

Strålsäkerhetsmyndigheten
Att: Georg Lindgren
171 16 Stockholm

Svar till SSM på begäran om komplettering av ansökan om utökad verksamhet vid SFR - hydrogeologi

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har i sin skrivelse till Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, daterad 2016-10-07 begärt förtydligande information om hydrogeologi i säkerhetsanalysen SR-PSU.

SKB översänder härmed begärda komplettering. Leveransen består av detta brev och tillhörande bilaga.

- 1. SSM önskar att SKB förtydligar valet att genomföra en diskret spricknätverksmodellering av bergmassan mellan de deterministiska zonerna, under beaktande den komplexitet det innebär och de osäkerheter som sådan modellering och efterföljande uppskalning är behäftad med.**

SKB:s svar:

SKB har valt att använda samma modelleringsstrategi och metodik i SDM-PSU/SR-PSU som SKB använt i SDM-Site/SR-Site.

SFR och dess planerade utbyggnad är förlagda i sprickigt berg. SKB använder hydrauliska tester i enskilda sprickor (PFL, Posiva Flow Log) och geologisk kartering för att kartlägga flöden och flödesvägarnas (sprickornas) geometri, samt diskret spricknätverksmodellering för att fånga upp den anisotropi som berget uppvisar. Skälet är att grundvattenströmning och transport i sprickigt berg lämpligast modelleras med diskret spricknätverksmodellering av bergmassan (Selroos et al. 2002, Follin et al. 2007, Selroos och Follin 2010).

Uppskalningen av en diskret spricknätverksrealisering (DFN) till en ekvivalent porös medium realisering fångar upp det geometriska riktighetsberoendet (anisotropi) hos varje underliggande DFN-realisering. Multipla realiseringar används för att beskriva den osäkerhet som heterogeniteten i mätdata uppvisar.

- 2. SKB bör förtydliga vad osäkerheterna i kalibreringen har för inverkan på flödesmodelleringens resultat. SKB bör därvid belysa de osäkerheter som uppstår pga. att de verkliga avstånden från borrhålen till strukturer som kontrollerar flöden varierar (SKB R-11-03 figur 5-12 till 5-14), att kontrasten mellan HCD och HRD generellt sätt är låg i centralområdet**

(SKB R-11-03 avsnitt 7.1.2) och att stora stokastiska sprickor som skär det simulerade deponeringshålet kan ha sin mitt utanför modelldomänen.

SKB:s svar:

I SKB:s etablerade metod delas berget in i zoner, vilka modelleras deterministiskt (geometriskt bestämda), och bergmassan utanför, som beskrivs stokastiskt med en DFN-modell. DFN-modellens sprickstorleksfördelning bestäms i en s.k. konnektivitetsanalys, där de deterministiska strukturerna antas utgöra positiva hydrauliska ränder.

En överblick över de osäkerheter som öppnar för alternativa tolkningar i den konceptuella modelleringen ges i Öhman et al. (2012, avsnitt 5.6, se även punkt 6 nedan), där tre alternativa huvudspår lyfts fram (Öhman et al. 2012, tabell 5-2). SKB:s etablerade metod (alternativ 1) ställs emot en hypotes om att den observerade laterala kontrasten i transmissivitet (t ex SKB 2013, figur 7-29) kan associeras till varierande hydrauliska egenskaper hos zoner (alternativ 2). Med andra ord: för att en zon skall kunna agera positiv hydraulisk rand till en spricka under PFL-loggning, så måste zonens hydrauliska egenskaper (transmissivitet/konnektivitet) överstiga sprickans. Syftet med detta alternativ är därför att beakta möjligheten till att zoner kan ha olika roller för konnektiviteten i det flödande spricknätverket, vilket i sin tur skulle påverka kalibreringen av DFN-modellens storleksfördelningar.

Den föreslagna hypotesen i alternativ 2 bygger på ett resonemang, där jämförelse av hydrauliska egenskaper inte väger in storleksskillnaden mellan den enskilda PFL-loggade sprickan och deformationszonen. Deformationszonernas utbredning i modellområdet är påtaglig och förhållandevis väl underbyggd. Bilden av att zoner skulle ha en underordnad roll för storskaligt flöde strider mot den gängse uppfattningen baserat på ett större hydrogeologiskt dataunderlag (SKB 2008). Alternativ 2 bedöms därför vara mindre lämpligt, då det: 1) medför en risk att underskatta zonernas roll och 2) ökar graden av komplexitet i konnektivitetsanalysen. Det bör poängteras att konnektivitetsanalysen är geometrisk och därför i sitt grundutförande inte beaktar det fenomen ("hydraulic chokes") som bedömts utgöra en möjlig förklaring till att uppmätt transmissivitet avtar med avstånd från vattenförande zoner.

Efter en avvägning där hantering av konceptuella osäkerheter ställs mot förväntade konsekvenser i flödesmodelleringen, så bedömdes det tredje alternativet vara det mest rimliga (Öhman et al. 2012, tabell 5-2). Det tredje alternativet ses som en medelväg mellan de andra två, i det att den laterala kontrasten i transmissivitet inte nödvändigtvis kopplas till zoners egenskaper. Istället associeras en avvikande population av PFL-f (de mest transmissiva utanför zoner) till separata geologiska strukturer (SBA-strukturer och unresolved PDZ), vilka lyfts ut ur den stokastiska DFN-modellen för att modelleras deterministiskt/geometriskt konditionerade. Den resterande populationen PFL-f konstateras därefter vara statistiskt homogen (SKB 2013, figur 7-30). Överlag, bedöms alternativ 3 vara ett mer robust tillvägagångssätt.

Vid flödessimulering inom SR-PSU beaktas spricknätverk inom, såväl som utanför, SFR:s regionala modellområde. Däremot bedöms det vara mindre troligt att icke-deterministiska sprickor med mittpunkt utanför det regionala modellområdet kan nå fram till de PFL-loggade borrhål som utgör grunden för DFN-kalibrering, och därmed begränsades volymen för DFN-kalibrering till SFR:s regionala modellområde. Det finns tre motiveringar till detta:

- 1) Det kortaste avståndet från villkorande borrhålssektioner till randen av SFR:s regionaldomän är 400 m (dvs, vid 242 m borrhålsdjup av KFR101), vilket överstiger den antagna maximala sidlängden för stokastiska sprickor på 300 m (dvs, enligt metodiken i den geologiska modelleringen).
 - 2) Den undersökta bergmassan, där borrhålen ligger, omgärdas av deformationszoner (ZFMWNW0001, ZFMNW0805A, ZFMNNE0869) som antas utgöra yttre tektoniska, såväl som positiva hydrauliska ränder för det konnekterade spricknätverket (som jämförelse antas dessa strukturer terminera zonen ZFM871).
 - 3) Förekomst av stora, icke-deterministiska, vattenförande sprickor stöds inte av tunnelkarteringen av befintligt SFR.
- 3. SKB bör förtydliga valet av mätteknik för de hydrauliska testerna. Avsaknaden av packertester bedöms i SKB R-11-03 ge en osäkerhet i fråga om utvärdering av vilken roll så kallade hydraulic chokes har i modellen för HRD (hydraulic rock domain). SKB bör förtydliga om det finns möjlighet att utnyttja de äldre data för att adressera denna fråga eller om det finns andra sätt att begränsa de osäkerheter som avsaknaden av sådana data leder till.**

SKB:s svar:

Vid platsundersökningen inför utbyggnad av SFR användes PFL-metoden eftersom den anses ge bäst underlag för att kunna beskriva bergets flödande spricknätverk (dvs ansatsen med DFN-modellering motiveras i svaret till fråga 1). Fördelen med PFL-metoden är att kontinuerligt flödande anomalier kan identifieras och kvantifieras med tillräcklig precision för att kunna kopplas till enskilda karterade sprickor, och i förlängningen möjliggöra en stokastisk beskrivning av bergmassans heterogena och anisotropa flödesbanor. Flödesloggningen sker efter flera dagars pumpning vilket innebär att de uppmätta anomalierna representerar uthålliga flödesbanor under pseudo-stationära förhållanden. Det historiska datasetet för SFR domineras av kortvariga transienta tester.

Begreppet ”hydraulic choke” syftar till ”flaskhalsar” som begränsar flödet mellan sprickor i ett kompartmentaliserat spricknätverk. Kortvariga hydrauliska tester speglar framförallt bergets lokala egenskaper. Långväga flödesbanor (tex de som mäts i PFL-loggning) påverkas därför förhållandevis mer av förekomsten av flaskhalsar. Således hade en jämförelse mellan pseudo-stationära data (tex PFL-data) och transienta packerdata kunnat utgöra ett möjligt underlag för att analysera förekomsten av flaskhalsar (som gjorts i SDM-Site Forsmark, Follin et al. 2011). Transienta packerdata ger dessutom underlag för att analysera det flödande spricknätverkets lokala konnektivitet (förändringar i flödesregim eller påträffade no-flow ränder inom testtiden, 20 minuter). Dessa analyser kunde inte göras då kompletterande transienta packertester inte utfördes i SDM-PSU (dvs. borrhålen som borrades 2007–2008).

SKB anser att en jämförelse mellan långvariga och kortvariga hydrauliska tester (PFL och packertester) i syfte att utvärdera förekomsten av hydrauliska flaskhalsar måste avse en och samma uppsättning borrhål. Även om en viss skillnad mellan nya PFL-data och de historiska kortvariga testerna kring SFR kan påvisas, vilket skulle kunna tolkas som ett mått på kompartmentalisering av spricksystemet, så överskuggas den tolkningen av osäkerhet kring:

- 1) skillnad i bergets lokala egenskaper mellan befintligt SFR och dess planerade utbyggnad och
- 2) att motsvarande indelning av bergmassan inte kan göras för det historiska datasetet (dvs HRD, SBA och Unresolved PDZs) pga begränsningar i dataunderlaget.

SKB har därför valt att komplettera platsundersökningen med överlappande packertester i KFR27 och KFR105 (Öhman och Odén 2017). Resultaten visar att andelen testade sektioner som indikerar kompartmentaliserat flöde (dvs. förhållande T_{PSS}/T_{PFL} som överstiger 10) är mindre än befarat. Andelen tolkade no-flow ränder i den transienta utvärderingen är cirka 20 %. I KFR27 har 8 av 96 sektioner förhållande T_{PSS}/T_{PFL} som överstiger 10. KFR105 uppvisar en systematisk avvikelse mellan de två datatyperna, med ett medianvärde på kvoten $T_{PSS}/T_{PFL} \approx 4$. De systematiskt lägre värden i PFL data tros bero på ogynnsamma förhållanden då borrhålet loggades under fritt flöde, vilket kan orsaka: 1) turbulens, 2) hydromekanisk stängning, 3) bubbelbildning och 4) underrepresentation av dränerade sprickor.

4. **Parametriseringen av sedimenten på Östersjöns botten är behäftad med osäkerhet (SKB R-11-03 Avsnitt 7.2, SKB R-11-10 avsnitt 3.1) och påverkar beräkningen av inflöden till befintligt SFR som används för att testa den hydrogeologiska modellen (R-11-10 avsnitt 5.4). Därutöver kopplar sedimentens roll till förståelsen för hydrogeologin på platsen med tanke på förklaringen av avtagande inflöden till SFR 1. SSM önskar att SKB förtydligar hur osäkerheter i sedimentens roll och dess parametrisering påverkar modelltesterna och resultaten i hydrogeologiska modelleringen i SR-PSU.**

SKB:s svar:

Simulering av inflöde till befintligt SFR under atmosfäriska förhållanden indikerar att det hydrogeologiska systemet begränsas av en resistans som inte fångats i de historiska borrhålsdata (Öhman et al. 2013). Vid sidan av etablerade faktorer såsom ökade effektivspänningar i berget pga portrycksändringarna, omättad zon och/eller kemisk utfällning i berget närmast SFR har även de ovanliggande sedimentens låga vertikala konduktivitet föreslagits utgöra en möjlig förklaring till det begränsade och successivt avtagande tunnelinflödet. Även om de data som var tillgängliga för att villkora simuleringarna (inflöde och vattentrycksmätningar) inte bedömdes vara fullt tillräckliga för att klargöra/utesluta sedimentens roll i det hydrogeologiska systemet, anses kontakten med havet vara begränsad trots att anläggningen kringgärdas av brantstående deformationszoner.

Ett annat tolkningsalternativ är att det är hydraulisk anisotropi i berget, dvs. att de vattenförande sprickorna företrädesvis är flacka, även inom de brantstående zonerna. Sedimentens roll kvarstår som konceptuell osäkerhet.

I SR-PSU beskrivs jordlagrens (HSD) mäktighet av RLDM-modellen (Brydsten och Strömgren 2013), och parameteriseras enligt SR-Site Forsmark. Moränen är för konduktiv för att begränsa grundvattenflödet i det underliggande berget (dvs in-/utflöde över bergöverytan), och därför förknippas sedimentens roll i det hydrogeologiska systemet framförallt med lokal förekomst av lera. Piren ovanför SFR skapar skyddande förhållanden för lera på havsbotten söder om piren, till skillnad från norr om piren där den eroderar. Baserat på resultat från RLDM-modellen beskrivs havsbotten söder

om piren med ett heltäckande lerlager ovanpå moränen, medan området norr om piren, där utsläppspunkterna ligger (exit locations), modelleras att enbart bestå av morän.

Hur osäkerheten i jordlagrens parameterisering propagerar i modellresultat har utvärderats genom att jämföra basfallet mot alternativa parametersättningar (se HSD cases, Öhman och Odén 2017). Överlag är den simulerade påverkan liten i förhållande till den undersökta förändringen i jordlagrens konduktivitet (att variera konduktivitet med \pm en tiopotens gav en genomsnittlig påverkan på cirka ± 20 % i tunnelflöden såväl som performance measures för partikel-spårning). För de hydrogeologiska förhållanden som antas råda vid SFR (dvs topografi samt antagen parametersättning) tyder simuleringensresultaten på att jordlagrens primära roll är att styra avrinningen, snarare än infiltrationen till underliggande berg. Med andra ord, minskas jordens konduktivitet leder det till mindre avrinning vilket upprätthåller grundvattenytan högre i topografiska höjder. Eftersom moränen fortfarande är mer konduktiv än berget, begränsar det inte infiltrationen till berg nämnvärt, utan leder enbart till högre hydrauliska gradienter i berget, och i sin tur något högre tunnelflöden och snabbare partikelbanor. Det omvända gäller vid ökad konduktivitet i jorden: gradienterna minskar i berget, vilket leder till något lägre tunnelflöden.

5. SKB anger att de äldre data som generellt sett pekar på högre transmissiviteter i de deterministiska zonerna är behäftade med en rad osäkerheter (SKB R-11-03 avsnitt 7.3.2). SSM önskar att SKB förtydligar hur modelleringens resultat skulle påverkas om de äldre data skulle vara rättvisande trots osäkerheterna.

SKB:s svar:

Analys av borrhålsdata indikerar en skillnad mellan nya och gamla borrhålsdata (tex Öhman et al. 2012, figur 6-2e), vilket sannolikt reflekterar den skalningseffekt som härrör från skillnad i testtid (transienta historiska data visar lokala egenskaper relativt PFL-data som representerar pseudo-stationära förhållanden). Även simulering av tunnelinflöde tyder på att storskaligt flöde begränsas av en resistans som inte fångas i de historiska borrhålsdata (Öhman et al. 2013). Tre källor till resistans diskuteras: 1) skin i tunnelvägg, 2) ovanliggande sediment, och 3) skalningseffekt som orsakas av begränsad konnektivitet. Ingen av dessa kan uteslutas, och sannolikt är det en kombination av alla tre som begränsar flödet.

Utöver osäkerhet i data finns även konceptuella osäkerheter i den data-baserade parameteriseringen av zoner (Öhman et al. 2013, bilaga A). Den sammantagna bilden av dataanalys och simuleringar föranledde en omtolkning av hydrauliska data i borrhålsintercept (Öhman et al. 2013, tabell A-1), där olika aspekter beaktades i datahanteringen (t ex. den att kortvariga hydrauliska tester underskattar effekten av hydrauliska flaskhalsar i storskaliga flödesbanor).

I den ursprungliga databaserade parameteriseringen (Öhman et al. 2012, tabell 6-1) är transmissiviteten för nyckelzonerna kring SFR (ZFM871, ZFMNW0805, ZFMWNW0001) mellan 2,5 och 10 gånger högre än i basfallet som användes i SR-PSU (SKB 2013, tabell A6-1). Osäkerheten kring parameteriseringen av dessa zoner har utvärderats genom att jämföra den ursprungliga modelluppställningen mot basfallet i SR-PSU i termer av simulerade s.k. ”performance measures” (tunnelflöden och utsläppspunkter för partiklar). Resultaten visar tydligt att även om storleken på de simulerade

flödena omfördelas något mellan enskilda bergssalar så är nettoeffekten obetydlig (Öhman och Odén 2017), vilket var väntat eftersom ingen av de tre zonerna står i direkt förbindelse med något förvarsutrymme. Med andra ord, totala flöden genom befintlig anläggning, såväl som planerad utbyggnad, är oförändrade.

6. I SKB R-11-01 avsnitt 5.6 föreslås olika strategier för att implementera den konceptuella modellen med hänsyn till trender i PFL-f data. SSM önskar att SKB förtydligar hur osäkerheten i SBA strukturernas utbredning och rumsliga variabiliteten av dess hydrauliska egenskaper har hanterats i modelleringen i SR-PSU och vilken effekt osäkerheterna uppskattas ha på resultaten.

SKB:s svar:

Denna fråga syftar till det vägval som gjordes i den konceptuella modelleringen och kopplar därför delvis till fråga 2.

Flacka deformationszoner saknas av olika tekniska skäl i den deterministiska deformationszonsmodellen. Undantaget är ZFM871, som detekterades med hjälp av borrhningar i samband med att SFR anlades. Tillvägagångssättet för att modellera de ytnära och flacka systemen av vattenförande sprickor som påträffats har varit en central fråga i SDM-PSU, dvs om de ska modelleras deterministiskt eller stokastiskt (Öhman et al. 2012, avsnitt 5.6). Vad som talar emot en stokastisk ansats är: 1) att det finns relativt gott om information som visar på deras utbredning (borrhålsintercept, radarreflektorer och karterad tunnelvägg i SFR), och 2) modelltekniska svårigheter att ta fram en trovärdig stokastisk beskrivning. En obetingad stokastisk DFN-modell försummar tillgänglig deterministisk information som kan ge vägledning för inplacering av förvaret, medan en strikt deterministisk modell underskattar osäkerheten i tolkning, samt riskerar att underrepresentera förekomsten av flacka deformationszoner i mindre väl undersökta områden.

I SDM-PSU valdes därför en modelleringsmetodik baserat på 3 komponenter:

- 1) Deterministisk modellering av 8 så kallade SBA-strukturer, baserat på dataunderlag med övervägande deterministiskt stöd (Öhman et al. 2012, bilaga B). De 8 SBA-strukturerna parameteriserades baserat på interpolation av PFL-data och deras utbredning terminerades lateralt mot brantstående deformationszoner.
- 2) Betingad ("conditional") stokastisk modellering av "Unresolved PDZs", baserat på geometrisk inferens till randstrukturer (Öhman et al. 2012, bilaga A).
- 3) Obetingad ("unconditional") stokastisk DFN-modellering av återstående dataunderlag (efter att ovanstående två komponenter lyfts ut) domineras fortfarande av sprickgrupperna Hz och Gd (Öhman et al. 2012, bilaga G).

SBA-strukturernas utsträckning baseras på terminerande deformationszoner, villkorande borrhålsdata/tunnelkartering samt hydrogeologiskt stöd (så som hydrauliska responser, radar reflektorer, etc.). Storleksmässigt motsvarar de den övre svansen av stokastiska sprickor (de 8 strukturerna varierar mellan 160 m och 430 m, uttryckt som ekvivalent sidolängd av en kvadrat). Den hydrauliska parameteriseringen baseras på interpolation av PFL-data i borrhålsintercept, och varierar mellan cirka 10^{-6} och $3 \cdot 10^{-5}$ m²/s, vilket motsvarar den övre svansen av sprickgrupperna Gd/Hz i DFN-modellens

översta djupintervall ”Shallow”. I termer av sprickintensitet (m^2/m^3) utgör de deterministiska strukturerna 5 % av motsvarande stokastiska sprickor och 50 % av motsvarande unresolved PDZs (dvs sprickgrupperna Gd/Hz i samma storleks- och transmissivitetsintervall).

Den deterministiska modelleringen av SBA-strukturerna baseras på data som delvis även ingår i andra modellkomponenter. Det underliggande datasetet kan delas in i tre kategorier: 1) data som även ingår i deformationszonsmodellen, 2) data som tagits från modellen för Unresolved PDZs, och 3) data som tagits från underlaget till den stokastiska DFN-modellen, men som ändå täcks in av modellens variabilitet (Öhman och Odén 2017). Då de underliggande data delvis täcks in av andra modellkomponenter, betraktas SBA-strukturerna som en kompletterande tolkning, i syfte att utnyttja mer av den tillgängliga deterministiska informationen i närområdet kring förvaren. Osäkerheterna i denna tolkning bedöms alltså täckas av den stokastiska modelleringen av DFN och Unresolved PDZs.

Utbyggnaden har anpassats till att ligga under nivån som främst förknippas med SBA-strukturer (SKB 2013, avsnitt 9.9.2), samt ovanför SBA6, och därför har osäkerheter kring SBA bedömts vara underordnad övriga analyserade aspekter i SR-PSU (Odén et al. 2014). Detta styrks av modellering som visar att, så länge SBA-strukturerna inte skär förvaret, så är deras påverkan begränsad (Öhman och Odén 2017).

Det bör noteras att SKB har utfört riktade interferenstester för att befästa dataunderlaget till den deterministiska modelleringen av SBA-strukturerna (Öhman och Odén 2017). Undersökningarna styrker SBA2-SBA6, både med avseende på deras hydrogeologiska roll i området och med avseende på deras parameterisering. Däremot kan SBA1 inte styrkas av de utförda testerna.

- 7. Flödet genom 2BMA anges vara känsligt för parameteriseringen av zonerna som den skärs av (SKB TR-13-08 avsnitt 7.6). SSM noterar att basfallet för 2BMA förefaller att motsvara fallet med lågt flöde (SKB TR-13-08 figur 7-27). SSM önskar att SKB förtydligar hur SKB har hanterat känsligheten för parametreringen av zonerna som skär 2BMA i beräkningarna i SR-PSU. I svaret bör SKB beakta påverkan av de olika tillstånden för betongdegradering och parameteriseringen av zonerna på flödet genom avfallet.**

SKB:s svar:

Inom SR-PSU hanteras osäkerheter relaterade till parametreringen av bergets hydrauliska egenskaper genom scenariot Högt flöde i berget (*Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR. Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU*, avsnitt 7.6.2). Effekterna tydliggörs i beräkningsfallet CCL_FH (*Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR. Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU*, avsnitt 8.4.2). I den regionala hydrogeologiska modelleringen har 17 bergmodeller inkluderats med olika parameteriseringar av deformationszoner och spricknätverk (Odén et al. 2014, tabell 4-4). Bergmodell 1 som representerar medelflöden i berggrunden har valts för huvudscenariot. I scenariot med högt flöde i berggrunden används hydrogeologiska data för bergmodellen med högt flöde (bergmodell 11) för beräkningarna av radionuklidtransport i geosfären. För förvarsutrymmena har vattenflöden skalats upp till det maximala vattenflödet av alla 17 bergmodeller, för alla tidpunkter \geq år 2500 AD.

Vattenfödet genom 2BMA är långsamt och vattnet leds genom den genomsläppliga återfyllnaden, förbi betongkonstruktionen. Diffusion dominerar masstransporten genom betongen under ungefär 50 000 år, även om vattenflödet förbi betongkonstruktionen ökar till de högsta värden som beräknats (bilaga 1). De degraderingstillstånd som beskrivs för 2BMA i SR-PSU (Höglund 2014) har en begränsad koppling till parametriseringen av bergmodellen.

Ytterligare detaljer rörande ovanstående förtydliganden presenteras i bilaga 1.

- 8. SSM önskar att SKB förtydligar betydelsen som tillmäts vattenmättnadsfasen och dess tidsutdräkt, exempelvis när det gäller belastningar av konstruktionen i 2BMA eller interaktionen mellan vatten och bentonit i slutförvaret. Vattenmättnadstiderna verkar ha uppskattats baserats på resultat från Holmén och Stigsson (2001, SKB R-01-02) som kalibrerades mot inflödesdata. SSM noterar att inflödena till SFR 1 har avtagit sedan dess.**

SKB:s svar:

Betongkonstruktioner i silon och 1-2BMA som utgör tekniska barriärer efter förslutning behöver kunna stå emot de belastningar som de utsätts för dels under drift men även efter förslutning. Ett lastfall som är avgörande för dimensioneringen av barriärkonstruktion i betong är det yttre vattentrycket. Barriärkonstruktionen i betong i silon och 1-2BMA dimensioneras för ett fullt hydrostatiskt vattentryck som uppkommer när bergrummen vattenfylls. Det hydrostatiska vattentrycket uppträder direkt efter förslutning och varierar med hänsyn till barriärkonstruktionernas förläggingsdjup. Eftersom silon och 1-2BMA är placerade på olika djupintervall blir även det dimensionerande hydrostatiska vattentrycket olika för konstruktionerna.

Initialt och under återmättnadsfasen kan händelser inträffa eller har inträffat som påverkar betongbarriärernas täthet och därmed dess förmåga att upprätthålla ett lågt flöde. Initialt räknar SKB med att betongen har en bra täthet och att dess hydrauliska konduktivitet är cirka 10^{-11} m/s. För att ta hand om de processer som kan ske under återmättnaden då olika laster kan verka på betongkonstruktionerna räknar SKB med att inom 100 år efter förslutning så ökar den hydrauliska konduktiviteten till 10^{-7} m/s. Inledningsvis är koncentrationen av radionuklider i vattenfasen låg eftersom nukliderna inte hunnit frigöras från avfallet. Därför har denna period liten betydelse för radionuklidtransport. En process som teoretiskt kan ske under återmättnaden och som kan påverka förvarets funktion är erosion av bentoniten. Bentoniterosion och bentonitens självläkande förmåga har därför studerats i mer detalj.

Nedan diskuteras tid för återmättnad, processer kopplade till bentonit samt processer i avfallet och dess förpackningar som kan ske under återmättnadsfasen.

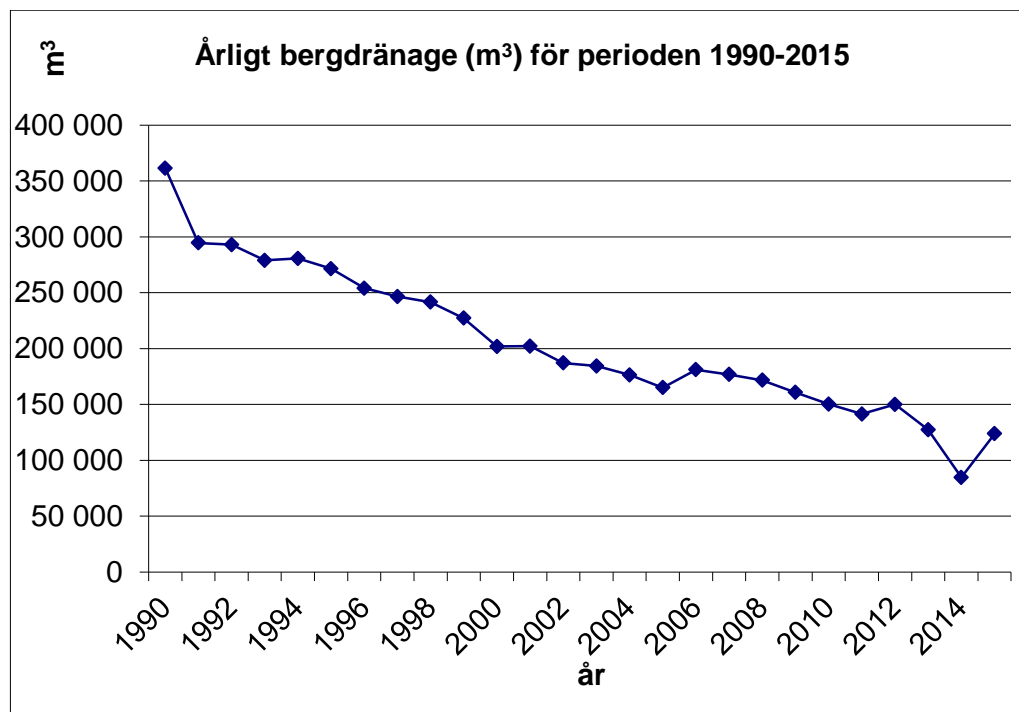
Tid för återmättnad

Förvaret beräknas att återmättas relativt snabbt efter förslutning. De analyser SKB har gjort av hur lång tid det tar att återmätta SFR efter det att dränagepumpningen avslutas visar att återmättnaden är snabb för både bergsalarna och silon. I en studie från 2001 beräknades återmättnadstiden för

silon till cirka 25 år och övriga bergssalar förväntades återmättas på några år (Holmén och Stigsson 2001).

Tillrinningen av vatten till förvaret har minskat med cirka 50 % sedan de tidiga beräkningarna över hur lång tid återmättnaden kommer att ta. Sedan anläggningen togs i drift år 1988 har inläckage av grundvatten minskat med ca 60 % (Hellman et al. 2014). Beräkningar av återmättnadsfasen som presenteras i Holmén och Stigsson (2001) baseras på data över inrinnande vatten från 1997. 1997 var tillrinningen cirka 246 529 m³/år medan mätningar från 2015 visar på en tillrinning på 123 759 m³ (figur 1). Att tillrinningen minskat kan påverka hur lång tid återmättnadsfasen kommer att ta men en minskning av vattenflöden på 50 % tyder ändå på en så kort tidsskala att det inte påverkar de processer som sker efter förslutning.

I en senare studie har återmättnadsfasen för silon uppskattats med numeriska metoder (Börgesson et al. 2015). De viktigaste målen var att: 1) uppskatta tiden från förslutningen till full vattenmättnad i silon, 2) att beskriva mättnadsprocessen i systemet och 3) att studera hur variationer i systemets representation ändrar mättnadsprocessen. Mättnadsförloppet studerades dels med en modell där berget var dränerat, dels en där berget var odränerat. Eftersom berget i det verkliga systemet borde ha egenskaper någonstans mellan dränerat och odränerat, bör den parvisa metoden visa den tidsram inom vilken det verkliga systemet sannolikt kommer att vara mättat. För basfallet beräknades silon att vara helt mättad i intervallet mellan 13 och 53 år. Den största osäkerheten kom från representationen av berget både när det gäller att använda odränerade/dränerade eller torra representationer. Egenskaperna hos siloinnehållet samt toppfyllningen hade också signifikant effekt på det totala mättnadsintervallet. Resultatet från studien bekräftar resultaten från 2001 med en snabb mättnadsperiod.



Figur 1. Läns-pumpat bergdränage från SFR.

Processer i bentoniten

Olika processer kopplade till bentonit i silon, inklusive processer under återmättnadsfasen, har analyserats och undersökts som en del av säkerhetsanalysen SR-PSU. Resultaten från dessa studier presenteras i Börgesson et al. (2015).

Självläkning av erosionsskador har analyserats i Börgesson et al. (2015). När dränering av berget i silon avslutas, kommer vattentrycket öka tills det antingen 1) når det hydrostatiska vattentrycket, vilket kommer att leda till kanalbildning och efterföljande erosion av bentonit, eller 2) det penetrerar bentonitbarriären, vilket kan leda till bildning av vattenfickor. Båda scenarierna kommer att leda till en lokal förlust av bentonit och bildandet av en öppen kanal eller ett hålrum. Hur stort detta hålrum kommer att bli och hur väl det kommer att förseglas av svällande bentonit har undersökts med analytisk modellering av erosionshastigheten tillsammans med finit elementmodellering av självläkningen. Modelleringen resulterade i en ofullständig homogenisering vilken främst orsakades av numeriska problem. Slutsatsen är dock att det kommer att finnas tillräckligt med opåverkad bentonit kvar mellan berget och silon för att uppfylla tätningsfunktionen.

Jonbyte förväntas med tiden att förändra bentoniten från dess installerade tillstånd (natriumdominerat) till dess slutliga form (kalciumdominerat). Laboratedata visar att för de bentonitdensiteter som är aktuella runt silon så leder detta till en betydande minskning av svälltrycket. Från resultaten av den numeriska modelleringen som presenteras i Börgesson et al. (2015) kan man dra slutsatsen att jonbytet kommer att leda till en betydande minskning av spänningarna i bentonitbarriären, jämfört med spänningsnivåerna vid full vattenmättnad före jonbyte. Emellertid visar modelleringsresultaten också att inga signifikanta förändringar i densiteten av bentoniten kommer att inträffa och att den nedåtgående rörelsen av den övre ytan av bentonitbarriären kommer att vara liten (i storleksordningen några få centimeter).

Effekter av eventuell uppbyggnad av gastryck i silon har också analyserats i Börgesson et al. (2015). Laborietester av silobentonit visar att dess beteende vid uppbyggnad av gastryck överensstämmer med andra testade bentonitmaterial. Uppskattningar av gastrycket som krävs för att bara ha diffusiv transport tyder i fallet med icke-funktionella evakueringsrör på att en gasfas kommer att interagera mekaniskt med bentoniten vilket kan leda till gasdriven advektion av radionuklider.

Processer i avfallet och dess förpackningar

Vid förslutning kommer syre att finnas närvarande i förvarssystemet. Aerob korrosion av metaller förväntas därför att vara den dominerande korrosionsprocessen så länge syre är närvarande. Efter det att förvaret har återmättats kan aerob korrosion av metall pågå så länge det finns syre kvar i omgivande vatten. Korrosion av metaller leder dock till förbrukning av syre under den initiala fasen efter det att förvaret återmättats med vatten. Tabell 3-2 i Duro et al. (2012) visar att det förväntas att ta cirka 2 år efter det att förvaret återmättats för att konsumera allt kvarvarande syre i 1BMA och 3 år i silon förutsatt att bara Fe(0) ansätts bidra till syrekonsumtionen.

Återmättnadsfasens tidsförlopp anses inte påverka förvarets utveckling i någon nämnvärd utsträckning vilket beskrivs i SKB (2014, avsnitt 3.3.1 och 4.2.1). Under återmättnadsfasen kommer inträngande grundvatten att trycka undan den luft som finns i förvarsutrymmena. Gastransport av luft kan leda till

att vatten pressas ut ur porstrukturerna. Detta vatten innehåller väldigt små mängder radionuklider då dessa inte hinner diffundera ut från avfallsformen under den tid som återmättnaden tar.

Med vänlig hälsning

Svensk Kärnbränslehantering AB
Projekt SFR Utbyggnad

Peter Larsson
Projektledare

Bilaga

1. *Vattenflöde genom 2BMA – känslighet för parameterisering av bergets egenskaper.* SKBdoc 1564134 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Referenser

Brydsten L, Strömgren M, 2013. Landscape development in the Forsmark area from the past into the future (8500 BC – 40000 AD). SKB R-13-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Börgesson L, Åkesson M, Kristensson O, Malmberg D, Birgersson M, Hernelind J, 2015. Modelling of critical H-M processes in the engineered barriers of SFR. SKB TR-14-27, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Duro L, Grivé M, Domènech C, Roman-Ross G, Bruno J, 2012. Assessment of the evolution of the redox conditions in SFR 1. SKB TR-12-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Follin S, Levén J, Hartley L, Jackson P, Joyce S, Roberts D, Swift B, 2007. Hydrogeological characterisation and modelling of deformation zones and fracture domains. Forsmark modelling stage 2.2. SKB R-07-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Follin S, Ludvigson J-E, Levén J, 2011. A comparison between standard well test evaluation methods used in SKB's site investigations and the generalised radial flow concept. SKB P-06-54, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Hellman H, Vidstrand P, Sassner M, 2014. Hydrogeologisk utredning rörande befintligt SFR och planerad utbyggnad. SKBdoc 1346469 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Holmén J, Stigsson M, 2001. Modelling of future hydrogeological conditions at SFR. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Höglund L O, 2014. The impact of concrete degradation on the BMA barrier functions. SKB R-13-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Odén M, Follin S, Öhman J, Vidstrand P, 2014. SR-PSU Bedrock hydrogeology. Groundwater flow modelling methodology, setup and results. SKB R-13-25, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Selroos J O, Follin S, 2010. SR-Site groundwater flow modelling methodology, setup and results. SKB R-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Selroos J-O, Walker D D, Ström A, Gylling B, Follin S, 2002. Comparison of alternative modelling approaches for groundwater flow in fractured rock. Journal of Hydrology 257, 174–188.

SKB, 2008. Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2013. Site description of the SFR area at Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-PSU Forsmark. SKB TR-11-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2014. Waste form and packaging process report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Öhman J, Odén M, 2017. TD15 Complementary simulation cases in support of SR-PSU. SKBdoc1578373 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Öhman J, Bockgård N, Follin S, 2012. Site investigation SFR. Bedrock hydrogeology. SKB R-11-03, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Öhman J, Follin S, Odén M, 2013. Site investigation SFR. Bedrock hydrogeology – Groundwater flow modelling. SKB R-11-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Dokument som ingår i ansökan

Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR. Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Revisionsförteckning

Ver	Datum	Revideringen omfattar	Utförd av	Kvalitetssäkrad	Godkännare