

Strålsäkerhetsmyndigheten  
Att: Georg Lindgren  
171 16 Stockholm

## Svar till SSM på begäran om komplettering av ansökan om utökad verksamhet vid SFR – säkerhetsanalysmetodik SR-PSU

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har i skrivelse till Svensk Kärnbränslehantering AB, SSM2015-725-43 (daterad 2016-10-10) begärt kompletterande information inom området säkerhetsanslysmetodik i samband med SR-PSU. Begäran omfattade tio frågor.

SKB översänder härmed den begärda kompletteringen. Leveransen består av detta brev och fyra bilagor. I det följande återges de tio frågorna och efter varje fråga ges SKB:s svar, ibland med hänvisning till mer detaljerade utredningar i någon av bilagorna.

- 1. SKB har valt att inte definiera några kvantitativa kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorerna (SR-PSU, kapitel 5). SSM önskar att SKB förtydligar varför detta inte har skett. SSM önskar därutöver att SKB förtydligar hur utvärderingen av tillståndet för säkerhetsfunktionsindikatorerna under analys tiden sker och hur avsaknaden av kvantitativa kriterier påverkar utvärderingen av strålsäkerheten efter förslutning.**

### SKB:s svar:

För att pröva om en säkerhetsfunktion upprätthålls eller inte är det önskvärt att ha ett kvantitativt kriterium mot vilket säkerhetsfunktionsindikatorn kan utvärderas över den tidsperiod som täcks av säkerhetsanalysen. För kärnbränsleförvaret, som bygger på principen total inneslutning, har kvantitativa kriterier för säkerhetsfunktionerna visats vara bra och lämpliga för utvärderingen av strålsäkerheten efter förslutning.

SFR, som bygger på principerna *begränsad mängd långlivade radionuklider och fördröjning av uttransport av radionuklider*, kommer att förändras kontinuerligt och det finns ingen klar skiljelinje mellan en acceptabel och bristfällig funktion för de enskilda barriärerna. För flera säkerhetsfunktioner kan det vara mycket svårt att definiera kvantitativa kriterier. SKB har därför valt att inte definiera kvantitativa kriterier för säkerhetsfunktionsindikatorerna i SFR.

Huvudsyftet med säkerhetsfunktionerna och säkerhetsfunktionsindikatorerna i SR-PSU var att vägleda definitionen av scenarier. Valet av mindre sannolika scenarier gjordes genom att jämföra tillståndet hos säkerhetsfunktionsindikatorerna med vad som antogs i huvudscenariot och alternativa scenarier genererades när säkerhetsfunktionsindikatorernas status avvek från dess status i huvudscenariot.

För SFR finns olika typer av scenarier, en del härleds snarast från ett underförstått kriterium för en säkerhetsfunktionsindikator, till exempel intrångsbrunnar som har det kvantitativa kriteriet ”inga” intrångsbrunnar och *scenariot med intrångsbrunnar* undersöker konsekvensen av att det underförstådda kriteriet inte uppfylls.

Två av de mest betydelsefulla scenarierna (scenariot med accelererad betongdegradering, scenariot med bentonitdegradering) bedöms inte kunna härledas ur ett kvantitativt kriterium för en säkerhetsfunktionsindikator då dessa scenarier härleds ur säkerhetsfunktionsindikatorer som förändras över tiden. Detta gäller alla scenarier som har en annan kontinuerlig förändring av enskilda barriärer än den antagna förändringen i huvudscenariot.

Säkerhetsfunktionernas övergripande roll vid valet av scenarier är att peka på vilka funktioner som behöver stå i fokus för scenarievalet. Detta gäller för såväl Kärnbränsleförvaret som för SFR. I båda fallen ger säkerhetsfunktionerna i princip upphov till en lista med scenarier. I varje scenario utvärderas en eller flera säkerhetsfunktioner genom att utreda vad som över tid kan leda till att motsvarande säkerhetsfunktionsindikatorer försämras. Om det dessutom är möjligt att ange kvantitativa kriterier för när en funktion går förlorad underlättas analysen av den vägledning som kriteriet ger vid utvärderingen av utvecklingen. Om inte sådana kriterier finns definierade erhålls inte denna hjälp vid analysen av scenariot. Utvärderingen måste då göras med andra mått, och i SR-PSU används ofta dos/riskkriteriet, eftersom ett utsläpp sker från detta förvar. Avsaknaden av kriterier leder således till att värderingen över tid av statusen för motsvarande säkerhetsfunktion inte blir lika tydlig. Dock innebär inte detta något hinder från att använda säkerhetsfunktioner vid val och analys av scenarier, så länge det finns ett annat användbart mått på säkerhet, t ex dos/risk.

## **2. SKB bör förtydliga hur kontroller samt acceptanskriterier för byggnader, konstruktioner och komponenter med säkerhetsfunktion kan fastställas under uppförande, drift och förslutning av slutförvaret i avsaknad av kvantitativa konstruktionsförutsättningar.**

### **SKB:s svar:**

Kvantitativa konstruktionsförutsättningar är centrala för att på ett framgångsrikt sätt uppföra slutförvarsanläggningen SFR och inte minst kontrollera och vid behov korrigera utfallet. SKB bedriver en stegvis utveckling av utformningen av utbyggnaden i takt med att tillståndsprövningen framskrider. De kvantitativa konstruktionsförutsättningarna kan formuleras först efter att flera steg i utvecklingsprocessen har genomförts. De kvantitativa konstruktionsförutsättningarna behöver finnas utarbetade inför upphandling av entreprenader.

Utgångspunkten i arbetet utgörs av föregående säkerhetsanalysers säkerhetsfunktioner och utvärderingen av dessa, vilka ställer krav på de tekniska barriärernas initialtillstånd. Initialtillståndet tillsammans med processförståelse leder fram till en beskrivning av hur barriärerna utvecklas för tiden efter förslutning. Initialtillståndet och utvecklingen av barriärerna ingår i analysen av säkerheten efter förslutning. Om analysen av säkerheten efter förslutning visar kravuppfyllnad, kan det beskrivna initialtillståndet användas som en konstruktionsförutsättning.

Till de konstruktionsförutsättningar som identifierats i analyser av säkerheten efter förslutning, läggs de krav som ställs på konstruktionerna under driftperioden. Kraven kan i tillämpliga fall appliceras på de systemkomponenter som utgör barriärer efter förslutning av förvaret. Kravbildningen på komponenter för driftskedet läggs då till kraven på initialtillståndet.

De sammanlagda krav som säkerheten under drift och efter förslutning ställer på anläggningen utgör utgångspunkt för projekteringen. Vid projekteringen tillkommer krav från lagar, författningar och normer relaterade till anläggningar och deras uppförande, vilket leder fram till de byggnadstekniska krav som SKB ställer på anläggningen. I detta steg omhändertas även den förväntade åldringen av anläggningen under driftperioden. Byggnadstekniska krav ska ställas när konstruktionskraven kvantifieras. De byggnadstekniska kraven utgör grunden för SKB:s styrning av entreprenörer som kommer att anlitas för att uppföra anläggningen. När de byggnadstekniska kraven finns framtagna kommer SKB att formulera kontrollprogram där kraven från de olika kravställarna (figur 1) följs upp. Kontrollprogrammen kommer att ha en tyngdpunkt på kraven som ska innehållas för att uppnå initialtillståndet eftersom det bland annat är initialtillståndet som leder till att förvaret kan uppvisa riskuppfyllnad enligt SSMFS 2008:37 § 5. Kraven på uppförandet kommer att ställas på så sätt att eventuell förändring av konstruktionens egenskaper som kan ske under driftperioden täcks in av initialtillståndet.

I den stegvisa process som SKB tillämpar befinner sig SFR-utbyggnaden i det skede att systemprojektering har genomförts och detaljprojekteringen håller på att startas upp. I detaljprojekteringen kommer kravbilden för uppförandet av anläggningen att fastställas. I nästa skede av processen (PSAR) kommer ett vidareutvecklat initialtillstånd för de tekniska barriärerna att utvärderas.



*Figur 1. Schematisk bild över de olika kravställarna på anläggningen och hur kravbilden successivt byggs på. Den sammantagna kravbilden resulterar i kvantitativa konstruktionsförutsättningar som används vid uppförandet av anläggningen.*

**3. SSM önskar fördjupad information om konstruktionsstyrande fall resulterande från scenarioanalysen i SR-PSU och hur dessa kopplar till kraven som ställs på barriärernas initialtillstånd samt till utvärderingen av säkerhetsfunktionsindikatorerna efter förslutning.**

**SKB:s svar:**

Som beskrivs i *Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR* (avsnitt 11.5) utvecklas ett slutförvar iterativt där återkommande säkerhetsanalyser leder till krav som i sin tur vägleder den fortsatta utvecklingen av förvarskonceptet. Resultat från en säkerhetsanalys, tillsammans med andra krav och annan information kan leda till uppdateringar av ett förvars utformning. I bilaga 1 beskrivs hur konstruktionsstyrande

fall identifierats utifrån säkerhetsanalysen SR-PSU och bilagan ger exempel på krav som kan ställas på konstruktionen för att säkerhetsanalysens resultat ska vara giltiga.

- 4. SKB har valt att inkludera ett mindre sannolikt scenario kallat ”högt flöde i berggrunden”. Vad SSM kan se kopplar detta scenario inte till någon särskild FEP och frågan uppstår varför analysen av osäkerheterna i hydrogeologiska beräkningarna inte ingår i huvudscenariot, som rekommenderas i allmänna råden till SSMFS 2008:21, eller alternativt kategoriseras som restscenario ifall sannolikheten för uppkomst av högre flöden bedöms vara försumbar. SKB bör även förtydliga hur sannolikheten för scenariot med högt flöde i berggrunden har härletts i SR-PSU.**

#### **SKB:s svar:**

SKB anser att valet av *scenariot med högt flöde i berggrunden* kopplar till en FEP, vilket redovisas nedan. I analysen SR-PSU har SKB valt scenarier genom att gå igenom tänkbara förlopp som kan leda till att säkerhetsfunktioner inte upprätthålls. Detta görs genom att bedöma osäkerheterna i initialtillstånd, interna processer och externa förhållanden för att avgöra om det finns en risk att säkerhetsfunktionens status avviker från huvudscenariot på ett sådant sätt att en lägre grad av säkerhet uppnås.

*Scenariot med högt flöde i berggrunden* valdes på grund av osäkerheter i initialtillståndet som kan påverka säkerhetsfunktionen lågt flöde i berggrunden. Initialtillståndets FEP (Feature Events and Processes) som är relaterade till det avsedda initialtillståndet hanteras i kategorin variabler (features) i SR-PSU:s FEP katalog (SKB 2014a, avsnitt 5.2). En av dessa variabel-FEP är VarGe06 Fracture and pore geometry som har definitionen 'Geometrisk beskrivning av alla hålrum, från sprickzoner till mikroporer i bergmatrisen' (SKB 2014a, tabell A2-9). Det är osäkerheten i initialtillståndet för denna variabel-FEP som är grunden för valet av *scenariot med högt flöde i berggrunden*. Inverkan av denna osäkerhet, i data som beskriver geometrin för sprickor och porer, bedöms kunna utvärderas med hjälp av resultaten från de olika hydrogeologiska spricknätverksmodellerna/bergmodellerna.

Sannolikheten för *scenariot med högt flöde i berggrunden* är satt som <10 % och även om SKB i analysen försiktigt använder 10 % så är det rimligt att anta att sannolikheten är betydligt lägre. I den regionala hydrogeologiska modelleringen (Odén et al. 2014) har 17 bergmodeller inkluderats med olika parameteriseringar av deformationszoner och spricknätverk. För huvudscenariot valdes bergmodellen som representerar måttligt flöde i berggrunden (bergmodell 1). I *scenariot med högt flöde i berggrunden* används hydrogeologiska data för bergmodellen med högt flöde (bergmodell 11) för beräkningarna av radionuklidtransport i geosfären. Eftersom de olika bergmodellerna främst syftar till att fånga medelhöga och höga flöden i berggrunden, dvs inte till att visa en fördelning över alla möjliga flöden, kan man inte utifrån antalet bergmodeller beräkna sannolikheten genom att ta 1/17 (6 %) för det valda flödet i berggrunden för *scenariot med högt flöde i berggrunden*. Hänsyn måste även tas till metodiken för att bestämma de olika bergmodellerna. Först analyserades 99 realiseringar av spricknätverket där två realiseringar valdes ut för att representera ytterligheter hos de 99 realiseringarna med avseende på förväntade flöden genom bergssalarna. Den realisering som används i bergmodell 11 är den som av de 99 realiseringarna har störst antal sprickor som korsar bergssalarna, samt högst sammanlagd transmissivitet på dessa sprickor. Därefter analyserades även 10 realiseringar av heterogeniteten hos deformationszonerna. Den realisering som används i bergmodell 11 är den som gav högst flöden genom bergssalarna. Alltså har det i bergmodell 11 kombinerats en konservativ beskrivning av både spricknätverk och deformationszoner. Sannolikheten för flöden i berggrunden motsvarande bergmodell 11 bedöms därför vara lägre än 6 %.

I *scenariot med högt flöde i berggrunden* erhöjls detaljerade vattenflöden inne i förvarsutrymmena genom skalning av vattenflödena i huvudscenariot. Skalfaktorn för respektive förvarsutrymme är den maximala kvoten mellan vattenflödena i alla bergmodeller och vattenflödena i fallet med måttligt flöde som används i huvudscenariot (för alla tidpunkter  $\geq$  år 2500 e Kr). Detta innebär att vissa av dessa skalfaktorer kom från andra fall än bergmodell 11. Detta val av indata gjordes för att inte underskatta utsläpp från något av förvarsutrymmena, även om det är en ofysikalisk uppsättning indata. Användningen av maximala kvoter innebär att flödena för samtliga förvarsutrymmen inte kommer från samma bergmodell, och därmed är det totala aggregerade vattenflödet genom förvarsutrymmena högre än vad som beräknats i någon av bergmodellerna. Den maximala kvoten valdes från 85 beräknade vattenflöden för respektive förvarsutrymme (17 bergmodeller och fem tidpunkter för tider  $\geq$  2500 e Kr). Eftersom den valda kombinationen är ofysikalisk finns det egentligen ingen sannolikhet för att den inträffar. Att säga att sannolikheten är 1,2 % för att man valt en av 85 möjliga är således inte korrekt. Om bergmodellen med högt flöde (bergmodell 11) hade valts även för de detaljerade vattenflödena skulle resonemanget om sannolikheten gällande flödet i geosfären gälla även här. Således bedöms det vara försvarbart att påstå att sannolikheten är betydligt mindre än 10 %.

SKB redovisar här hur osäkerheterna i vattenflöde på grund av osäkerheter i data som beskriver geometrin för sprickor och porer har analyserats. Osäkerheten i geometri och porer utvärderas med hjälp av resultaten från de olika hydrogeologiska spricknätverksmodellerna/bergmodellerna. I huvudscenariot görs ett försiktigt val av representativ bergmodell, men ändå valde SKB att utvärdera *scenariot med högt flöde i berggrunden* som ett mindre sannolikt scenario för att säkerställa att osäkerheten gällande vattenflöden var tillräckligt väl belysta i analysen. SKB anser att det även skulle ha varit möjligt att utvärdera *scenariot med högt flöde i berggrunden* som ett restscenario.

- 5. I huvudrapport SR-PSU avsnitt 10.3.4 och i sammanfattningen hänvisas till avsnitt 10.6 för ytterligare information om hantering av osäkerheter och pessimistiska antaganden i analysen. Det förefaller dock inte finnas någon sådan information i avsnitt 10.6. SSM önskar att SKB förtydligar var informationen som avses kan hittas.**

**SKB:s svar:**

Hantering av osäkerheter beskrivs i *Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU*, avsnitt 2.6.2. SKB noterar att hänvisningen till avsnitt 10.6 som refereras i SSM:s fråga är otydlig. I avsnitt 10.6 finns information för vissa radionuklider där vissa försiktiga antaganden finns noterade, t.ex. att analysen inte tar hänsyn till flödesbegränsning för Am-241 i 1BLA trots att avfallet som innehåller mest Am-241 i 1BLA är inneslutet i betong. Försiktiga antaganden finns noterade i flera rapporter, i sammanfattningen och i avsnitt 10.3.4 nämns radionuklidtransportrapporten (SKB 2015) och biosfärens syntesrapport (SKB 2014b). Utöver dessa finns försiktiga antaganden beskrivna i huvudrapporten, bland annat i avsnitt om scenariorhantering och risksummering och initialtillståndet. I bilaga 2 ges en översiktlig sammanfattning av försiktiga antaganden som tas upp i olika rapporter. Sammanfattningen ska dock ses som en överblick av försiktiga antaganden och inte som en fullständig sammanställning av försiktiga antaganden då säkerhetsanalysen genomsyras av ett försiktigt angreppssätt och det blir svårt att beskriva alla försiktiga antaganden.

- 6. SSM önskar ytterligare information som relaterar till resultaten av den probabilistiska analysen med en diskussion av huvudsakliga osäkerheter. Känslighetsanalyser som demonstrerar samband mellan**

## **inputparametrar och beräknade doser bör redovisas. SKB bör förtydliga om de numeriska probabilistiska beräkningarna har konvergerat eller ej.**

### **SKBs svar:**

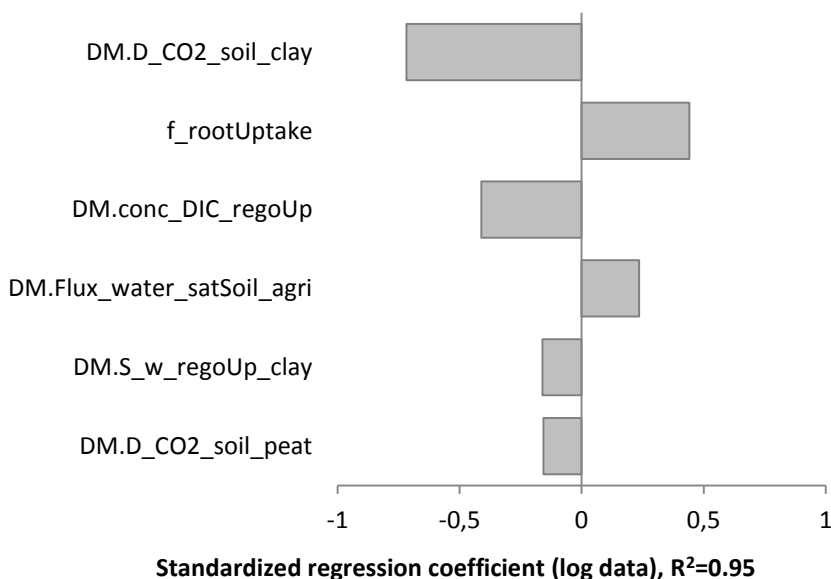
Parameterosäkerheter driver variationen av resultaten från de probabilistiska beräkningarna, och sambanden mellan variation i inputparametrar och variationen i den beräknade dosen har redovisats och diskuterats för fyra dosgivande radionuklider i biosfärens syntesrapport (SKB 2014b) och i radionuklidtransportrapporten (SKB 2015). SKB har även visat att konvergensen för dosen från de probabilistiska beräkningarna är god i beräkningsfallet för global uppvärmning. Nedan ges en sammanfattning av de utförda analyserna samt en kort redovisning av resultat från kompletterande beräkningar.

I biosfärens syntesrapport (SKB 2014b) redovisas och diskuteras samband mellan osäkerheter i parametervärden och dos över tid givet ett enhetsutsläpp till biosfären av fyra dosgivande radionuklider, nämligen C-14, Cl-36, Mo-93 och Ni-59. Sambanden redovisas för doser till den mest exponerade gruppen (Jordbrukare på dikad myr för samtliga radionuklider) och för dosrater för den mest exponerade organismen för respektive radionuklid. Det valda känslighetsanalysmåttet är standardiserade regressionskoefficienter (SRC). Eftersom de underliggande sambanden främst är multiplikativa utfördes analyserna på logaritmisk skala, och förklaringsgraden av dosvariationen var hög eller mycket hög.

I radionuklidtransportrapporten (2014b) utfördes en liknande känslighetsanalys för den tidpunkt och exponerad grupp som ger den högsta dosen för respektive radionuklid i beräkningsfallet för global uppvärmning (CCM\_GW)<sup>1</sup>. I rapporten valdes den exponerade gruppen Jägare och samlare som högst exponerad grupp för organiskt C-14. Detta är ett misstag då det är den exponerade gruppen Jordbrukare på dikad myr som erhåller högst dos. I figur 2 visas kompletterande resultat för C-14 för Jordbrukare på dikad myr vid år 4500 AD (figuren ersätter alltså figur F-2 i SKB 2015). Då det främst är parametervariation i ysystemet som orsakar variationen i dosen från C-14 stämmer resultat mycket väl överens med de resultat som tidigare presenteras och diskuteras i analysen av ett enhetsutsläpp till biosfären (SKB 2014b, avsnitt 10.9).

---

<sup>1</sup> Dosen motsvarar medelvärdet över samtliga 1000 realiseringar för en tidpunkt.



**Figur 2.** Parameterkänslighet vid högsta medelexoneringen av organiskt C-14 för exponerad grupp Jordbrukare på dikad myr i biosfärsobjekt 157\_2 vid tidpunkten 4500 e Kr. Känsligheten visas för beräkningsfallet för global uppvärmning (CCM\_GW).

Vidare har SKB beräknat ett empiriskt 95 % konfidensintervall för medelvärdet av den totala dosen vid den tidpunkt som gav högst dos i beräkningsfallet för global uppvärmning (SKB 2015, avsnitt 5.1.1 ”Uncertainty related to sample size”). Då osäkerheten i medelvärdet var mycket begränsad bedömde SKB att ett större antal realiseringar, eller en djupare analys av konvergens, inte var motiverad. I bilaga 3 gör SKB nu en kompletterande analys av hur antalet parameterrealiseringar påverkar konvergens för det beräknade flödet av radionuklider från geosfären och den beräknade dosen för tre dosgivande radionuklider.

Genom att använda återupprepade dragningarna av slumpvis genererade parameteruppsättningar visar SKB att konvergens för utflödet av radionuklider från berget och för den effektiva dosen är god. Detta betyder att sannolikheten för att det verkliga medelvärdet är mer än 10 % högre än de beräknade medelvärdena är låg (mindre än 5 %). De utförda kompletterande beräkningarna stödjer SKB:s tidigare presenterade resultat och visar att den metodik som använts för probabilistiska beräkningar är rimlig och ger tillförlitliga resultat som inte underskattar den beräknade dosen.

- SKB har valt att inkludera en säkerhetsfunktion som kopplar till uppkomst och transport av gas endast för silon. SSM önskar att SKB förtydligar varför den säkerhetsfunktion som kopplar till uppkomst och transport av gas inte tilldelas andra slutförvarsdelar. SSM önskar information om en sådan säkerhetsfunktion skulle kunna bidra till att tydliggöra vilka krav uppkomst och transport av gas ställer på konstruktionerna i slutförvarsdelarna.**

**SKB:s svar:**

SKB har valt att ansätta denna säkerhetsfunktion för silon därför att silon omges av bentonit samt en blandning av sand och bentonit i botten och toppen vilket skulle kunna hindra bildad gas från att transporteras ut i omkringliggande berg. Försök visar att det krävs ett övertryck på cirka 15 kPa för att åstadkomma gastransport genom sand/bentonitblandningen som planeras som förslutningsåtgärd för silon (Pusch och Hökmark 1987). Om gasavledningsrören inte fungerar tillräckligt bra och

gasövertrycket överstiger 50 kPa kan en puls av advektiv transport av radionuklider lösta i vattnet uppstå.

I de andra förvarsdelarna har SKB valt att inte inkludera denna säkerhetsfunktion på grund av att omgivande betong, kringgjutning, golv, väggar och lock, kommer att innehålla gasavledande passager i form av konstruerade gasavledningsanordningar eller betongsprickor. Spricköppningar på 0,1 mm ner till 10 µm kommer att förekomma i BMA-betongkonstruktionerna. För sådana sprickor krävs 1-15 kPa övertryck för att gasen ska tas sig ut (Moreno et al. 2001). I 1-2BTF är den bildade gasmängden liten. I BLA-salarna är en sådan säkerhetsfunktion inte aktuell då inga tekniska barriärer som bidrar till fördröjning av radionuklidtransport kommer att uppföras. För alla förvarsdelar kommer uppkomsten av gas att begränsas genom införande av acceptanskrieter för avfallet. I de acceptanskriterier som tagits fram för SR-PSU begränsas mängderna gasbildande ämnen (Eriksson Örtengren och Eriksson 2014, avsnitt 3.3.6).

För att upprätthålla säkerhetsfunktionen lågt flöde i BMA strävar SKB efter att de tekniska barriärerna ska vara så täta som möjligt. Detta åstadkoms med en så tät betong som möjligt. I och med detta kan en situation uppstå, om än osannolikt, där gas inte obehindrat transporteras ut genom porstrukturen och ett gasövertryck bildas. Detta gäller 2BMA som konstrueras med minimal mängd armering vilket leder till en långsiktigt tät betong då korrosion av armeringsjärn i möjligaste mån undviks. Detta gasövertryck skulle kunna leda till sprickbildning i barriären och därmed påverka säkerhetsfunktionen lågt flöde i förvarsutrymmen. I SR-PSU argumenterades det för att den spalt som bildas mellan kassunvägg och lock skulle möjliggöra gastransport. I vidare teknikutvecklingsarbete har det klarlagts att det vore bättre att ha en kontrollerbar teknisk lösning som ger frihetsgrader att välja hur och var bildad gas ska transporteras ut ur kassunerna. Därför har SKB valt att i pågående teknikutveckling för 2BMA konstruera, likt för silon, gasavledande passager i konstruktionen istället för att låta den bildade krympspalten mellan det pågjutna locket och kassunväggarna utgöra passage. För 1BMA hanteras detta inom de förslutningsåtgärder som planeras.

**8. SKB har valt hydraulisk kontrast som säkerhetsfunktionsindikator för lågt flöde genom avfallet i 1 och 2BMA. SSM önskar att SKB förtydligar varför inte enskilda säkerhetsindikatorer har kopplats till betongkonstruktionerna och återfyllnaden var för sig, med tanke på att det skulle tydliggöra vilka krav samt konstruktionsförutsättningar som ställs på dessa komponenter utifrån hur indikatorn utvecklas över tid.**

**SKB:s svar:**

Säkerhetsfunktionerna beskriver på vilket sätt en förvarskomponent bidrar till säkerhet och i SR-PSU har säkerhetsfunktionerna varit ett verktyg för att utvärdera säkerheten efter förslutning.

Vattenflödet genom avfallskollina i BMA-salarna begränsas av den hydrauliska kontrasten mellan den omgivande genomsläppliga makadamåterfyllnaden och de mindre genomsläppliga betongkonstruktionerna som innehåller avfallskollina. Denna hydrauliska kontrast avleder vattenflödet från betongkonstruktionerna till de mer genomsläppliga kringliggande materialen, och utrymmet mellan det kringliggande materialet utgör en så kallad hydraulisk bur (*Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR, Huvudrapporten för säkerhetsanalysen SR-PSU, avsnitt 5.4.2*).

Barriärerna i BMA-salarna förändras över tiden men eftersom det är kontrasten som är viktig för att upprätthålla BMA-salarnas hydrauliska funktion anser SKB att valet av



säkerhetsfunktionsindikatorn hydraulisk kontrast är ett bra val för analysen av säkerhet efter förslutning. Separata indikatorer för betongkonstruktionen och återfyllnads-materialiet var för sig anger inte om en hydraulisk bur upprätthålls. SKB ställer krav på konstruktionsmaterialen som kommer att användas vid uppförandet (SFR 3) och förslutning av SFR. Detta för att få en så bra initial kontrast som möjligt. En sådan kontrast uppnås genom användandet av en tät betong och genomsläpplig återfyllnad. En mer ingående motivering till valet av säkerhetsfunktionsindikatorn hydraulisk kontrast kopplat till BMA-salarnas hydrauliska funktion finns i bilaga 4.

Den hydrauliska kontrast som initialt ansätts i säkerhetsanalysen förutsätter att både betongkonstruktionen och återfyllnaden har vissa hydrauliska egenskaper initialt. Kraven på betongkonstruktionerna och återfyllnaden sätts i Initialtillståndsrapporten (SKB 2014d).

- 9. SKB förefaller inte ha redovisat fasen när slutförvaret återfylls med grundvatten efter förslutning i någon större detaljeringsgrad. SSM önskar att SKB förtydligar hur de transienter som uppstår pga. pålastning med vattentryck och andra processer kopplade till återmättnad tas omhand i säkerhetsredovisningen (t.ex. erosion, flerfasflöde, oxiderade kontra reducerande förhållanden).**

#### **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.

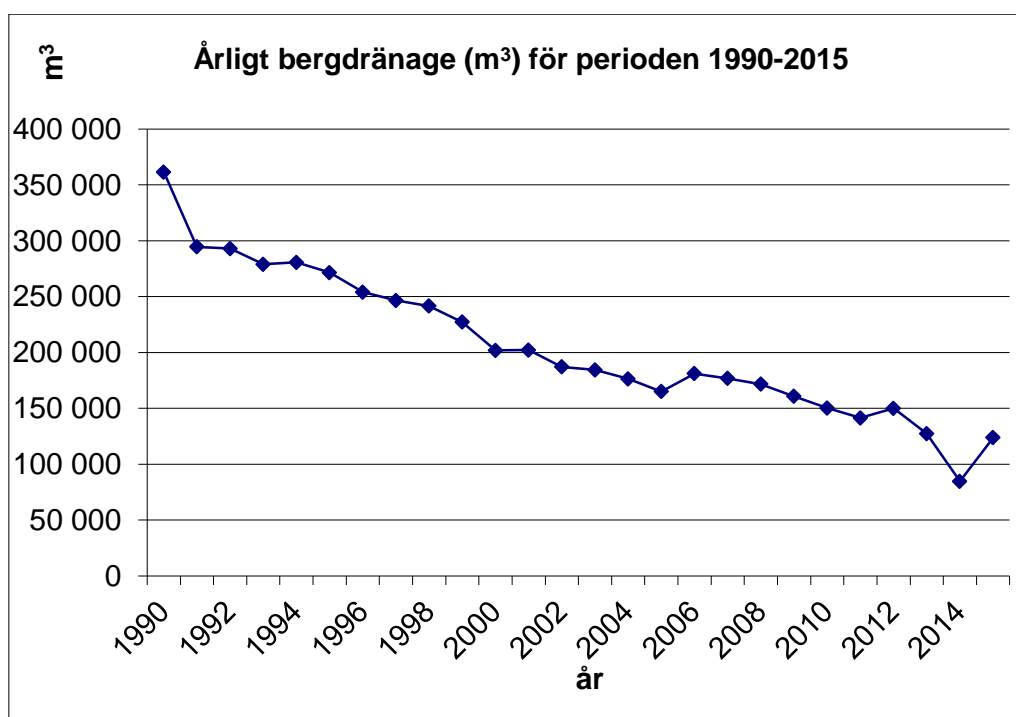
Nedan diskuteras tid för återmättnad, processer kopplade till bentonit samt processer i avfallet och dess förpackningar som kan ske under återmättnadsfasen.

#### **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 bergssalarna 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 m<sup>3</sup>/år medan mätningar från 2015 visar på en tillrinning på 123 759 m<sup>3</sup> (figur 3). 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 3. Länsdumpat 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 modelleringens resultat också att inga signifikanta förändringar i densiteten av bentonit 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). Laborrietester 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 (2014c, 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.

**10. I avsnitt 11.5.3 i huvudrapport SR-PSU redogör SKB för behov av ytterligare forskning och utveckling som motiveras baserat på resultatet från säkerhetsanalysen. SSM önskar att SKB förtydligar behovet av teknikutveckling med hänsyn till 2BMA exempelvis när det gäller barriärskonstruktionens tålighet mot belastningar som uppstår under förvarsdelen tidiga utveckling när slutförvaret vattenfylls.**

**SKB:s svar:**

SKB har arbetat vidare med teknikutveckling för 2BMA och en förbättrad layout presenteras i kompletteringen om alternativ utformning av 2 BMA (*Vidareutvecklad utformning av förvarsdelen 2BMA i utbyggd del av SFR*). SKB arbetar kontinuerligt med teknikutveckling och ytterligare förbättringar kan inkluderas inför PSAR.

Med vänlig hälsning

**Svensk Kärnbränslehantering AB**  
Projekt SFR Utbyggnad

Peter Larsson  
Projektledare

**Bilagor**

- 1 *Information om konstruktionsstyrande fall. SKBdoc 1572211 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.*
- 2 *Försiktiga antaganden i analysen av säkerhet efter förslutning SR-PSU. SKBdoc 1579024, ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.*
- 3 *Konvergens av probabilistiska beräkningar. SKBdoc 1581608 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.*
- 4 *Säkerhetsfunktionsindikatorn hydraulisk kontrast och BMA salarnas hydrauliska funktion. SKBdoc 1578211 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.*

## Referenser

**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.

**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.

**Moreno L, Skagius K, Södergren S, Wiborgh M, 2001.** Project SAFE. Gas related processes in SFR. SKB R-01-11, 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.

**Pusch R, Hökmark H, 1987.** Megaparameterstudie av gastransport genom SFR-buffertar. SKB SFR 87-06, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2014a.** FEP report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-07, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2014b.** Biosphere synthesis report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-06. Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

**SKB, 2014d.** Initial state report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2015.** Radionuclide transport and dose calculations for the safety assessment SR-PSU. Revised edition. SKB TR-14-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Örtengren Eriksson M, Eriksson A, 2014.** Acceptanskriterier för avfall, projekt SFR-utbyggnad. SKBdoc 1368638 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

## Dokument som ingår i ansökan

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

*Vidareutvecklad utformning av förvarsdelen 2BMA i utbyggd del av SFR.* SKBdoc 1569813 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

## Revisionsförteckning

Ver	Datum	Revideringen omfattar	Utförd av	Kvalitetssäkrad	Godkännare