publicación técnica 04/2002. Madrid.

Villar M. V., Fernández A. M., Gómez R., Barrenechea J. F., Luque F. J., Martín P. L., Barcala J. M., 2007. State of a bentonite barrier after 8 years of heating and hydration in the Laboratory. *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Vol. 985.

Vives I Batlle J., Beaugelin-Seiller K., Beresford N. A., Copplestone D., Horyna J., Hosseini A., Johansen M., Kamboj S., Keum D.-K., Kurosawa N., Newsome L., Olyslaegers G., Vandenhove H., S. Ryufuku S., Vives Lynch S., Wood M.D., Yu C., 2011. The estimation of absorbed dose rates for non-human biota: an extended intercomparison. *Radiation and Environmental Biophysics* 50(2); pp 231-251.

Väliranta M., Birks H H., Helmens K F., Engels S., Piirainen M., 2009. Early-Weichselian interstadial (MIS 5c) summer temperatures were higher than today in Northern Fennoscandia. *Quaternary Science Reviews (rapid communications)*, 28, pp 777–782.

Walke R., Kirchner G., Xu S. and Dverstorp B., 2015. Post-closure biosphere assessment modelling: comparison of complex and more stylised approach. *Journal of Environmental Radioactivity*. 148, 50-58.



Wampler W R., Schober T., Lengeler B., 1976. Precipitation and trapping of hydrogen in copper. *Philosophical Magazine* 34, 129–141.

Wells D.L., Coppersmith K.J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.* 84(4): pp 974-1002.

Werme L. O., Rosborg B., Taxén C., Karnland O., Quirk G., 2002. In Situ Copper Corrosion Experiments In Äspö Hard Rock Laboratory, Proc. WM'02 Conference "Aqueous corrosion tests", February 24-28, 2002, Tucson, Arizona, USA.

Wersin P., Kober F., (eds). 2017. *Arbeitsbericht NAB 16-16. FEBEX-DP. Metal Corrosion and Iron-Bentonite Interaction Studies.*

White J H., Yaniv A E., Schick H., 1966. The corrosion of metals in the water of the Dead Sea. *Corrosion Science*, 6, pp 447–460.

Whitehouse P., Latychev K., Milne G A., Mitrovica J X., Kendall K., 2006. Impact of 3D Earth structure on Fennoscandian glacial isostatic adjustment: Implications for space-geodetic estimates of present-day crustal deformations. *Geophysical Research Letters* 33, L13502, doi:10.1029/2006GL026568.

Wilmot R. and Robinson P., 2004. The issue of risk dilution in risk assessments. *Proceedings of NEA workshop: Management of uncertainty in safety cases and the role of risk.* Stockholm, Sweden, 2-4, February, 2004, pp 197-206.

Witherly K., 2012: The evolution of minerals exploration over 60 years and the imperative to explore undercover. *Mining Geophysics*, 292-295.

Wohlfarth B., 2010. Ice free conditions in Sweden during Marine Oxygen Isotope Stage 3? *Boreas*, 39, pp 377–398.

Wood M.D., Marshall W.A., Beresford N.A., Jones S.R., Howard B.J., Copplestone D., Leah R.T., 2008. Application of the ERICA Integrated Approach to the Drigg coastal sand dunes. *Journal of Environmental Radioactivity* 99(9); 1484-1495.

X-5 Monte Carlo Team, 2003. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5, Volume I: Overview and Theory. LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory, New Mexico, USA.

Xu S., Wörman A., Dverstorp B., Kłos R., Shaw G. and Marklund L., 2008. SSI's independent consequence calculations in support of the regulatory review of the SR-Can safety assessment, SSI Rapport 2008:08. Statens Strålskyddsinstitut (SSI).

Xu S., Dverstorp D. and Nordén M., 2014. Modeling in Support of SSM's Licensing Review of a Geological Repository for Spent Nuclear Fuel. *Proceedings of WM symposia 2014*, 2-6, March, 2014. Phoenix, Arizona, USA.

Xu S., Dverstorp B., Lindgren G., Nordén M. and Röhlig K-J., 2015. A structured approach to independent modelling in support of a licensing review. *Proceedings of the 15th International High-Level Radioactive Waste Management Conference (IHLRWMC)*, Charleston, SC, USA, April 12-16, 2015. pp.18-26.



Yagodzinskyy Y., Malitckii E., Saukkonen T., Hänninen H., 2012. Hydrogen-enhanced creep and cracking of oxygen-free phosphorus-doped copper. *Scripta Materialia* 67, 931–934.

Youngs R.R., Arabasz W.J., Anderson R.E., Ramelli A.R., Ake J.P., Slemmons D.B., McCalpin J.P., Doser D.I., Fridrich C.J., Swan F.H., Rogers A.M., Yount J.C., Anderson L.W., Smith K.D., Bruhn R.L., Knuepfer P.L.K., Smith R.B., dePolo C.M., O’Leary D.W., Coppersmith K.J., Pezzopane S.K., Schwartz D.P., Whitney J.W., Olig S.S., Toro G.R., 2003. A Methodology for Probabilistic Fault Displacement Hazard Analysis (PFDHA). *Earthquake Spectra*, Volume 19, No. 1, pp. 191–219, Earthquake Engineering Research Institute.

Zang A., Wagner F.C., Stanchits S., Janssen C., Dresen G., 2000. Fracture process zone in granite. *J Geophys Res* 105(B10), pp. 23651-23661.

Zang A., Stephansson O., 2010. *Stress Field of the Earth’s Crust*. Springer, Dordrecht.

Zheng L., Samper J., 2008. A coupled THMC model of FEBEX mock-up test. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, pp. 508-515.



Bilaga 1 Förkortningar

ALARA As Low as Reasonably Achievable

ASME The American Society of Mechanical Engineers

BAT Best available technology (bästa tillgängliga teknik)

BMT Bästa möjliga teknik

BRITE The Barrier Review, Integration, Tracking and Evaluation group

BWR Boiling Water Reactor

Clab Centralt mellanlager för använt kärnbränsle

Clink Integrerad anläggning för mellanlagring och inkapsling av använt kärnbränsle

Crud Chalk River Unidentified Deposit

DFN Discrete Fracture Network (diskreta spricknätverksmodeller)

EURATOM Europeiska atomenergigemenskapen

FEP Features, events and processes (egenskaper, händelser och processer)

Fud Forskning, Utveckling och Demonstration

F-PSAR Förberedande preliminär säkerhetsredovisning

IAEA International Atomic Energy Agency

ICRP International Commission on Radiological Protection

IEC International Electrotechnical Commission

INK Inkapsling

ISO International Standard Organisation

KBS-3 Kärnbränslesäkerhet; tredje rapporten i projekt om kärnbränslesäkerhet (1983)

KBS-3V Variant av KBS-3 där kapslarna deponeras stående i vertikala deponeringshåll

KTL Kärntekniklagen (1984:3)

LDF Landskapsspecifika doskonverteringsfaktorn

MB Miljöbalken (SFS 1988:808)

MKB Miljökonsekvensbeskrivning

MOX-bränsle Mixed Oxide Fuel



NEA Nuclear Energy Agency

OECD Organisation for Economic Co-operation and Development

OFP Oförstörande provning

PGF Pressure-Gradient Force (postglaciala förkastningar)

PSA Probabilistisk säkerhetsanalys

PSAR Preliminär säkerhetsredovisning inför uppförande

PSU Projektet SFR Utbyggnad

PWR Pressurised Water Reactor

SAR Safety Analysis Report; säkerhetsredovisning för en kärnteknisk anläggning

SDM, Site Description Model (av Forsmark)

SER, Site engineering report (SKB R-08-83)

SKI Statens kärnkraftsinspektion

SR Säkerhetsredovisning för slutförvaring av använt kärnbränsle

SR-Can Analys av slutförvarets långsiktiga säkerhet

SR-Drift Säkerhetsredovisning för drift av slutförvarsanläggning för använt kärnbränsle

SR-PSU Långsiktig säkerhetsanalys (Säkerhetsredovisning – Projekt SFR-Utbyggnad)

SR-Site Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle

SSI Statens Strålskyddsinstitut

SSL Strålskyddslagen (1988:220)

SSMFS Strålsäkerhetsmyndighetens författningssamling

UT Ultraljud



Bilaga 2 Ordlista

Absorption, process som innebär att gas, vätska eller en energiform tränger in i och upptas av ett ämne. (NE)

Adsorption, förloppet när ett fast ämne till sin yta upptar och binder ämnen från en gas eller vätska. (NE)

Advektion, en transport av ett ämne eller konstant egenskap med ett flöde som förflyttas. (Wikipedia)

Aktinider, grundämnen med atomnummer 89 – 103. (SKB)

Aktivitetsinventarium, radioaktivitet uttryckt i enhet Becquerel som innehålls i det använda kärnbränslet. (SSM)

Aleatorisk, slumpmässig. (NE)

Amorf, formlös, strukturlös. (NE)

Anaerob, en process eller organism som inte fordrar tillgång till fritt syre. (NE)

Anisotropi, innebär att en fysikalisk egenskap är olika i olika riktningar. (NE)

Anoxi, frånvaro av molekyllärt syre. (NE)

Antropogen, påverkad, skapad eller orsakad av människan. (NE)

Apertur, (i denna rapport) öppning av sprickorna i berget. (NE)

Aseismisk, seismisk inaktiv (Wiktionary)

Attenuering, försvagning, dämpning. (NE)

Barriär, fysiskt hinder mot spridning av radioaktiva ämnen. (SSM)

Batymetri, mätning av djup, vanligtvis till botten av hav och insjöar. (NE)

Bayesiansk, formell beskrivning av hur empiriska observationer förändrar vår kunskap om ett osäkert/okänt fenomen. (Wiki)

Biosfär, sammanfattande benämning på de delar av jorden där liv kan förekomma. (NE)

Bränslekuts, kärnbränsle, vanligen i form av en kort cylinder, avsedd att staplas i en bränslekapsling för att bilda en bränslestav. (SKB)

Bränslematris, fastfasen av bränslekutsarna innehållande urandioxidpartiklar med inbäddade fissionsprodukter, transuraner och dotternuklider till vissa sönderfallskedjor. (SSM)

Buffert, lera som innehåller svällande mineral. Bufferten är en av förvarets tekniska barriärer. (SKB)

BWR, Kokvattenreaktor av lättvattentyp. (SKB)



ConnectFlow, datakod för simulering av grundvattenflöde. (SKB)

Crud, korrosionsprodukter som bildas i vattenkyld reaktor och kan ge upphov till beläggning på de ytor som har kontakt med kylvattnet. (SKB)

Darcy Tools, datorprogram för hydrogeologiska beräkningar. (SKB)

Datafrys, en definitiv tidsgräns för vilken information beaktades. För att tydliggöra vilka data som hör till vart och ett av stegen, och som därmed utgjort underlag till de olika versionerna av platsbeskrivande modell, infördes begreppet ”datafrys”. (SKB)

Deformationszon, samlingsnamn för olika typer av svaghetszoner i berggrunden. (SKB)

Den glaciala fasen, istiden i en glacialcykel, som kännetecknas av att stora landområden är täckta med glaciäris (Wikipedia)

Den periglaciala fasen, den perioden i en glacialcykel där landformer och processer förekommer utanför och omkring regionerna med glaciäris (wikipedia)

Den tempererade fasen, den perioden i en glacialcykel där landområdet befinner sig mellan det subarktiska och subtropiska klimatet.

Den termiska fasen, tiden från kapseldeponering och 10 000 år framåt, då värmeutveckling i bränslet fortfarande påverkar bergets ursprungliga temperatur. (SSM)

Denudation, nednötning av landytan genom vittring, massrörelser och erosion. (NE)

Desoxidation, avlägsnande av syre från en metallsmälta, t.ex. stål. (NE)

Deviatorisk, avvikande kurva (SSM)

Diagenes, de kemiska, fysiska och biologiska förändringar som äger rum i ett sediment efter dess avsättning, samt under och efter dess litifiering (förstening). (NE)

Diffundera, sprida sig åt skilda håll, undergå diffusion. (NE)

Diffusion, spontan materialtransport eller utbredning av ett ämne, orsakad av slumpvisa förändringar i egenrörelserna hos ämnets atomer eller molekyler. (NE)

Dipol, en neutral molekyl i vilken elektron- och kärnladdningarnas tyngdpunkter inte sammanfaller. (NE)

Diskretisering, inom matematiken teknik att överföra ett matematiskt problem till ett beräkningsbart problem med ändligt många variabler. (NE)

Dispersion, spridning (Wiktionary)

Djupförsvar, tillämpning av flera överlappande nivåer av tekniska, organisatoriska och administrativa åtgärder för att skydda en anläggnings barriärer och vidmakthålla deras effektivitet samt för att skydda omgivningen om barriärerna inte skulle fungera som avsett. (SSM)

Dosrat, stråldos per tidsenhet. (SKB)



Duktilitet (av latin ductilis 'tänjbar'), mått på ett materials förmåga att utsättas för plastisk deformation utan sprickbildning. (NE)

Emissivitet, en kropps förmåga att utsända elektromagnetisk strålning (värme och ljus).(NE)

ERICA, ett EU-projekt som tog fram screeningvärden för att bedöma miljörisk från joniserande föroreningar (Environmental Risk from Ionising Contaminants: Assessment and management). (SKB)

Exsickator, ett tjockväggigt glaskärl med slipat, lufttätt slutande lock, för torkning av av ömtåliga fasta och flytande ämnen utan användning av värme, samt för förvaring av laboratorieutensilier och fukt känsliga kemikalier. (NE)

Extrapolation, slutsatser dragna om förhållanden i ett område man inte studerat, på basis av vad man vet om något näraliggande område. (Wiki)

Extrusion, inom metallbearbetning en process vid vilken ämnet med hjälp av en stämpel pressas ut ur en container via en matris. (NE)

Foliation, egenskapen hos en bergart att med större eller mindre lätthet låta sig klyvas efter med varandra parallella plan. En allmän term för en anordning av texturella och/eller strukturella element i plan hos en metamorf bergart. (Liten Geologisk Encyklopedi, Melkerud P.-A., SLU)

Fraktal, inom matematiken benämning på en bild eller en mängd som är starkt sönderbruten i motsats till rätta linjer, cirklar, trianglar och andra figurer inom den klassiska euklidiska geometrin. (NE)

Geosfär, jordens yttre del, omfattande skorpan och övre manteln till cirka 100 km djup. (NE)

Gradient, förändring av temperatur, materialkoncentration, tryck eller dylikt inom per enhet avstånd. (SSM)

Gravimetri, metod för kvantitativ kemisk analys som bygger på noggrann vägning. (NE)

Göt, block av stål eller annan metall, som är avsett för vidare bearbetning genom t.ex. valsning eller smidning. (NE)

Hydrogeokemi, läran om kemiska förhållanden i ytvatten och i grundvatten i berg och jord. (SKB)

Hydrogeologi, läran om ytvatten och grundvatten i berg och jord. (SKB)

Induktion, slutledning i vilken man sluter sig till ett generellt samband från ett antal enskilda fall. (NE)

Injektering, i byggtekniken åtgärd för att fylla ut hålrum med ett flytande ämne som sedan stelnar och antar fast form. (NE)

INSITE, INdependent Site Investigation Tracking & Evaluation; extern expertgrupp organiserad av SKI som stöd i granskningen av SKB:s platsundersökningsprogram. (SSM)



Interpolation, i matematiken en metod att utgående från en funktions värden för vissa variabelvärden approximativt beräkna funktionen för mellanliggande variabelvärden. (NE)

Intrusion, process som innebär att en magma tränger in i en bergarts massa; även benämning på den magmatiska bergartskropp som bildas genom en intrusion. (NE)

Isomorf, en matematisk struktur som i något avseende är fullständigt identisk med någon annan struktur. (Wiki)

Isostatisk, statiskt bestämd, kallas inom strukturmekniken en konstruktion där de krafter konstruktionen utövar på stödordningar (stödkrafter) och vissa definierade spänningsresultanter kan beräknas ur enbart jämviktsekvationer. (NE)

Kalorimetri, mätning av värmemängd. (NE)

Karakterisering, ange väsentliga kännetecken för en företeelse. (NE)

Katjon, positivt laddad jon som vid elektrolys av en lösning eller smälta vandrar till den negativa elektroden, katoden. (NE)

Kavititet, hålighet, hålrum, fackterm inom flera områden, bl.a. mikrometerstort hålrum som bildas i kristallina material vid plastisk deformation. (NE)

Kaxprov, krossat bergartsmaterial som uppkommer vid borrhning (exempelvis hammarborrning). (NE)

KBS-metod, metod för slutförvaring av använt kärnbränsle där:

- det använda kärnbränslet kapslas in i täta, lastbärande kapslar som är
- motståndskraftiga mot korrosion
- kapslarna deponeras i kristallint berg på 400–700 meters djup i en långsiktig stabil miljö
- kapslarna omges av en buffert som förhindrar vattenflöde och skyddar dem
- de utrymmen i berget som krävs för deponering återfylls och försluts. (SKB)

Kohesion, egenskap hos materiens molekyler att attraheras till varandra utan kemisk bindning. (NE)

Kokill, gjutform av metall, vanligen av gjutjärn men ibland av stål eller koppar. (NE)

Kolloid, ett system där ett ämne är finfördelat (dispergerat) i ett annat, och det finfördelade ämnets partiklar har åtminstone i någon dimension en storlek mellan en nanometer och en mikrometer (Wikipedia)

Konduktivitet, ledningsförmåga, term som vanligen används för elektrisk eller termisk konduktivitet, betecknad γ eller κ , ett materials förmåga att leda elektrisk eller termisk ström, inversen till resistivitet. (NE)

Konnektering, metod för att tidsmässigt knyta ihop åtminstone delvis överlappande diagram från likartade lager- och årsringsserier. (NE)

Konvektion, rörelser i gaser och vätskor som orsakas av att densiteten, dvs. tyngden, varierar mellan gasens eller vätskans olika delar. (NE)



Konvergens, närmande från olika håll till ett visst värde, mot ett visst mål o.d.
Matematiskt begrepp. (NE)

Korrodat, ämnen som orsakar korrosion (SSM)

Korrosion, ett material, vanligtvis en metall, löses upp genom en kemisk, oftast elektrokemisk, reaktion till en mer stabil form. (Wikipedia)

Kriging, statistisk metod att interpolera spatiala processer (efter den sydafrikanske gruvingenjören Daniel Gerhardus Krige, född 1919). (NE)

Kriticitet, det tillstånd då en kärnreaktor, eller annan anordning som innehåller kärnbränsle, kan upprätthålla en kedjereaktion av kärnklyvningar. (NE)

Krypning, med tiden fortgående, långsam deformation hos vissa material under mekanisk belastning. (NE)

Kumulativ, en företeelse, en process etc. som växer genom att det nya läggs till det gamla. (NE)

Likvefaktion, smältning, övergång till vätska (NE)

Littorinahavet, saltvattensstadium i Östersjöns utvecklingshistoria för mellan ca 8 500 och 3 000 år sedan. (NE)

Läckström, oönskad elektrisk ström betingad av ofullkomlig eller tillfälligt försämrad elektrisk isolation. Läckström kan medföra att isolationsmaterialet förstörs och att överslag inträffar. Läckström förorsakas framför allt av smuts och saltbeläggningar, ofta i kombination med fukt, på isolationsmaterialet. (NE)

Länshållning, bortledning av vatten från en hålighet i marken utan avlopp. (SKB)

Mafisk bergart, magmatisk bergart som huvudsakligen består av mörkfärgade, järn–magnesiumrika mineral som olivin, pyroxen, amfibol och biotit. (NE)

MIKE SHE, datorprogram för att simulera grundvatten- och ytvattenflöden. (SKB)

Mol, SI-enhet för substansmängd, en av SI:s grundenheter. (NE)

Momentmagnitud, det mest fysikaliskt riktiga magnitudbegreppet. MW räknas ut från storleken på den yta som rört sig i berget, rörelsens storlek och bergets elastiska egenskaper (μ). Produkten $M_0 = \mu AD$ kallas för det skalära seismiska momentet och används för beräkningen av MW. Momentmagnituden definieras som $MW = (2/3) \log_{10}(M_0) - 6$, där M_0 har enheten Nm. (Svenska nationella seismiska nätet).

Nodul, inom geologin en mindre, oregelbundet rundad kropp, med eller utan inre struktur, med en mineralsammansättning som vanligtvis markant skiljer sig från den omgivande bergartens eller sedimentets. (NE)

Notch, ett V-format snitt i en hård yta; ett hål eller märke på kanten av en del av ett objekt (översättning från definitionen i Cambridge Dictionary Online)

Nuklid, atomslag karakteriserat av atomkärnans sammansättning. (NE)



Oligotrof, näringsfattig och därmed biologiskt lågproduktiv. Sådana miljöer är t.ex. mossar och många barrskogar. Oligotrofa sjöar förekommer framför allt i urbergsområden med sand eller mager morän, på vissa myrmarker samt i fjällen. (NE)

Orogenes, detsamma som bergskedjebildning. (NE)

Osmos, transport av lösningsmedel mellan två faser med olika koncentration av upplösta ämnen och där faserna är åtskilda av ett membran eller på ett annat sätt som endast släpper genom lösningsmedlets molekyler. (NE)

OVERSITE, extern expertgrupp organiserad av SSI som stöd i granskningen av SKB:s platsundersökningsprogram. (SSM)

P-våg**hastighet**, Primär våg, eller P-våg, hastighet mäter hur snabbt ljudvågor färdas genom jorden. (www.give2all.org)

Paleohydrogeologi, benämning som används för att beskriva den information om förflutna hydrogeokemiska och hydrogeologiska system som erhålls. (SKB)

Parametrisering, Val av värde för en parameter i en matematisk formel som beskriver ett samband mellan in- och utdata, ofta baserat på mätdata. (SSM)

Passivera, göra överksam; minska reaktionsförmågan hos (metallyta) och skydda (den) mot angrepp av syror, oxidation e.d. (NE)

Peneplan, nästan plant område där berggrunden nötts ned genom erosion under lång tid. (NE)

Percentil, en metod där materialet är indelat och sorterat i hundra lika stora delar, alltså en uppdelning av värden i proportioner om 1 %. När en uppdelning görs i percentiler är observationerna sorterade från lägsta till högsta värde eller tvärtom. Percentil 50 motsvarar medianen i en fördelning och har 50 % av observationerna på respektive sida om sig. (Svenskt Ekonomilexikon)

Periglacial, term för att beskriva landformerna och processerna som förekommer utanför och omkring regionerna med glaciäris. (Wiki)

Permeabel, genomtränglig (Wiktionary)

Plasticitet, innebär att ett material under inverkan av främst mekanisk belastning undergår en formändring som kvarstår efter det att belastningen upphört. (NE)

Porositet, hålrumsvolym per volymenhet för hela materialet. (NE)

Porvatten, det vatten som finns inneslutet i porerna, dvs. hålrummen i jord eller lera. (NE)

Postulerande, förutsättande (Wiktionary)

Propagering, delsteg t.ex. i en kemisk kedjereaktion. (NE)

PWR, tryckvattenreaktor av lättvattentyp (SKB)



Qeg, parameter känslig för beräknat radionuklidflöde från närområde till geosfär. Qeg kan beskrivas som ekvivalent flödes hastighet i gränssytan mellan två material. (SKI)

Radiologi, medicinskt område som uppstod ur användningen av olika slag av strålning, ursprungligen röntgenstrålning. (NE)

Reaktant, komponent som genom en kemisk reaktion övergår i ett annat ämne. (NE)

Redoxreaktion, kemisk reaktion i vilken ett ämne reduceras medan ett annat oxideras. (NE)

Redundans, närvaro av extra komponenter, så som inom elektrotekniken, utöver dem som krävs för en apparats normala funktion ("både hängslen och livrem"). (NE)

Refraktion, brytning, ändring av riktning för en ljusstråle eller annan vågrörelse som passerar gränssytan mellan två medier. (NE)

Regolit, det lösa jordtacket ovanpå den ovittrade berggrunden. (NE)

Resistivitet, tidigare specifikt elektriskt motstånd, beteckning ρ , egenskap definierad som förhållandet mellan elektrisk fältstyrka E och strömstätheten i ett material J så att $\rho = E / J$. (NE). Begreppet har utvidgats även till vetenskapsområdena av andra transportprocesser än elströmtransport. (SSM)

Resteffekt, den effekt som utvecklas i en kärnreaktor efter det att reaktorn har stängts av. Den härrör från sönderfallet av de radioaktiva ämnen som har bildats i reaktorn genom fission och andra reaktioner. Omedelbart efter avstängningen kan resteffekten uppgå till ca 7 % av reaktorns värmeeffekt, men genom att radioaktiviteten avklingar sjunker den sedan. På grund av resteffekten måste reaktorn kylas för att undvika överhettning av bränslet även efter det att den stängts av. (NE)

Resuspension, när finkorniga sediment/partiklar som sedimenterat från suspension återigen slammats upp i en vätska/vatten. (SSM)

Retention, kvarhållande (Wiktionary)

Salinitet, salthalt, dvs. mängden lösta salter i vattnet. (NE)

SDM-Site, platsbeskrivning av Forsmark, SDM är förkortning för "Site Description Model" på engelska. (SSM)

Segjärn, gjutjärn med grafiten i form av små kulor i en ferritisk eller perlitisk grundmassa. (NE)

Sfäroidisering, typ av värmebehandling som används för att förändra ett materials struktur. (Wiki)

Skjuvning, en relativ förskjutning mellan två parallella, närliggande ytor. Den utmärks av att volymen inte ändras. (NE).

Skyddsgas, kemiskt oreaktiv gas som används i laboratorier vid arbete med fukt- och syrekänsliga ämnen och industriellt vid t.ex. svetsning, metallframställning och livsmedelshantering för att skydda mot oxidation. (NE)



Sorption, fysikalisk bindning av atomer eller molekyler till en yta. (NE)

Speciering (kemisk), hänvisar till den verkliga form i vilken en molekyl eller jon förekommer i lösning. (Aquatic Chemistry; W Stumm, J Morgan 1981)

Spjälkning, a process som lossnar fragment från kanten eller ytan av sten eller malm och fragmenten har åtminstone en tunn kant (Wiktionary)

Stokastisk, term i sannolikheteori med den ungefärliga betydelsen slumpmässig. (NE)

Stökiometri, läran om de mängdförhållanden vari ämnen kemiskt reagerar med varandra. (NE)

Talik, partier med ofrusen mark inom ett område med permafrost som orsakas av en lokal anomali i termiska, hydrologiska, hydrogeologiska eller hydrokemiska förhållanden. (SKB)

Tangentiell, vara eller rör sig i riktningen av en tangent (Wiktionary)

Tektonik, den gren av geologin som behandlar jordskorpan regionala, storskaliga strukturer och de processer som skapat dem. (NE)

Tiopotens, allmän metod för att beskriva reella tal. (Wiki)

Transient, Den initiala perioden i en processutveckling som kännetecknas med stora förändringar och snabb utveckling på väg mot ett stationärt tillstånd (SSM)

Transmissivitet, förmåga hos ett jord- eller berglager att leda grundvatten. (NE)

Transversalvåg, våg när partiklar svänger i en riktning som är vinkelrät mot utbredningsriktningen. (Wiki)

Triaxialförsök, test för att bestämma den odränerade skjuvhållfastheten för en jord. (Wiki)

Tritierat vatten (T2O eller 3H2O), en kemisk förening vars struktur är analog med vattenmolekylen men där en väteatom är ersatt med den tyngsta väteisotopen tritium. (Wiki)

Tvåvärt järn, järnatomer med oxidationstalet II, Fe²⁺. Tvåvärt järn är lösligt i vatten. Vid kontakt med syrgas kan det tvåvärda järnet oxideras till trevärt järn (Fe³⁺). (Wiki)

Variogram, term inom statistiken som beskriver beroendestrukturen, främst inom spatiala serier och processer men också inom tidsserier. (NE)

Vällning, sammanfogning av metalliska material där de två materialstyckena bringas i mer eller mindre "degigt" tillstånd och hamras, trycks eller smids ihop. (NE)


Weichselis, namnet på den senaste istiden i nordöstra Europa (SKB)

Ytdosrat, stråldos per tidsenhet på kapselns yta. (SSM)

Återmätnad, när lermaterialet i buffert och återfyllnad i ett KBS-3 slutförvar installeras i förvaret, porvolymen i materialet är bara delvis fylld med vatten. Efter installation börjar



lermaterialet suger in vatten från sprickan eller berget tills hela porvolymen blir fylld med vatten då lermaterialet blir vattenmättat. Denna process kallas för återmättnad. (SSM)



Swedish Radiation Safety Authority
Solna strandväg 96
SE-171 16 Stockholm
Sweden

+46 8 799 40 00
registrator@ssm.se
www.ssm.se

Send an e-mail to registrator@ssm.se
if you would like to have the report in a
different format, such as Braille or DAISY.