



DokumentID  
1572176

Handläggare  
Klas Källström

Datum  
2016-12-12

Sida  
1(11)

Ärende  
SSM2015-725-36

Er referens  
Lena Sonnerfelt

Ert datum  
2016-09-29

**Kvalitetssäkring**

2017-05-11 Helén Segerstedt (TS)

2017-05-12 Peter Larsson (Godkänd)

**Kommentar**

Strålsäkerhetsmyndigheten  
Att: Georg Lindgren  
171 16 Stockholm

**Svar till SSM på begäran om komplettering av ansökan om utökad verksamhet vid SFR - utveckling av betongegenskaper i 1-2BMA**

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har i sin skrivelse till Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, daterad 2016-09-29 begärt förtydligande information om utvecklingen av betongegenskaper i 1-2BMA.

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

- 1. SSM anser att SKB bör komplettera ansökan med:  
Redovisning för definitionen av hydraulisk kontrast mellan den hydrauliska konduktiviteten för återfyllnadsmaterialet och den för barriärkonstruktionerna i 1-2BMA.**

**SKB:s svar:**

Vattenflödet genom avfallskollina i BMA-salarna begränsas av den hydrauliska kontrasten mellan den omgivande genomsläppliga makadamåterfyllnaden och de mindre genomsläppliga betongkonstruktionerna som innehåller avfallskollina. Den hydrauliska kontrasten avleder vattenflödet från betongkonstruktionerna till de mer genomsläppliga kringliggande materialen, och det kringliggande materialet utgör en så kallad hydraulisk bur. Som beskrivs i *Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU, avsnitt 6.3.8* har den hydrauliska kontrasten mellan den genomsläppliga makadamåterfyllnaden som omger betongkonstruktionerna och de mindre genomsläppliga betongkonstruktionerna i BMA-salarna definierats som kvoten mellan betongkonstruktionernas och återfyllnadsmaterialets hydrauliska konduktivitet.

Ovanstående definition av hydraulisk kontrast är lämplig som indikator för betongkonstruktionernas och återfyllnadens långsiktiga funktion eftersom förändringen av de geometriska aspekterna är underordnad förändringarna i den hydrauliska konduktiviteten hos betongkonstruktionerna och återfyllnadsmaterialet (bilaga 1). Den hydrauliska kontrasten anger den hydrauliska konduktiviteten hos betong i relation till återfyllnadens hydrauliska konduktivitet. Återfyllnadens hydrauliska egenskaper anses i huvudscenariot vara konstanta under hela analysperioden vilket medför att kontrasten till stor del sätts av betongens hydrauliska egenskaper.

**2. SSM anser att SKB bör komplettera ansökan med:  
Redovisning av säkerhetsfunktionsindikatorerna för  
betongbarriärkonstruktionerna i 1-2BMA.**

**SKB:s svar:**

Säkerhetsfunktionsindikatorerna för betongbarriärer i 1–2BMA anges i *Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU, tabell 5-3*. Den hydrauliska funktionen hos barriärerna i BMA-salarna beror på de hydrauliska egenskaperna hos både återfyllnaden och betongkonstruktionerna. Det räcker inte att bara återfyllnaden eller betongkonstruktionen upprätthåller sina hydrauliska egenskaper för att funktionen med en hydraulisk bur ska upprätthållas. Därför utgör den hydrauliska kontrasten en lämplig säkerhetsfunktionsindikator för att utvärdera säkerhetsfunktionen lågt flöde i förvarsutrymmen. Kopplingen mellan säkerhetsfunktionsindikatorn hydraulisk kontrast och den hydrauliska funktionen hos betongbarriärkonstruktionerna i 1-2BMA är beskriven i bilaga 1.

**3. SSM anser att SKB bör komplettera ansökan med:  
Redovisning på hur de kemiska degraderingsprocesserna som orsakar  
mineral- och porositetsförändringar påverkar hållfasthetsegenskaper  
(tryck- och draghållfasthet) hos betongen i barriärkonstruktionerna för  
1-2BMA vid olika tidpunkter efter förslutning och vilka osäkerheter som  
finns.**

**SKB:s svar:**

Dimensionerande beräkningar visar att betongkonstruktionerna i 1-2BMA kan dimensioneras för att motstå ett ensidigt vattentryck motsvarande förvarsdjup för respektive förvarsdel. Med utgångspunkt i denna dimensionering och de modeller för betongdegradering och armeringskorrosion som tidigare använts visar beräkningar att betongkonstruktionerna i 1-2BMA kan motstå den långsiktigt dimensionerande lasten vilken här utgörs av jordtrycket från återfyllnadsmaterialet. De underliggande beräkningarna och modellerna för betongdegradering och armeringskorrosion beskrivs i mer detalj i bilaga 2.

**4. SSM anser att SKB bör komplettera ansökan med:  
Redovisning på hur eventuell sprickbildning som utvecklas hos betongen  
i barriärkonstruktionen för 1-2BMA efter förslutning av slutförvaret  
påverkar utvecklingen av den effektiva diffusiviteten, hydrauliska  
konduktiviteten samt porositeten i Tabell 9-5 och 10-4 i rapporten SKB  
TR-14-10.**

**SKB:s svar:**

Transport av lösta ämnen genom betongbarriärerna i 1-2BMA modelleras på två sätt. Antingen betraktas betongen som ett homogent medium där det homogena mediets transportegenskaper är valda så att de representerar transportegenskaperna hos sprickorna i betongen och cementmatrisen, eller så hanteras transporten genom sprickor separat (Höglund 2014, avsnitt 7.2, SKB 2015, bilaga D). Det första sättet är tillämpligt när spricksystemet i betong består av flera små sprickor och det andra sättet är lämpligt när advektiv transport genom en eller ett fåtal sprickor är den dominerande transportmekanismen. För radionuklidtransportberäkningarna används kriteriet beskrivet i radionuklidtransportrapporten (SKB 2015, bilaga D) för när sprickorna behöver explicit hantering.

För att representera en betongbarriär inklusive dess spricksystem som ett homogent medium tillämpas den metod som beskrivs i Höglund (2014, avsnitt 6.3–6.4). I dessa avsnitt antas att sprickorna är genomgående och figur 6-1 och 6-2 visar hur

hydrauliska konduktiviteten och effektiva diffusiviteten varierar med olika sprickparametrar (sprickvidd och sprickavstånd). Från figur 6-1 och 6-2 framgår att de sprickor som finns och som eventuellt skulle kunna uppstå har en relativt liten inverkan på den effektiva diffusiviteten men att de har en betydande inverkan på den hydrauliska konduktiviteten.

Sprickbildning har en liten inverkan på porositeten hos barriären när den representeras som ett homogent medium. En viss porositetsökning pga. sprickbildning sker när betongen krymper t.ex. pga. nedkylning men denna porositetsökning är i sammanhanget försumbar relativt porositeten hos cement. För större sprickor där sprickorna hanteras separat så ansätts att porositeten hos en spricka är 100 %.

I Höglund (2014, avsnitt 9.4 och tabell 9-1) beskrivs hur värdena i datarapporten (SKB 2014a) är valda. För tidsperioden fram till 10 000 år efter förslutning är den hydrauliska konduktiviteten hos betongbarriären i huvudsak bestämd av de sprickor som kan uppstå på grund av de fysiska/mekaniska degraderingsprocesser som bedöms svåra att undvika under de första 10 000 åren. Den effektiva diffusiviteten bestäms snarare av den kemiska degraderingen hos betongen än den fysiska/mekaniska eftersom sprickor har en ganska liten inverkan på den effektiva diffusiviteten. För porositeten är det i huvudsak den kemiska degraderingen som har en signifikant inverkan.

Sprickor genom vilka vattenflödena blir så pass stora att transporten av lösta ämnen genom betongbarriären domineras av den advektiva transporten genom ett fåtal sprickor förväntas inte uppstå förrän betongen är kraftigt degraderad efter 20 000 år.

Ökningen av den hydrauliska konduktiviteten på grund av de sprickor som skulle kunna uppstå inom 100 år efter förslutning medför att vattenflödet genom betongen ökar, vilket bidrar till en snabbare lakning (kemisk degradering pga. upplösning och uttransport av lösta ämnen) av betongen. Effekten av högre vattenflöden i sprickor är dock begränsad under de första 20 000 åren till följd av att vattenflödet genom barriären ändå är så lågt att diffusion fortfarande är den mekanism som dominerar transporten av lösta ämnen (se svaret på fråga 7). Efter 20 000 år antas att sprickorna har en större inverkan på betongdegraderingen eftersom de bidrar till en så pass stor ökning av vattenflödet att advektion blir den dominerande transportmekanismen.

Den begränsade ökningen av diffusiviteten på grund av sprickor ger i sammanhanget ett relativt litet bidrag till lakningen av betongen vilket medför att sprickors bidrag till utvecklingen av den effektiva diffusiviteten, den hydrauliska konduktiviteten samt porositeten innan 20 000 år efter förslutning är begränsad.

- 5. SSM anser att SKB bör komplettera ansökan med:**  
**Redovisning av osäkerheterna vid olika tidpunkter efter förslutning för den effektiva diffusiviteten, hydrauliska konduktiviteten och porositeten i betongen i barriärkonstruktionen för 1-2BMA tillsammans med en motivering av parameterintervall i säkerhetsanalysen SR-PSU och beräkningar av radionuklidtransport (SKB TR-14-09, Tabell 4-1, 4-2 och 4-3), särskilt för tidsintervallet mellan år 12 000 och 22 000.**

**SKB:s svar:**

I tabell 1 nedan anges vilka effektiva diffusiviteter, hydrauliska konduktiviteter och porositeter som används för barriärkonstruktionen i 1-2BMA i radionuklidtransportberäkningarna för SR-PSU. I de fall en sannolikhetsfördelning har använts i de probabilistiska beräkningarna är även en nedre och en övre gräns angivna.

**Tabell 1. Data över effektiva diffusiviteter, hydrauliska konduktiviteter och porositeter som används för barriärkonstruktionen i 1-2BMA i radionuklidtransportberäkningarna för SR-PSU.**

Tidsperiod (år e Kr)	Hydraulisk konduktivitet (m/s)	Porositet (-)	Effektiv diffusivitet (m <sup>2</sup> /s)	Effektiv diffusivitet nedre gräns log triangulär (m <sup>2</sup> /s)	Effektiv diffusivitet övre gräns log triangulär (m <sup>2</sup> /s)
2000-2100	1,00E-07	0,11	3,50E-12		
2100-22 000	1,00E-07	0,14	5,00E-12		
22 000-52 000	1,00E-05	0,18	1,00E-11	7,00E-12	5,00E-11
52 000-	1,00E-03	0,5	2,00E-10	2,00E-11	3,00E-10

Utvecklingen av de externa förhållandena bidrar till ändrade vattenflöden men i huvudskenariot ändras inte vattenflödet pga några andra externa förhållanden än strandlinjeförskjutning och periglaciala klimatförhållanden. Strandlinjeförskjutningens inverkan på degraderingsprocesserna i betongen i barriärkonstruktionen i 1-2BMA beskrivs i Höglund (2014, tabell 7-6). Strandlinjeförskjutningens inverkan på osäkerheten i parametervärdena för barriärkonstruktionen i 1-2BMA är underordnad osäkerheterna i parametervärdena pga. interna betongdegraderingsprocesser. Periglaciala klimatförhållanden skulle kunna medföra att betongen fryser. I huvudskenariot ansåts att betongen blir kraftigt degraderad på grund av frysning vid 52000 år e Kr. Valet av hydraulisk konduktivitet, porositet och diffusivitet för betong som varit frusen är behäftad med osäkerheter. Den valda hydrauliska konduktiviteten är samma som man valt för makadamåterfyllnaden vilket medför att betongkonstruktionen efter frysning inte längre utgör en flödesbarriär. Porositeten är satt till ett relativt högt värde vilket medför en ökad porvattenkoncentration för starkt sorberande nuklider, se SKB (2015, avsnitt 9.1). Vid 52000 år e Kr kommer radionuklidinventariet i 1-2BMA i huvudsak att bestå av starkt sorberande nuklider. Den valda diffusivitetsfördelningen för tiden efter frysning är representativ för kraftigt degraderad betong, se Höglund (2014, tabell 9-1 och figur 9-2). Övriga interna betongdegraderingsprocesser inklusive processer som förväntas orsaka sprickbildning utreds i Höglund (2014).

I Höglund (2014, avsnitt 9.4 och tabell 9-1) samt i datarapporten (SKB 2014a, kapitel 9 och 10) motiveras de valda parametrarna för betongen i barriärkonstruktionen för 1-2BMA. Valet av hydraulisk konduktivitet är befäst med stora osäkerheter pga. det komplexa samspelet mellan fysikaliska och kemiska degraderingsprocesser (Höglund 2014, avsnitt 9.4). Skillnaden mellan vald hydraulisk konduktivitet och de beräknade ändringarna i hydraulisk konduktivitet till följd av kemiska porositetsförändringar i Höglund (2014, figur 9-1) tillskrivs fysiska/mekaniska processer som bedöms svåra att undvika (såsom uttorkningsprickor, temperatursprickor). En konsekvens av de fysiska/mekaniska processerna är en förhöjning av den hydrauliska konduktiviteten och diffusiviteten relativt den konduktivitet och diffusivitet som erhålls om man endast tar hänsyn till den kemiska porositetsförändringen. De antaganden som gjorts kring konsekvenserna av de fysiska/mekaniska processerna bedöms vara pessimistiska och valet av hydraulisk konduktivitet bedöms vara pessimistiskt.

Om man bortser från de fysiska/mekaniska processerna och gör en uppskattning av den hydrauliska konduktiviteten baserad på endast kemiska porositetsförändringar erhålls den röda linjen i figur 9-1 i Höglund (2014). En sådan uppskattning indikerar att den hydrauliska konduktiviteten hos barriärkonstruktionen i 1-2BMA skulle kunna vara en till två storleksordningar lägre än den som ansatts i huvudskenariot.

Det antagande som gjorts kring konsekvensen av de fysiska/mekaniska processerna på diffusiviteten hos barriärkonstruktionen i 1-2BMA bedöms vara pessimistiskt och

valet av diffusivitet under de första 10000 åren bedöms vara pessimistiskt. Om man bortser från de fysiska/mekaniska processerna och gör en uppskattning av diffusiviteten baserad på endast kemiska porositetsförändringar erhålls den röda linjen i figur 9-2 i Höglund (2014). En sådan uppskattning indikerar att diffusiviteten hos barriärkonstruktionen i 1-2BMA under de första 10000 åren skulle kunna vara något lägre än den som ansatts i huvudscenariot.

Inom ramen för doktorandarbetet av A. Babaahmadi undersöktes transportegenskaperna hos kraftigt degraderad betong. Resultaten redovisade i avhandlingen stöder den valda diffusiviteten för tidsperioden 10 000–20 000 år efter förslutning (Babaahmadi 2015). I Höglund (2014, figur 9-2) så är diffusiviteten beräknad med tre olika modeller, fram till 20 000 år så ger alla tre modellerna ett likartat värde för diffusiviteten. Efter 20 000 år ökar osäkerheten i betongens diffusivitet vilket tas hänsyn till i valet av diffusivitetsfördelning i de probabilistiska radionuklidtransportberäkningarna, se tabell ovan.

Porositeten hos betongbarriären förväntas variera mellan dess olika delar, framförallt kan man förvänta sig att porositeten med tiden ökar mer i de yttre delarna av barriären (Höglund 2014, kapitel 7). Porositeten påverkar koncentrationen av radionuklider i porvattnet, men en ökad porositet kan leda till både en sänkning eller ökning av koncentrationen beroende på radionuklidernas sorptionsegenskaper på cementmatrisen (se SKB 2014a, avsnitt 9.1). Detta medför att en överskattning av porositeten skulle vara pessimistiskt för vissa nuklider men optimistiskt för andra. I radionuklidtransportberäkningarna har SKB valt att använda medelvärdet av porositeterna angivna i Höglund (2014, tabell 9-1 i). Spannet av porositeter i tabell 9-1 visar hur porositeten förväntas variera under tidsperioden.

Utöver de osäkerheter i parameterintervall som beskrivs ovan har även osäkerheterna i interna betongdegraderingsprocesser genererat det mindre sannolika scenariot accelererad betongdegradering.

- 6. SSM anser att SKB bör komplettera ansökan med:**  
**Redovisning av hur betydelsefull mängden urlakningsprodukter i det genomströmmande vattnet är för utvecklingen av de kemiska samt fysikaliska egenskaperna av barriärkonstruktionernas betong. Dessa urlakningsprodukter kan ha sitt ursprung i t.ex. övriga betongkonstruktioner i det förslutna slutförvaret, såsom betongpluggar, bentonit, sprutbetong i bergrumsförstärkningar, cement i berginjektering, avfallskollin samt deras kringgjutning.**

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

Det finns flera tekniska barriärer tillverkade av betong i SFR. Dessa är golv, väggar och lock i de båda BMA-salarna, golv, kringgjutningsbruk och själva betongtankarna i BTF-salarna samt betongbarriären i silon. Betongen i de tekniska barriärerna i SFR påverkas av kemiska reaktioner till följd av att porvattnet i betongen blandas med det inkommande grundvattnet. Detta leder till en långsam förändring av cementmineralens sammansättning samt betongens porositet. Förändringen i framför allt porositeten och porstrukturen i betongen är starkt kopplad till barriärens hållfasthet och säkerhetsfunktioner som låg hydraulisk konduktivitet och diffusivitet. Hur lång tid förändringen tar beror på grundvattnets kemiska sammansättning. Under den analyserade perioden, 100 000 år, varierar grundvattensammansättningen framförallt på grund av landhöjningen, men även på eventuell framtida glaciation. Grundvattnets kemiska sammansättning kan även påverkas av andra material i förvaret. Avfallet innehåller lösliga salter och korrosionsprodukter som förändrar vattenkemin. Grundvattnet kan

träffa på andra betongkonstruktioner i förvaret innan det når barriären. Bentoniten kring silon kan förändra vattnets sammansättning innan det når betongbarriären.

### Processbeskrivning

I Höglund (2014, avsnitt 4.1) finns en detaljerad redogörelse för de kemiska processer som är kända för att leda till förändringar av betydelse för betongbarriärernas säkerhetsfunktioner efter förslutning av SFR. De viktigaste av dessa är portlanditlakning, karbonatisering, salt- (klorid-) angrepp och sulfatangrepp. Dessa processer, tillsammans med flera andra reaktioner och mineralomvandlingar, är inkluderade i den termodynamiska modelleringen.

Portlanditlakning sker alltid i betong under vatten. Det är en process som pågår under mycket lång tid, om mängden portlandit i betongen inledningsvis är hög. Portlanditen buffrar betongporvattnet till högt pH. Portlanditlakningen går långsammare om det inkommande vattnet redan är jämviktat med portlandit ifrån andra cementmaterial i förvaret, till exempel sprutbetongen på bergssalarnas väggar. När betongen är ny innehåller porvattnet alkalihydroxider som håller pH över 13. Så länge alkalihydroxiderna finns kvar i porvattnet sker portlanditlakningen långsammare än efter att alkalihydroxiderna lakats ur.

Karbonatisering är vanligt då betong utsätts för atmosfärens koldioxid och har relevans för driftsperioden före förslutning och återmättnad. Karbonatjoner i grundvattnet kan också leda till att karbonat faller ut i eller kring betongen. Den termodynamiska modelleringen inkluderar flera mineral innehållande karbonat, till exempel kalcit och karbonatbaserade AFm-faser. Metastabila kalciumkarbonatfaser ( $\text{CaCO}_3$ ) som aragonit och vaterit kommer inte att synas i modellerna, eftersom man antar lokal kemisk jämvikt vilket förhindrar att metastabila mineral faller ut.

Klorid från saltvatten som tränger in i betongen kan leda till utfällning av mineralet friedelsalt som har hög molär volym. Detta kan orsaka expansion med påföljande sprickbildning eller spricktillväxt i betongen. Klorid som tränger in till armeringen i betongen kan också bryta passiveringen av järnkorrosionen och leda till att de expansiva järnkorrosionsprodukterna skadar betongen.

Om sulfatkoncentrationen i det inkommande vattnet är större än jämvikt-koncentrationen av sulfat i betongporvattnet kan det expansiva mineralet ettringit falla ut och skada betongen. Detta kan dock bara hända om det finns aluminium tillgängligt i andra lösliga mineral i betongen eller i vattnet.

### Påverkan från processer

I Höglund (2014) beskrivs betongens kemiska degradering över tid till följd av att grundvatten passerar förvaret. Här används två olika grundvatten, ett för den inledande perioden när förvaret befinner sig under havet och ett annat för den efterföljande perioden då det inkommande grundvattnet är meteoriskt. Den kemiska sammansättningen i de båda vattnen beskrivs i Höglund (2014, bilaga H). Dessa vattens sammansättningar är hämtade från Höglund (2001). Inledningsvis regleras hastigheten i betonglakningen av det omgivande vattnets pH och kalciumkoncentration. Lakningen av portlandit i betongen är den tydligaste förändringen under de första tusentals åren. Portlanditen lakas lite fortare då jonstyrkan i det inkommande grundvattnet är låg, det vill säga lakningen går långsammare om grundvattnet plockar upp joner från andra material i förvaret.

I Cronstrand (2014) beskrivs hur pH förändras över tid i de olika förvarsdelarna till följd av skillnader i inkommande vattens kemiska komposition, reaktioner med cementmineral samt reaktioner med materialen i avfallet.

I Gaucher et al. (2005), Cronstrand (2016b) och Cronstrand (2007) beskrivs hur bentoniten och betongen i silon påverkas av att befinna sig i kontakt med varandra. I alla tre studierna framgår att cementmineralen påverkas av bentonitporvattnet, men att cementen påverkas mindre av bentonitporvattnet än av inkommande grundvatten som inte jämviktats med bentonit.

Som visas i *Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU*, tabell 6-2, räcker mängden cement i avfallet till för att absorbera det salt som finns i avfallet. SKB anser därför att salt från avfallet inte i någon större utsträckning kommer att påverka betongen i barriärerna.

Bitumensolidifierat avfall i plåtkokiller/fat som placeras intill betongbarriärerna skulle dock kunna påverka barriären istället för cementen i avfallet. I Cronstrand (2016a) beskrivs hur salt som frigörs från avfall som innehåller industrikoncentrat och jonbytarmassor i bitumenmatris kan påverka betongen i kringliggande betongstrukturer och leda till tryckklaster som möjligen kan vidga befintliga mikrosprickor i betongen. Detta skulle i så fall leda till en ökad hydraulisk konduktivitet och effektiv diffusivitet för radionuklider genom betongbarriären. Dessa öknings bedöms inrymmas under scenariot ”accelererad betongdegradering” i radionuklidtransportberäkningarna (SKB 2015).

Sammanfattningsvis kan sägas att betongens degraderingshastighet är kopplad till den kemiska sammansättningen hos det inkommande grundvattnet. De grundvatten som använts i modelleringen av betongdegraderingen och de olika material som i modellerna tillåts påverka vattnet innan det når fram till betongbarriärerna anses av SKB täcka in de möjligheter som sannolikt kan uppstå i SFR efter förslutning. Höga halter av klorid- respektive sulfatjoner i inkommande grundvatten omfattas av det mindre sannolika scenariot ”accelerated concrete degradation” i SKB (2015).

**7. SSM anser att SKB bör komplettera ansökan med:  
Redovisning av effekten av lokaliserade flöden genom återfyllnaden på de antagna degraderingsprocesserna i barriärkonstruktionernas betong som redovisas i rapport SKB R-13-40.**

**SKB:s svar:**

Under de första 100 åren efter förslutning antas de hydrauliska egenskaperna hos betongbarriären i 2BMA vara desamma som vid initialtillståndet. Betongen har en genomsnittlig hydraulisk konduktivitet på  $K_{\text{betong}}=8,3 \cdot 10^{-10}$  m/s och en effektiv diffusivitet på  $D_e=3,5 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s (SKB 2014a). Från 100 år och fram till 20 000 år efter förslutning antas betongen vara måttligt degraderad med en genomsnittlig konduktivitet på  $K_{\text{betong}}=10^{-7}$  m/s och en effektiv diffusivitet på  $D_e=5 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s (SKB 2014a).

Den huvudprocess som påverkar betongens utveckling under perioden är lakning av portlandit. Lakningshastigheten beror av mekanismerna för masstransport. Tabell 2 visar medelhastigheter för grundvatten i betongbarriären, utvärderade från simulering av närzonshydrologi för 2000 e Kr, 3000 e Kr och 5000 e Kr (Abarca et al. 2013). Från 5000 e Kr och framåt råder landförhållanden över förvaret. De hydrogeologiska förhållanden som då råder antas vara representativa även för framtida tempererade förhållanden under analysperioden. Under periglaciala förhållanden minskar flödet av grundvatten genom förvaret.

Tabell 2 redovisar även tillhörande Péclets tal som relaterar masstransport genom diffusion till advektiv transport, enligt

$$Pe = \frac{uL}{D_e}$$

Ovan är  $u$  grundvattnets hastighet genom betongbarriären (m/s),  $L$  är barriärens tjocklek (0,4 m för 1BMA och 0,5 m för 2BMA). Pécle's tal i tabellen är mindre än 1 för samtliga fall. Detta indikerar att diffusiv masstransport dominerar över advektiv transport genom betongbarriären och därmed att diffusion styr lakningen av portlandit.

**Tabell 2. Flödes hastighet och Pécle's tal i betongbarriären i 1-2BMA.**

Tidpunkt (år e Kr)	Bergssal	Flödes hastighet i betongbarriär (m/s)	Pécle's tal
2000	1BMA	$3,1 \cdot 10^{-15}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$
3000	1BMA	$1,0 \cdot 10^{-12}$	$8,1 \cdot 10^{-2}$
5000	1BMA	$2,2 \cdot 10^{-12}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$
2000	2BMA	$1,8 \cdot 10^{-16}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$
3000	2BMA	$1,2 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$
5000	2BMA	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$

I bilaga 3, avsnitt 1.2, visas att grundvattnets hastighet utanför betongkonstruktionen har en begränsad påverkan på den diffusivt kontrollerade lakningsprocessen. Om salsflödet ökar 4 gånger, ökar det beräknade lakningsdjupet från cirka 16 till 17 cm sett över 20 000 år.

Under perioden 20 000-50 000 år efter förslutning följs lakning av portlandit av upplösning av CSH-faser i betongen. Beskrivningen av degraderingstillståndet tar hänsyn till att inväxt av thaumasit och ettringit potentiellt kan skapa sprickor i betongen. Då vatten leds genom sprickor sker lakning av betong vid sprickornas ytor. Lakningsprocessen är liksom i föregående tidsperiod styrd av diffusion i betongen. I bilaga 3, avsnitt 1.2, visas att grundvattnets hastighet utanför betongkonstruktionen och i sprickor har en begränsad påverkan på den diffusivt kontrollerade lakningsprocessen. I ett exempel visas att det beräknade lakningsdjupet  $d_m$  i en punkt mitt i betongväggen i 2BMA, utvärderat över ett 1000 års intervall, blir cirka 1 % större om vattenflödet genom bergssalen är 4 gånger högre än det som beräknats för huvudscenariot. Utvärderat över ett tidsintervall på 10 000-tals år blir skillnaden mindre än 1 %. Exemplet visar att kopplingen mellan flödet i 2BMA och betongdegraderingen är begränsad.

Under 50 000–100 000 år efter förslutning lakas betongen ut på återstående cementhydrater. Betongbarriären i 2BMA antas vara ”fullständigt” degraderad och inte längre erbjuda något flödesmotstånd (Abarca et al. 2013). Detta betongens antagna sluttillstånd påverkas inte längre av grundvattenflödet.

Flödet genom 1-2BMA styrs av bergets egenskaper och den regionala tryckgradienten. Vid sprickzoner, där vatten kommer in eller lämnar en bergssal, kan lokaliserade flöden uppstå genom återfyllnaden, där flödes hastigheter är högre än medelhastigheten beräknad över hela salen. Modellering av närzonshydrologin (Abarca et al. 2013) har visat att lokala flödes hastigheter i återfyllnaden som mest skiljer sig från medelhastigheten med en faktor 2-3 i 1BMA. Skillnaden är mindre i 2BMA. Mot bakgrund av resultat presenterade ovan och i bilaga 3 förväntas dessa lokaliserade flöden i återfyllnaden 1-2BMA inte förändra den beskrivning av betongbarriärernas utveckling som beskrivs i SR-PSU.

## 8. SSM anser att SKB bör komplettera ansökan med:



## **Redovisning av hur långtidsutvecklingen av återfyllnaden och makadam under barriärkonstruktionen påverkar säkerhetsfunktionen hydraulisk kontrast samt dess osäkerheter.**

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

De material och installationsmetoder som leder fram till initialtillståndet för 1-2BMA finns beskrivna i initialtillståndsrapporten (SKB 2014b) och förslutningsplanen för SR-PSU (Luterkort et al. 2014). En redovisning och analys av de processer som påverkar makadam i återfyllnad och i grundläggning ges i bilaga 4.

Som beskrivs i *Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU*, avsnitt 6.3.8, är den hydrauliska kontrasten i 1-2BMA given av kvoten mellan betongkonstruktionernas hydrauliska konduktivitet och konduktiviteten i återfyllnad och grundläggningmaterialen. Redovisningen i bilaga 4 av de processer som påverkar långtidsutvecklingen av makadam i återfyllnad och i grundläggning pekar på en begränsad inverkan på porgeometri och hydrauliska konduktivitet och att påverkan på det huvudsakliga flödesmönstret i 1-2BMA är försumbart.

Den hydrauliska konduktivitet för makadam som antagits som initialtillstånd inom SR-PSU är  $K > 1 \cdot 10^{-2}$  m/s (SKB 2014b). I beräkningar av flöden genom bergssalar och avfall i 1-2BMA antas att makadam i återfyllnaden och i grundläggningen ha en hydraulisk konduktivitet på  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s, från initialtillståndet och vidare genom hela analysperioden på 100 000 år (Abarca et al. 2013). Större osäkerheter relaterar i första hand till avgränsningen mellan återfyllnadsmaterial och betongkonstruktioner. Ungefär 50 000 år efter förslutning förväntas kemisk betongdegradering och spräckning av betong till följd av frysning leda till betongmaterial som inte längre begränsar flöde i lika stor utsträckning som initialt, eller kan antas vara väl avgränsat från återfyllnadsmaterialet. Inom närzonshydrologin ansätts då en hydraulisk konduktivitet på  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s även för betongmaterialen (Abarca et al. 2013). Ingen skillnad i hydrauliska egenskaper mellan återfyllnaden och betongkonstruktionerna antas existera, vilket är ett försiktigt antagande.

Långtidsutvecklingen av makadam i återfyllnad och i grundläggning förväntas sammanfattningsvis inte styra den hydrauliska kontrasten i 1-2BMA.

Med vänlig hälsning

**Svensk Kärnbränslehantering AB**  
Projekt SFR Utbyggnad

Peter Larsson  
Projektledare PSU

### **Bilagor**

1. *Säkerhetsfunktionsindikatorn hydraulisk kontrast och BMA salarnas hydrauliska funktion*, SKBdoc 1578211 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

2. *Hållfasthetsegenskaper hos betongkonstruktionerna i 1-2BMA under de första 20 000 åren efter förslutning*, SKBdoc 1577237 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
3. *Vattenflöde genom 2BMA - känslighet för parametrering av bergets egenskaper*, SKBdoc 1564134 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.
4. *Långtidsutveckling av materialegenskaper för grundläggning och återfyllnad i 1-2BMA*, SKBdoc 1568423 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

## Referenser

**Abarca E, Idiart A, de Vries L M, Silva O, Molinero J, von Schenck H, 2013.**

Flow modelling on the repository scale for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Babaahmadi A, 2015.** Durability of cementitious materials in long-term contact with water. Doktorsavh. Chalmers tekniska högskola.

**Cronstrand P, 2007.** Modelling the long-time stability of the engineered barriers of SFR with respect to climate changes. SKB R-07-51, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Cronstrand P, 2014.** Evolution of pH in SFR 1. SKB R-14-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Cronstrand P, 2016a.** Long-term performance of bituminized evaporator concentrates in the BMA repository hall: Study of the release mechanism and its impact on engineered barriers. SKBdoc 1479248 ver 1.0. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Cronstrand P, 2016b.** Long-term performance of the bentonite barrier in the SFR silo. SKB TR-15-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Gaucher E, Tournassat C, Nowak C, 2005.** Modelling the geochemical evolution of the multi-barrier system of the Silo of the SFR repository. Final report. SKB R-05-80, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Höglund L O, 2001.** Project SAFE. Modelling of long-term concrete degradation processes in the Swedish SFR repository. SKB R-01-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

**Luterkort D, Nyblad B, Wimelius H, Pettersson A, Aghili B, 2014.** SFR Förslutningsplan. SKBdoc 1358612 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2014a.** Data report for the for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2014b.** 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.

## Revisionsförteckning

Ver	Datum	Revideringen omfattar	Utförd av	Kvalitetssäkrad	Godkännare