

## SKB – Huvudrapport SR-Site

### Redovisning av säkerhet efter förslutning av slutförvaret för använt kärnbränsle

#### Huvudrapport från projekt SR-Site

#### Del II

I tidigare distribuerad rapport finns det fel som nu har korrigerats. De korrigerade sidorna 334, 338, 345, 391, 407, 463, 542 och 552 bifogas. Den ändrade texten är markerad med en vertikal linje i sidmarginalen. En uppdaterad pdf-version av rapporten, daterad 2012-01, finns på [www.skb.se/publikationer](http://www.skb.se/publikationer).

Följande mekaniska processer som är relaterade till den inledande tempererade perioden efter förvarets förslutning skulle kunna ha betydelse för säkerheten.

- Reaktivering av sprickor i närområdet till följd av termisk belastning, inklusive minskningar av sprickaperturer då den förhöjda temperaturen leder till att det intakta berget expanderar. Detta skulle kunna påverka den mekaniska stabiliteten (säkerhetsfunktion R3bc, se figur 10-2) och sprickornas transmissivitet och därmed transportmotståndet hos berget i närområdet (säkerhetsfunktioner R2ab).
- Reaktivering av sprickor i fjärrområdet som skulle kunna påverka sprickornas transmissivitet och därmed transportmotståndet (säkerhetsfunktion R2a).
- Reaktivering till följd av spänningar i jordskorpan orsakade av trycket från den mittatlantiska ryggen (ridge push), vilket skulle kunna påverka deponeringshålens mekaniska stabilitet (säkerhetsfunktion R3bc).
- Sprickbildning i berget som skulle kunna påverka deponeringshålens geometri (säkerhetsfunktion Buff1) och överföringen av lösta komponenter mellan buffert och berg (relaterat till säkerhetsfunktion R2a).
- Risk för krypdeformationer som skulle kunna påverka deponeringshålens geometri (relaterat till säkerhetsfunktionerna Buff3 och Buff6). Här används termen kryp även för de fall där den mekaniska belastningen inte är konstant över tiden, dvs när skjuvdeformationen gradvis minskar spänningarna.

Dessa frågor utvärderas i följande delavsnitt.

### **Modelleringsmetod**

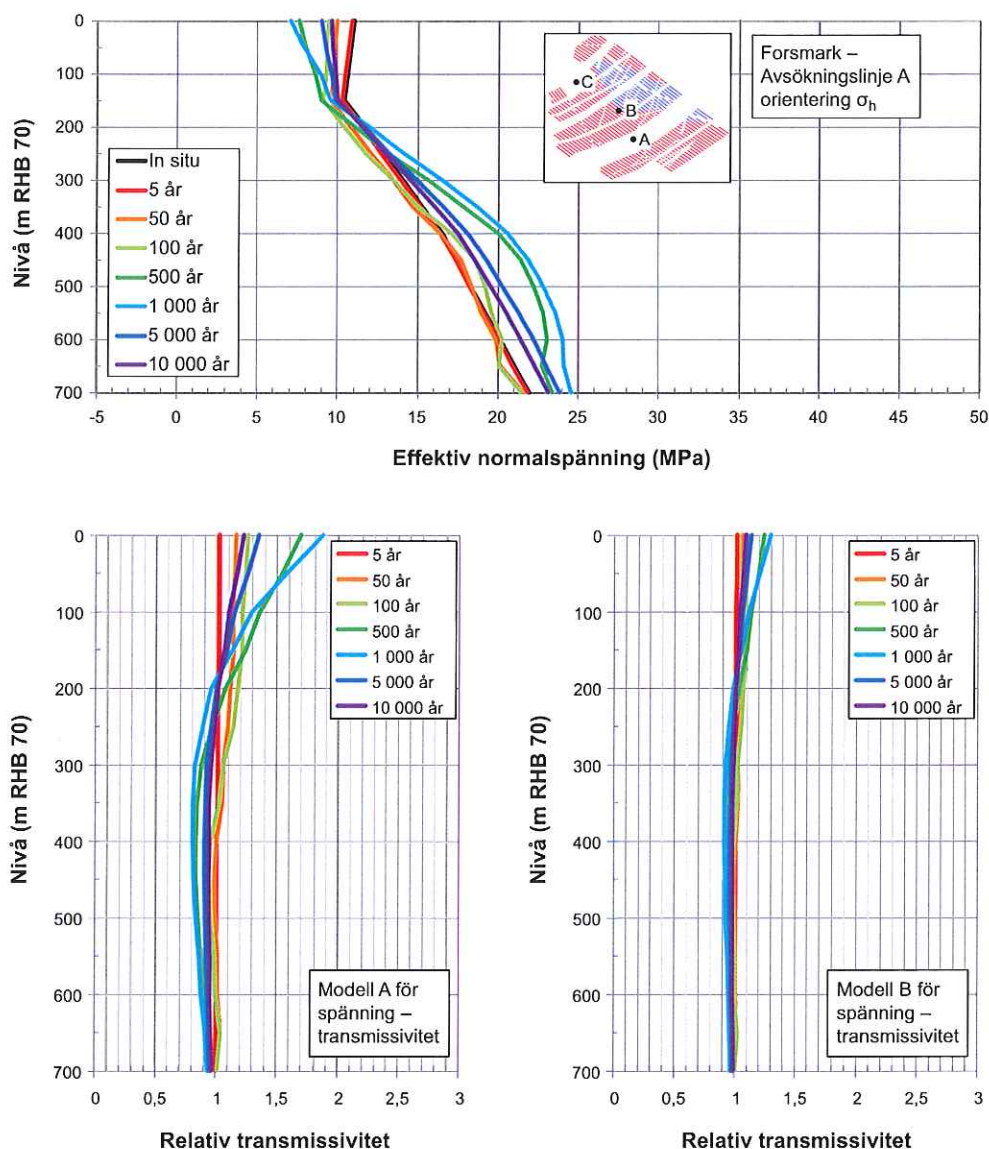
De flesta av ovanstående frågor analyseras med hjälp av integrerad numerisk modellering /Hökmark et al. 2010/ där 3DEC-koden (3 Dimensional Distinct Element Code) /Itasca 2007/ används för storskaliga modeller och för modeller av närområdet. Vid denna modellering genereras spänningsförändringar som beror på de termiska (och senare glaciala) lasterna. Dessa spänningsförändringar används i sin tur för att analysera möjliga förändringar av sprickors eller sprickzoners transmissivitet genom att anta vissa förhållanden mellan spänningsförändringar och transmissivitet.

Den storskaliga modellen representeras av rektangulära block med måtten 8 km·7,4 km·cirka 3 km, se figur 10-17. Genomsnittsvärden av de termomekaniska egenskaper som bedöms vara relevanta för hela den domän som modelleras används för att representera egenskaperna hos bergmassan. Detta beskrivs utförligare i avsnitt 6.4 i **Datarapporten**. I modellerna är värmekällorna placerade i enlighet med Layout D2, där förlusten av deponeringspositioner antas vara jämnt fördelad över förvarsregionen. Randvillkor för den efterföljande modelleringen av närområdet erhålls från förskjutningar av de fördefinierade snittplan som representerar närområdesmodellens gränssytor och utvärderas som utvidgning/kompression i förhållande till centrum av närområdesmodellen som en funktion av tiden.

Två typer och storlekar av närområdesmodellen används:

- Ett tunnelsegment med sju värmegenererande kapslar (för spjälkningsanalyser), men där endast tre av deponeringshålerna explicit ingår. Modellmåttan är 40 m (tvärsöver tunnlarna) och 50 m (vertikalt), se figur 10-18.
- Fem tunnelsegment, vart och ett med 33 potentiella deponeringspositioner (skjuvning, normalspänningsvariationer och transmissivitetsförändringar hos sprickor). Inget av deponeringshålerna ingår explicit. Med ett angreppssätt som liknar det som användes av /Hökmark et al. 2006/ och /Fälth och Hökmark 2007/ har spricksystemet stiliserats. En modell används i vilken sprickornas orienteringar baseras på platsdata i sprickdomän FFM01 /Fox et al. 2007/ och en modell där en spricka är orienterad så att risken för skjuvbrott är stor, se figur 10-19. Modellmåttan är 200 m (tvärsöver tunnlarna) och 200 m (vertikalt).

Baserat på de transmissivitetsdata som finns för sprickdomän FFM01 i Forsmark /Follin et al. 2007b/ samt på de data för normalstyvhet som anges i **Datarapporten**, tillämpade /Hökmark et al. 2010/ två olika modeller för förhållandet mellan spänning och transmissivitetsförändringar, se figur 10-20. Som diskuteras utförligare i **Datarapporten** är styrkan hos den hydromekaniska kopplingen mycket osäker, men det spann som ges av dessa modeller bedöms täcka in – eller åtminstone överskatta – denna koppling.



**Figur 10-21.** Övre delen: effektiv spänning längs med en skanningslinje i riktningen för  $\sigma_h$ . Här har kompressionen ett positivt värde. Nedre delen: Relativ transmissivitet hos sprickor som är vinkelräta mot  $\sigma_h$ . Från /Hökmark et al. 2010, figur 6-21/.

som skär de uppvärmda deponeringsområdena är betydligt stabilare. För en spricka inuti deponeringsområdet och med en radie på 150 m på 450 m djup är den maximala förskjutningen omkring 6–7 mm, återigen i enlighet med det analytiska uttryck som används. På grund av värmebelastningen åtföljs förskjutningsrörelsen av en ökad normalspänning, vilket betyder att transmissiviteten kan minska snarare än öka. Det bör också noteras att förskjutningen och påverkan på transmissiviteten kommer att vara mycket mindre för sprickor med andra orienteringar.

Sammanfattningsvis bedöms de transmissivitetsförändringar som induceras av den termiska belastningen vara för små för att de ska behöva beaktas ytterligare vid de hydrogeologiska analyserna av fjärrområdet.

### Reaktivering av sprickor i närområdet

Resultaten från modellen av ett närområde beskrivet i intermediär skala tyder på att normalspänningarna för de platsspecifika sprickorienteringarna i allmänhet ökar under den uppvärmda fasen, vilket leder till små minskningar av transmissiviteten hos de modellerade sprickorna. Dessutom är den transmissivitetsökning nära tunneln som uppstår i samband med bergguttaget, se figur 10-6, mycket mindre jämfört med den som förekommer under byggskedet. Det kan finnas områden som ligger mycket nära öppningar i berget där lokala transmissivitetseffekter skulle kunna vara betydande, till exempel på

## Vattenmättnad

Tidsskalan för återfyllningsmaterialets vattenmättnad uppskattas genom att modelleringsverktyget DarcyTools används enligt den metodik som beskrivs ovan /Svensson och Follin 2010/. Inflödet beräknas för varje driftskede A–C. För en förklaring av de olika faserna, se avsnitt 10.2.3.

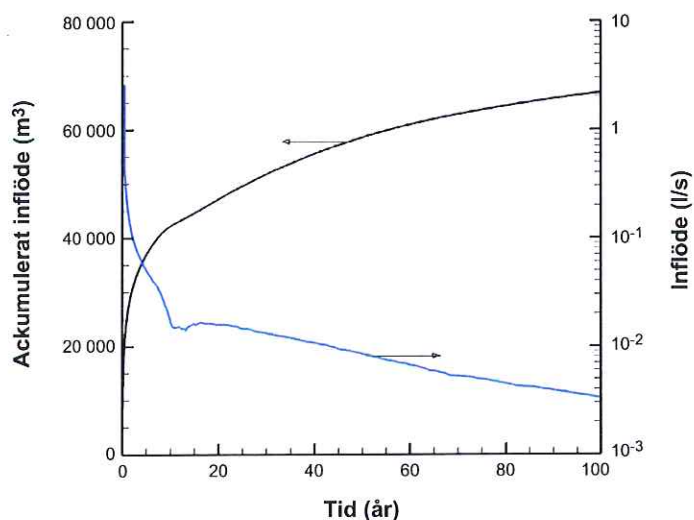
I figur 10-23 visas inflödet som funktion av tiden för driftskede A. Efter en kort period med högt inflöde följer en period där inflödet gradvis minskar. Enligt beräkningarna som redovisas i /Svensson och Follin 2010/ kommer det att ta flera hundra år för förvaret att uppnå full vattenmättnad. Eftersom den tempererade perioden pågår i storleksordningen 10 000 år svarar den initiala perioden med delvis vattenmättade förhållanden bara mot en liten del av hela den tempererade perioden. Följaktligen kan antagandet om mättade förhållanden under huvuddelen av simuleringarna för den tempererade perioden anses vara relevant.

För att studera skillnader i mättnadsegenskaper mellan olika delar av förvaret görs en analys av vattenmättnadsförloppet i olika tunnelsektioner utifrån tryckfördelningen efter 100 dagars mättnad. Resultatet visas i figur 10-24 uttryckt som integrerat inflöde per meter tunnel för tre olika förlopp – ett långsamt, ett medelsnabbt och ett snabbt. Ungefär 4,1 m<sup>3</sup> vatten per meter behövs för att helt och hållet vattenmätta porutrymmet i återfyllningsmaterialet i tunnarna. Resultaten visar att efter 50 år har tunnelsektionen med snabbt förlopp uppnått 3,7 m<sup>3</sup>/m, medan tunnelsektionen med långsamt förlopp har uppnått 2,9 m<sup>3</sup>/m. Tunnelsektionen med medelsnabbt förlopp har uppnått 3,1 m<sup>3</sup>/m.

Vattnet som mättar de återfyllda anläggningsdelarna härrör huvudsakligen från modellområdets övre rand. Denna slutsats grundar sig på två aspekter. För det första är inströmningen över toppranden den enda tillgängliga fria vattenkällan i modellen. Modellen får här ett tillskott antingen i form av nederbörd (meteoriskt vatten med en successivt ändrad kemisk sammansättning) eller vatten från Östersjön (havsvatten med en successivt ändrad kemisk sammansättning). För det andra är permeabiliteten hos berggrunden över förvarsdjupet mycket högre än under. I grova drag kan sägas att den volym vatten som krävs för att uppnå full vattenmättnad av förvaret motsvaras av den volym vatten som ryms i berggrundens advektiva porvolym ovanför förvarsdjup.

## Hydrogeokemisk utveckling

Utvecklingen av grundvattenflöde och hydrogeokemi under den tempererade perioden har modelleras mellan 8000 f Kr och 12 000 e Kr (notera att bara resultat fram till 9000 e Kr används i de geokemiska analyserna, se avsnitt 10.3.7). Det initiala hydrogeokemiska förhållandet i Forsmarksområdet år 8000 f Kr beskrivs med hjälp av ett antal referensvatten, vilka antas bidra till grundvattnets sammansättning i olika grad beroende på djupet. Initialt antas att salthalten är hög (djupt liggande salt vatten) på stort djup och att den minskar ju närmare markytan man kommer på grund av uppblandning med sötvatten av äldre meteoriskt ursprung (gammalt meteoriskt vatten) och glacialt smältvatten (glacialt smältvatten).



Figur 10-23. Inflow [l/s] och ackumulerat inflöde [m<sup>3</sup>] under driftskede A.

**Tabell 10-5. Totalt tillåten förlust för fallet som åskådliggörs i figur 10-60.**

$\phi$ (°)	Total förlust (ton)
10	430
20	220
30	150

Detta innebär att avståndet mellan kapseln och återfyllningen förutsätts vara 1,5 m som i figur 5-16 och inte 2,5 m som i figur 10-60. Vidare antas det att friktionsvinkeln är lika stor i bufferten och återfyllningen och att materialförlusten i återfyllningen sker precis ovanför kapseln, samt att återfyllning förloras till en vertikal spricka. Materialförlust längre bort i tunneln eller till en stupande spricka skulle innebära att ytterligare återfyllning kan gå förlorad.

Det är rimligt att anta att friktionsvinkeln kommer att vara omkring 20° för dessa förhållanden, eftersom svälltrycket är lägre än 100 kPa /Börgesson et al. 1995/. Detta innebär att totalt 220 ton återfyllning kan försvinna innan svälltrycket ovanför kapseln sjunkit till 100 kPa.

Förlust av återfyllning till följd av erosion är betydelsefull för buffertens egenskaper i deponeringshålet, men förväntas inte ha någon avgörande betydelse för själva transportegenskaperna. Det kommer att finnas en lokal volym med lågt svälltryck och hög hydraulisk konduktivitet. Huvuddelen av tunnelns volym kommer emellertid inte att påverkas.

### Risk för advektiva förhållanden

Advektiva förhållanden i bufferten kan endast uppstå om den hydrauliska konduktiviteten är tillräckligt hög. Buffertens funktionsindikatorer fastlägger att en hydraulisk konduktivitet på  $10^{-12}$  m/s och ett svälltryck på 1 MPa behövs för att advektion i bufferten ska kunna uteslutas. I dessa värden ingår dock vissa säkerhetsmarginaler.

/Neretnieks 2006b/ beräknade de förhållanden under vilka vatten dras in i ett deponeringshål. Hans slutsats var att även för en spricka i berget med en mycket hög flödes hastighet (transmissivitet  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s och hydraulisk gradient 0,01) är en konduktivitet hos bufferten på runt  $3 \cdot 10^{-6}$  m/s tillräcklig för att förhindra advektion och får vattnet i sprickan att flöda runt bufferten som om den vore ogenomtränglig. Denna konduktivitet motsvarar en torrdensitet långt under 500 kg/m<sup>3</sup>. För att säkerställa att den självläkande förmågan upprätthålls och att inga kanaler eller rör bildas krävs det även ett visst svälltryck. Det minsta svälltrycket som behövs kommer att vara omkring 100 kPa. Detta baseras på laboratorieförsök i vilka kanalbildning har observerats vid ungefär 60 kPa /Karnland et al. 2006/. Värdet är högst sannolikt fortfarande pessimistiskt, eftersom gradienterna på platsen förväntas vara mycket små. Effekten på den acceptabla materialförlusten kommer dock att vara relativt liten. För att säkerställa att detta gäller för alla förväntade grundvattensammansättningar krävs det en torrdensitet av minst 1 000 kg/m<sup>3</sup>, se figur 5-14. Detta motsvarar ett portal på 1,75. Som framgår av figur 10-59 är detta krav fortfarande uppfyllt i nästan hela buffertens radiella utsträckning när två hela bentonitringar utelämnas, vilket motsvarar en förlust av 2 400 kg torrmassa.

För det fall när bufferten eroderar genom kolloidfrigörelse kan materialförlusten vara mer lokal jämfört med det fall i vilket hela block utelämnas. Det är då lämpligare att behandla motsvarande gräns för förluster över cirka halva omkretsen, dvs 1 200 kg, vilket även täcker in situationen när förlusten sker närmare kapselns centrum. Detta värde innehåller ett visst mått av pessimism, eftersom homogenisering i den horisontella riktningen försummas. För större massförluster kan dock inte ett tillräckligt högt svälltryck garanteras och advektion i bufferten måste därför beaktas. Detta diskuteras mer ingående för fallet med buffeterosion i avsnitt 10.3.11.

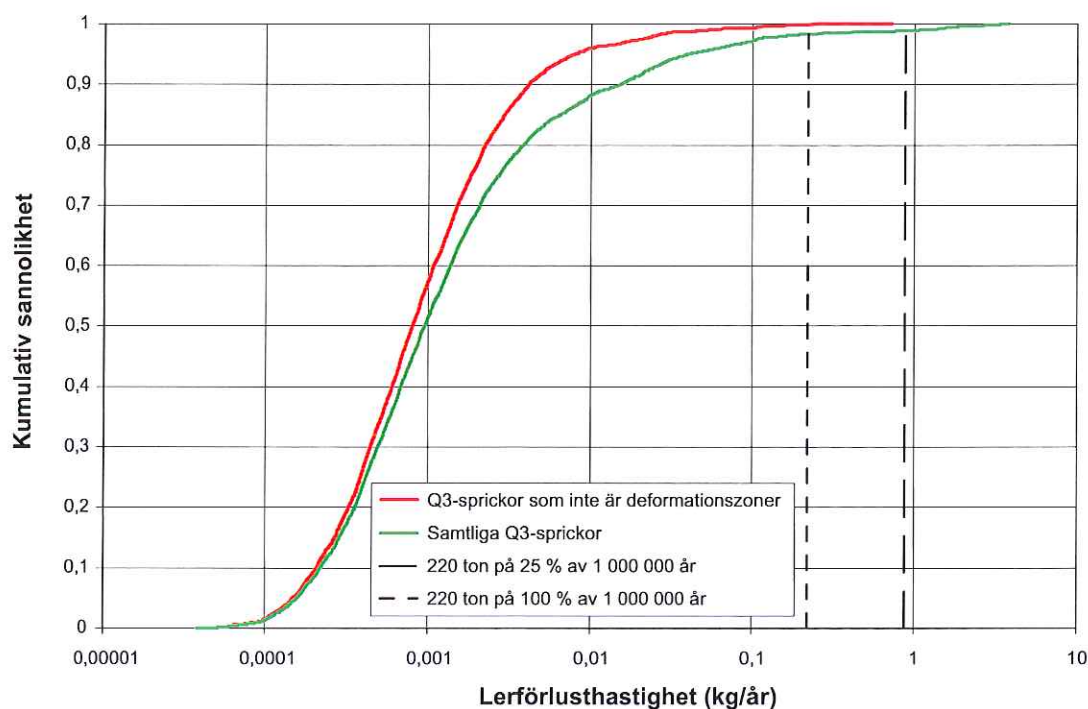
För fallet då materialförlust huvudsakligen sker i tunneln och endast återfyllningsmaterial går förlorat kan en maximal förlust av 220 ton återfyllning tillåtas innan advektiva förhållanden måste beaktas för bufferten i underliggande deponeringshål. Förlust av återfyllning genom erosion innebär emellertid inte att den hydrauliska konduktiviteten i hela tunneln kommer att påverkas.

## Erosion av återfyllningen i deponeringstunnlar

Erosionshastigheten för återfyllningen i deponeringstunnlar beräknades med samma modell som används för buffererosion med följande modifiering: förlusthastigheten ökas med en faktor två för att ta hänsyn till den större diametern för gränssytan mellan sprickan och tunneln (diameter 5 m) jämfört med deponeringshålet (diameter 1,75 m). Alltså får hastigheten ett diameterberoende som växer långsammare än linjärt /Moreno et al. 2010/.

Data för sprickaperturer och Darcyflöde hämtades från resultaten av den hydrogeologiska beräkningen (se avsnitt 10.3.6) för det semikorrelerade fallet utan skadad zon, för att säkerställa att analysen endast inbegriper ”sanna” tunnelskärande sprickor. Vattenhastigheter togs fram från Darcyflödena med samma procedurer som används för buffererosion /Joyce et al. 2010/. Resultaten från hydroanalyserna ger storlekarna på sprickaperturerna och flödeshastigheterna för strukturer där partiklar som frigörs i deponeringstunnlarna omedelbart ovanför varje deponeringshål försvinner in i berget. Flera av dessa strukturer är i själva verket deformationszoner som skär tunnelsystemet på långt avstånd från alla deponeringspositioner. Sådana data bör således uteslutas från analysen när syftet är att utreda om tunnelerosion kan inverka på förhållandena nära ett deponeringshål.

Resultatet av beräkningen visas i figur 10-73. Ingen av de tunnelskärande enskilda sprickorna kommer att leda till erosion i sådan omfattning att kriteriet inte upprätthålls, dvs att mer än 220 ton förloras under en miljon år om erosion äger rum under 25 procent av tidsperioden. För ett fåtal positioner där partiklar försvinner till en deformationszon kan eventuellt mer än 220 ton förloras, men detta är inte relevant för kapselns integritet. För ett orealistiskt, gränssättande fall då erosion äger rum under 100 procent av tiden förloras lite mer än precis 220 ton i fem enskilda tunnelskärande sprickor under en miljon år. Förlusten av 220 ton återfyllning tyder på att advektiva förhållanden inte kan uteslutas i deponeringshålen närmast den tunnelskärande sprickan. Med tanke på att kapselkorrosion är en process som behöver pågå flera hundra tusen år för att åstadkomma ett brott på kapselns inneslutning när advektiva förhållanden med höga sulfidkoncentrationer råder, och att 220 ton tunnelåterfyllning förloras i endast fem positioner med det orealistiska, gränssättande antagandet om erosion under 100 procent av tidsperioden, kan bidraget från förlust av återfyllning i deponeringstunnlar till den möjliga uppkomsten av advektiva förhållanden i deponeringshål betraktas som försumbar.

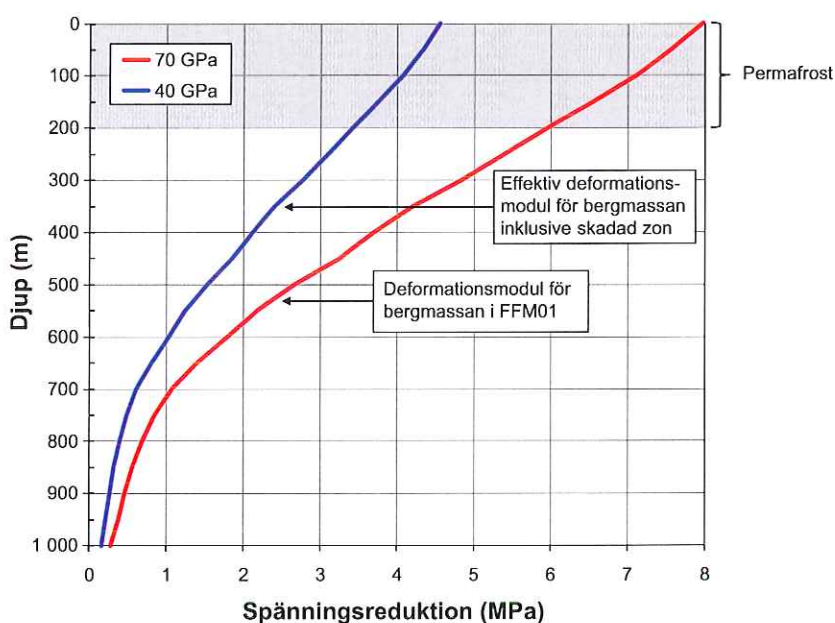


**Figur 10-73.** Beräknad fördelningsfunktion för lerförlusthastighet i deponeringstunnlar för det semikorrelerade hydrofallet och under antagandet att utspädda förhållanden råder.

bakgrundsfältet och visade hur de kombinerade spänningsfälten uppstår. /Lund et al. 2009/ använde det kombinerade spänningsfältet som utgångspunkt för att uppskatta hur förkastningarnas stabilitet påverkades av glaciationen och ägnade särskild uppmärksamhet åt de tilltänkta förvarsplatserna i Forsmark och Laxemar samt som en jämförelse Pärvieförkastningen i norra Sverige, den största av de kända glacialt reaktiverade förkastningarna.

/Hökmark et al. 2010/ utgick från resultaten från /Lund et al. 2009/ för att uppskatta spänningsändringarna i både fjärrområdet och närområdet. Figur 10-110 visar den tidsmässiga utvecklingen av de totala huvudspänningarna på förvarsdjup (460 m) under den glaciala fasen i Forsmark. I likhet med det skede under den tempererade perioden där värme tillförs från förvaret kommer de temperaturförändringar som införs under permafrostförhållanden att ändra spänningarna i bergmassan. I motsats till under den tempererade perioden kommer temperaturminskningen under permafrostförhållanden att påverka mycket större volymer av bergmassan. Detta betyder att de termomekaniska egenskaperna i stor skala måste beaktas genom att ta hänsyn till omgivande berg med lägre styvhet och förekomsten av deformationszoner, vilket kommer att minska bergmassans deformationsmodul. Med utgångspunkt från de skattningar av bergmassans deformationsmodul (40-50 GPa), som föreslås gälla för storskaliga modeller för berggrunden runt Forsmark, skalanpassades resultaten till en effektiv deformationsmodul på 40 GPa. Figur 10-111 visar den resulterande minskningen i horisontell spänning som en funktion av djupet. Dessutom gjorde /Hökmark et al. 2010/ två alternativa antaganden med avseende på det glacialt inducerade portrycket på olika djup.

1. Det antas följa det hydrostatiska trycket i gränssnittet mellan is och underlag, dvs 98 procent av ökningen i vertikal spänning beror på glaciären, vid alla tidpunkter och på alla djup. När isfronten passerar över förvaret, eller i kombination med proglacial permafrost när isen rycker fram, kan dock detta angreppssätt underskatta det högre portrycket på större djup.
2. Skattningar av det kvarvarande porövertrycket som funktion av djupet allt eftersom isfronten passerar över förvaret görs tvådimensionellt med hjälp av en förenklad inlandsisprofil /Paterson 1994/ med den reträtthastighet för isfronten som föreslagits för Forsmark /SKB 2006a/ och med djupberoende hydrauliska egenskaper hos bergmassan /Follin et al. 2007b, Vidstrand et al. 2010/. Skattningen av det övertryck som skulle kunna förekomma under ett proglacialt ogenomsläppligt permafrostlager är baserad på maximalt ogynnsamma antaganden om permafrostens smälthastighet, dvs på ett fall som maximerar det potentiella hydrauliska lyftdjupet under den framryckande isfronten /Lönnqvist och Hökmark 2010/. För den senare portrycksskattningen tas hänsyn till tryckets säsongsvariationer.



**Figur 10-111.** Minskad horisontell spänning (dvs minskad kompression) under permafrostförhållanden. Den röda linjen visar det beräkningsresultat som är baserat på en styvhet hos bergmassan i lokal skala på 70 GPa. Denna spänningsminskning har modifierats för användning i efterföljande analyser så att den motsvarar bergmassans styvhet för relevanta elastiska egenskaper i stor skala, dvs en styvhet på 40 GPa. Den modifierade spänningsminskningen visas med den blå linjen. Från /Hökmark et al. 2010, figur 7-6/.

## **Buff6. Begränsa tryck på kapsel och berg**

a) Svälltryck < 15 MPa.

Eftersom det inte har definierats någon process som innebär tillskott av buffertmaterialet under nästa glaciationscykel kommer kriteriet för maximalt svälltryck att uppfyllas.

b) Temperatur > -4 °C.

Som nämndes ovan för säkerhetsfunktion R4 för berget förväntas det att detta kriterium uppfylls med god marginal för referensglaciationscykeln.

## **Säkerhetsfunktioner hos återfyllningen**

### **BF1. Motverka buffertexpansion**

För att denna säkerhetsfunktion ska uppfyllas krävs att densiteten hos återfyllningsmaterialet är tillräckligt hög. Som visas i avsnitt 10.2.4 är den största möjliga erosion som kan förekomma till följd av kanalbildning 1 640 kg. Erosion i återfyllningen kommer i praktiken att innebära att materialet omfördelas inne i själva tunneln. Med tanke på den stora mängden återfyllningsmaterial i tunneln antas en omfördelning på 1 640 kg inte påverka återfyllningens funktion över huvud taget.

Även om det uppstår utspädda förhållanden i några av de mer transmissiva enskilda sprickorna som skär deponeringstunneln under nästa glaciationscykel, kommer dessa förhållanden inte att orsaka erosion i sådan omfattning att det kommer att leda till en sådan förlust av svälltryck ovanför deponeringshålen att det skulle uppstå advektiva förhållanden i dessa. För ett fåtal positioner där sprickorna står i förbindelse med en deformationszon kan potentiellt mer än 220 ton förloras i ett miljonårsperspektiv, men detta är inte relevant för kapselns integritet.

## **Säkerhetsfunktioner hos kapseln**

### **Can1. Utgöra korrosionsbarriär**

Det enda som skulle kunna orsaka kapselbrott till följd av korrosion under den återstående delen av glaciationscykeln är korrosion på grund av advektiva förhållanden i deponeringshålen som uppstått till följd av erosion av buffert som exponerats för utspädda grundvatten. Upp till omkring ett kapselbrott kan av denna anledning inträffa under den en miljon år långa analysperioden. Resultaten från beräkningarna av erosion och korrosion förs vidare till beräkningarna av radionuklidtransport, genom att ange den tid som krävs för erosion och korrosion specifikt för varje deponeringshål och för varje sulfidkoncentration.

### **Can2. Motstå isostatisk last**

För att denna säkerhetsfunktion ska upprätthållas krävs att kapseln motstår en isostatisk last på upp till 45 MPa. Att denna säkerhetsfunktion uppfylls säkerställs genom kapselns design, se avsnitt 5.4.3 samt **Produktionsrapporten för kapseln**. Det kan också noteras att den maximala förväntade isostatiska lasten på kapseln i Forsmark är ett hydrostatiskt tryck på 4,5 MPa, ett isostatiskt svälltryck på upp till 13 MPa från bentoniten och maximalt ytterligare 26 MPa hydrostatiskt tryck från en framtida inlandsis i Weichsel-referensutvecklingen. Det maximala totala isostatiska trycket som kapseln kan komma att utsättas för uppskattas således till 43,5 MPa.

Sannolikheten för lokala brott på kapselinsatsen vid 44 MPa övertryck är försvinnande liten, vilket visas genom probabilistiska beräkningar, se avsnitt 5.4.3. Dessutom är kriteriet för kapselbrott att det inträffar en total kollaps, vilket inte förväntas för tryck under 100 MPa, se vidare i avsnitt 5.4.3. Följaktligen förväntas inga kapselbrott vid det maximala övertryck som skulle kunna uppstå i Forsmark under referensutvecklingen.

### **Can3. Motstå skjuvlast**

Kapselbrott till följd av framtida jordskalv undviks genom att respektavstånd och acceptanskriterier tillämpas för deponeringshålen, vilka anpassas efter kapselns förmåga att stå emot last från skjuvrörelser i sprickor. Det kan emellertid inte helt uteslutas att sådana kapselbrott kan komma att inträffa, se ovanstående diskussion av säkerhetsfunktion R3b hos berget för uppskattningar av sannolikheten för sådana kapselbrott.



sulfat försvinner genom mikrobiell reduktion till sulfid. Det kan därför konstateras att grundvattenförhållandena kommer att likna dem i referensutvecklingen, med skillnaden att en längre periods exponering för grundvatten med meteoriskt ursprung förväntas ha viss påverkan på förvarsdjup. Vattens sammansättning förväntas emellertid inte variera på något avgörande sätt under den tempererade perioden, vilket framgår av de hydrogeologiska modelleringsresultat för Forsmark som diskuteras i avsnitt 10.3.6 och resultaten från /Wersin et al. 1994b/.

I Forsmark, som har en låg topografisk gradient, förväntas påverkan från infiltrerande meteoriska vatten som når förvarsvolymer (dvs på större djup än cirka 400 m) vara liten även under en lång period med tempererade förhållanden. Till exempel visar grundvattnen i den tilltänkta förvarsvolymer för närvarande ingen påverkan av vare sig glaciala smältvatten eller havsvatten, även om drivkrafterna för infiltrationen av dessa vatten varit relativt stora. I själva verket är påverkan från det senaste Littorinahavet tydlig i Forsmark på grundare djup än cirka 300 m och sydost om det tilltänkta förvarsområdet. Den generellt högre hydrauliska konduktiviteten för berget har där medgett en infiltration av dessa havsvatten driven av densitetsgradienter. Som nämns i avsnitt 10.3.7 går det ändå inte att bortse från att en andel av deponeringshålerna kan vara utsatta för utspädda förhållanden under denna långa tempererade period, när hänsyn tas till inverkan av de mest extrema flödesvägarna från ytan till förvaret i de hydrogeologiska simuleringar som visas i figur 10-32. Enligt figuren drabbas ungefär 2 procent av deponeringspositionerna av utspädda förhållanden efter de 60 000 år med tempererade förhållanden som antas för varianten med global uppvärmning. Med tempererade förhållanden under en miljon år skulle denna andel fortfarande ligga väl under 10 procent.

Slutsatserna liknar därför dem som presenteras i avsnitten 10.3.7 och 10.4.7. Under hela den inledande tempererade perioden som följer efter förvarets förslutning kommer det att råda anoxiska grundvattenförhållanden på förvarsdjup, trots den med tiden ökande andelen meteoriskt vatten. Detta uppfyller därmed kriteriet för säkerhetsfunktionsindikatorn R1a i figur 10-2. Salthalterna under denna period kommer att vara begränsade, vilket säkerställer att buffertens och återfyllningens svällningsegenskaper inte påverkas negativt, jämfört med säkerhetsfunktionsindikatorn R1b i figur 10-2. Katjonkoncentrationer uttryckta som laddning,  $\sum q[M^{q+}]$ , kommer i allmänhet att ligga väl över 0,004 mol/l i den tilltänkta förvarsvolymer, även om det inte kan uteslutas att katjonkoncentrationerna i en del av deponeringshålerna kommer att vara lägre än gränsen för när montmorillonitkolloider börjar stabiliseras.

Sulfidkoncentrationen, som är en annan viktig parameter, förväntas förbli på de nutida nivåer som konstaterats i grundvattnet i Forsmarks. Även kolloidkoncentrationerna förväntas ligga kvar på de nivåer som uppmätts under platsundersökningarna, dvs mindre än 200 µg/l /Hallbeck och Pedersen 2008/.

### **Bufferten och återfyllning i deponeringstunnlarna**

Bufferten och återfyllningen i deponeringstunnlarna kommer inte att påverkas på något avgörande sätt av den annorlunda utvecklingen i varianten med global uppvärmning. Den huvudsakliga skillnaden är att den tempererade perioden kommer att bli längre och att de glaciala förhållandena kommer att inträffa senare, vilket bland annat påverkar grundvattenkemin. Enligt avsnitt 10.3.11 kommer emellertid fortfarande mindre än 7 procent av deponeringshålerna att uppnå advektiva förhållanden i ett tidsperspektiv på en miljon år, även om utspädda förhållanden består hela tiden.

### **Kapseln**

En inledande 100 000 år lång tempererad period kommer att ha obetydlig effekt på kapselns prestanda. Den förlängda perioden före den första uppkomsten av permafrost förväntas leda till en längre period med exponering för grundvatten med meteoriskt ursprung. Detta ger en viss påverkan på förvarsdjup, men grundvattenförhållandena kommer att likna dem i referensutvecklingen. Sulfidkoncentrationen förväntas ligga kvar på de nutida nivåer som konstaterats i grundvattnet i Forsmark.

Den analys av kapselkorrosion som presenteras i avsnitt 10.4.9 och som avser kapselbrott till följd av en delvis eroderad buffert täcker också in dessa fall. En något längre period med utspädda förhållanden i den första glaciationscykeln, jämfört med de 25 procent av tiden för referensutvecklingen, har mycket liten effekt på det genomsnittliga antalet kapselbrott. Detta utvecklas vidare i känslighetsanalyserna i avsnitt 12.6.2.

Inlandsisens minskade mäktighet kommer att leda till en lägre mekanisk belastning på kapseln under den första glaciationscykeln. Detta kan också resultera i en lägre risk för att större jordskalv inträffar.