

Ansökan enligt kärntekniklagen

Toppdokument

Begrepp och definitioner

Bilaga SR
Säkerhetsredovisning för slutförvaring av använt kärnbränsle

Bilaga SR-Drift
Säkerhetsredovisning för drift av slutförvarsanläggningen

Bilaga SR-Site
Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret

Sammanfattning
Svenska
Vol.1
Vol.2
Vol.3

Bilaga AV
Preliminär plan för avveckling

Bilaga VP
Verksamhet, organisation, ledning och styrning
Platsundersökningsskedet

Bilaga VU
Verksamhet, ledning och styrning
Uppförande av slutförvarsanläggningen

Bilaga PV
Platsval – lokalisering av slutförvaret för använt kärnbränsle

Bilaga MV
Metodval – utvärdering av strategier och system för att ta hand om använt kärnbränsle

Bilaga MKB
Miljökonsekvensbeskrivning

Bilaga AH
Verksamheten och de allmänna hänsynsreglerna

Kapitel 1
Introduktion
Kapitel 2
Förläggingsplats
Kapitel 3
Krav och konstruktionsförutsättningar
Kapitel 4
Kvalitetssäkring och anläggningens drift
Kapitel 5
Anläggnings- och funktionsbeskrivning
Kapitel 6
Radioaktiva ämnen i anläggningen
Kapitel 7
Strålskydd och strålskärning
Kapitel 8
Säkerhetsanalys

Repository production report
Design premises KBS-3V repository report
Spent fuel report
Canister production report
Buffer production report
Backfill production report
Closure production report
Underground opening construction report
Ramprogram för detaljundersökningar vid uppförande och drift
FEP report
Fuel and canister process report
Buffer, backfill and closure process report
Geosphere process report
Climate and climate related issues
Model summary report
Data report
Handling of future human actions
Radionuclide transport report
Biosphere analysis report
Site description of Forsmark (SDM-Site)

Comparative analysis of safety related site characteristics

Samrådsredogörelse

Metodik för miljökonsekvensbedömning

Vattenverksamhet Laxemar-Simpevarp

Vattenverksamhet i Forsmark I Bortledande av grundvatten

Vattenverksamhet i Forsmark II Verksamheter ovan mark

Avstämning mot miljömål

Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle

Huvudrapport från projekt SR-Site

Svensk Kärnbränslehantering AB

Mars 2011

Sammanfattning

Den huvudsakliga slutsatsen i säkerhetsanalysen SR-Site är att ett KBS-3-förvar som uppfyller kraven på långsiktig säkerhet kan byggas i Forsmark. Slutsatsen kan dras eftersom de gynnsamma egenskaperna hos förvarsplatsen i Forsmark säkerställer att KBS-3-förvarets barriärer är långsiktigt hållbara. Framför allt är kopparkapslarna och dess segjärnsinsatser tillräckligt motståndskraftiga mot de mekaniska och kemiska påfrestningar de kan komma att utsättas för i förvarsmiljön.

Slutsatsen baseras på:

- KBS-3-förvarets säkerhetsfilosofi som bygger på i) en geologisk miljö där de egenskaper som är viktiga för den långsiktiga säkerheten – dvs mekanisk stabilitet, låga flödes hastigheter hos grundvattnet på förvarsdjup och avsaknad av höga halter av skadliga ämnen i grundvattnet – är stabila i ett långt tidsperspektiv och ii) valet av naturligt förekommande och i förvarsmiljön tillräckligt beständiga material (koppar och bentonitlera) för de tekniska barriärerna, vilket säkerställer den livslängd hos barriärerna som krävs för långsiktig säkerhet.
- Kunskapen om fenomen som påverkar den långsiktiga säkerheten, som har inhämtats genom decenniernas forskningsinsatser inom SKB och genom internationella samarbeten, vilket har lett till en välutvecklad kunskapsbas för säkerhetsanalysen.
- Kunskapen om platsens egenskaper som har uppnåtts genom åtskilliga års ytbaserade undersökningar av förhållanden på djupet och genom vetenskapliga tolkningar av data från undersökningarna, vilket lett till en välutvecklad platsmodell anpassad till säkerhetsanalysens behov.
- Ett kvalitetssäkrat initialtillstånd som utgångspunkt för säkerhetsanalysen, erhållet genom detaljerade specifikationer för de tekniska delarna av förvaret och genom demonstration av hur komponenter som uppfyller specifikationerna kan tillverkas och kvalitetssäkras.

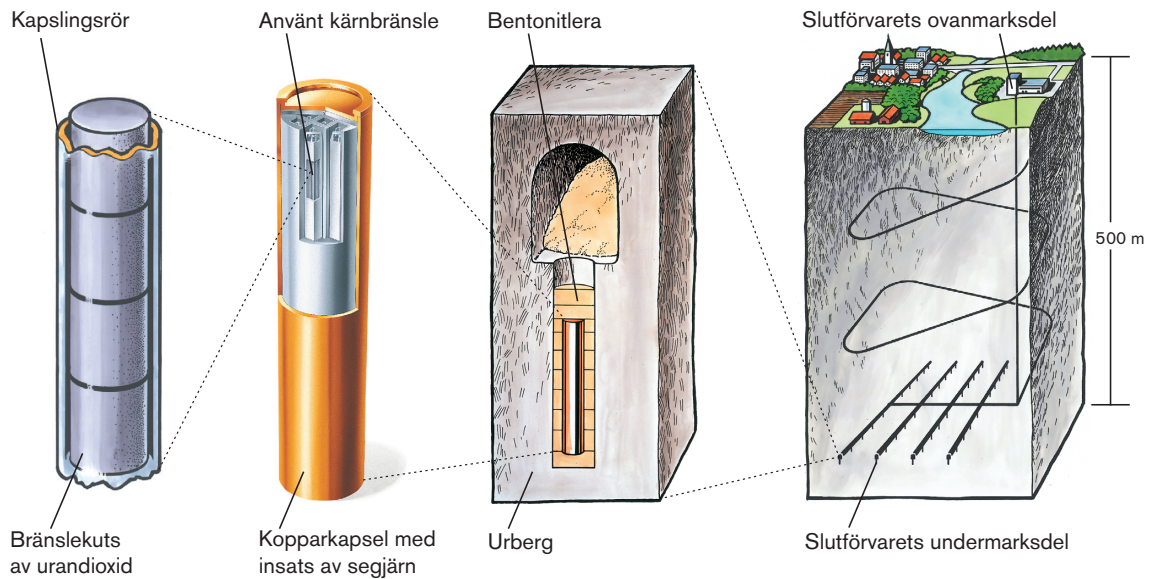
De detaljerade analyserna visar att kapselskador är sällsynta i ett tidsperspektiv på en miljon år. Även med flera pessimistiska antaganden om skadliga fenomen som påverkar bufferten och kapseln, är kapselskador så sällsynta att deras försiktigt modellerade radiologiska konsekvenser blir betydligt under en procent av den naturliga bakgrundsstrålningen.

S1 Syfte och allmänna förutsättningar

Syftet med säkerhetsanalysen SR-Site är att undersöka om ett säkert förvar för använt kärnbränsle av KBS-3-typ kan uppföras i Forsmark i Östhammars kommun i Sverige. Platsen i Forsmark har valts baserat på resultat av flera års undersökningar från ytan av förhållanden på djupet i Forsmark och i Laxemar i Oskarshamns kommun. Valet av plats motiveras inte i SR-Site-rapporten utan i andra bilagor till SKB:s tillståndsansökningar.

SR-Site-rapporten är en viktig del av SKB:s tillståndsansökningar för att uppföra och driva ett slutförvar för använt kärnbränsle i Forsmark i Östhammars kommun. Rapportens syfte i ansökningarna är att visa att ett förvar i Forsmark är säkert efter förslutning.

Flera decenniernas forskning och utveckling har lett till att SKB föreslår KBS-3-metoden som det slutliga steget i hanteringen av det använda kärnbränslet. I metoden används kopparkapslar med en segjärnsinsats för att innesluta det använda kärnbränslet. Kapslarna omges av bentonitlera och deponeras på ett djup av ungefär 500 m i grundvattenmättat granitiskt berg, se figur S-1. Syftet med KBS-3-förvaret är att isolera kärnavfallet från människa och miljö under mycket långa tidsrymder. Det nuvarande svenska kärnkraftsprogrammet (där man planerar att 2045 avveckla den sista av de tio reaktorer som för närvarande är i drift) bedöms ge upphov till omkring 12 000 ton använt kärnbränsle, vilket motsvarar ungefär 6 000 kapslar i ett KBS-3-förvar.



Figur S-1. KBS-3-metoden för förvaring av använt kärnbränsle.

Huvudsyftena med säkerhetsanalysprojektet SR-Site är:

- Att utvärdera säkerheten, som den definieras i gällande svensk lagstiftning, för det föreslagna förvaret i Forsmark.
- Att ge återkoppling till arbetet med att utforma förvaret, till SKB:s Fud-program, till kommande detaljerade undersökningar av platsen och till framtida säkerhetsanalyser.

Ett viktigt steg på vägen mot denna rapport var säkerhetsrapporten SR-Can, som publicerades i november 2006. SR-Can-rapporten granskades av svenska säkerhetsmyndigheter med stöd av internationella experter. Resultatet av granskningen har beaktats i SR-Site-analysen.

Föreskrifter

Samhällets krav på säkerhet efter förslutning för slutförvar för använt kärnbränsle och kärnavfall uttrycks i myndighetsföreskrifter. Två detaljerade föreskrifter har utfärdats av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) med stöd av kärntekniklagen respektive strålskyddslagen:

- ”Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om säkerhet vid slutförvaring av kärnavfall” (SSMFS 2008:21)
- ”Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om skydd av människors hälsa och miljön vid slutligt omhändertagande av använt kärnbränsle och kärnavfall” (SSMFS 2008:37)

Dessa två dokument återges i sin helhet i bilaga A till huvudrapporten SR-Site. Det sätt som kraven hanteras på i SR-Site-rapporten anges i bilagan genom att hänvisningar till relevanta avsnitt i rapporten har lagts in i bilagans föreskriftstexter.

Det övergripande acceptanskriteriet, som anges i SSMFS 2008:37, rör skyddet av människors hälsa och fastställer 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”. ”Skadeverkningar” avser cancer och ärftliga effekter. Riskgränsen motsvarar en gräns för effektivdos på omkring $1,4 \cdot 10^{-5}$ Sv/år. Detta motsvarar i sin tur omkring en procent av effektivdosen från naturlig bakgrundsstrålning i Sverige. I föreskriften SSMFS 2008:21 krävs det även att utvecklingen av biosfären, geosfären och förvaret beskrivs för utvalda scenarier. Dessutom måste förvarets miljöpåverkan för valda scenarier, inklusive huvudscenariot, utvärderas med avseende på defekter hos de tekniska barriärerna och andra identifierade osäkerheter.

Tidsperioden som utvärderas i analysen – en miljon år

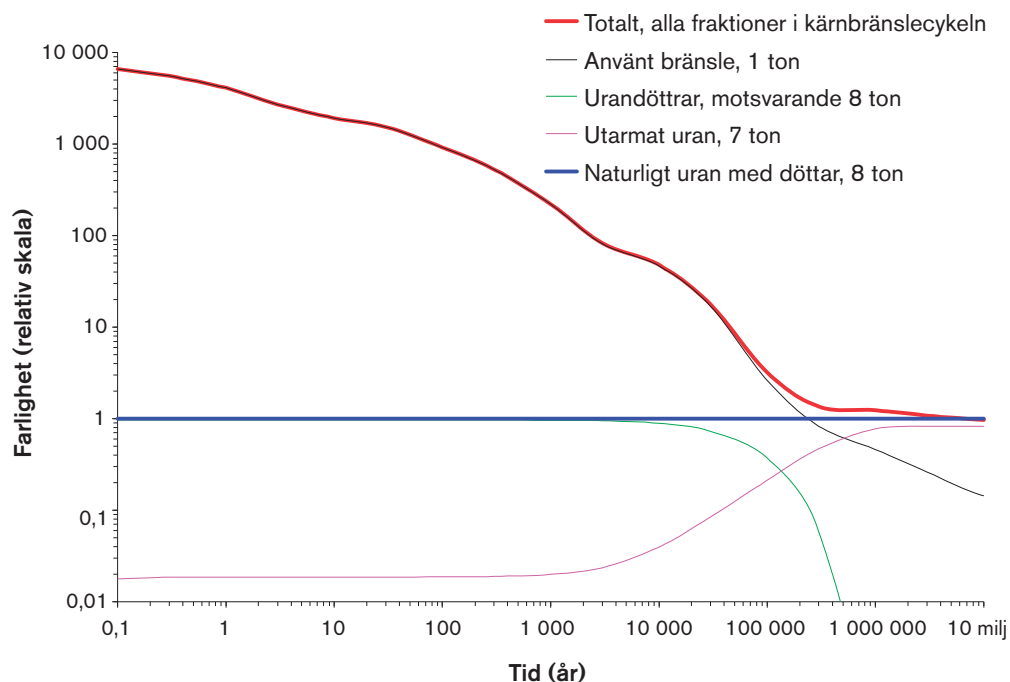
I de allmänna råden till SSMFS 2008:37 anges det att den tidsperiod som ska täckas i en säkerhetsanalys av ett slutförvar för använt kärnbränsle ska sträcka sig en miljon år framåt i tiden efter förslutning. En detaljerad riskanalys krävs för den första perioden på tusen år efter förslutning. För tidsperioden fram till ungefär 100 000 år krävs att redogörelsen baseras på en kvantitativ riskanalys.

För perioden bortom 100 000 år efter förslutning anges det i de allmänna råden att en strikt kvantitativ jämförelse av beräknad risk i förhållande till föreskrifternas kriterium för individrisk inte är meningsfull. Det ska i stället visas att utsläpp från både tekniska och geologiska barriärer begränsas och fördröjs så långt som det rimligen är möjligt genom att använda den beräknade risken som en av flera indikatorer.

Avfallets farlighet

Efter ungefär 100 000 år är radiotoxiciteten hos det använda kärnbränslet jämförbar med radiotoxiciteten för den naturliga uranmalm som en gång använts för att framställa bränslet. Även summan av toxiciteten från alla fraktioner som uppstått i kärnbränslecykeln (de dotternuklider som separerats från uranet före anrikningen, det utarmade uranet som uppstår vid anrikningsprocessen och det använda bränslet) är jämförbar med toxiciteten hos den använda uranmalmen efter 100 000 år, se figur S-2.

Noterbart är även att de inledningsvis mycket höga doserna från en tänkt exponering för direkt, extern bestrålning från det använda bränslet minskar väsentligt efter några tusen år. På lång sikt kommer dessa doshastigheter emellertid att vara kvar på nivåer som kräver avskärmning från människor under mycket lång tid, eftersom den långsiktiga nivån av direktstrålning bestäms av dotternuklider till U-238.



Figur S-2. Radiotoxicitet vid intag via födan av uran och urandöttrar i malm (blå kurva) och av summan av alla fraktioner som uppkommer när samma mängd uran används i kärnbränslecykeln (röd kurva). Tiden avser tiden efter reaktordrift. De olika fraktionerna utgör det använda kärnbränslet (38 MWd termisk energi/kg U av typ SVEA 64 BWR), det utarmade uranet och urandöttrarna som separeras vid isotopanrikning.

Den stegvisa utvecklingen av förvarsprogrammet

Utformningen och säkerhetsvärderingen av ett förvarskoncept för geologisk avfallsdeponering, som exempelvis KBS-3-systemet, utvecklas stegvis. En säkerhetsvärdering i ett skede ger återkoppling till utvecklingen av förvarsutformningen. Den utvecklade utformningen utvärderas sedan i en efterföljande säkerhetsanalys, som ger en förfinad återkoppling till den fortsatta utvecklingen av utformningen etc. På samma sätt utvecklas kunskapen om naturliga processer av betydelse för den långsiktiga säkerheten i ett forskningsprogram. De resultat som kommer fram utvärderas i ett iterativt samspel med säkerhetsanalysprojekt. En annan viktig aspekt av utvecklingsarbetets iterativa karaktär är de externa granskningar av säkerhetsanalyserna, vilka genomförs av myndigheter och internationella experter.

SKB har bedrivit forskning och utveckling om KBS-3-systemet under tre årtionden. Både förvarsutformningen och det vetenskapliga kunnandet är väl utvecklade, vilket illustreras av att inga större förändringar av utformningen har skett under senare år och av att den identifierade uppsättningen av processer som har betydelse för långsiktig säkerhet inte förändras. Även kunnandet om dessa processer är väl utvecklat.

SKB har tagit fram en tekniskt genomförbar referensutformning med layout för KBS-3-förvaret och har visat att denna överensstämmer med de framtagna konstruktionsförutsättningarna, se nedan. Den tekniska utvecklingen kommer att fortsätta. Detaljerade utformningar som är anpassade för en industriell process som uppfyller krav på kvalitet, kostnad och effektivitet återstår att ta fram. Layouten måste anpassas efter de lokala förhållanden som påträffas när förvaret byggs på djupet. Dessa potentiellt mer optimala lösningar ska resultera i en säkerhet på minst samma nivå som för den aktuella referensutformning som analyseras i SR-Site. Eftersom SR-Site utgör en viktig grund för en väsentlig milstolpe i förvarsprogrammet är det viktigt att visa i) att utformningen är väl utvecklad med avseende på dess viktigaste säkerhetsrelaterade funktioner och ii) att det finns minst en tillgänglig och fullgod lösning för de delar av systemet som bidrar till säkerheten på ett mer perifert sätt.

Den aktuella utformningen kännetecknas även av att de välutvecklade delarna specificeras i detalj. Återkopplingen till utvecklingen av utformningen från den säkerhetsanalys som föregick SR-Site (SR-Can) ges i form av detaljerade konstruktionsförutsättningar. Dessa ger förutsättningarna för framtagandet av specifikationer för referensutformningen och har bidragit till utvärderingen av utformningens lämplighet med avseende på långsiktig säkerhet.

S2 Att uppnå säkerhet i praktiken – platsens egenskaper samt utformningen och uppförandet av förvaret

S2.1 Säkerhetsprinciper

Sedan arbetet med ett svenskt slutförvar inleddes i slutet av 1970-talet har SKB fastlagt ett antal principer för slutförvarets utformning. Principerna kan sägas utgöra säkerhetsfilosofin bakom KBS-3-metoden och sammanfattas nedan.

- Genom att förlägga förvaret djupt nere i en långsiktigt stabil geologisk miljö isoleras avfallet från människor och miljön nära markytan. Detta innebär att förvaret inte påverkas på något avgörande sätt vare sig av samhällsförändringar eller av direkta effekter av långsiktiga klimatförändringar på markytan.
- Genom att förlägga förvaret till en plats där berget inte förväntas bli av ekonomiskt intresse för framtida generationer minskar risken för mänskligt intrång.
- Det använda kärnbränslet omgärdas av flera tekniska och naturliga barriärer.
- Barriärernas primära säkerhetsfunktion är att innesluta bränslet i en kapsel.
- Om inneslutningen skulle brytas är barriärernas sekundära säkerhetsfunktion att fördröja ett eventuellt utsläpp från förvaret.
- De tekniska barriärerna ska tillverkas av naturligt förekommande material som är stabila på lång sikt i förvarsmiljön.
- Förvaret ska utformas och konstrueras så att temperaturer som kan ha skadlig effekt på barriärernas långsiktiga egenskaper undviks.

- Förvaret ska utformas och byggas så att strålningsinducerade processer som kan ha skadlig effekt på de tekniska barriärernas eller bergets långsiktiga egenskaper undviks.
- Barriärerna ska vara passiva, dvs de ska fungera utan mänskliga ingrepp och utan aktiv tillförsel av material eller energi.

Tillsammans med flera andra faktorer, som de geologiska förhållandena i Sverige och kraven på att förvaret måste vara tekniskt möjligt att bygga, har dessa principer lett till utvecklingen av KBS-3-systemet för slutförvaring av använt kärnbränsle.

I praktiken uppnås långsiktig säkerhet genom att välja en plats med gynnsamma egenskaper och genom att utforma och bygga ett förvar som uppfyller krav relaterade till långsiktig säkerhet. Dagens förhållanden på platsen samt utformningen och layouten av KBS-3-förvaret i Forsmark utgör säkerhetsanalysens initialtillstånd. Detta är också de aspekter som styrs av verksamhetsutövaren, genom valet av plats och genom utformningen och anpassningen av förvaret till platsen.

S2.2 Förvarsplatsen i Forsmark

Den valda förvarsplatsen i Forsmark ligger i norra Uppland i Östhammars kommun, omkring 170 km norr om Stockholm. Forsmarksområdet består av kristallin berggrund som tillhör den fennoskandiska skölden och bildades för 1,85 till 1,89 miljarder år sedan. Tektoniska linser, i vilka berggrunden är förhållandevis opåverkad av plastisk deformation, omgärdas av starkt deformerade plastiska bälten. Kandidatområdet ligger i den nordvästligaste delen av en av dessa tektoniska linser. Linsen sträcker sig från nordväst om Forsmarks kärnkraftverk i sydostlig riktning mot området kring Öregrund (se figur S-3).

Tre huvudkategorier av deformationszoner med distinkta riktningar har identifierats. Utöver vertikala och brant stående zoner finns det zoner som sluttar svagt mot sydost och syd. Dessa svagt sluttande zoner är vanligare i den sydöstra delen av kandidatvolymen och har högre hydraulisk transmissivitet än de vertikala och brant stående deformationszoner som finns på platsen. I den nordvästra delen av kandidatvolymen, vilket är den volym som är tilltänkt för förvaret, är förekomsten av öppna och delvis öppna sprickor mycket låg på större djup än ungefär 300 m jämfört med vad som observeras i den övre delen av berggrunden. Utöver detta är bergsspänningarna relativt höga jämfört med genomsnittliga värden för den svenska berggrunden. De översta 100 till 150 metrarna av berggrunden ovanför den tilltänkta volymen innehåller många horisontella högtransmissiva sprickor och har god hydraulisk kontakt över långa sträckor, medan det djupt liggande berget har mycket låg genomsläpplighet med få transmissiva sprickor. På förvarsdjup (cirka 470 m) är medelavståndet mellan de transmissiva sprickorna större än 100 m.

Grundvatten i de översta 100 till 200 metrarna av berggrunden uppvisar stor kemisk variation, med kloridkoncentrationer i intervallet 200 till 5 000 mg/l. Detta tyder på inverkan från både bräckt havsvatten och nederbörd. På djup mellan 200 och 800 m håller sig salthalten tämligen konstant (5 000–6 000 mg/l). Vattensammansättningen tyder på rester av vatten från Littorinahavet, som täckte Forsmark från 9 500 år tillbaka i tiden till 5 000 år tillbaka i tiden. På djup mellan 800 och 1 000 m ökar salthalten till högre värden.

Data från platsundersökningen för säkerhetsanalysen

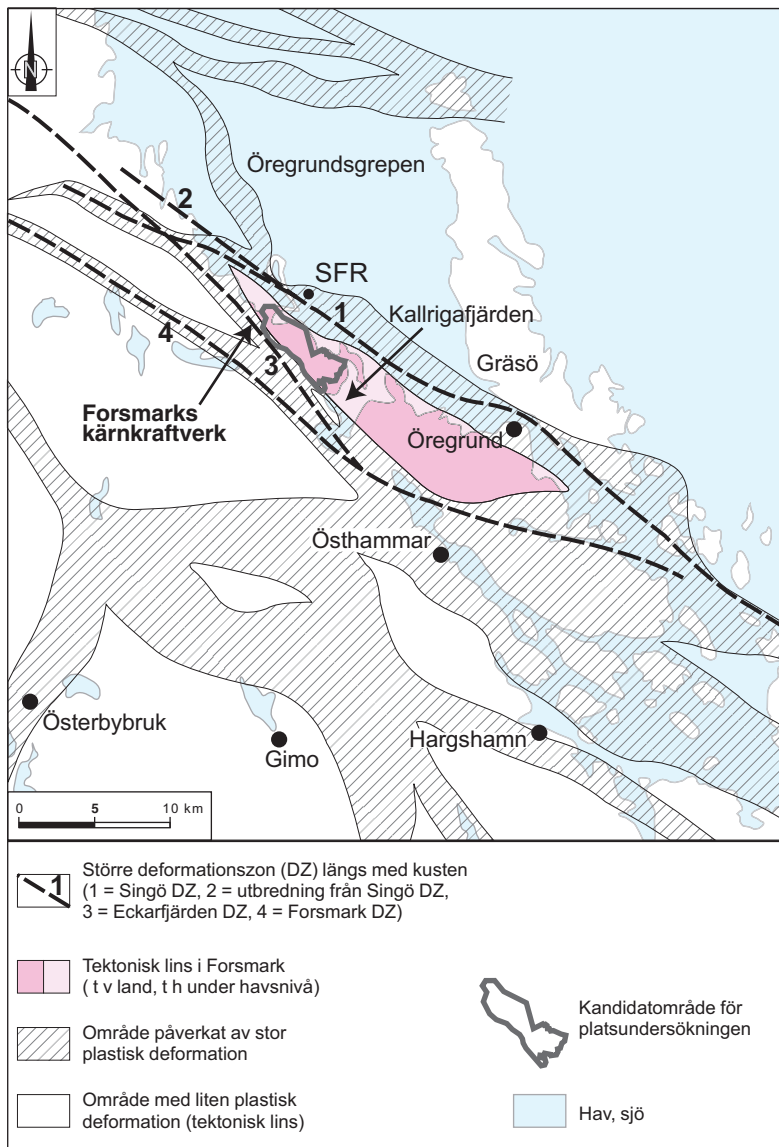
Platsundersökningen i Forsmark, inklusive bearbetning av insamlade data och platsmodellering, genomfördes mellan 2002 och 2008. Informationsinsamlingen och överföringen av information från platsundersökningarna i Forsmark till säkerhetsanalysarbetet har skett i flera steg.

- Fältdata från olika undersökningsaktiviteter, exempelvis flyg- och markgeofysiska studier från ytan, samt olika tester i de hål som borrats, har insamlats och efter kvalitetskontroll lagrats i SKB:s databaser.
- Fältdata har tolkats och utvärderats i en tvärvetenskaplig platsbeskrivande modell (SDM, site descriptive model) som är en syntes av geologi, bergmekanik, termiska egenskaper, hydrogeologi, hydrogeokemi, transportegenskaper hos berggrunden och ytsystemets egenskaper, se figur S-4. **Platsbeskrivning Forsmark** (SDM) ger en beskrivning av kunskapen om platsens egenskaper inom de olika ämnesområdena. Den omfattar även en utvärdering av osäkerheten i dessa

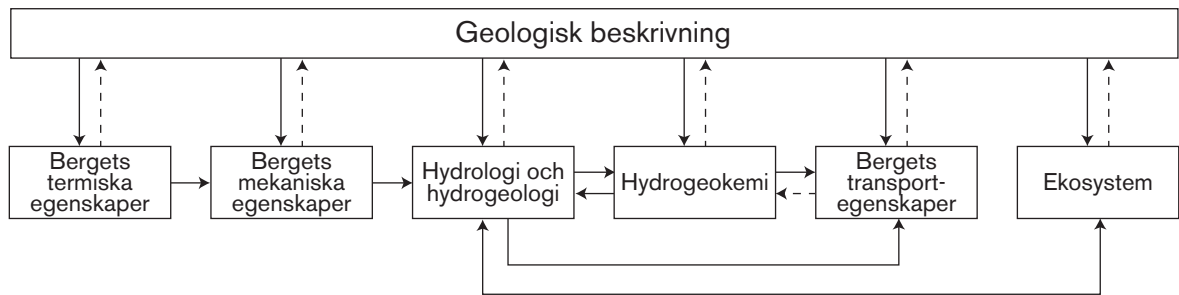
beskrivningar. **Platsbeskrivning Forsmark**, vilken baseras på de genomförda undersökningarna från ytan, redovisas i en huvudrapport och i flera stödjande underlagsrapporter.

- Platsbeskrivningen med tillhörande referenser kan inte alltid användas direkt i säkerhetsanalysen. Det finns behov av att också beakta information som inte är platsspecifik, att hantera osäkerheter som identifierats i platsbeskrivningen och att slutgiltigt välja indata till modellerna i säkerhetsanalysen. Av detta skäl utvärderas alla platsdata som används i SR-Site i **Datarapporten** för SR-Site, där SDM används som indata. **Datarapportens** funktion förklaras i avsnitt S3.7 nedan.

Som en del av den platsbeskrivande modelleringen utvärderades osäkerheten och tilltron till platsbeskrivningen för Forsmark. Denna utvärdering omfattade tilltron till data från platskaraktäriseringen, viktiga kvarvarande osäkerheter i platsbeskrivningen, alternativa modeller och hanteringen av dessa, överensstämmelse mellan ämnesområden samt huvudorsakerna till tilltro till eller avsaknad av tilltro till den platsbeskrivande modellen. Det övergripande resultatet av denna utvärdering var att man, med hjälp av kvantitativa osäkerhetsuppskattningar och alternativa modeller, fann att de egenskaper hos platsen som är betydelsefulla för både möjligheten att bygga förvaret och för den långsiktiga säkerheten är tillräckligt väl avgränsade.



Figur S-3. Den tektoniska linsen i Forsmark och områden som påverkas av kraftig plastisk deformation i Forsmarks omgivning.



Figur S-4. De olika ämnesbeskrivningarna i SDM hänger samman genom flera återkopplingslingor, där det geometriska ramverket väsentligen bestäms av geologiska faktorer.

Sammanfattningsvis är de viktigaste säkerhetsrelaterade egenskaperna hos förvarsplatsen i Forsmark:

- En låg frekvens av vattenförande sprickor på förvarsdjup.
- Gynnsamma geokemiska förhållanden, i synnerhet reducerande förhållanden på förvarsdjup (vilket gäller allmänt i den djupa berggrunden i Sverige) och salthalter som säkerställer att bufferten av bentonitlera förblir stabil.
- Ingen potential för fyndigheter av metaller och industriella mineraler inom kandidatområdet i Forsmark.

Dessutom möjliggör den relativt höga värmeledningsförmågan vid platsen att bergvolymen kan utnyttjas effektivt. De bergmekaniska förhållandena och andra egenskaper, som är betydelsefulla för att förvaret ska kunna uppföras på ett säkert och effektivt sätt, är också gynnsamma.

S2.3 Den platsanpassade referensutformningen av förvaret

En uttömmande beskrivning av förvarssystemets initialtillstånd är en av huvudförutsättningarna för säkerhetsanalysen. För de tekniska barriärerna definieras initialtillståndet i SR-Site som tillståndet vid tidpunkten för deponering/installation. Initialtillståndet för geosfären och biosfären definieras som det naturliga orörda tillståndet vid tidpunkten då berguttaget för förvaret påbörjas. (Påverkan på geosfären och biosfären till följd av berguttaget för förvaret analyseras som en del av säkerhetsanalysen.)

Konstruktionsförutsättningar, referensutformning och produktionsrapporter

Utformningen av KBS-3-förvaret har utvecklats sedan det introducerades. Den nuvarande utformningen är baserad på den som första gången presenterades i KBS-3-rapporten 1983. Återkoppling från utvärderingar av långsiktig säkerhet är central information för vidareutvecklingen av förvarets utformning. Återkoppling från SR-Can-analysen utvecklades vidare till *konstruktionsförutsättningar* för SR-Site-analysen och tillståndsansökningarna. Konstruktionsförutsättningar avser t ex specifikationer av vilka mekaniska påfrestningar barriärerna måste kunna motstå, begränsningar rörande barriärmaterialens sammansättning och acceptanskriterier för de olika momenten vid bergarbetena under markytan. Ungefär 30 olika konstruktionsförutsättningar för kapseln, bufferten, deponeringshålen, deponeringstunnlarna och återfyllningen samt för stamtunnlarna, transporttunnlarna, tillfartstunnlarna, schakten, centralområdet och förslutningen har utvecklats utgående från SR-Can-analysen och en del efterföljande analyser. De resulterande konstruktionsförutsättningarna utgör begränsningar för utformningen som, om alla är uppfyllda, ger en bra grund för att påvisa att förvaret är säkert.

En referensutformning som överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna har utvecklats och redovisas i flera så kallade **Produktionsrapporter**. Dessa rapporter, som täcker in det använda bränslet, kapseln, bufferten, återfyllningen i tunnlar, förslutningen av förvaret och bergutrymmena, innehåller den information som krävs för att utvärdera de tekniska delarna av förvarssystemet i SR-Site.

I varje rapport redovisas i) de konstruktionsförutsättningar som ska vara uppfyllda, ii) den referensutformning som valts för att uppfylla kraven, iii) analyser som bekräftar att referensutformningen verkligen uppfyller konstruktionsförutsättningarna, iv) de produktions- och kontrollrutiner som valts

för att åstadkomma referensutformningen, v) analyser som bekräftar att dessa rutiner verkligen leder fram till referensutformningen och vi) det resulterande initialtillståndet. Den sista punkten är en central utgångspunkt för säkerhetsanalysen.

Initialtillståndet, som beskrivs i **Produktionsrapporterna**, ger kvantitativ information om viktiga indata till säkerhetsanalysen. Dessa data utvärderas kritiskt i **Datarapporten**. I denna kvalificeras formellt indata till säkerhetsanalysen, utifrån en bedömning av osäkerheter i initialtillståndets data.

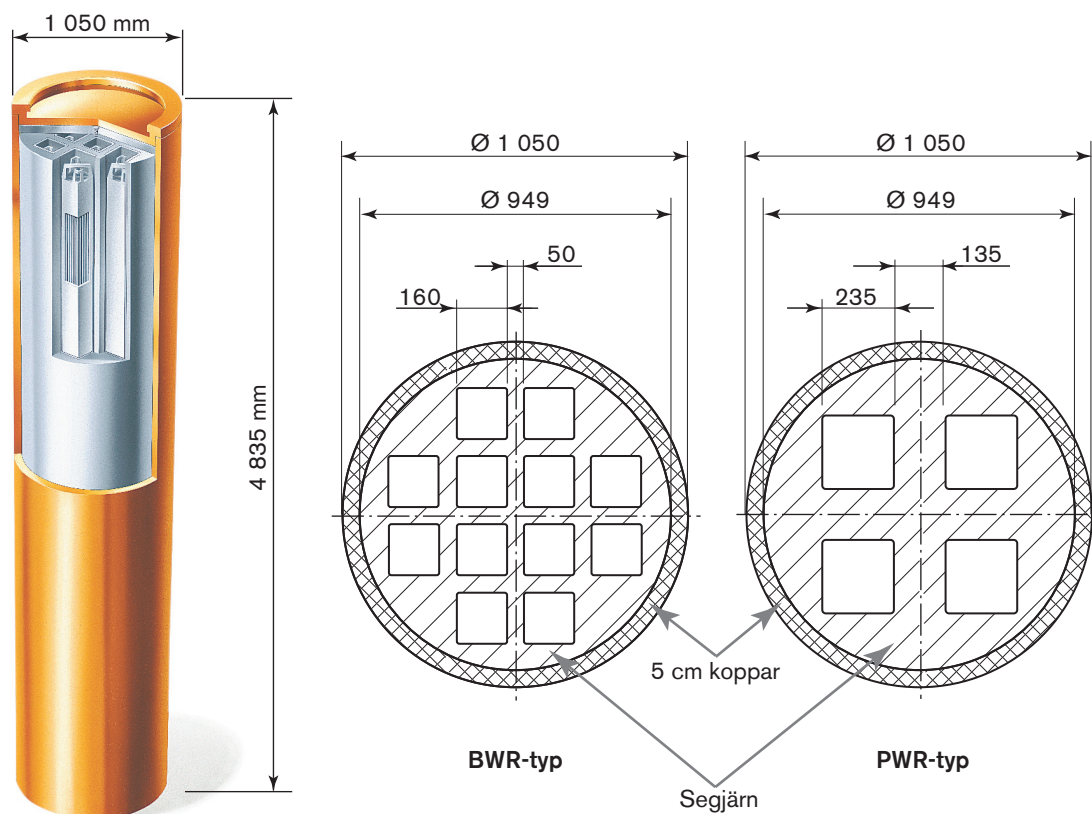
Nedan följer en kort sammanfattning av förvarsutformningens viktigaste funktioner.

Bränsle

Större delen av det kärnbränsle som ska deponeras består av använt kärnbränsle från driften av de tolv svenska kärnkraftverken. Reaktorerna är antingen av kokvattenreakortyp (BWR, boiling water reactor) eller av tryckvattenreakortyp (PWR, pressure water reactor). Bränsletyperna och bränslemängderna har beräknats utifrån det använda kärnbränsle som förvarades i Clab (31 december 2007) och ett referensscenario för den framtida driften av de tio återstående kärnkraftverken. I referensscenariot antas drifttiden vara 50 år för de fyra reaktorerna i Ringhals och de tre i Forsmark, medan drifttiden antas vara 60 år för de tre reaktorerna i Oskarshamn. De två reaktorerna i Barsebäck togs ur drift efter ungefär 24 respektive 28 år. Huvuddelen av det bränsle som används i reaktorerna består av uranoxid (UOX). Från Oskarshamn kommer det att finnas mindre mängder bränsle med blandoxid (MOX). KBS-3-förvaret ska också rymma mindre mängder av andra typer av oxidbränslen, från forskningsprogram och från den tidiga delen av kärnkraftsprogrammet.

Kapsel

Referensutformningen för kapseln utgörs av en tät, 5 cm tjock korrosionsbarriär av koppar och en lastupptagande insats av segjärn. Den förslutna kapseln har en total längd på 4 835 mm och en diameter på 1 050 mm, se figur S-5.



Figur S-5. Vänster: Referensutformningen av kapseln med ett korrosionsbeständigt yttre kopparhölje och en lastupptagande insats av segjärn. Höger: Tvärsnitt av insatser av BWR- respektive PWR-typ.

I **Produktionsrapporten för kapseln** beskrivs hur kapslar ska tillverkas och kvalitetssäkras för att uppfylla specifikationerna för referensutformningen. Rapporten visar även att referensutformningen överensstämmer med konstruktionsförutsättningarna för kapseln, baserat på en omfattande konstruktionsanalys. Där dras slutsatsen att referensutformningen, tillsammans med de föreslagna tillverknings- och kontrollmetoderna, som resultat ger en kapsel som är i överensstämmelse med konstruktionsförutsättningarna. En viktig konsekvens av detta är att alla de 6 000 kapslarna är täta när de deponeras.

Buffert

Lerbuffertens huvudfunktion är att begränsa vattenflödet runt kapseln. Detta uppnås genom att man väljer ett buffertmaterial med låg hydraulisk konduktivitet efter vattenmättnad. Diffusion blir då den dominerande transportmekanismen. Materialet måste även ha ett tillräckligt högt svälltryck, vilket gör att bufferten blir självtätande. Lermaterialets montmorillonitnehåll är en viktig egenskap för buffertens säkerhetsfunktioner.

I SR-Site utvärderas två exempel på lermaterial som uppfyller konstruktionsförutsättningarna. Exempelen, MX-80 och Ibeco RWC, är båda från stora fyndigheter och bryts av stora bentonitleverantörer. De har olika ursprung och ska betraktas som möjliga exempel på alternativ som kan användas i förvaret.

I **Produktionsrapporten för bufferten** visas det hur bufferten ska tillverkas och inplaceras på ett kvalitetssäkrat sätt för att specifikationerna för referensutformningen ska uppfyllas.

Återfyllningsmaterial i deponeringstunnlar

Huvudfunktionen för deponeringstunnlarnas återfyllning är att begränsa advektiv transport i deponeringstunnlarna. Detta uppnås genom att man väljer ett återfyllningsmaterial med låg hydraulisk konduktivitet och tillräckligt högt svälltryck. Återfyllningen ska även bidra till att hålla bufferten på plats, dvs den ska motverka att bufferten expanderar uppåt. Detta uppnås huvudsakligen genom att återfyllningsmaterialet har en tillräckligt hög densitet.

Referensmaterialet för återfyllningen är en bentonitlera med mellan 50 och 60 procent montmorillonit. I SR-Site utvärderas ett exempel på material, Milos BF 04, som uppfyller konstruktionsförutsättningarna.

Produktionsrapporten för återfyllningen redogör för hur deponeringstunnlarnas återfyllning ska tillverkas och inplaceras på ett kvalitetssäkrat sätt för att uppfylla specifikationerna för referensutformningen.

Övriga tekniska delar i förvaret

För SR-Site definieras de övriga tekniska delarna i förvaret som:

1. Pluggar i deponeringstunnlar: Behandlas i **Produktionsrapporten för återfyllningen**.
2. Centralområde: Behandlas i **Produktionsrapporten för förslutningen**.
3. Toppförslutning: Behandlas i **Produktionsrapporten för förslutningen**.
4. Bottenplatta i deponeringshål: Behandlas i **Berglinjerapporten**.
5. Borrhålsförslutningar: Behandlas i **Produktionsrapporten för förslutningen**.
6. Förslutning av stamtunnlar och transporttunnlar.
7. Förslutning av ramp och schakt under toppförslutningen.
8. Pluggar (på andra ställen än i deponeringstunnlar).

I SR-Site behandlas förslutningen av alla tunnlar på förvarsnivå samt rampen och schaktet under toppförslutningen som tunnelåterfyllning, i enlighet med den nuvarande referensutformningen. Alla pluggar i förvaret behandlas som deponeringstunnelpluggar, även detta enligt rådande referensutformning.

Syftena med förslutningskomponenterna är i allmänhet att begränsa grundvattenflödet genom bergutrymmena, att tillhandahålla mekanisk inneslutning och att förhindra oavsiktligt intrång i förvaret. Undantaget är bottenplattan i deponeringshålen som endast har till uppgift att underlätta installationen av kapseln och bufferten.

Bergutrymmen

Under alla faser av arbetet med att utforma de underjordiska delarna av förvaret måste man ta hänsyn till de faktiska förhållandena på platsen och osäkerheter i dessa. För att fastställa en slutgiltig layout för deponeringstunnlar och deponeringshål måste en stor bergvolym karakteriseras. Denna karakterisering går emellertid bara på ett effektivt sätt, att utföra från bergutrymmen på eller nära förvaringsdjup. Det innebär att karakteriseringen kommer att detaljeras i takt med att byggarbetet går framåt.

Det djup som fastställts för referensutformningen är en kompromiss mellan konstruktionsförutsättningarna för långsiktig säkerhet och bygghänsyn för deponeringstunnlarna och deponeringshålen i förvaringsanläggningen. Under ett djup av 400 meter är förekomsten av vattenförande sprickor mycket liten, medan bergspänningarna fortfarande är acceptabla. Detta motiverar att förvaringsanläggningens maximala djup är 470 meter och att den har ett minsta djup (tunneltak) av 457 meter.

Platsens termiska egenskaper används för att bestämma ett minsta avstånd mellan kapslarna. Detta säkerställer att den maximala temperaturen i bufferten understiger 100 °C.

Layouten är anpassad för att uppfylla de konstruktionsförutsättningar som avser att minska jordskalvsrisken. Den säkerställer att alla deponeringshål ligger bortom respektavstånden till stora deformationszoner, som skulle kunna hysa större framtida jordskalv. Stora sprickor får dessutom inte skära deponeringspositioner enligt det så kallade EFPC-kriteriet (Extended Full Perimeter Intersection). Detta kriterium slår fast att ett kapselläge inte får skäras av en spricka som också fullständigt skär deponeringstunnelns omkrets. Dessutom diskvalificeras de kapselpositioner som korsas av sprickor som även skär fyra eller fler närliggande positioner.

Deponeringspositioner med höga inflöden godkänns inte. I SR-Site hanteras detta huvudsakligen genom att en modifierad version av EFPC-kriteriet används för att undvika deponeringspositioner med potential för uppkomst av höga framtida grundvattenflöden.

Deponeringstunnlarnas orientering relateras till den största huvudspänningens orientering för att minska spjälkningsrisken. Visst byggmaterial i berget eller på bergytter, t ex från bergförstärkning och från injektering, kommer att finnas kvar i förvaret efter förslutning.

Sammanfattning

Sammanfattningsvis är nedanstående säkerhetsrelaterade egenskaper bland de mest betydelsefulla för förvarets initialtillstånd.

- Kapselns 5 cm tjocka kopparhölje som utgör en korrosionsbarriär.
- Kapselns förmåga att motstå isostatiska laster, vilken ges av segjärnsinsatsens mekaniska egenskaper.
- Kapselns förmåga att motstå skjuvlaster, vilken också ges av segjärnsinsatsens mekaniska egenskaper.
- Densiteten hos den deponerade bufferten och buffertens kvalitetssäkrade materialsammansättning, vilka säkerställer att bufferten utvecklas till en diffusionsbarriär då den vattenmättas.
- Densiteten och materialsammansättningen hos deponeringstunnelns återfyllning vid deponeringen.
- Förvarets allmänna layout, med respektavstånd till sprickzoner som potentiellt kan hysa stora jordskalv samt med ett avstånd mellan deponeringshålen som tillsammans med begränsningarna för värmeavgivningen från de deponerade kapslarna säkerställer att temperaturen i förvaret med god marginal är lägre än 100 °C.
- Acceptans av deponeringspositioner i enlighet med fastställda kriterier, vilket minskar sannolikheten för att deponeringspositioner korsas av sprickor som är stora och/eller kraftigt vattenförande.

S3 Analysen av långsiktig säkerhet

S3.1 Inledning

Förvarssystemet kommer att utvecklas över tiden. Framtida tillstånd kommer att bero på

- förvarets initialtillstånd,
- interna processer, dvs ett antal strålningsrelaterade, termiska, hydrauliska, mekaniska, kemiska och biologiska processer som samverkar inom förvarssystemet över tiden, samt
- externa faktorer som påverkar systemet.

Interna processer är t ex radioaktivt sönderfall, vilket medför värmeutveckling och uppvärmning av bränslet, de tekniska barriärerna och det omgivande berget. Grundvattenrörelser samt kemiska processer, som påverkar de tekniska barriärerna och grundvattnets sammansättning är andra exempel. Till externa faktorer hör inverkan av framtida klimat och andra processer relaterade till klimatet, såsom glaciationer och landhöjning.

Initialtillståndet, de interna processerna och den externa påverkan, samt de sätt på vilka dessa faktorer tillsammans styr förvarets utveckling, kan aldrig till fullo beskrivas eller förstås. Osäkerheter av olika slag finns därför förknippade med alla aspekter av förvarets utveckling och följaktligen också med bedömningen av säkerheten. En grundtanke i metodiken för en säkerhetsanalys måste därför vara att hantera alla relevanta typer av osäkerhet. Denna hantering innebär att identifiera, klassificera och beskriva osäkerheter, liksom att hantera dem på ett konsekvent sätt vid kvantifieringen av förvarets utveckling och av de radiologiska konsekvenser som denna medför. Ett metodiskt tillvägagångssätt innefattar också att jämföra resultaten från analysen med myndighetens kriterier på ett sådant sätt att tillbörlig hänsyn tas till de osäkerheter som är förbundna med analysen.

Säkerhetsanalysen SR-Site består av elva huvudsteg. Figur S-6 visar en schematisk bild som beskriver de olika stegen. Den metodik som utnyttjas i analysens första tio steg beskrivs i följande underavsnitt, tillsammans med de viktigaste resultaten från varje steg. Resultatet av det slutliga steget, sammanställningen av slutsatser, redovisas i avsnitt S4.

S3.2 Steg 1: Hantering av egenskaper, händelser och processer (FEP)

Vid detta steg identifieras alla de faktorer som behöver ingå i analysen. Erfarenhet från tidigare säkerhetsanalyser och KBS-3-specifika och internationella databaser över relevanta egenskaper, händelser och processer (eng. features, events and processes, FEP) som påverkar den långsiktiga säkerheten utnyttjas. En SKB-specifik FEP-databas utvecklas för detta, där de flesta FEP klassificeras som antingen i) FEP för initialtillståndet, ii) interna processer eller iii) externa FEP. Återstående FEP är antingen relaterade till analysmetodiken i allmänhet eller har konstaterats vara irrelevanta för KBS-3-metoden. Utifrån resultaten från FEP-hanteringens har en FEP-katalog tagits fram för SR-Site, vilken innehåller de FEP som ska hanteras i SR-Site. Den fortsatta hanteringen av de tre FEP-kategorierna beskrivs i metodikens tre nästföljande steg.

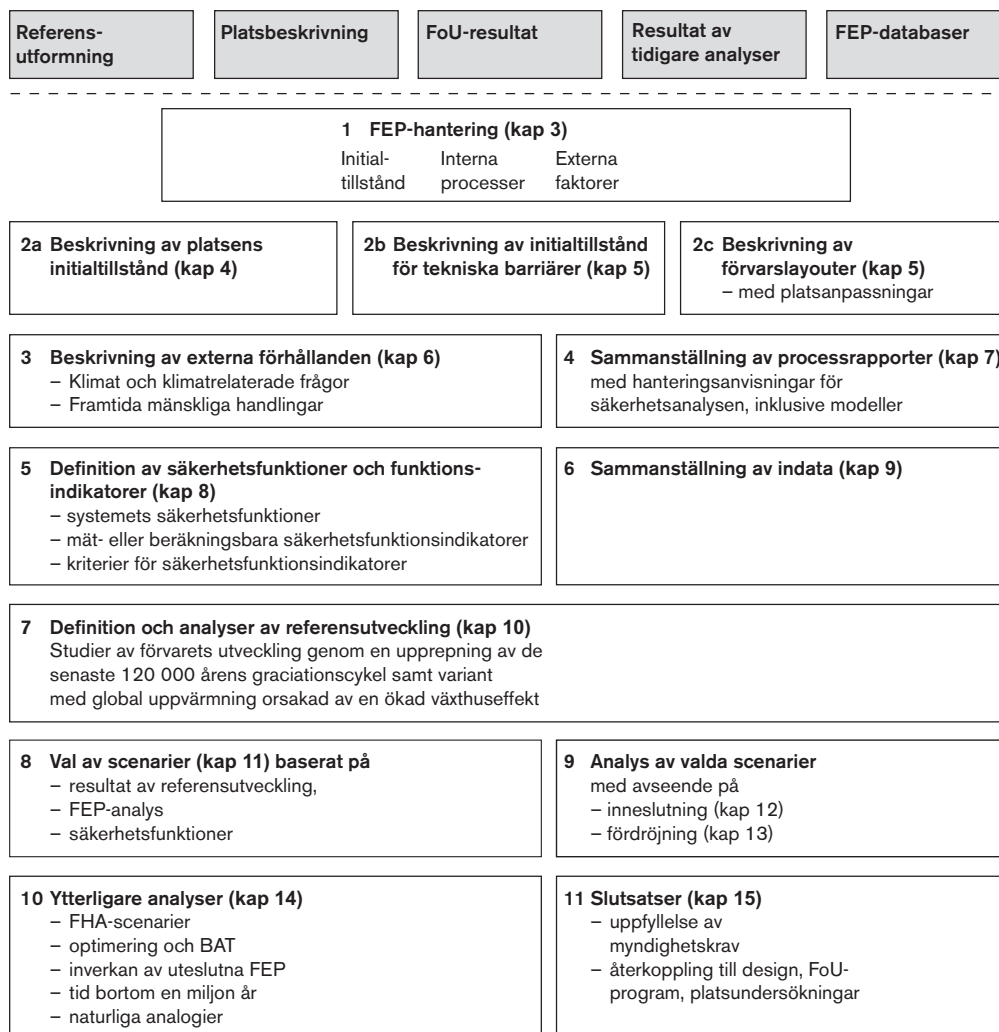
Detta steg som omfattar FEP-hanteringens redovisas utförligt i **FEP-rapporten** för SR-Site¹.

S3.3 Steg 2: Beskrivning av initialtillståndet

Systemets initialtillstånd beskrivs med hjälp av den platsbeskrivande modellen, utformningen av KBS-3-förvaret med dess olika komponenter och en platsspecifik layout som tillämpar denna utformning på platsen i fråga. Initialtillståndet för geosfären och biosfären definieras som tillståndet hos det naturliga systemet innan bergarbetena påbörjas. Initialtillståndet för bränslet och de tekniska komponenterna definieras som tillståndet omedelbart efter deponering/installation.

Systemets initialtillstånd är fundamentalt i analysen och kräver omfattande dokumentation. För den aktuella platsen uppnås detta genom den platsbeskrivande modellen i **Platsbeskrivning Forsmark**, dvs resultaten från platsundersökningen från ytan och platsmodelleringen baserad på platsundersökningsdata. Platsmodellen för Forsmark är en huvudreferens till SR-Site.

¹ **FEP-rapporten** är en av flera huvudreferenser till denna huvudrapport. Vid hänvisning till dessa huvudreferenser anges deras kortnamn i fetstil. Samma nomenklatur används i huvudrapporten.



Figur S-6. En översikt av de elva huvudstegen i säkerhetsanalysen SR-Site. De översta rutorna ovanför den streckade linjen utgör indata till analysen. De kapitler i huvudrapporten där stegen redovisas mer utförligt anges också.

Initialtillståndet för förvarssystemets tekniska komponenter beskrivs i ett antal **produktionsrapporter** som omfattar det använda bränslet, kapseln, bufferten, tunnelåterfyllningen, förslutningen av förvaret respektive konstruktionen av bergutrymmena. Se även ovanstående avsnitt S2.3.

S3.4 Steg 3: Beskrivning av externa förhållanden

Faktorer relaterade till externa förhållanden hanteras i de tre kategorierna ”klimatrelaterade frågor”, ”storskaliga geologiska processer och effekter” samt ”framtida mänskliga handlingar” (eng. future human actions, FHA). Hanteringen av dessa faktorer beskrivs i **Klimatrapporten**, **Processrapporten för geosfären** respektive **FHA-rapporten**.

En viktig grund för hanteringen av externa förhållanden är att lägga fast externa referensförhållanden för den efterföljande analysen. Som referensförhållanden postuleras en upprepning av den senaste 120 000 år långa glaciationscykeln. En alternativ referensutveckling baseras på ett antagande om global uppvärmning. Dessutom undersöks de fysikaliskt möjliga klimatförhållanden som skulle kunna ha allvarigare inverkan på förvarets säkerhet. Syftet är att använda dessa vid valet av scenarier i ett senare steg av analysen.

Framtida mänskliga handlingar hanteras i enlighet med en metodik som fastställdes i SR-Can-analysen och som uppdaterats i viss utsträckning för SR-Site. Utifrån en strukturerad redovisning av ett stort antal FEP som rör framtida mänskliga handlingar, väljs ett antal stiliserade fall för vidare analys.

S3.5 Steg 4: Sammanställning av processrapporter

Identifieringen och hanteringen av processer av betydelse för förvarets långsiktiga utveckling och säkerhet är en viktig del i säkerhetsanalysen. Identifieringen av processer baseras på tidigare analyser och sällning av FEP. Alla processer som identifieras inom systemgränsen, och som är relevanta för systemets långsiktiga utveckling, beskrivs i tre särskilda **processrapporter**, en för bränslet och kapseln, en för bufferten, återfyllningen och förvarsförslutningen samt en för geosfären. Kortsiktiga processer eller förändringar i geosfären som orsakas av berguttaget för förvaret ingår i **Processrapporten för geosfären** och beaktas i säkerhetsanalysen.

Varje process dokumenteras i **processrapporterna** enligt en mall med fastställda rubriker. I slutet av procesdokumentationen fastställs hur processen ska hanteras i säkerhetsanalysen, vilket utgör det viktigaste resultatet från **processrapporterna**. **Processrapporterna** tillhandahåller således ett "recept" för hantering av de olika processerna i analysen.

Hantering av samtliga processer i en processrapport sammanfattas i en *processtabell* som beskriver om processen kan försummas, om den är föremål för kvantitativ modellering eller om valet mellan dessa alternativ beror på ett angivet villkor (som uppfylls eller inte uppfylls) under förvarssystemets utveckling.

Flera av processerna hanteras således genom kvantitativ modellering. Varje modell inkluderar i allmänhet flera samverkande processer. Processerna förekommer ofta i olika delar av systemet och beskrivs därför i olika processrapporter. Modellerna bildar ett nätverk, där resultaten från en modell används som indata till en annan. Nätverket beskrivs grafiskt genom två modellscheman (så kallade *AMF-scheman*, eng. Assessment Model Flowcharts) och två tillhörande AMF-tabeller som kopplar samman processer i processtabellerna, modeller i AMF-scheman och rapportering av modellering i olika avsnitt av huvudrapporten.

S3.6 Steg 5: Definition av säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer

Ett centralt inslag i metodiken för SR-Site-analysen är definitionen av en uppsättning *säkerhetsfunktioner* som förvarssystemet optimalt ska uppfylla över tid. De övergripande säkerhetsfunktionerna "inneslutning" och "fördröjning" delas upp i ett antal delfunktioner för kapseln, bufferten, återfyllningen i deponeringstunnlar och berget. Utvärderingen av säkerhetsfunktionerna över tid möjliggörs genom att varje säkerhetsfunktion kopplas till en *säkerhetsfunktionsindikator*, dvs en mätbar eller beräkningsbar egenskap hos den aktuella förvarskomponenten. För flera funktioner är det också möjligt att ange *kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer*. Om en säkerhetsfunktionsindikator uppfyller kriteriet, är den aktuella säkerhetsfunktionen uppfylld.

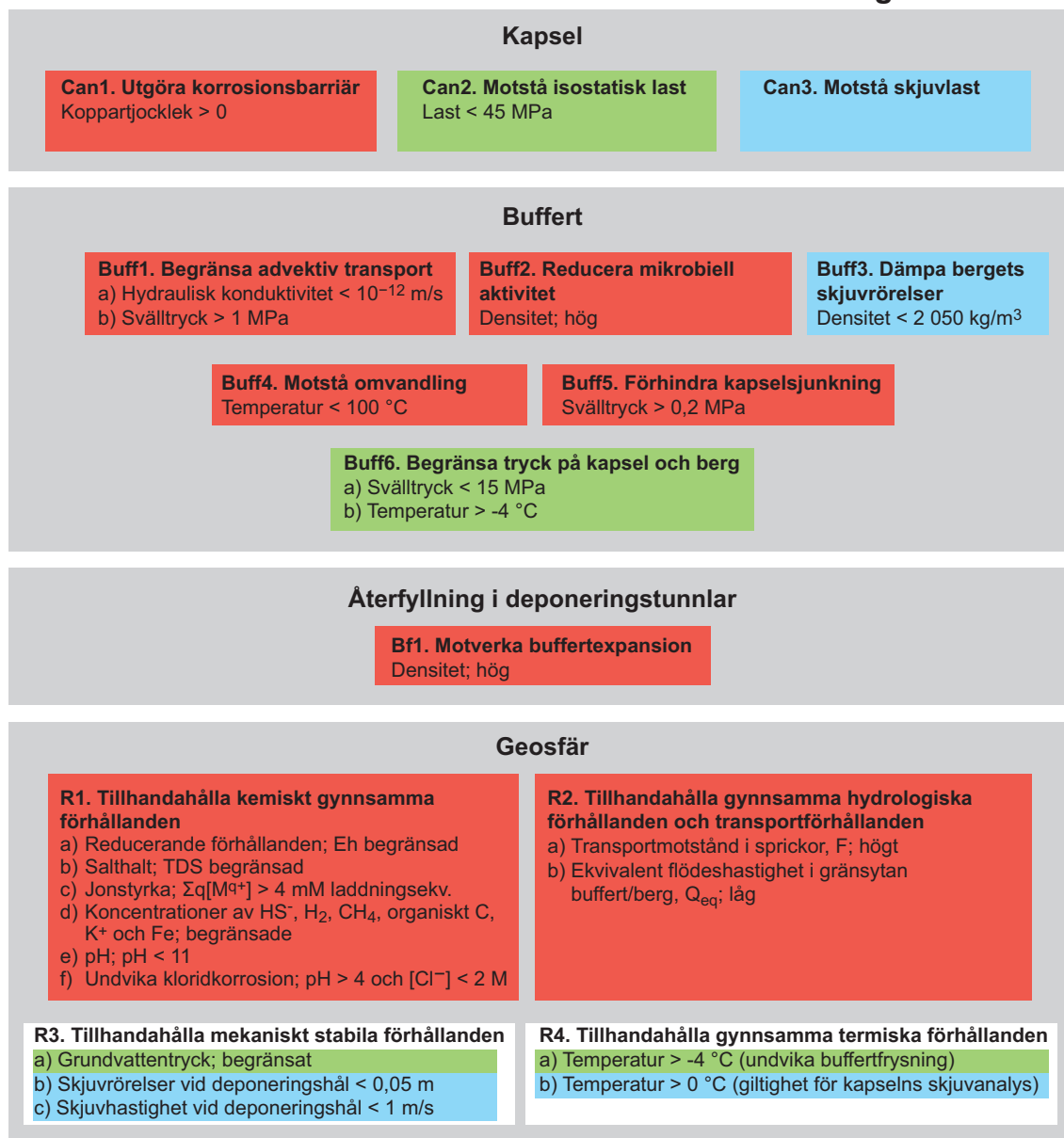
Kapselns förmåga att stå emot isostatiska laster är ett exempel på en säkerhetsfunktion. Den tillhörande indikatorn är den isostatiska belastningen på kapseln och kriteriet är den isostatiska belastning som kapseln har visats kunna stå emot.

Det är viktigt att notera att kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna inte är desamma som designkriterier, vilka formellt beskrivs som konstruktionsförutsättningar i SR-Site. De förra ska optimalt upprätthållas under den period som omfattas av analysen, medan konstruktionsförutsättningarna ska uppfyllas initialt. Konstruktionsförutsättningarna ska i allmänhet säkerställa att systemet är tillräckligt robust för att uppfylla kriterierna för säkerhetsfunktionsindikatorerna över tid. Kopparkapseln måste exempelvis utformas på ett sådant sätt att dess initiala tjocklek (konstruktionsförutsättningen) säkerställer att den står emot korrosion under mycket lång tid, dvs att tjockleken är större än noll (funktionsindikatorkriteriet) under denna tid.

Uppsättningen av säkerhetsfunktioner ger förståelse för systemets säkerhetsegenskaper. Det ger också en lista över nyckelfrågor som ska utvärderas över tid i analysen. Säkerhetsfunktionerna används direkt i senare steg av analysen när referensutvecklingen analyseras för att utvärdera säkerheten på ett strukturerat sätt för de olika tidsskedena. Säkerhetsfunktionerna har även en framträdande roll vid valet av ett antal scenarier, varigenom de osäkerheter som är relaterade till förvarets säkerhetsfunktioner utvärderas på ett strukturerat sätt.

Alla säkerhetsfunktioner, säkerhetsfunktionsindikatorer och säkerhetsfunktionsindikatorkriterier relaterade till inneslutning sammanfattas i figur S-7. Varje funktion diskuteras kort i samband med redovisningen av resultaten av referensutvecklingen i avsnitt S3.8. Säkerhetsfunktioner relaterade

Säkerhetsfunktioner relaterade till inneslutning



Figur S-7. Säkerhetsfunktioner (fetstil), säkerhetsfunktionsindikatorer och kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorer relaterade till inneslutning. När kvantitativa kriterier inte kan anges används termerna "stor", "liten" och "begränsad" för att indikera gynnsamma värden för säkerhetsfunktionsindikatorerna. Färgkodningen visar hur funktionerna bidrar till kapselns säkerhetsfunktioner Can1 (rött), Can2 (grönt) och Can3 (blått).

till fördröjning har också lagts fast och de sammanfattas i en figur liknande figur S-7. Flera av fördröjningskriterierna är relaterade till inneslutningskriterierna. Det gäller särskilt geosfärens roll att tillhandahålla gynnsamma kemiska och hydrologiska förhållanden/transportförhållanden.

När säkerhetsfunktionerna har definierats tas ett *FEP-diagram* fram som visar hur initialtillståndets egenskaper och processer i den långsiktiga utvecklingen av förvaret är relaterade till säkerhetsfunktionerna.

S3.7 Steg 6: Sammanställning av indata

I detta steg används ett strukturerat förfarande för att välja ut data som ska användas för kvantifieringen av förvarsutvecklingen och för beräkningar av dos. Urvalsprocessen och de valda datavärdena rapporteras i en särskild **Datarapport**. Arbetet följer en mall för att diskutera kvalitet och osäkerheter hos

indata. Instruktionerna berör två parter, leverantören och kunden. Leverantörerna är de arbetsgrupper som tar fram data. Kunden är i vid bemärkelse SR-Site-gruppen som ansvarar för att utföra säkerhetsanalysen SR-Site. De modeller för vilka data krävs anges i de AMF-scheman som beskrivs i steg 4 (se avsnitt S3.5) ovan. Rutinerna för granskning och lagring av data utgör en del av kvalitetssäkringsplanen för SR-Site.

S3.8 Steg 7: Definition och analys av referensutvecklingen

I detta steg definieras och analyseras en referensutveckling av förvarssystemet. Referensutvecklingen är ett resultat av bland annat de externa referensförhållanden som definierades i steg 3. Syftet är att få kunskap om systemets övergripande utveckling, samt om de osäkerheter som påverkar utvecklingen inför det val av scenarier och de scenarieanalyser som kommer i de två efterföljande stegen. Utvecklingen är ett viktigt underlag för att i ett senare skede definiera ett huvudscenario.

Fokus ligger på systemets inneslutningsförmåga. Två fall av referensutvecklingen analyseras:

1. Ett basfall där de externa förhållandena under den första 120 000 år långa glaciationscykeln förutsätts likna de förhållanden som gällde under den senaste cykeln. Därefter antas sju upprepningar av denna cykel täcka in hela den 1 000 000 år långa analysperioden.
2. En variant med ökad global uppvärmning där man antar att det framtida klimatet och därmed de externa förhållandena i hög grad påverkas av mänskligt förorsakade utsläpp av växthusgaser under den första 120 000 år långa glaciationscykeln. Denna analys bygger på analysen för basfallet.

För båda fallen gäller att initialtillståndet med dess osäkerheter förutsätts, alla interna processer med sina osäkerheter hanteras i enlighet med specifikationen i **Processrapporterna** och data med tillhörande osäkerheter hämtas från **Datarapporten**.

Analysen av referensutvecklingens basfall genomförs för fyra tidsskeden:

- Bygg- och driftperioden.
- De första 1 000 åren efter förslutning av förvaret och den initiala perioden med tempererat klimattillstånd enligt referensglaciationscykeln.
- Den återstående delen av glaciationscykeln.
- Efterföljande glaciationscykler upp till en miljon år efter förslutning av förvaret.

För varje tidsskede presenteras analyserna i följande ordning:

- Klimatanalyser.
- Biosfärsanalyser.
- Termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska analyser som rör geosfären.
- Termiska, mekaniska, hydrauliska och kemiska analyser som rör det tekniska barriärsystemet (kapsel, buffert och återfyllning).

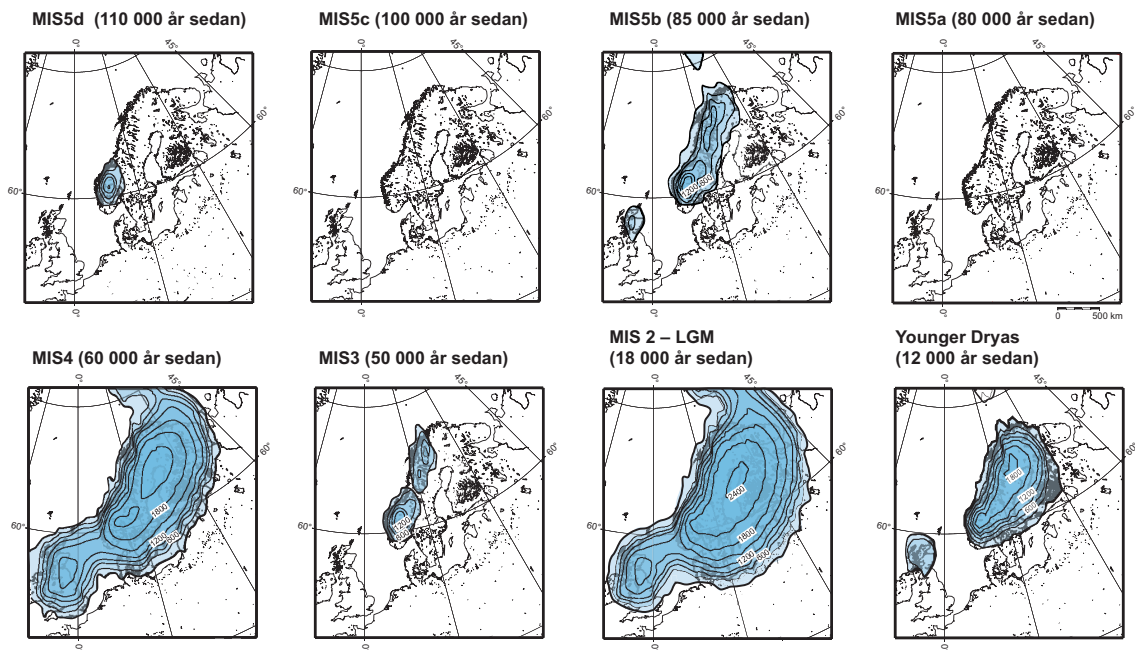
Behandlingen av varje delanalys avslutas med en redovisning av identifierade osäkerheter som ska föras vidare till senare skeden av referensutvecklingen och/eller till efterföljande delar av säkerhetsanalysen.

Redogörelsen för varje skede avslutas med en diskussion om förväntad status hos säkerhetsindikatorerna under och i slutet av skedet.

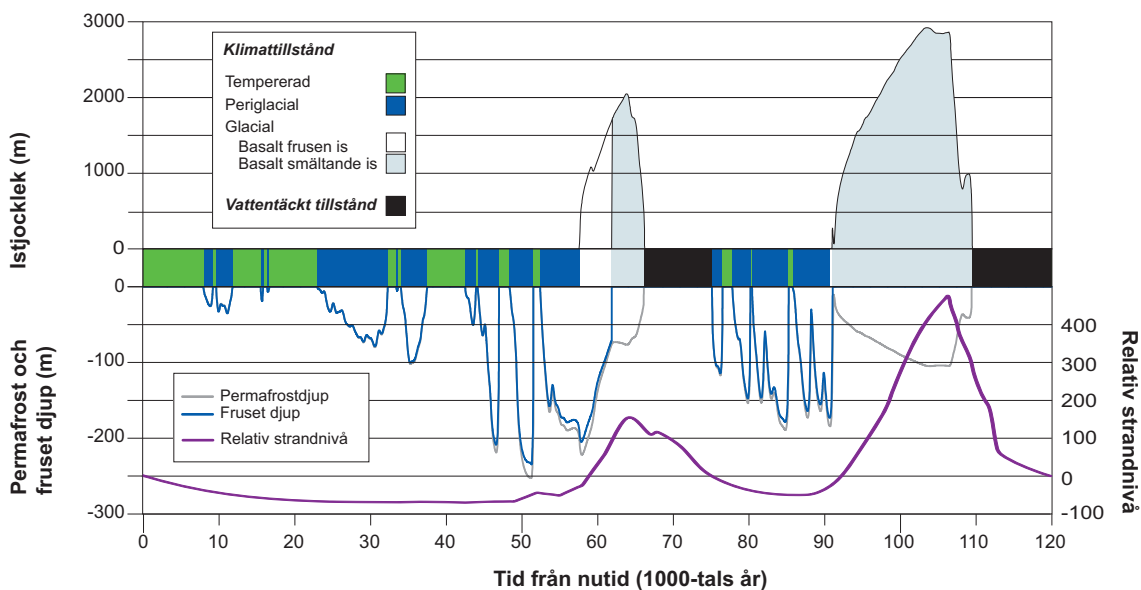
Allmänt om referensutvecklingen

En avsevärd del av det material som presenteras i referensutvecklingen är resultat från simuleringsstudier, som specificerades när hanteringen av processerna fastställdes och som visas grafiskt i AMF-schemana.

Initialt kännetecknas referensutvecklingen av ett transient skede som orsakas av berguttaget samt av uppförandet och existensen av förvaret. Långsiktigt kännetecknas referensutvecklingen av ändringar som orsakas av ändrade externa förhållanden. Figur S-8 och figur S-9 visar centrala aspekter av referensutvecklingens externa förhållanden i form av den modellerade rekonstruktionen av Weichselglaciationscykeln.



Figur S-8. Urval av kartor över modellerade utbredningar av inlandsisen från rekonstruktionen av Weichselperiodens istäcke. Konturlinjerna visar isytans höjd med ett intervall på 300 m. Alla kartor visar det nuvarande läget för strandlinjen.



Figur S-9. Utveckling av viktiga klimatrelaterade variabler vid Forsmark under referensglaciationscykeln.

Den termiska utvecklingen kännetecknas av en snabb temperaturökning till följd av värmeproduktionen i det använda kärnbränslet. Maximala temperaturer i kapseln, bufferten och deponeringshålets vägg uppnås efter några tiotals år. Det kommer att ta tiotusentals år av tempererade klimatförhållanden innan temperaturen återgår till den bakgrundstemperatur som råder i berget (omkring 11 °C vid Forsmark). För glaciala klimatförhållanden och särskilt permafrostförhållanden kommer temperaturen på förvaringsdjup att minska, men kommer alltid att överstiga 0 °C.

Från mekanisk synpunkt förväntas en skadezon bildas under utsprängning, i synnerhet under deponeringstunnlarnas sula. Det är dock inte troligt att denna kommer att bilda en hydrauliskt sammanhängande flödesväg. Dessutom kan den initialt förhöjda temperaturen orsaka termiskt inducerad spjälkning

i begränsad omfattning i deponeringshålets väggar. Långsiktigt kännetecknas de mekaniska förhållanden av stabilitet. Det går inte att utesluta kraftiga jordskalv i större sprickzoner i närheten av förvaret. Förvarslayouten är därför utformad för att undvika kapselbrott på grund av sådana händelser.

Från hydraulisk synpunkt dräneras förvaret under uppförande och drift. Den tid som åtgår för att vattenmätta återfyllnaden i deponeringstunnlar och buffert kommer att variera avsevärt mellan olika delar av förvaret. Till följd av berggrundens egenskaper i Forsmark sträcker sig tiden för att nå vattenmättnad sannolikt från några tiotals år till flera tusentals år. Långsiktigt kommer berggrundens flödesförhållanden att bestämmas av ändrade externa förhållanden.

Från kemisk synpunkt förväntas initiala transienter. Dessa omfattar förbrukning av initialt inneslutet syre i förvaret av mikrober och mineraler i berget, återfyllningen och bufferten. Dessutom sker reaktioner som inbegriper konstruktionsmaterial och andra kvarlämnade material i förvaret. Transienterna följs av långsamt varierande förhållanden under det initiala tempererade skedet och ändringar som styrs av varierande externa förhållanden i ett långt tidsperspektiv.

Säkerhet och säkerhetsfunktioner under referensutvecklingen

För flertalet av de 6 000 deponeringspositionerna görs bedömningen att alla säkerhetsfunktioner som är relaterade till kapseln, bufferten, deponeringstunneln och berget kan upprätthållas under referensutvecklingen. Följande resultat och slutsatser som rör säkerhetsfunktioner framkom från analysen av referensutvecklingen. Nomenklaturen för säkerhetsfunktionerna motsvarar den som används i figur S-7.

Berget

Resultaten från studierna av den *hydrogeokemiska utvecklingen* under referensutvecklingen innebär följande:

- Reducerande förhållanden (säkerhetsfunktion R1a) upprätthålls genom hela referensutvecklingen, från att de har etablerats kort efter förvarets förslutning. Lokal, tillfällig nedträngning av syre till förvarsdjup kan inte uteslutas under de hydrologiska transienter som uppstår när en isfront passerar. De möjliga effekterna är emellertid för små för att påverka säkerheten.
- Salthalten (R1b) begränsas till en kloridhalt under 0,35 M, dvs, den understiger de koncentrationer där buffertens eller återfyllningens funktion kan påverkas. De högsta salthalterna förekommer som följd av saltvattenuppträngning i) under de initiala geokemiska transienter som orsakas av dräneringen och den efterföljande återmättnaden av berggrunden och ii) under transienter som uppstår när en isfront passerar ovanför förvaret.
- Jonstyrkan (R1c) överstiger 4 mM laddningsekvivalenter för merparten av deponeringspositionerna under hela referensutvecklingen. Detta krävs för att kolloidfrigörelse/erosion av bufferten ska kunna uteslutas. Det kan emellertid inte uteslutas att några få procent av deponeringspositionerna, de som korsas av sprickor med de högsta vattenflödena, exponeras för utspädd vatten på ett sätt som innebär att bufferterosion skulle kunna ske efter tusentals år med tempererade eller glaciala förhållanden eller under de korta transienter som uppstår när en isfront passerar ovanför förvaret.
- Koncentrationerna av ämnen som är skadliga för bufferten och kapseln (R1d) är som följer:
 - Koncentrationerna av HS^- förväntas inte överstiga nuvarande koncentrationer.
 - Koncentrationerna av H_2 förväntas ligga kvar under 0,1 mM. Den vätgas som bildas genom korrosion av förvarets stål- och järnkomponenter förväntas antingen att diffundera bort eller förbrukas genom mikrobiella processer. Om sulfatreduktion är inblandad förväntas den sulfid som bildas att reagera med det tvåvärda järnet från korrosionen, vilket innebär att sulfidnivåerna inte kommer att öka på grund av denna mekanism.
 - Koncentrationerna av CH_4 och organiskt C kommer att ligga kvar under ~0,1 mM respektive ~1 mM.
 - Koncentrationerna av K^+ and Fe kommer att ligga kvar under ~5 mM respektive 0,1 mM.
- Grundvattnets pH (R1e) är under 11 och över 6,3.
- De villkor som krävs för att undvika kloridfrämjad korrosion (R1f) är uppfylla genom den begränsande kloridkoncentrationen (<0,35 M) och grundvattnets pH-värden (>6,3).

Resultaten från studierna av den *hydrogeologiska utvecklingen* under referensutvecklingen innebär följande.

- De ekvivalenta flödena i gränsytan mellan buffert och berg (R2b) är låga. Enligt den hydrogeologiska modellens fördelning av sprickstorlekar och sprickintensiteter skärs nästan 5 000 av de 6 000 kapselpositionerna inte alls av vattenförande sprickor. Bland de korsade sprickorna har de flesta ett mycket lågt ekvivalent flöde. Om man betraktar hela uppsättningen av deponeringspositioner varierar dock flödena inom ett stort intervall. Den högsta percentilen för fördelningen av flöden är sådan att dessa kan bidra till långsiktigt skadliga effekter på bufferten och kapseln.
- Det flödesrelaterade transportmotstånd som finns i spricknätverket som förbinder deponeringshålen med ytan (R2a) är högt för de flesta deponeringspositioner, vilket bidrar till att retentionen av radionuklider i berget är effektiv. Om man betraktar hela uppsättningen av deponeringspositioner varierar dock transportmotstånden inom ett stort intervall. Den lägsta percentilen för fördelningen är sådan att retentionen i berget kan vara ringa. Dessutom kan transportvägar med lågt transportmotstånd ofta ha en hög flödeshastighet vid deponeringspositionen.

Följande slutsatser dras beträffande bergets *mekaniska stabilitet*.

- Grundvattentrycket (R3a) är vanligen i storleksordningen 5 MPa, men kan öka om förvarsplatsen är täckt med is. Under glaciala förhållanden kommer trycket att vara beroende av istäckets tjocklek, och ligga under 26 MPa för den modellerade referensutvecklingen.
- Skjuvrörelser som överstiger 5 cm vid deponeringshål (R3b) är ytterst sällsynta. Detta beror på att sannolikheten för att kraftiga jordskalv ska inträffa i närheten av förvaret är liten, samt på iakttagandet av respektavstånd till stora sprickzoner vid valet av deponeringsområden och tillämpningen av acceptanskriterier vid valet av enskilda deponeringspositioner.
- Skjuvhastigheter vid deponeringshål (R3c) är av samma skäl som ovan under 1 m/s.

Beträffande bergets *termiska utveckling*, överstiger temperaturen på förvarsdjup i Forsmark med god marginal 0 °C i referensutvecklingen, dvs buffertfrysning kan undvikas (R4a) och skjuvanalyserna av kapseln är giltiga (R4b).

Återfyllningen i deponeringstunnlar

Vad gäller återfyllningen i deponeringstunnlar är densiteten tillräckligt hög för att motverka buffertexpansion (BF1) för alla analyserade fall i referensutvecklingen.

Bufferten

I merparten av deponeringshålen förväntas bufferten upprätthålla en densitet över tiden på ett sätt som innebär – givet buffertens egenskaper i initialtillståndet, grundvattnets gynnsamma sammansättning över tiden och de begränsade maximitemperaturer som uppnås genom en lämplig förvarslayout – att alla dess säkerhetsfunktioner uppfylls, dvs så att:

- Advektiv transport begränsas genom en hydraulisk konduktivitet under 10–12 m/s (Buff1a) och ett svälltryck över 1 MPa (Buff1b).
- Mikrobiell aktivitet undertrycks (Buff2).
- Skjuvrörelser i berget dämpas (Buff3) genom att en övre densitetsgräns säkerställs.
- Buffertomvandling undviks (Buff4) genom en övre temperaturgräns.
- Kapselsjunkning (Buff5) undviks genom ett svälltryck över 0,2 MPa.
- Trycket på kapseln och berget begränsas (Buff6) genom ett svälltryck under 15 MPa och en bergtemperatur över –4 °C.

Eftersom det långsiktigt inte går att säkerställa en tillräckligt hög jonstyrka (R1c) för de deponeringshål som skärs av sprickorna med de högsta flödena, kan det inte uteslutas att den buffert som befinner sig i dessa positioner kommer att eroderas. De beräknade erosionshastigheterna är sådana att advektiva förhållanden skulle kunna uppstå i omkring en procent av deponeringshålen under den en miljon år långa analysperioden. För dessa hål är inte säkerhetsfunktionerna Buff1 and Buff2 uppfyllda.

Kapseln

Vad gäller kapselns roll som korrosionsbarriär (Can1) visar analyserna i referensutvecklingen att högst några få millimeter av det 5 cm tjocka kopparhöljet kommer att korrodera på en miljon år om bufferten är på plats med upprätthållna säkerhetsfunktioner. För de få deponeringspositioner där bufferten kan försvinna till följd av erosion, på ett sätt som innebär att advektiva förhållanden uppstår i deponeringshålet, ökar däremot korrosionshastigheten. De kvantitativa analyserna visar, uttryckt som ett statistiskt medelvärde, att upp till ungefär en kapsel kan ha förlorat sin integritet till följd av korrosion i slutet av den en miljon år långa analysperioden på grund av sådana omständigheter.

Vad gäller kapselns förmåga att motstå isostatiska laster (Can2) visar de kvantitativa analyserna att det totala isostatiska trycket understiger konstruktionsförutsättningen på 45 MPa, vilket betyder att denna säkerhetsfunktion hos kapseln upprätthålls.

När det gäller kapselns förmåga att motstå skjuvlaster visar analysen att sannolikheten för att ett enda sådant brott bland de 6 000 kapslarna har skett i slutet av den en miljon år långa analysperioden är 0,08. Då ingår ett antal pessimistiska antaganden avseende både berget och kapseln.

Identifierade osäkerheter i analysen av referensutvecklingen

De osäkerhetsfrågor som behöver föras vidare till scenarieanalyser kan huvudsakligen hänföras till två grupper: frågor som rör kapselbrott till följd av korrosion (säkerhetsfunktion Can1) och frågor som rör kapselbrott till följd av skjuvlaster (säkerhetsfunktion Can3). Kapselbrott till följd av isostatisk last (Can2) utesluts i enlighet med analyserna i referensutvecklingen.

Frågorna som rör kapselbrott till följd av korrosion är:

- Grundvattenflödet under glaciationscykeln.
- Grundvattnets salthalt under glaciationscykeln.
- Bufferterrosion som bestäms av grundvattenflöde, spricköppningar och salthalt och vars analys även påverkas av den ofullständiga konceptuella förståelsen för bufferterrosion.
- Grundvattnets sulfidkoncentrationer under glaciationscykeln.
- Kapselkorrosion under advektiva förhållanden, vilket kräver bufferterrosion i den omfattningen att advektiva förhållanden uppstår i deponeringshålet och som därefter bestäms av grundvattenflöde och sulfidkoncentrationer.

Frågorna som rör kapselbrott till följd av skjuvlast är:

- Förekomsten av jordskalv av tillräckligt stor magnitud för att orsaka sekundära skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshål.
- Omfattningen av skadliga sekundära skjuvrörelser, under förutsättning att tillräckligt stora jordskalv inträffar.
- Sekundära skjuvrörelsers påverkan på buffert/kapselsystemet.

Definitionsmässigt begränsas de externa förhållandena för referensutvecklingen antingen till en utveckling som är jämförbar med en upprepning av Weichselglaciationscykeln (basfallet) eller till en som är kompatibel med varianten med global uppvärmning. Som anges ovan finns det osäkerheter inom dessa begränsningar, som i sin tur leder till osäkerheter inom referensutvecklingen. Det finns också betydande osäkerheter till följd av det faktum att andra externa förhållanden än de som bestämmer Weichsel-basfallet eller fallet med global uppvärmning är tänkbara. Dessa hanteras i scenarieanalyserna.

S3.9 Steg 8: Val av scenarier

Metod för val av scenarier

Vid hanteringen av osäkerheter i den framtida utvecklingen av förvarssystemet är det angeläget att minska antalet möjliga utvecklingar som behöver analyseras. Detta görs genom att välja ut en representativ uppsättning scenarier. Valet fokuseras på att hantera de delar av utvecklingen som är relevanta för säkerheten, uttryckta på övergripande nivå genom säkerhetsfunktionerna ”inneslutning” och ”fördröjning”. Dessa detaljeras ytterligare med hjälp av säkerhetsfunktionsindikatorer.

De valda scenarierna bör täcka in alla rimliga framtida utvecklingar. Dessutom ska det vara möjligt att beräkna den risk som är förenad med existensen av förvaret som en summa av riskbidrag från uppsättningen av scenarier.

Det finns flera krav och riktlinjer i tillämpliga föreskrifter som måste beaktas vid valet av scenarier. Givet föreskrifternas krav och de nyssnämnda övervägandena har en femstegsmetod för valet av scenarier utvecklats, enligt nedan.

1. Definition av huvudscenariot

Ett *huvudscenario* definieras utifrån referensutvecklingen och i enlighet med SSMFS 2008:21. Huvudscenariot är uppdelat i två varianter, vilka baseras på de två varianterna av referensutvecklingen (Weichsel-basfallet och varianten med ökad global uppvärmning).

2. Val av ytterligare scenarier baserat på eventuellt bortfall av säkerhetsfunktioner

En viktig faktor som styr scenarievalet är att säkerhetsfunktionerna som rör inneslutning ska upprätthållas. Dessa säkerhetsfunktioner används därför för att strukturera valet av ytterligare scenarier. Detta är det huvudsakliga tillvägagångssättet för att hantera frågan om *mindre sannolika scenarier* i SSMFS 2008:21.

Kapseln har tre säkerhetsfunktioner som rör inneslutning: att utgöra en korrosionsbarriär, att stå emot isostatiska laster och att stå emot skjuvlaster. Från säkerhetsfunktionerna kan man således härleda tre olika typer av kapselbrott: brott som orsakas av korrosion, isostatiskt tryck respektive skjuvrörelser. Därför definieras scenarier, ett för varje typ av kapselbrott. Tre typer av buffertfel betraktas också som scenarier: advektion, frysning och omvandling. Kapselscenarierna kombineras systematiskt med buffertscenarierna.

Osäkerheter relaterade till initialtillståndet, till processer och till externa förhållanden som inte ingår i huvudscenariot beaktas sedan för varje utvalt scenario. För till exempel scenariot som täcker kapselbrott till följd av isostatiskt övertryck beaktas brister vid tillverkningen av den lastbärande kapselinsatsen, högre svälltryck än de som angivits för referensbufferten och extrema istäcken som ger upphov till höga grundvattentryck.

För varje scenario görs en bedömning av om det ska betraktas som ”mindre sannolikt scenario” eller ”restscenario”. I det förra fallet sätts normalt sannolikheten för scenariot pessimistiskt till ett. De bedömda begränsade sannolikheterna för dess karakteristiska FEP, till exempel stora jordbävningar, beaktas emellertid i riskberäkningen för scenariot.

Dessa scenarier omfattar även många av de restscenarier som krävs enligt SSM:s föreskrifter och allmänna råd för att analysera *betydelsen av barriärer och barriärfunktioner*. För att få en djupare förståelse för barriärfunktionerna definieras ett antal restscenarier. Dessa beskriver, med fokus på radionuklidtransport, hypotetiska situationer där ett initialt bortfall av en eller flera barriärer antas.

3. Scenarier som rör framtida mänskliga handlingar

Även en uppsättning scenarier som rör framtida mänskliga handlingar definieras och analyseras. Scenarier som rör mänskligt intrång och som leder till en försämring av systemets funktioner ska i enlighet med SSMFS 2008:21 betraktas som ”mindre sannolika scenarier”. Enligt de allmänna råden till SSMFS 2008:37 ska inte dessa tas med i risksummeringen. SSM kräver att restscenarier 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 övervakas*.

4. Övriga restscenarier

Eventuella övriga scenarier, som av någon anledning anses nödvändiga för att få en heltäckande uppsättning av scenarier, definieras också. Dessa kan omfatta scenarier som identifieras direkt vid FEP-analysen men inte enligt kriterierna ovan. Inga sådana frågor har identifierats i SR-Site.

5. Kombination av scenarier

För att valet av scenarier ska bli heltäckande måste kombinationer av scenarierna beaktas. Detta görs när samtliga scenarier har valts och analyserats. Alternativa händelseförlopp är också relaterade till frågan om hur olika scenarier kombineras. Ordningsföljden i vilken olika händelser eller aspekter av utvecklingen inträffar kan vara viktig för förvarets utveckling. Detta tas upp explicit i varje scenario.

Sammanfattning

Sammanfattningsvis består scenariometodiken av en undersökning av alla förlopp som kan leda till de tre identifierade typerna av kapselbrott. Metodikens syfte är att utesluta eller kvantifiera förloppen med hänsyn till alla tänkbara utvecklingsvägar för systemet. Säkerhetsfunktionerna hos förvarets olika delar och den kunskap om förvarssystemets utveckling som kommer från analysen av referensutvecklingen utgör grunden för uttömmande utvärderingar av sådana förlopp.

Valda scenarier

Följande scenarier har valts ut i SR-Site.

- Ett huvudscenario som motsvarar referensutvecklingen.
- Ett scenario med advektion i bufferten för att undersöka de förlopp som leder till advektiva förhållanden i deponeringshålet och den kvantitativa omfattningen av dessa.
- Ett buffertfrysningsscenario för att undersöka de förlopp som leder till att bufferten fryser.
- Ett buffertomvandlingsscenario för att undersöka de förlopp som leder till att bufferten omvandlas.
- Ett scenario för att undersöka de förlopp som leder till kapselbrott till följd av korrosion och den kvantitativa omfattningen av dessa.
- Ett scenario för att undersöka de förlopp som leder till kapselbrott till följd av skjuvlaster och den kvantitativa omfattningen av dessa.
- Ett scenario för att undersöka de förlopp som leder till kapselbrott till följd av isostatiska laster.
- Hypotetiska restscenarier som belyser barriärfunktioner.
- Scenarier som rör framtida mänskliga handlingar.

S3.10 Steg 9, del 1: Analys av inneslutningspotentialen för de valda scenarierna

Metod

Analysen av de valda scenarierna är uppdelad i två steg: analys av inneslutningspotential och av fördröjningspotential.

Inneslutningspotentialen analyseras inte ytterligare för huvudscenariot. Resultaten från referensutvecklingen i steg 7 används.

De ytterligare scenarierna analyseras genom att fokus riktas mot faktorer som skulle kunna leda till situationer där säkerhetsfunktionen i fråga inte upprätthålls. I de flesta fall utförs dessa analyser genom jämförelser med utvecklingen för huvudscenariot. Det innebär att de endast omfattar sådana aspekter av förvarsutvecklingen för vilka scenariot i fråga skiljer sig från huvudscenariot.

För analyserna, och för dokumentationen av dem, används en gemensam mall med en uppsättning fasta rubriker.

Resultat

Sammanfattningsvis kan följande slutsatser dras från analyserna av inneslutningspotentialen hos de utvalda scenarierna. (För de hypotetiska restscenarierna förutsätts att inneslutningen bryts. FHA-scenarier analyseras med hjälp av en annan metodik.)

- Advektion i bufferten: Situationen kan uppträda i referensutvecklingen. De ytterligare analyser som utfördes för scenariot med advektion i bufferten, där hänsyn togs till konceptuella osäkerheter och ytterligare tolkningar av platsernas hydrauliska egenskaper, visade att omfattningen

av advektion i bufferten kan variera inom ett brett intervall. *Dessa konsekvenser fördes vidare till kapselkorrosionsscenarioet.*

- Buffertfrysning: Buffertfrysning uteslöts i referensutvecklingen, även för en eroderad buffert. De ytterligare analyser som utfördes för buffertfrysningsscenarioet ledde också till slutsatsen att frysning av en intakt buffert kan uteslutas och följaktligen bör betraktas som ett restskenario. Detta gäller även frysning av vatten i hålrum hos en delvis eroderad buffert. *Risken för buffertfrysning fördes därför inte vidare till kapselscenarierna.*
- Buffertomvandling: För buffertomvandlingsscenarioet utfördes analyser av höga temperaturer i bufferten och andra förhållanden som kan leda till att buffertmaterialet omvandlas, och slutsatsen drogs att detta bör betraktas som ett restskenario. *Risken för buffertomvandling fördes därför inte vidare till kapselscenarierna.*
- Kapselbrott till följd av korrosion: Ett funktionsfel av denna typ finns med i referensutvecklingen. Där uppträder det vid förhållanden med advektiv transport i en eroderad buffert och med sulfid i grundvattnet som den huvudsakliga korrodanten. För kapselkorrosionsscenarioet analyserades återigen samtliga mekanismer som kan leda till att kapseln korroderar. Det bekräftades att kopparkorrosion som orsakas av klorid kan uteslutas, eftersom detta kräver höga kloridkoncentrationer och mycket lågt pH jämfört med vad som förväntas i förvaret. Analysen visade även att en nyligen föreslagen mekanism för kopparkorrosion i rent vatten, vars vetenskapliga grund bedöms som svag, har försumbar inverkan på kopparkorrosionens totala omfattning om man antar att mekanismen verkligen förekommer. De ytterligare analyser som utfördes för kapselkorrosionsscenarioet, där indata från scenarioet med advektion i bufferten användes, ledde till slutsatsen att advektiva förhållanden i bufferten verkligen är huvudorsaken till potentiella kapselbrott till följd av korrosion. Det konstaterades också att sulfid i grundvattnet är den enda korrodanten som har potential att orsaka kapselbrott, och då enbart om det råder advektiva förhållanden. Då alla advektiva situationer och andra osäkerheter relaterade till korrosion utvärderats, ledde detta till att omfattningen av korrosionsbrotten kan variera inom ett visst intervall. *Detta fördes vidare till analysen av korrosionsscenarioets radiologiska konsekvenser.*
- Kapselbrott till följd av isostatiska laster: Ett funktionsfel av denna typ uteslöts för referensutvecklingen. Analysen i scenarioet med isostatiska laster ledde till slutsatsen att detta bör betraktas som ett restskenario. Konsekvenserna av ett hypotetiskt fall där kapselbrott inträffar till följd av isostatisk last analyseras trots detta.
- Kapselbrott till följd av skjuvlaster: Detta funktionsfel analyserades för referensutvecklingen. Sannolikheten för att funktionsfelet skulle inträffa var låg, även då ett antal pessimistiska antaganden gjordes. Denna slutsats kvarstår efter de ytterligare analyser som utförts för skjuvlastscenarioet. *Den pessimistiskt uppskattade förekomsten av kapselbrott till följd av skjuvlast fördes vidare till analyserna av skjuvscenariots konsekvenser.*
- Efter analyser av olika kombinationer drogs slutsatsen att relevanta kombinationer och den stegvisa utvecklingen av olika fenomen antingen har tagits upp i tidigare delar av analysen och i vissa fall förts vidare till konsekvensberäkningar, eller att det med relativt enkla kompletterande argument kunde visas att de inte ger upphov till ytterligare fall som måste beaktas. Det enda undantaget rör ett fall där kapselbrott till följd av skjuvlast följs av bufferterosion. Också detta fall fördes vidare till konsekvensberäkningar.

S3.11 Steg 9, del 2: Analys av fördröjningspotentialen för de valda scenarierna

Detta andra steg i scenarieanalyserna omfattar beräkningar av radionuklidutsläpp, radionuklidtransport och dospåverkan för de möjliga typer av kapselbrott som identifierats för varje scenario i analysen av inneslutningspotentialen. Syftet är att utvärdera systemets fördröjningsegenskaper för dessa scenarier och att kvantifiera risken. En fullständig redogörelse för konsekvensberäkningarna ges i SR-Sites **Radionuklidtransportrapport**.

Kriticitet

Om ett kapselbrott sker måste möjligheten för uppkomst av kriticitet beaktas, eftersom det skulle kunna ha en avsevärd inverkan på den fortsatta utvecklingen av en otät kapsel. Slutsatsen från kriticitetsanalyserna i SR-Site är att kapseln förblir underkritisk i förvaret i alla rimligen tänkbara fall.

Biosfären

Under de tidsperioder som är relevanta för säkerhetsanalysen kommer biosfären att genomgå betydande förändringar, särskilt på grund av långsiktiga klimatvariationer styrda av glaciationscykler. I de fall det förekommer utsläpp av radionuklider från förvaret, förväntas de potentiella aktivitetskoncentrationerna i ytvattnet att öka när förvarsplatsen höjer sig ur havet. Radionuklider, som eventuellt har ackumulerats i sediment, kan då tas upp i den terrestra näringskedjan i befintliga eller för jordbruksändamål omvandlade våtmarker. Det innebär att den potentiellt högsta exponeringen av människor och andra organismer för radionuklider från förvaret förväntas när förvarsplatsen åtminstone delvis har höjt sig ur havet. I SR-Site modelleras utvecklingen av landskapet i Forsmark under en interglacial klimatperiod i detalj. Landskapet delas upp i ett antal olika objekt och för varje objekt görs sedan utförliga modelleringar över utvecklingen i tiden. Enhetsutsläpp för relevanta nuklider matas sedan in till varje objekt och den resulterande tidsberoende omsättningen av radionuklider beräknas. Varje objekt antas pessimistiskt vara befolkat i sådan omfattning att mängden föda är precis tillräcklig för dess invånare, vilket innebär att de bara äter kontaminerad föda. Människorna antas i framtiden täcka sitt dricksvattenbehov till hälften från en kontaminerad brunn och till hälften från ytvattnet i den sjö eller det vattendrag som passerar objektet. Den tidsberoende radionuklidfördelningen i varje objekt leder till årsdoser som varierar i tiden för invånarna. För varje nuklid fastställs den högsta årsdosen över hela interglacialperioden och bland alla objekt, vilket ger en högsta årsdos per enhetsutsläpp av varje radionuklid till landskapet. Dessa landskapspecifika omvandlingsfaktorer (eng. landscape dose conversion factor, LDF) används för att omvandla utsläppshastigheter från förvaret till årsdoser. Detta tillvägagångssätt utgår från det faktum att utsläpp från förvaret i allmänhet varierar relativt långsamt under en interglacial.

Resultat av radionuklidtransport och dos för riskbidragande scenarier

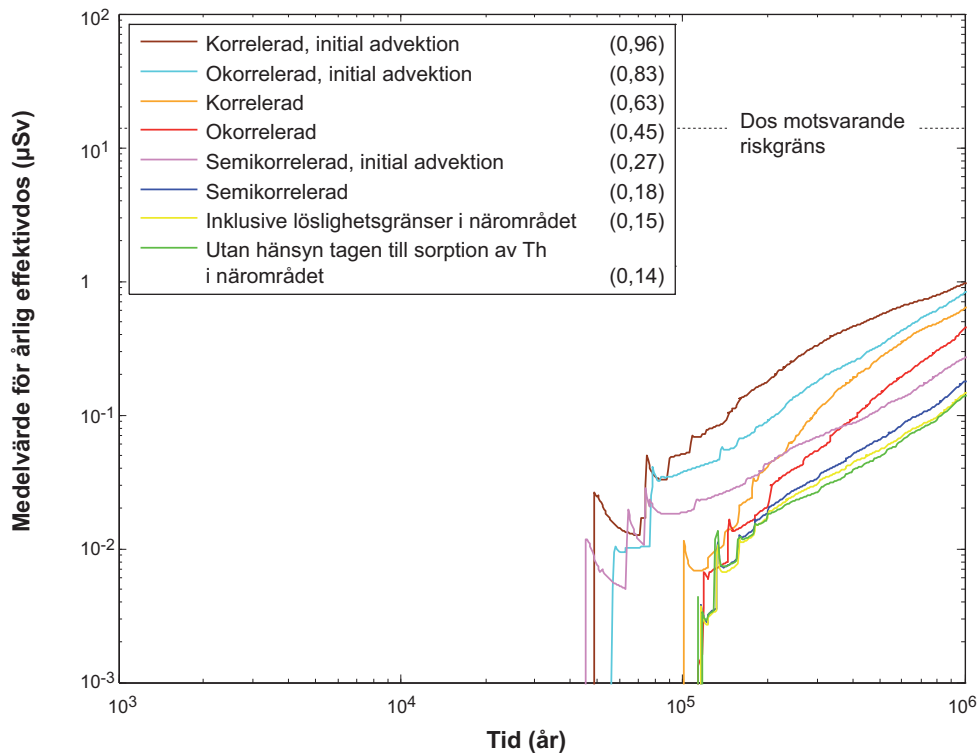
Enligt analysen av inneslutningspotential finns det två scenarier för vilka kapselbrott inte kan uteslutas: korrosionsscenarioet och skjuvscenarioet.

För korrosionsscenarioet beaktas en uppsättning fall som täcker in det intervall för den möjliga omfattningen av korrosionsbrott som erhöles vid analysen av inneslutningspotentialen. De beräknade medeldoserna är minst en storleksordning lägre än den dos som motsvarar SSM:s riskgräns, se figur S-10. I de mest pessimistiska varianterna av detta scenario sker det första kapselbrottet – och således det första utsläppet – efter omkring 50 000 år. I dessa varianter är den genomsnittliga dosen efter 100 000 år omkring två storleksordningar lägre än föreskrifternas riskgräns och omkring en storleksordning lägre än gränsen efter en miljon år.

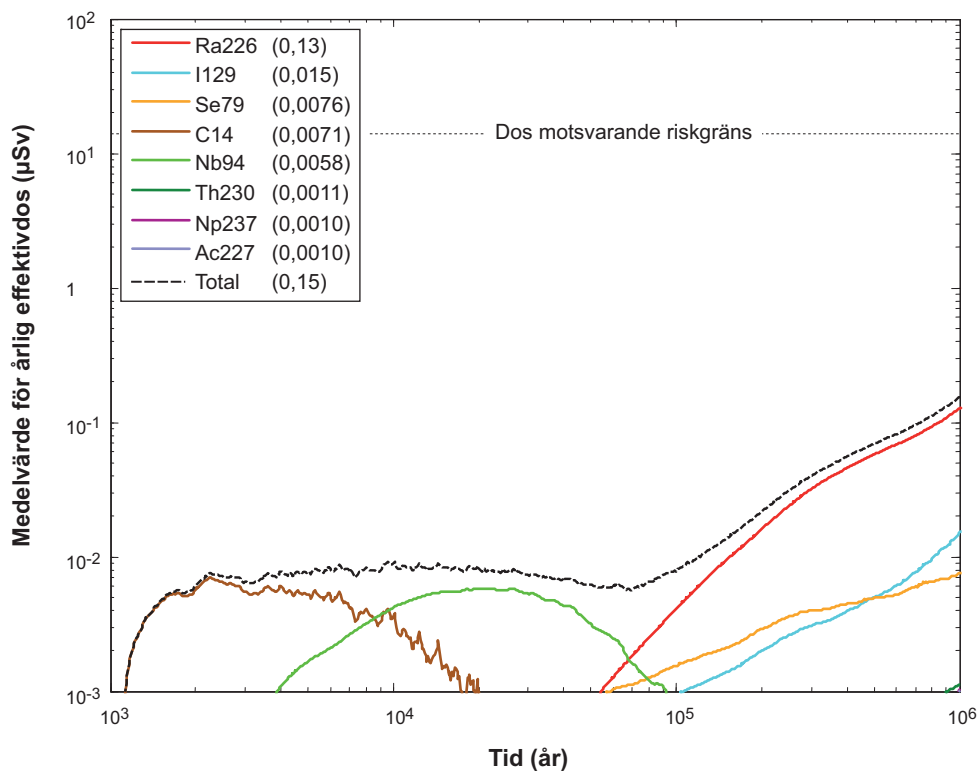
Eftersom flera beräkningsfall, alla med olika omfattning av kapselbrott i korrosionsscenarioet, fördes vidare från analysen av inneslutningspotential varierade de beräknade medeldoserna inom en storleksordning. Även fall som täcker osäkerheter i transportförhållanden i närområdet har en liknande begränsad inverkan på beräkningsresultaten.

För skjuvscenarioet används i konsekvensberäkningarna de pessimistiskt härledda sannolikheterna för kapselbrott till följd av skjuvlast från analysen av inneslutningspotential. Den beräknade genomsnittsdosen för de första 1 000 åren är försumbar jämfört med den dos som motsvarar föreskrifternas riskgräns. Mellan 1 000 och 100 000 år är den beräknade genomsnittsdosen omkring tre storleksordningar under gränsen. Därefter ökar genomsnittsdosen så att den efter en miljon år är omkring två storleksordningar under gränsen, se figur S-11.

Känslighetsanalyser av resultaten från den probabilistiska beräkningen visar att indatosäkerheter för bränsleupplösningshastigheten, för tidpunkten för kapselbrott och för det flödesrelaterade transportmotståndet i geosfären svarar för största delen av osäkerheterna i den beräknade dosen i ett givet beräkningsfall. Ytterligare osäkerheter hanteras genom att man formulerar varianter av beräkningsfall som exempelvis avser olika konceptuella hydrogeologiska modeller eller genom att man gör pessimistiska antaganden avseende exempelvis sannolikheten för kapselbrott till följd av skjuvlast. Inverkan av samtliga betydande osäkerheter på den beräknade risken utvärderas utifrån resultatet av risksummeringen. De möjligheter som finns att minska osäkerheterna diskuteras som återkoppling från analysen.



Figur S-10. Sammanfattning av medelvärdet av den årliga effektivdosen från fjärrområdet för alla probabilistiska beräkningar som utförts för korrosionsscenarioet. De maximala doserna visas inom parentes i μSv . I teckenförklaringen hänvisar "korrelerad", "okorrelerad" och "semikorrelerad" till tre varianter av den hydrogeologiska modell som används i SR-Site. De tre fallen med "initial advektion" ger den övre gränsen för de möjliga konsekvenserna av buffererosion.



Figur S-11. Probabilistiskt beräknade konsekvenser i händelse av skjuvbrott för perioden mellan 1 000 år och en miljon år. Teckenförklaringen är ordnad efter sjunkande högsta medelvärdet av årlig effektivdosis under en miljon år (anges inom parentes i μSv).

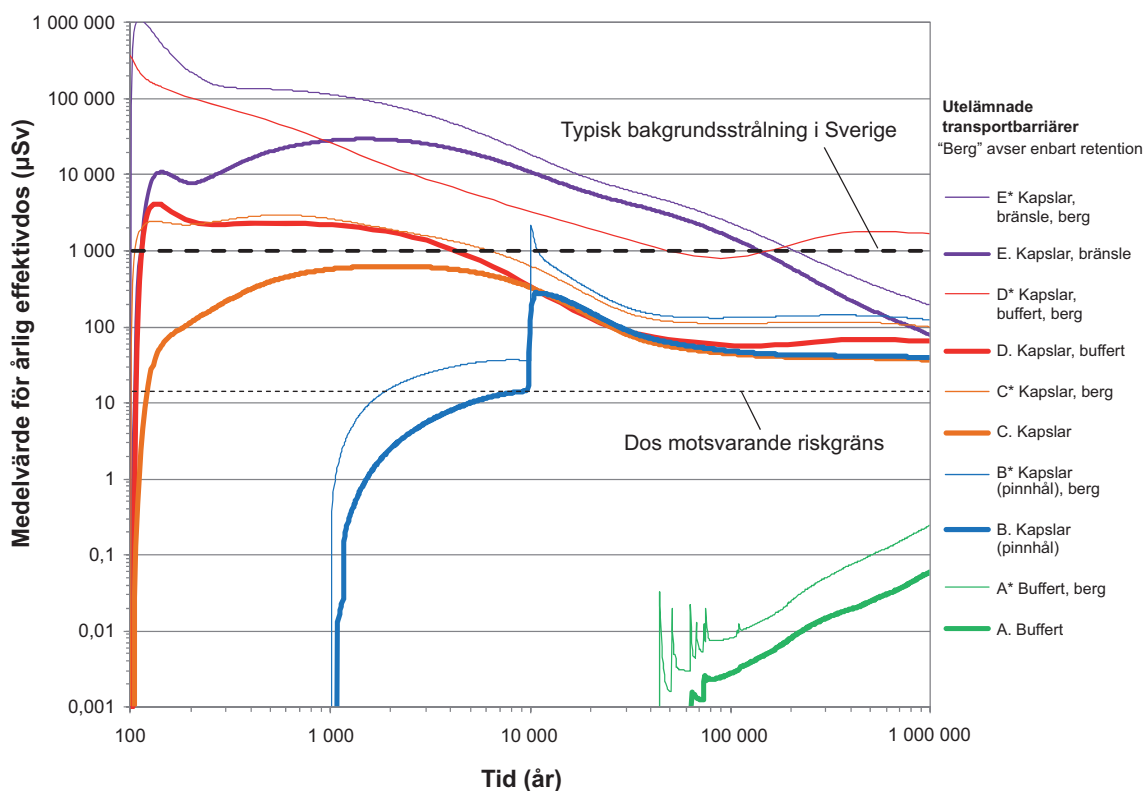
Beräkningsfall med hypotetisk fullständig förlust av barriärfunktioner

För att illustrera barriärernas funktion och som ett underlag för diskussionen om KBS-3-förvarets säkerhetskoncept har även en uppsättning beräkningsfall med hypotetiska, fullständiga förluster av barriärfunktioner analyserats. Följande fall med skadade barriärer har antagits:

- Det saknas sådana mängder buffert att det uppstår advektiva förhållanden i samtliga 6 000 deponeringshål redan från början.
- Ett initialt litet hål (benämnt pinnhål) i kopparhöljet hos samtliga 6 000 kapslar.
- En stor initial öppning i kopparhöljet och i segjärnsinsatsen hos samtliga 6 000 kapslar.
- En kombination av fall A och C, dvs en initial stor öppning i samtliga kapslar och advektiva förhållanden till följd av buffertförlust i samtliga 6 000 deponeringshål.
- En kombination av fall C och antaganden om snabb bränsleupplösning och snabb korrosion av metalldelar. En stor initial öppning i varje kapsel kombineras med antagandet om fullständig bränsleupplösning och metallkorrosion inom bara 100 år.

Förlust av berggrundens förmåga att fördröja radionuklider kombineras med vart och ett av de fem fallen, vilket totalt ger tio utsläppssituationer. Fallen utan retention i geosfären benämns A* till och med E*.

I alla dessa fall antas det att återfyllningen och förslutningen är på plats och fungerar som förväntat. Alla egenskaper hos berggrunden – förutom de som är förknippade med retention – förutsätts vara oförändrade. Det gäller exempelvis grundvattenflödet i närområdet, som i allmänhet är litet och där bara en sjättedel av alla deponeringshål står i kontakt med en vattenförande spricka. I närområdet är även grundvattnets sammansättning stabil och gynnsam. Löslighetsgränser används för radionuklider i kapselns tomvolym endast i de fall då bufferten finns kvar. Detta är samma tillvägagångssätt som användes i analyserna av korrosions- och skjuvscenarierna. Den totala dosen för vart och ett av fallen visas i figur S-12.



Figur S-12. Resultat av stiliserade fall för att illustrera förlust av barriärfunktioner. Notera att utelämnande av den barriär som "berggrunden" utgör i dessa fall endast avser utelämnande av retention av radionuklider i sprickor. Den gynnsamma låga flödes hastigheten på förvarsdjup och de gynnsamma geokemiska förhållandena antas fortfarande gälla.

Efter omkring 10 000 år är doserna för nästan samtliga fall lägre än den dos som orsakas av den normala bakgrundsstrålningen i Sverige. De enda undantagen är det fall där retentionsegenskaperna i kapseln, bufferten och bergrunden ignoreras (fall D*) och det fall där det förekommer snabb upplösning av bränslet i kombination med kapselbrott (fall E och E*). Det låga vattenflödet och den gynnsamma grundvattenkemin i berget samt närvaron av återfyllningen och förslutningen av förvarstunneln skyddar därför i hög grad mot ett bränsle för vilket upplösningshastigheten är oförändrad.

Ytterligare resultat

Ytterligare resultat från beräkningarna av utsläpp av radionuklider och dos presenteras i avsnittet med slutsatser nedan. Här ingår bland annat en summering av riskbidragen från de scenarier som inte kunde uteslutas från analysen, beräkningar av doser till levande organismer förutom människor, beräkningar som utförts med alternativa, förenklade analytiska modeller och användning av alternativa säkerhetsindikatorer.

S3.12 Steg 10: Ytterligare analyser och stödjande argument

Översikt

I detta steg av analysen görs ytterligare ett antal analyser för att fullborda säkerhetsanalysen:

- Analyser av scenarier som rör framtida mänskliga handlingar.
- Analyser för att påvisa optimering och användning av bästa möjliga teknik, BAT.
- Verifiering av att de FEP som uteslutits under tidigare delar av analysen har försumbar betydelse i ljuset av den genomförda scenarie- och riskanalysen.
- En kort redovisning av tidsperioden bortom en miljon år.
- Användning av naturliga analogier.

Nedan ges endast resultat från den första punkten. Vissa resultat från de övriga punkterna sammanfattas i slutsatsavsnittet i denna sammanfattning.

Scenarier relaterade till framtida mänskliga handlingar

I enlighet med allmänt accepterade principer och SSM:s föreskrifter är de framtida mänskliga handlingar som studeras begränsade till globala föroreningar och handlingar som utförs efter förslutningen av förvaret, sker vid eller nära förvarsplatsen, är oavsiktliga och försämrar säkerhetsfunktionerna hos förvarets barriärer. För detta används ett systematiskt tillvägagångssätt som omfattar en teknisk analys, en analys av samhällsfaktorer, ett urval av representativa fall och slutligen scenariebeskrivningar och konsekvensanalyser av de fall som valts. De viktigaste slutsatserna från dessa analyser sammanfattas nedan.

- För ett stiliserat fall där borrhälspersonal oavsiktligt borrar igenom en kapsel och en del av det använda bränslet förs upp till ytan drogs följande slutsatser:
 - Doshastigheten som en individ bland borrhälspersonalen skulle utsättas för under tiden han eller hon arbetar i det mycket kontaminerade området kan vara relativt hög. Om borrhälsarbetet sker omkring 5 000 år efter förslutningen av förvaret kommer emellertid doshastigheten att ha minskat till ett värde som understiger bakgrundsstrålningen.
 - Den totala dos som fås om borrhålet används som brunn 300 år efter förslutningen av förvaret understiger bakgrundsstrålningen.
 - Den högsta totala årliga effektivdosen från utnyttjande av mark för jordbruksändamål, vilken kontaminerats med bränslerester, är mycket hög. Det noteras dock att beräkningarna utförts med ett antal förenklade pessimistiska antaganden.
- Inverkan av ett öppet undersökningsborrhål på grundvattenflödet och på återfyllningens långsiktiga egenskaper i deponeringstunneln i närheten av borrhålet bedöms som försumbara.
- En tunnel som byggts i den övre delen av berggrunden skulle inte påverka grundvattenflödet på förvarsdjup på ett sådant sätt att existensen av tunneln skulle innebära att slutförvarets säkerhetsfunktioner hotas.
- Exploatering av de potentiella mineralresurserna i närheten av Forsmark skulle inte påverka förvarets säkerhetsfunktioner.

- Om förvaret överges utan att alla delar av det återfylls och försluts kan, enligt analysen av ett stilerat FHA-scenario, innebära att återfyllningen i deponeringstunneln förloras och att säkerhetsfunktionerna för inneslutning bryts för de deponeringshål som ligger nära deponeringstunnlarnas mynning. Utan återfyllning i delar av systemet förväntas inga kapselbrott ske under den första perioden med tempererade förhållanden. Under den efterföljande nedsningsperioden, som förväntas pågå fram till 66 000 år efter nutid, kan korrosionsbrott inträffa och den beräknade årliga effektiva dosen från radionuklider i de otäta kapslarna överstiger föreskrifternas riskgränser. Med tanke på de stora osäkerheter och försiktiga antaganden som görs i analysen, kan resultatet betraktas som en förenklad illustration av möjliga följder. Resultatet pekar på nödvändigheten av att korrekt återfylla och försluta förvaret.

S4 Slutsatser från SR-Site

Som nämndes i början är den huvudsakliga slutsatsen i säkerhetsanalysen SR-Site att ett KBS-3-förvar som uppfyller kraven för långsiktig säkerhet kan byggas i Forsmark.

Denna slutsats har kunnat dras eftersom de gynnsamma förhållandena i Forsmark säkerställer att KBS-3-förvarets barriärer är långsiktigt hållbara. Framför allt är kopparkapslarna och dess segjärnsinsatser tillräckligt motståndskraftiga mot de mekaniska och kemiska påfrestningar de kan komma att utsättas för i förvarsmiljön.

De utförliga analyser som gjorts på ett systematiskt sätt i enlighet med en fastlagd metodik visar att kapselbrott är sällsynta i ett tidsperspektiv på en miljon år. Även med flera pessimistiska antaganden om skadliga fenomen som påverkar bufferten och kapseln, är kapselbrott så sällsynta att deras försiktigt modellerade radiologiska konsekvenser hamnar betydligt under en procent av den naturliga bakgrundsstrålningen.

S4.1 Översikt av resultaten

Uppfyllande av föreskrifternas riskkriterium

Ett förvar i Forsmark bedöms uppfylla föreskrifternas riskkriterium

De analyser som utförts i SR-Site visar att ett KBS-3-förvar i Forsmark som byggs i enlighet med nuvarande referensutformning, kommer att uppfylla det riskkriterium som SSM lagt fast.

Sannolikheten för kapselbrott under de första tusen åren bedöms som försumbar

Det genomsnittliga antalet kapselbrott till följd av jordskalv under de första tusen åren beräknas pessimistiskt till storleksordningen ett på hundratusen. Alla andra typer av kapselbrott bedöms som uteslutna för denna period. Dessutom visar analyserna av förslutningsproceduren för kapslarna att samtliga kapslar kommer att vara täta vid deponeringstillfället.

I ett tidsperspektiv på en miljon år finns ett litet riskbidrag från kapselbrott som orsakar av ökad korrosion till följd av bufferterrosion

Buffertförlust skulle kunna förekomma om bufferten exponeras för vatten med låg jonstyrka, men omfattningen av detta är osäker. Förvarsplatsen vid Forsmark har stor potential att kunna upprätthålla tillräckligt hög jonstyrka på förvarsdjup under en glaciationscykel. Förlust av buffertmaterial i en sådan omfattning att advektiva förhållanden uppstår i deponeringshålet kan emellertid inträffa i ett tidsperspektiv på 100 000 år för normalt färre än tio deponeringshål med höga flödes hastigheter.

Advektiva förhållanden i ett deponeringshål kommer att påskynda kapselkorrosionen. Under ett tidsperspektiv på en miljon år kan detta leda till ett fåtal kapselbrott för de mest pessimistiska tolkningarna av de hydrauliska egenskaperna vid förvarsplatsen i Forsmark och med försiktiga antaganden om koncentrationer av korroderande ämnen och acceptanskriterier för ett deponeringshål.

Med pessimistiska antaganden om bufferterrosion, kopparkorrosion och förhållanden för radionuklidtransport beräknas den radiologiska risken från sådana kapselbrott pessimistiskt till omkring 1/100 av föreskrifternas riskgräns under ett tidsperspektiv på 100 000 år och omkring 1/10 av föreskrifternas riskgräns under ett tidsperspektiv på en miljon år.

I ett tidsperspektiv på en miljon år finns ett litet riskbidrag från kapselbrott till följd av jordskalv
Kapselbrott till följd av stora jordskalv kan inte kategoriskt uteslutas. De probabilistiska analyserna tyder på att det i genomsnitt skulle behövas avsevärt längre tid än en miljon år innan ens ett sådant kapselbrott skulle inträffa.

Bidraget från jordskalv till den radiologiska risken beräknas pessimistiskt vara lägre än 1/100 av föreskrifternas riskgräns i ett tidsperspektiv på 100 000 år och lägre än 1/10 av riskgränsen i ett tidsperspektiv på en miljon år.

Frågor relaterade till förändrade klimatförhållanden

Åtskilliga frågor för långsiktig säkerhet är förknippade med framtida glaciala, periglaciala eller varmare klimatförhållanden. Ett antal slutsatser beträffande effekterna av sådana förhållanden har dragits.

Frysning av bufferten kan uteslutas – även för mycket pessimistiskt valda klimatförhållanden

Enligt analyserna kan frysning av bufferten uteslutas även för de mest pessimistiska klimatförhållanden som beaktas, vilka inkluderar de stora osäkerheter som är förknippade med den framtida klimatutvecklingen. Även frysning av återfyllningsmaterialet i deponeringstunneln eller av ett vattenfyllt hålrum i en eroderad buffert kan uteslutas för den mest pessimistiska klimatutvecklingen i Forsmark.

Kapselbrott till följd av isostatisk last kan uteslutas – även för mycket pessimistiskt valda klimatförhållanden

Enligt analyserna kan kapselbrott till följd av isostatisk last uteslutas för de svåraste framtida glaciala förhållanden som beaktas och som grundas på utvecklingen av glaciationer under de senaste två miljoner åren.

Nedträngning av syre är mycket osannolikt – även för mycket pessimistiskt valda klimatförhållanden – och konsekvenserna är små

Nedträngning av syre till deponeringshål kan uteslutas, förutom vid de situationer med ökat flöde som inträffar i samband med den osannolika händelsen att en isfront tillfälligt står stilla över förvaret i kombination med flera andra pessimistiska antaganden. Även om detta skulle inträffa är konsekvenserna i form av kapselkorrosion små.

Förvarssäkerheten under en förlängd period med varmt klimat före nästa glaciala period bedöms som jämförbar med säkerheten vid ett klimat som inte drabbas av effekterna av global uppvärmning

En förlängd period med varmt klimat (global uppvärmning på grund av ökad växthuseffekt) kan leda till att ett förvar i Forsmark i ökad grad utsätts för utspätt grundvatten och därmed till ökad bufferterosion. Den beräknade riskens känslighet för effekterna av en sådan klimatförändring är emellertid låg.

Det är troligt att förekomsten av stora jordskalv ökar under isavsmältningen och denna effekt fördröjs således av en förlängd inledande period med varmt klimat.

Andra frågor relaterade till barriärernas funktion och utformning

Referensutformningen, som utgör grunden för det analyserade initialtillståndet i SR-Site, ger ett säkert förvar i Forsmark

Eftersom analyserna i SR-Site visar att föreskrifternas riskkriterium är uppfyllt, dras slutsatsen att förvaret blir säkert om den analyserade referensutformningen realiserar genom de utvalda produktions- och kontrollrutinerna. Slutsatser kring utformningsfrågor av betydelse för den långsiktiga säkerheten ger återkoppling till vidareutvecklingen av utformningen.

Det är avgörande att undvika deponeringspositioner som skärs av stora eller starkt vattenförande sprickor. Den låga frekvensen av vattenförande sprickor medger att sådana sovringskriterier kan tillämpas effektivt.

De riskbidragande faktorerna i SR-Site är förknippade med förekomsten av stora och/eller starkt vattenförande sprickor som skär deponeringshålen. Detta gäller för erosion av bufferten samt påverkan från stora jordskalv i närheten av förvaret. Dessa två fenomen är förknippade med kapselbrott till följd av kapselkorrosion respektive sekundära skjuvrörelser i berggrunden. Eftersom dessutom

retentionen är liten i stora, starkt vattenförande sprickor får i allmänhet sådana funktionsfel stora konsekvenser. Sådana sprickor behöver följaktligen identifieras och undvikas.

I SR-Site görs försiktiga antaganden beträffande sannolikheten för att sådana sprickor ska förekomma och beträffande kriterier för att sovra deponeringshål. Resultaten av analysen är känsliga för dessa antaganden. Det är viktigt att fortsätta utveckla acceptanskriterier för deponeringshål som en grund för framtida analyser. Detta måste studeras både genom simuleringar av effekterna av potentiella kriterier och genom att undersöka hur genomförbara kriterierna är.

Värmen från kapseln kommer troligen att spräcka berget i deponeringshålets väggar, vilket skulle öka in- och uttransporten av lösta ämnen, men detta påverkar risken endast i liten omfattning

Termiskt inducerad spjälkning runt deponeringshålen i Forsmark kan inte uteslutas och kan ha en avsevärd inverkan på massutbytet mellan det flödande grundvattnet och bufferten, så länge diffusion är den dominerande transportmekanismen i bufferten. För diffusiva förhållanden är emellertid marginalen till kapselbrott avsevärd, även om spjälkning pessimistiskt antas för alla deponeringspositioner i Forsmark. Om det råder advektiva förhållanden i bufferten är effekterna av spjälkning mycket mindre uttalade, eftersom den inte bidrar i någon större omfattning till den redan ökade flödes hastigheten. Följaktligen är den totala effekten på den beräknade risken liten.

Betydelsen av en sprängskadad zon i berggrunden runt deponeringstunnlarna som transportväg för radionuklider är begränsad

Betydelsen av en sprängskadad zon (eng. Excavation Damaged Zone, EDZ) runt deponeringstunnlarna är begränsad jämfört med andra transportvägar för radionuklider. Mycket pessimistiska antaganden med avseende på EDZ i förhållande till referensmetoden för utsprängning skulle kunna påverka omfattningen av kapselkorrosion för advektiva förhållanden.

Detta bekräftar att den skonsamma utsprängning som föreskrivs som referensmetod i referensutformningen är lämplig.

I de flesta deponeringshål kommer grundvatten inte att nå kapseln på tusentals år, tack vare de gynnsamma egenskaperna hos berggrunden i Forsmark

Tiderna för vattenmättnad av både återfyllningen och bufferten kommer troligen att variera från några tiotals år till flera tusen år som en följd av berggrundens egenskaper (matrisens hydrauliska konduktivitet samt förekomsten av och egenskaper hos sprickor) i Forsmark. Majoriteten av deponeringshålen skärs inte av vattenförande sprickor, vilket ger en långsam mättnad (med vatten från deponeringstunneln och bufferten) och ett långsamt inflöde av exempelvis korroderande ämnen i grundvattnet både under omättade och mättade förhållanden. Även under den omättade fasen kommer transporten av korroderande ämnen genom bentoniten att vara mycket begränsad och domineras av diffusion. Under mättnadsskedet kan den mikrobiella aktiviteten vara förhöjd innan svälltrycket har etablerats. Detta har emellertid liten betydelse, eftersom korrosionen begränsas av massbalans och transport. Eftersom grundvattenflödet under mättnadsskedet är riktat mot deponeringshålen, kan ingen erosion av bufferten förekomma under den omättade perioden. Effekterna av den omättade perioden på de geokemiska, mineralogiska och termiska förändringarna av buffertens egenskaper har undersökts i SR-Site. De har befunnits vara små och inte ha någon betydande inverkan på den långsiktiga funktionen.

S4.2 Uppfyllelse av föreskriftskrav

Inledning

Det här avsnittet sammanfattar de viktigaste aspekterna när det gäller att påvisa att tillämpliga föreskrifter från SSM uppfylls. En fullständig redogörelse ges i bilaga A till huvudrapporten SR-Site, där föreskrifterna återges och hänvisning görs till de avsnitt i rapporten där varje fråga behandlas.

Säkerhetskonceptet och säkerhetens allokering till systemkomponenter

Som inledning till diskussionen om kravuppfyllelse ges en kort översikt av säkerhetskonceptet baserat på resultat från SR-Site-analysen. Den primära säkerhetsfunktionen i KBS-3-metoden är inneslutning och den sekundära är fördröjning, som mobiliseras om inneslutningsfunktionen inte upprätthålls.

Inneslutning för ett KBS-3-förvar i Forsmark

Inneslutningen ges av ett intakt kopparhölje hos kapseln. Hur denna funktion upprätthålls beror på buffertens funktion att begränsa advektiv transport mellan berget och kapseln samt på gynnsamma mekaniska, hydrogeologiska och geokemiska egenskaper hos berget: i) begränsade flödeshastigheter och en lägsta laddningskoncentration i grundvattnet för att undvika erosion hos bufferten, ii) begränsade flödeshastigheter och låga koncentrationer av sulfid i grundvattnet för att begränsa korrosion, speciellt om bufferten har eroderats och iii) låg sannolikhet för stora sprickor som skär deponeringshålen för att på så vis begränsa den eventuella påverkan på kapseln av stora jordskalv i närheten av förvaret.

Analyserna i SR-Site visar att en överväldigande majoritet av kapslarna har kvar sin förmåga att innesluta även i ett tidsperspektiv på en miljon år. Nedbrytning av barriärsystemet i en omfattning som gör att inneslutningen går förlorad har uppskattats till att i medeltal bara inträffa för färre än en kapsel genom påskyndad korrosion efter att bufferten eroderats. Den andra feltyp som inte kunde uteslutas, den till följd av jordskalvsinducerade sekundära skjuvrörelser i sprickor som korsar deponeringshål, är ännu mindre sannolik. När denna feltyp utvärderas statistiskt, baserat på ett antal pessimistiska antaganden, påverkar den i medeltal betydligt färre än en kapsel. Således bedöms inneslutningen upprätthållas för det stora flertalet av de 6 000 kapslarna under loppet av analysperioden.

Alla säkerhetsfunktioner som har att göra med inneslutning illustreras i figur S-7. Många av dessa funktioner, som kapselns förmåga att motstå isostatiska belastningar eller bergets "förmåga" att tillhandahålla en gynnsam bergtemperatur, bedöms kunna bestå under analysperioden.

Det är också värt att notera att konsekvenserna av en fullständig förlust av den inneslutande förmågan hos alla kapslar minskar med tiden. Vid slutet av analysperioden är den ungefär en faktor 3 gånger större än föreskrifternas riskgräns (hypotetiskt fall C i figur S-12).

Fördröjning för ett KBS-3-förvar i Forsmark

De båda felmekanismer som inte kunde uteslutas påverkar flera barriärer. Kapseln, bufferten och berget påverkas alla, antingen genom en skjuvrörelse med skadliga verkningar eller genom hög flödeshastighet i geosfären. Detta påverkar både erosion och korrosion. Orsaken bakom dessa fel inverkar också på retentionsegenskaperna genom höga flödeshastigheter och i fallet med erosion genom frånvaron av buffert. Därigenom är förvarets fördröjningspotential i dessa särskilda fall begränsad för de kapslar som skadats. I stället uppnås säkerhet främst genom att bränslet löses upp långsamt och i mindre grad även genom att korrosionshastigheten hos metallstrukturdelarna i bränsleelementen är begränsad.

För de kapslar som upprätthåller sin inneslutningspotential utgör fördröjning en latent säkerhetsfunktion under hela analysperioden. En mer generell bild av fördröjningspotentialen för bufferten och berget fås av de analyser av en hypotetisk fullständig förlust av barriärfunktioner som diskuterades i avsnitt S3.11 ovan.

Retentionen i bufferten är viktig under de första 1 000 åren och begränsad när man ser till längre tidsskeden (jämför fallen C och D i figur S-12). Det senare beror på det faktum att den totala dosen på lång sikt domineras av icke-sorberande eller mycket långlivade nuklider. En nuklidspecifik jämförelse avslöjar emellertid att bufferten har en betydande fördröjande funktion för sorberande nuklider också på lång sikt, vilket inte syns i den totala dosen på grund av de icke-sorberande nuklidernas dominans.

Retention i berget spelar en likartad roll. När det gäller totaldos är den viktig för de första 1 000 åren och begränsad i det längre tidsperspektivet (jämför fallen C och C* i figur S-12), detta återigen eftersom totaldosen då domineras av nuklider som berget inte sorberar. En nuklidspecifik jämförelse avslöjar att buffertens retentionsförmåga är stor för sorberande nuklider också på lång sikt, vilket inte syns i den totala dosen på grund av att de icke-sorberande nukliderna dominerar. Även de låga flödeshastigheterna på förvarsdjup spelar en stor roll för att begränsa utsläppshastigheten för radionuklider till berget.

Slutligen visar en jämförelse av t ex fallen E och C att den låga bränsleupplösningshastigheten har stor betydelse för att begränsa den beräknade totaldosen.

Sammanfattning

Sammanfattningsvis är inneslutning den primära säkerhetsfunktionen för KBS-3-förvaret. Analysen visar att inneslutningen upprätthålls effektivt på förvarsplatsen i Forsmark under hela analysperioden, direkt genom kapselns egenskaper och indirekt genom bergets gynnsamma hydrogeologiska och geokemiska egenskaper. Vid de sällsynta fall då inneslutningen bryts, är fördröjning av begränsad

betydelse. Det beror på att felmekanismerna i fråga påverkar flera barriärer, samt på att endast mycket långlivade nuklider återstår när dessa fel inträffar. Som en latent funktion är fördröjningen betydande för en hypotetisk frigörelse av i synnerhet sorberande nuklider under hela analysperioden. För hypotetiska feltyper som bara drabbar kapseln, blir retardationen av sorberande nuklider i buffert och berg avsevärd.

Uppfyllelse av SSM:s riskkriterium

Uppfyllelse under de första 1 000 åren

Av kapselns tre identifierade brottyper, dvs brott till följd av korrosion, skjuvlast och isostatisk last, går det att med stora marginaler utesluta kapselbrott till följd av korrosion och isostatisk last under de inledande 1 000 åren, vilket framgår av referensutvecklingen och analyserna av scenarierna med korrosion och isostatisk last.

Skjuvlaster på kapseln kan förekomma som en följd av stora jordskalvsinducerade sekundära skjuvrörelser i sprickor som skär deponeringshål. Fastän sannolikheten för stora jordskalv är högre under perioder med tektonisk spänning, t ex vid deglaciationer, kan det inte helt och hållet uteslutas att ett jordskalv med skadeverkningar skulle kunna äga rum under de inledande 1 000 åren.

Sannolikheten att en av de 6 000 kapslarna har förlorat sin integritet i slutet av den första 1 000-årsperioden uppskattas till $2,4 \cdot 10^{-5}$. Hypotetiskt skulle det alltså behöva byggas 40 000 förvar med 6 000 kapslar vardera för att ett enda kapselbrott under de första 1 000 åren ska förväntas. Trots denna extremt låga sannolikhet beräknades ett riskbidrag för de första 1 000 åren med resultat att medelårsdosen som högst ligger omkring $0,001 \mu\text{Sv}/\text{år}$, vilket motsvarar en risk på $10^{-10}/\text{år}$. Denna analys baseras på detaljerad modellering av biosfärsutvecklingen och radionuklidtransport i det föränderliga landskapet under de inledande 1 000 åren, i enlighet med vad föreskrifterna från SSM kräver.

Därför dras slutsatsen att det analyserade förvaret i Forsmark uppfyller föreskrifternas riskkriterium under de inledande 1 000 åren efter förslutning.

I hypotetiska fall med initialt defekta kapslar finns det flera egenskaper hos barriärsystemet som ger skydd, av vilka några är oviktiga eller svårare att hävda i längre tidsperspektiv. Med försiktiga antaganden skulle några av dessa egenskaper på egen hand förebygga alla utsläpp under de inledande 1 000 åren med en initialt defekt kapsel. Detta gäller speciellt den tid som det tar för vatten att komma i kontakt med bränsleelementen samt Zircaloykapslingens integritet.

Uppfyllelse för tiden bortom de första 1 000 åren

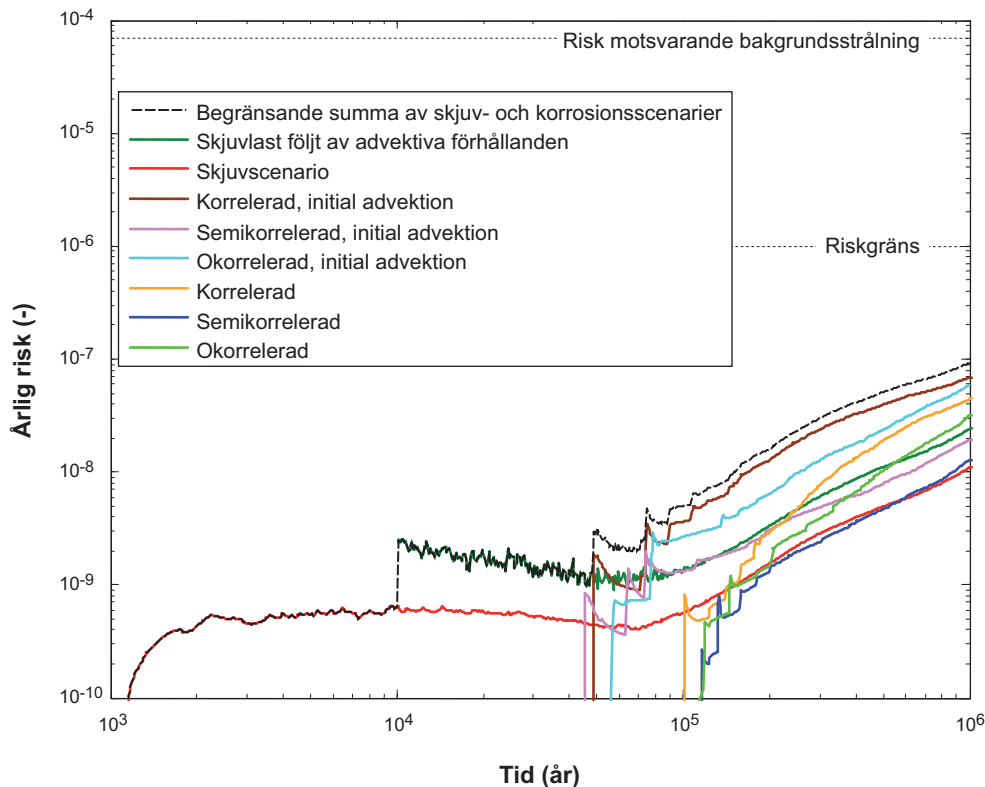
Den gränssättande, streckade kurvan i figur S-13 utgör summan av risken förknippad med skjuvscenariot och med korrosionsscenariot. Varje scenario representeras här pessimistiskt av det beräkningsfall som leder till den högsta risken.

Andra scenarier gav inte några bidrag till den beräknade risken. I redogörelsen för kombinationer av scenarier och fenomen drogs slutsatsen att konsekvenserna av ett skjuvlastbrott följt av bufferterosion behöver analyseras, och det görs i det gränssättande fallet för skjuvscenariot. Alla relevanta riskbidrag bedöms därför vara inkluderade i figur S-13.

Eftersom den begränsande kurvan i figur S-13 ligger under riskgränsen under den en miljon år långa analysperioden är bedömningen att det analyserade KBS-3-förvaret i Forsmark uppfyller föreskrifternas riskkriterium. Det har också visats att riskutspädning inte talar mot denna slutsats.

Dessutom dras slutsatsen att en mer realistisk risk kan ligga var som helst i området under den gränssättande kurvan, ända ner till nollrisk baserat på nollresultaten för de tre fallen utan erosion och en situation då inga kapslar skulle skadas av skjuvrörelser orsakade av stora jordskalv. Detta skulle kunna uppnås om något mindre pessimistiska antaganden kunde försvaras för skjuvscenariot.

Det är också värt att notera att genom användandet av LDF-faktorer för att omvandla utsläpp till doser antas det implicit i riskanalysen att landskapet till vilket utsläppen sker alltid är fullt befolkat, inklusive det objekt där den högsta dosen beräknas uppträda och vid den tidpunkt då detta inträffar. I själva verket förväntas långa perioder av glaciala och vattentäckta förhållanden, då inga doser drabbar människor eftersom platsen inte är beboelig. Någon hänsyn till detta har inte tagits vid risksummeringen. I stället antas ständigt tempererade förhållanden, vilka ger de högsta doserna.



Figur S-13. Riskkurvor, uttryckta som årlig risk för individen. Flera alternativ för korrosionsscenarioet och två för skjuvscenarioet visas. Den gränssättande streckade kurvan utgör summan av kurvan för skjuvbrott följt av advektiva förhållanden (mörkgrön) och kurvan för den variant av korrosionsscenarioet som ger den högsta risken (brun). Risken förknippad med huvudscenarioet täcks in av korrosionsscenarioet, eftersom detta representeras av det semikorrelerade fallet (blå).

Tiden bortom en miljon år

Även om berget, de plastiska och de spröda deformationszonerna i Forsmark alla bildades för åtminstone en miljard år sedan, gör de ökande osäkerheterna beträffande de yttre förhållandena att det inte är meningsfullt att förutsäga utvecklingen av platsen och förvaret för tidsperioder bortom en miljon år.

Det är värt att notera att det hypotetiska fallet i avsnitt S3.11, där alla kapslar uppvisar brott, bufferten är borta och man bortser från retentionen i berget, resulterar i utsläpp som efter en miljon år motsvarar doskonsekvenser som är jämförbara med den naturliga bakgrundsstrålningen. I det fallet bestäms utsläppen av flödet på förvarsdjup och av radionuklidinnehållet, av vilka det senare minskar med tiden och domineras av radionuklider som också uppträder i naturliga malmkroppar.

Avslutningsvis visar geologiska observationer att det finns uranmalmer som är många miljoner, upp till miljarder år gamla. Det ger en indikation på att med stabil tektonik och bevarade reducerande förhållanden i förvaret kan den uranoxid som bränslematrisen består av vara stabil under många miljoner år.

Alternativa säkerhetsindikatorer

Särskilt när det gäller tider långt in i framtiden blir den beräknade risken allt mindre användbar som en indikator på förvarssäkerhet. Enligt SSM:s föreskrifter ska alternativa indikatorer därför också utvärderas. Fyra alternativa säkerhetsindikatorer används i SR-Site. Följande resultat erhöles för centrala korrosionsfallet.

- De högsta aktivitetsutsläppen från geosfären ligger ungefär tre storleksordningar under de aktivitetsbegränsningar som den finska tillsynsmyndigheten STUK föreskrivit.
- Det högsta radiotoxicitetsflödet från geosfären är mer än tre storleksordningar lägre än det referensvärde för radiotoxicitetsflödet från geosfären som EU-projektet SPIN föreslår.

- De beräknade högsta koncentrationerna av radionuklider i Forsmarks ekosystem efter utsläpp av Ra-226 från förvaret är ungefär tre storleksordningar lägre än de uppmätta koncentrationerna av naturligt förekommande Ra-226 i Forsmark.
- De högsta geosfärsflödena, vilka orsakas av Ra-226 som släppts ut från förvaret, är ungefär två storleksordningar lägre än de naturligt förekommande lokala flödena av Ra-226 som uppskattas från platsdata. Skillnaden är större för U-234 och U-238, se figur S-14. Totalutsläppet av alla nuklider från förvaret, omvandlade till dos, är också omkring två storleksordningar lägre än den summerade dosen från flöden som omfattar de tre nämnda naturligt förekommande nukliderna.

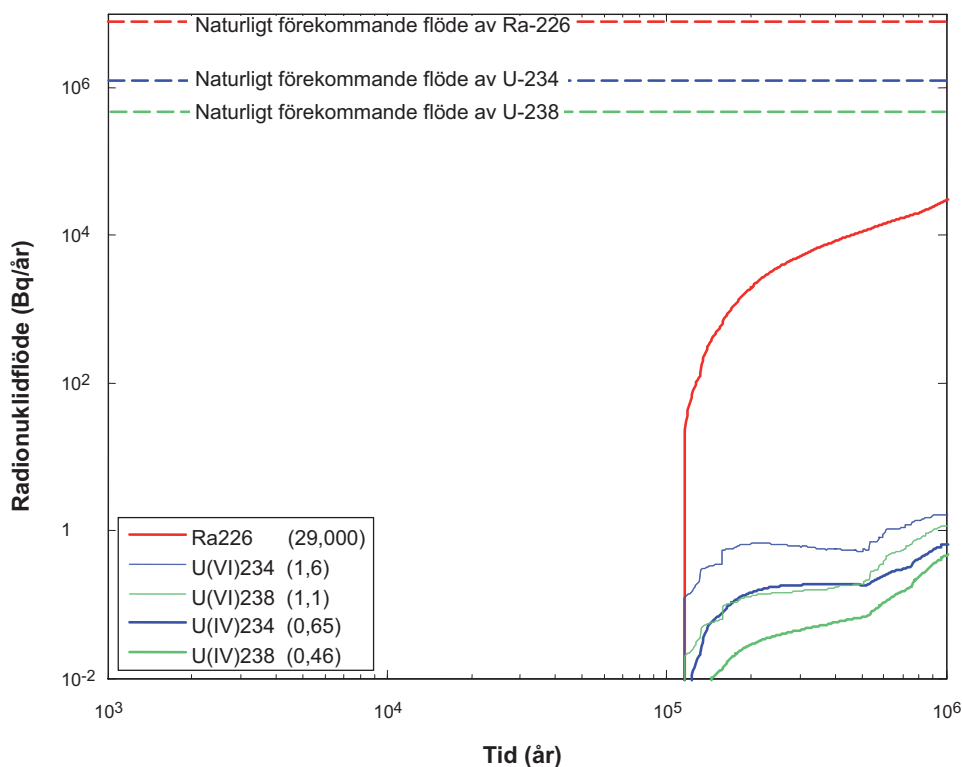
Resultaten är tillämpligt också på andra korrosionsfall, för flertalet indikatorer genom att helt enkelt skala till utsläppet av Ra-226, vilken som mest är en storleksordning högre än den för det centrala korrosionsfallet. Liknande slutsatser dras för skjuvscenariot.

Sammanfattningsvis visar tillämpningen av alternativa indikatorer att utsläpp från förvaret ligger storleksordningar under de referensvärden som antagits för indikatorerna. Det pekar på att framtida radiologiska konsekvenser för människa och miljö som uppstår genom utsläpp från förvaret är försumbara, och att detta gäller oberoende av antaganden i biosfärsmodellen.

Osäkerheter förknippade med riskberäkningen för olika tidsperioder

Osäkerheter som påverkar den beräknade risken i betydande utsträckning har identifierats i korrosions- och skjuvscenarierna. Hanteringen av dessa osäkerheter i SR-Site har sammanfattats tillsammans med hänvisningar till planer för att minska dessa osäkerheter. Flertalet osäkra faktorer har behandlats pessimistiskt, medan några har hanterats med sannolikhetsfördelningar i riskberäkningar där deras fulla osäkerhetsintervall används för att fastställa genomsnittliga årsdoser, det relevanta måttet för att bestämma den beräknade risken.

Kombinationen av pessimistisk hantering av osäkerheter för vilka sannolikhetsfördelningar inte kunde bestämmas med den probabilistiska hanteringen av kvantifierade osäkerheter innebär att den totala risken enligt risksummeringen hävdas stå för en övre gränssättande risk. Eftersom denna övre begränsning ligger under riskgränsen under hela den en miljon år långa analysperioden har det inte identifierats några riskrelaterade osäkerheter som är av kritisk betydelse att lösa.



Figur S-14. Utsläppshastigheter (Bq/år) från fjärrområdet för U-238, U-234 och Ra-226 i det centrala korrosionsfallet jämförda med de naturligt förekommande flödena i Forsmark.

Effekter på miljön av radionuklidutsläpp

Doser för icke-mänsklig biota har beräknats för det centrala korrosionsfallet. De högsta doshastigheterna till organismer i havsvattens-, sötvattens- och landekosystem i Forsmark, både totalt och för de dosdominerande radionukliderna, ligger väl under den doshastighet (10 $\mu\text{Gy/h}$) som rekommenderas som gräns i den sk ERICA-metoden. Därför dras slutsatsen att de radionuklidutsläpp som förutsägs i detta fall inte kommer att leda till några biologiska effekter av betydelse för individer hos funna arter eller för de arter som kan komma att finnas i framtiden på förvarsplatsen. Följaktligen förväntas inga skadeverkningar på populationer, samhällen eller ekosystem. Slutsatsen går att tillämpa på alla andra fall som ingår i risksummeringen.

Användandet av bästa möjliga teknik, BAT

Enligt svensk lag måste en ansökan för ett slutförvar för använt kärnbränsle behandla frågan om bästa möjliga teknik, BAT (eng. Best Available Technique). Eftersom en allmän redovisning av användandet av BAT är en omfattande fråga, som spänner från valet av metod för omhändertagande av kärnavfall till detaljer i den valda metoden, kan och ska endast en begränsad del av denna fråga beaktas i säkerhetsanalysen av den valda metoden. Återkoppling kan ges om huruvida förändringar i den analyserade referensutformningen skulle kunna leda till minskad risk eller till minskade osäkerheter som kan påverka risken. Beträffande aspekter på utformningen där man realistiskt inte kan uppnå någon sådan minskning av risk eller osäkerheten i uppfyllandet av säkerhetsfunktioner hävdar SR-Site att lösningen är optimal och motsvarar BAT. SR-Site analyserar emellertid inte alla tänkbara tekniska lösningar. SKB kommer att fortsätta den tekniska utvecklingen av flera sidor av utformningen för att på så vis förenkla byggande och genomförande, men kommer bara att använda sig av dessa lösningar om de leder till en risk som är jämförbar med eller lägre än den som redovisats i SR-Site. Följande slutsatser gäller beträffande BAT:

- Inga behov av att ändra på *kapselutformningen* har identifierats ur ett säkerhetsperspektiv. Förmågan hos gjutjärnsinsatsen att motstå skjuvlast beror emellertid främst av förekomsten av ytdefekter i insatsen. Medan slutsatsen i **Produktionsrapporten för kapseln** är att den nuvarande referensutformningen för kapseln överensstämmer med de fastslagna konstruktionsförutsättningarna, noteras det även att rigorösa krav på tillverkningen och på OFP (oförstörande provning) behöver ställas. Dessutom har det inte genomförts någon formell analys av om insatserna avsedda för PWR-bränsle uppfyller kriterierna, men PWR-utformningen är robustare till följd av gjutjärnsinsatsens tjockare material.
- Det finns potential för att ytterligare minska risken förknippad med skjuvning genom att ytterligare minska den maximalt tillåtna buffertdensiteten och anpassa produktionen av buffert och deponeringshål till en sådan utformning. Det råder osäkerhet beträffande modelleringen av kolloidbildning och efterföljande erosion av buffertmaterialet och angreppssättet i modelleringen tenderar att vara pessimistiskt, men det finns med nuvarande kunskaper inte något försvarbart sätt att minska denna genom att exempelvis välja ett annat buffertmaterial. Det finns behov av ett fortsatt forskningsprogram om mekanismen för bufferterosion.
- Möjligen går det att förbättra återfyllningens utformning med avseende på hur den installeras. Däremot har det inte identifierats något behov av att ändra utformningen för att ytterligare förbättra dess säkerhetsfunktion.
- Acceptanskriterier för deponering i form av EFPC ger tillräckligt skydd mot skjuvbrott. Det finns dock anledning att genomföra de insatser som planeras i det detaljerade undersökningsprogrammet, eftersom EFPC i onödan innebär att många hål som bara korsas av korta sprickor diskvalificeras. Andra sätt att identifiera stora sprickor skulle kunna öka effektiviteten hos kriteriet utan att tappa säkerhet och även höja säkerhetsnivån, eftersom fokus för de detaljerade undersökningarna skulle ligga på de få sprickor som är av potentiellt intresse. Tillämpning av EFPC är också viktig för att skydda mot korrosionsbrott, och det tycks finnas potential att ytterligare förbättra säkerheten genom att undvika deponeringshål med höga inflöden.
- Det valda förvarsdjupet är lämpligt och ett ändrat djup bedöms inte kunna minska den beräknade risken. En ytligare placering, t ex grundare än 400 m, skulle kunna öka risken eftersom förekomsten av vattenförande sprickor är högre där. Att placera förvaret något hundratal meter djupare ner skulle förmodligen resultera i en risk i samma intervall som råder på valt djup. Placeringar mycket djupare ner skulle innebära ett behov av att beakta ytterligare faktorer, exempelvis mycket höga spänningsnivåer.

S4.3 Återkoppling från analyserna i SR-Site

Konstruktionsförutsättningar

SR-Site visar på en tillräcklig säkerhet för ett förvar i Forsmark som byggts enligt referensutformningen och i överensstämmelse med konstruktionsförutsättningarna. Därför bedöms de flesta av de redan fastslagna konstruktionsförutsättningarna och tillhörande referensutformningar vara ändamålsenliga, medan några bör ses över. De viktigaste föreslagna omarbetningarna av konstruktionsförutsättningarna är som följer:

- De nuvarande konstruktionsförutsättningarna ifråga om isostatisk belastning skulle behöva ses över för att beakta osäkerheten avseende framtida istjocklek.
- Resultaten från SR-Site pekar på att riskbidraget från skjuvlaster på kapseln skulle minskas ytterligare ifall buffertdensiteten vore lägre än maximivärdet 2 050 kg/m³. Erfarenhet från arbetet med buffertdesignen antyder att det skulle vara möjligt att ersätta den övre gränsen med en fördelning av tillåtna densiteter så att bara en liten andel av deponeringshålen skulle ha densiteter i närheten av 2 050 kg/m³. En sådan fördelning kunde också ta hänsyn till halten av montmorillonit i buffertmaterialet.
- Alternativa lösningar till den nuvarande konstruktionen av bottenplattan borde undersökas. Idealt bör bara kapsel och bentonit vara tillåtna i ett deponeringshål.
- Så långt som det rimligen går ska deponeringshål enligt de nuvarande konstruktionsförutsättningarna väljas så att större skjuvning än vad kapseln kan stå emot inte är möjlig. EFPC-kriteriet är ett verktyg för att identifiera sådana stora sprickor, men det kan ersättas eller kompletteras av andra verktyg om dessa visar sig ge jämförbar eller lägre risk.
- Analyserna i SR-Site talar för att den beräknade risken skulle minska om det vore möjligt att identifiera de deponeringshål som har de största vattenflödena under mätade förhållanden. Det föreslås att de nuvarande konstruktionsförutsättningarna revideras så att man undviker deponeringshål med potential för höga vattenflöden under analysperioden. Den praktiska utformningen av regeln kräver vidareutveckling. Ett förslag till regel kan vara att undvika deponeringshål som skärs av hydrauliskt förbundna transmissiva sprickor som kan ge högre inflöde än 0,1 l/min. Detta betyder även att deponeringshål som skärs av sprickor där injekteringsbruk är synligt också skulle behöva diskvalificeras. Kriteriet kan behöva kombineras med att tillämpa EFPC på hela deponeringshålet, men bara i fråga om sprickor som uppvisar potential för grundvattenflöde.
- De olika fall som analyseras i SR-Site bekräftar att den föreslagna tillåtna transmissiviteten på 10⁻⁸ m²/s för en hydrauliskt förbunden EDZ i deponeringstunnlar är rimlig och inte behöver sänkas. Transmissiviteten för en hydrauliskt förbunden EDZ som går över detta värde börjar påverka risken och behöver undvikas.

Detaljerade platsundersökningar

Även om tilltron till förståelsen av förvarsplatsen anses som tillfredsställande och återstående osäkerheter är tillräckligt avgränsade för att medge gränssättande riskuppskattningar, kan förvaret optimeras ytterligare med avseende på effektivitet och riskreducering. Många sådana potentiella förbättringar handlar om möjligheterna att anpassa deponeringstunnlar och deponeringshål till de lokala förhållanden som påträffats i berget, även om några frågor återstår när det gäller egenskaperna hos bergmassan utanför den omedelbara närheten av deponeringsområdena. Det går därför att göra en återkoppling till de detaljerade platsundersökningarna och platsmodelleringen för att prioritera och ytterligare specificera utvecklingsbehoven i befintliga planer.

Planer för det detaljerade undersökningsprogrammet har utvecklats av SKB. Inom ramen för dessa planer framhäver resultaten i SR-Site behoven av att:

- Avgöra den faktiska utsträckningen av påverkanszonen kring de få deformationszoner som kan drabbas av större jordskalv vid förvarsplatsen i Forsmark.
- Utveckla metoder för att gränssätta storleken på sprickor som skär deponeringshål.
- Minska osäkerheten i den geologiska DFN-modellen.
- Utveckla sätt att finna (och sedan undvika) hydrauliskt förbundna transmissiva sprickor som kan orsaka höga inflöden till och omkring deponeringshål.

- Minska osäkerheterna i den faktiska fördelningen av hydrauliska egenskaper mellan vattenförande sprickor.
- Utveckla metoden för kontroll av EDZ liksom att visa på tillförlitligheten för denna metod.
- Karakterisera både bergspänningen och spjälkningshållfastheten hos berget.
- Stärka tilltron till utvärderingar av framtida sulfidnivåer.
- Komplettera data för vissa parametrar när det gäller biosfärmodelleringen.

Allmänt bedöms de planer som presenterats i ramprogrammet för detaljundersökningar som adekvata för dessa frågor.

Forskning om processer av betydelse för långtidssäkerheten

I enlighet med en god säkerhetskultur bör forskning om processer av betydelse för säkerheten drivas vidare, även om nuvarande kunskap är tillräcklig för att styrka den långsiktiga säkerheten. Mer specifikt finns det några frågor som genom SR-Site har visat sig bidra till risk och där grunden för säkerhetsanalysen kan förbättras genom mer FoU.

- För det använda bränslet omfattar sådana frågor fortsatta ansträngningar för att förstå mekanismerna för upplösning av använt bränsle och för att kvantifiera i) inventariet i gränsen mellan spalt och korn och ii) korrosionshastigheterna för avfallens metallkomponenter.
- Att förstå kopparkorrosion är grundläggande för säkerhetskonceptet. Även om tilltron bedöms vara hög är det fortfarande viktigt att fortsätta pågående forskning. För kapseln är det av grundläggande betydelse att förstå deformationen av gjutjärn för att förstärka tilltron till analysen av hur mekanisk belastning påverkar kapseln. Att förstå koppardeformation under yttre tryck är också väsentligt för tilltron till analysen av hur mekanisk belastning påverkar kapseln. Förhållanden som orsakar spänningskorrosion bedöms inte förekomma i förvaret, men grundläggande forskning kring att identifiera de förhållanden som krävs för spänningskorrosion i koppar bör fortsätta.
- Beträffande bufferten bör fortsatt forskning ske om vattentransport, gastransport, kanalbildning/erosion, homogenisering och självläkning, förändringar hos montmorillonit samt om reologiska effekter vid cementering. Utifrån studierna av buffererosion/kolloidfrigörelse har slutsatsen dragits att processen inte enkelt kan försummas och att det finns behov av ett fortsatt FoU-program. Ytterligare studier skulle kunna minska den nuvarande pessimismen i antagandena.
- Mycket av den FoU som har att göra med geosfären täcks in av det detaljerade undersökningsprogrammet, men forskning om vissa av processerna bör fortgå. Forskningsområden av intresse omfattar insatser för att hantera och mildra effekterna av termiskt inducerad spjälkning, fortsatt forskning om kopplade termohydromekaniska processer i berg, analyser av potentialen för jordskalv inklusive fortsatt utveckling av simuleringsverktygen för jordskalv, utveckling av DFN-metodiken, bättre avgränsning av hur sulfidhalterna förväntas utvecklas vid förvarsplatsen i Forsmark, vilken roll mikrobiell aktivitet har när det gäller att upprätthålla en låg och stabil redoxpotential, för sulfidbildning och syreförbrukning, och betydelsen av kanalbildning för transporten av radionuklider.

Det finns också ett antal frågor beträffande biosfären och det framtida klimatet som är av intresse att driva vidare i FoU-programmet.

S4.4 Tilltron till analysresultaten

Analysen i SR-Site stödjer SKB:s ansökan om ett slutförvar, som utgör en avgörande beslutspunkt i SKB:s program för att hantera använt kärnbränsle. Ett uttalande om tilltron till de resultat som tagits fram i SR-Site är därför adekvat. Tilltron till de resultat som tagits fram bedöms som tillräcklig för det förestående beslutet, baserat på följande:

- Kunskapen om förvarsplatsen vid Forsmark från de avslutade undersökningarna från ytan är tillräcklig för att analysera den långsiktiga säkerheten. Platsens säkerhetsrelaterade egenskaper är gynnsamma, och det har inte identifierats några platsrelaterade frågor som behöver klaras ut ytterligare för att demonstrera säkerheten. Tilltron till den platsbeskrivande modellen och platsförståelsen har uppnåtts genom ett systematiskt och kvalitetssäkrat program för platsundersökningar och platsmodellering. Tilltron till platsmodellen analyserades och dokumenterades i detalj i **Platsbeskrivning Forsmark**.

- Det finns en väl etablerad referensutformning med specificerade och genomförbara produktions- och kontrollprocedurer som resulterar i ett initialtillstånd för förvarssystemet med egenskaper som främjar långsiktig säkerhet på förvarsplatsen i Forsmark. De tekniska delarna av förvarssystemet grundar sig på beprövad teknik och etablerade kvalitetssäkringsförfaranden för att uppnå systemets initialtillstånd. Detta dokumenteras systematiskt i **Produktionsrapporterna** och deras underliggande referenser. Exempel på viktiga aspekter av initialtillståndet för de tekniska barriärerna är:
 - a. Kvaliteten hos kopparkapselns förslutningsteknik.
 - b. Kvaliteten hos gjutjärnsinsatsens produktion.
 - c. Buffertegenskaper som densitet och innehåll av montmorillonit och föreningar.
 - d. Egenskaper hos återfyllningen som säkerställer dess förmåga att hålla bufferten på plats och svälla.
 - e. Kvaliteten hos metoderna för att anpassa förvaret till detaljförhållandena under jord och kvaliteten vad gäller tekniken för berguttag.
 - f. Deponeringsteknikens kvalitet.

Det finns potential för ytterligare optimering när denna referensutformning utvecklas och realiseras.

- Den vetenskapliga förståelsen av frågor som är relevanta för den långsiktiga säkerheten är väl utvecklad som en följd av decenniernas forskning inom svenska och andra nationella program och internationella samarbetsprojekt. FoU-insatserna för att förstå förvarets utveckling och säkerhet har lett till förståelse av centrala processer som kopparkorrosion, skjuvning av kapslar och andra potentiella orsaker till kapselbrott, samt av viktiga processer relaterade till fördröjning. I SR-Site har dessa kunskaper systematiskt dokumenterats i flera rapporter på ett format anpassat för säkerhetsanalysen.
- Huvudrapporten i SR-Site och dess understödande dokument har undergått omfattande expertgranskningar. Särskilt den vetenskapliga grunden för säkerhetsanalysen har granskats av erkända experter inom de aktuella ämnesområdena.
- I SR-Site har en fullständig analys av frågor som identifierats som relevanta för den långsiktiga säkerheten genomförts i överensstämmelse med etablerad analysmetodik, som exempelvis inbegriper ett försiktigt förhållningssätt vid hanteringen av osäkerheter.
 - Förståelsen av säkerhet bygger på systematisk identifiering av säkerhetsfunktioner och kriterier för säkerhetsfunktioner.
 - Förvarsutvecklingen har analyserats med ett strukturerat angreppssätt i flera tidsskalor. De processer som identifierats som relevanta har beaktats inom varje tidsskala och säkerheten i systemet, uttryckt som säkerhetsfunktioner, har satts i fokus. Dataosäkerheter och datakvalitet har analyserats och dokumenteras enligt en på förhand bestämd mall. Kvalitetssäkring av modeller och modellering uppnås genom följande procedurer som dokumenteras i **Modellrapporten**. Analysen bryts sedan ner till en uppsättning scenarier för att uttömmande pröva alla möjliga sätt på vilka de identifierade säkerhetsfunktionerna skulle kunna hotas och konsekvenserna av sådana situationer. Ytterligare argument och analyser tillhandahålls enligt avsnitt S3.12.
 - Tilltron till de huvudsakliga resultaten kring radionuklidtransport- och riskberäkningar stärks av det faktum att de ofta kan reproduceras med ett snarlikt resultat med hjälp av enkla, analytiska modeller och med användning av samma indata som de fullt kvalificerade numeriska modellerna.
 - De viktigaste resultaten för radionuklidtransport och riskberäkningar utgör överskattningar, eftersom ett antal pessimistiska antaganden gjordes i analyserna, både när det gäller kapselbrottens omfattning och deras konsekvenser.
- Dokumenterade kvalitetssäkringsrutiner har tillämpats vid utvärderingen av initialtillståndet, vid utvecklandet av platsbeskrivningen och vid analysen av den långsiktiga säkerheten. En kvalitetsplan har upprättats och tillämpats i SR-Site. Denna omfattar de flesta av de rutiner som följts för att utföra de steg som punkterna ovan beskriver. Detta är en del av den övergripande metodik som följts i analysen.

S5 Översikt av SR-Sites huvudrapport

Efter det inledande kapitlet 1 sammanfattar huvudrapporten metodiken för analysen i SR-Site i kapitel 2 och presenterar i kapitel 3 hanteringen av egenskaper, händelse och processer, FEP, som är av vikt för den långsiktiga säkerheten. I kapitel 4 presenteras förvarsplatsen och i kapitel 5 initialtillståndet för det uppförda förvaret. I kapitlen 6 och 7 presenteras planerna och metoderna för att hantera extern påverkan respektive interna processer. Säkerhetsfunktioner och säkerhetsfunktionsindikatorer diskuteras i kapitel 8. Metodiken för värdering och sammanställningen av indata för analysen beskrivs i kapitel 9. Det material som presenteras i de första nio kapitlen används vid analysen av referensutvecklingen i kapitel 10, där fokus ligger på förvarets inneslutningsförmåga. Scenarier för den fortsatta utvärderingen av säkerheten väljs i kapitel 11. De valda scenarierna analyseras med avseende på inneslutningspotential i kapitel 12 och med avseende på fördröjningspotential i kapitel 13 genom utvärdering av radionuklidtransport och dos. Ytterligare analyser till stöd för säkerhetsanalysen presenteras i kapitel 14. Slutsatser och återkoppling ges i kapitel 15.

I kapitel 16 ges en referenslista. Bilaga A är en redogörelse för hur tillämpbara föreskrifter beaktas i analysen. En ordlista över förkortningar och specialisttermer som används i SR-Site återfinns i bilaga B. En topografisk karta över Forsmarksområdet finns i bilaga C.