



DokumentID  
1372575

Ärende

Strålsäkerhetsmyndigheten  
Att: Ansi Gerhardsson  
171 16 Stockholm

Handläggare  
Johan Andersson  
Er referens  
SSM2011-2426-83  
Kvalitetssäkrad av  
Olle Olsson  
Saida Engström  
Godkänd av  
Anders Ström  
Kommentar  
Granskning, se SKBdoc id 1387259

Sida  
1(17)  
Datum  
2013-04-18  
Ert datum  
2012-12-07  
Kvalitetssäkrad datum  
2013-06-26  
Godkänd datum  
2013-06-26

## Svar till SSM på begäran om komplettering rörande bergspänningar i Forsmark

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har i skrivelse till Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, begärt komplettering rörande bergspänningar i Forsmark. Nedan redovisas SSM:s frågeställningar samt SKB:s svar på respektive frågeställning. SKB anser sig med denna komplettering besvarat samtliga frågor SSM ställt i ovan nämnda kompletteringsbegäran.

*”SSM bedömer att följande kompletteringar gällande bergspänningsmodellen ska tas fram av SKB för att möjliggöra den fortsatta granskningen av SKB:s analys av den långsiktiga säkerheten för ett slutförvar i Forsmark i SR-Site (SKB, 2011) och underliggande rapporter:*

1. *Samlad redovisning: SKB bör ha producerat en samlad redovisning av den valda modellen för de initiala spänningarna där alla bergspänningsmätningar, bergspänningsindikatorer, antaganden, modeller och analyser, kvalitetssäkring av data samt modelleringsresultat som är till grund för säkerhetsanalysen redovisas. Den nuvarande dokumentationen är utspridd, svårtolkad och ibland redundant vilket leder till farhågor om alltför stor tilltro till de antagna initiala bergspänningsnivåerna (se även Technical Note SSM 2012:39). SSM har gjort en liknande värdering även för SKB:s redovisning av bergspänningsutvecklingen i tid och rum för den valda platsen i Forsmark och för tidsperspektivet på en miljon år för analysen av den långsiktiga säkerheten i SR-Site (se även Technical Note SSM 2012:39 och SSM 2012:57). Denna har implikationer bl.a. för:
  - a. *Termiska spänningar under drift av slutförvarsanläggningen och efter förslutning: SKB:s rapport TR-10-23, Figur 6-5, visar att redan 10 år efter påbörjad deponering av kapslar kommer bergspänningstillskottet p.g.a. värmeutveckling i slutförvarsanläggningen att öka med upp emot 15 MPa i ett område där schaktning av berg till nya deponeringstunnlar inte har påbörjats. Detta motsäger SKB:s påstående om att den valda uppförandesekvansen inte ger termiska effekter på bergspänningar i bergpolymer som planerar att utschaktas. Utvecklingen av bergspänningarna under den termala fasen bör även vara till grund för en analys av sannolikheten och konsekvenserna för eventuella termiskt inducerade skalv under drift eller efter förslutning av slutförvaret (se även Technical Note SSM 2012:51, SSM 2012:52 och SSM 2012:57).**

**Svensk Kärnbränslehantering AB**  
Box 250, 101 24 Stockholm  
Besöksadress Blekholmstorget 30  
Telefon 08-459 84 00 Fax 08-579 386 10  
www.skb.se  
556175-2014 Säte Stockholm

- b. *Bergspänningskoncentrationer i närheten av bergutrymmen vid jordbävning: de utsprängda utrymmena i bergmassan orsakar bergspänningskoncentrationer i bergväggarna och bergpelarna. Bergspänningskoncentrationer är inte försumbara i och med att dessa kan leda till bergspänningstillskott som är uppemot det dubbla i förhållande till de initiala bergspänningarna. Lokalt förhöjda bergspänningar kan ge upphov till skjuvrörelser i samband med jordbävningar som är större än de som kan förekomma när man utgår ifrån de initiala bergspänningarna, särskilt i anslutning till t.ex. deponeringshålen (se även Technical Note SSM 2012:52). Denna aspekt är inte beaktad i SKB:s rapport TR-08-11 om effekterna av stora jordbävningar på ett KBS-3-slutförvar.*
- c. *Bergspänningsriktningar i förhållande till en jordbävningssalstrande förkastning: Bergspänningsfältet påverkar på olika sätt förkastningar som kan generera jordbävningar beroende på riktningen för bergspänningarna i förhållande till förkastningens strykning och stupning (se även Technical Note SSM 2012:52). Kommentaren gäller särskilt i samband med förekomsten av stora post-glaciala jordbävningar. Denna aspekt är inte beaktad i SKB:s rapport TR-08-11 om effekterna av stora jordbävningar på ett KBS-3-slutförvar.*
- d. *Inverkan av glacialis- eller sedimentlast på bergspänningsfältet: i rapporten TR-11-01, s. 116, redovisar SKB mekanismer som har bidragit till uppbyggnad av höga bergspänningar i Forsmark. En av orsaken anses ha varit sedimentlasten; en annan orsak har varit glacialislasten. Dessa laster kan generera flacka sprickor i bergmassan, så kallade bankningsplan, eller reaktivera befintliga flacka sprickor och sprickzoner. Emellertid saknas i SKB:s ansökan en redovisning av vilka bergspänningstillskott kopplade till glacialis- eller sedimentlast som skulle kunna generera förekomsten eller reaktivering av befintliga flacka sprickor i Forsmark (se även Technical Note SSM 2012:51). Uppskattningar av bergspänningstillskotten i samband med en glacialislast som ger upphov till: i) tvångsspänningar i horisontellt led, ii) böjning av jordkorpan i stor skalans (koppling till de storskaliga spänningsmodellerna som används för att beräkna spänningarna under en glacial cykel i Lund m.fl., 2009), iii) "forebulge" vid isfronten samt iv) basaldrag för ismassan i rörelse, bör också tydligt redovisas (se även Technical Note SSM 2012:51).*
- Även utvecklingen av grundvattentrycket är avgörande delvis för stabilitet hos sprickor och deformationszoner, delvis för dess påverkan på effektiva spänningarna. SSM har gjort följande observationer i SKB:s ansökningsunderlag:*
- e. *Grundvattentryck och stora jordbävningar: förekomsten av stora jordbävningar styrs av hållfastheten i förkastningar och av magnituden av de effektiva bergspänningarna. Därför är det viktigt att redovisa den uppskattade utvecklingen för grundvattentrycket särskilt i samband med en glaciationscykel (se även Technical Note SSM 2012:52).*

- f. *Grundvattentrycktillskott på grund av frysning av bentonit: i ett fall där permafrosten når slutförvarsdjupet fryser vattnet i bentoniten och i bergmassan. Frysning leder till en volymökning som medför spänningstillskott men även ett tillskott till vattentrycket i det icke-frusna grundvattnet. SKB tar inte hänsyn till dessa problem i sitt ansökningsmaterial (se även Technical Note SSM 2012:51).*
2. *Aspekter i modellen för de initiala bergspänningarna i Forsmark: I SSM:s inledande granskningsfas har flera aspekter gällande modellen för de initiala bergspänningarna uppmärksammats (d.v.s. hur man går från bergspänningsmätningar och andra bergspänningsindikatorer till en modell som kvantitativt beskriver bergspänningsvariationen med djupet och genom den valda platsen idag i Forsmark) där antaganden, motiveringar och slutsatser bör redovisas av SKB på ett mera grundligt, strukturerat och konsekvent sätt. Dessa aspekter är:*
- Motivering för uteslutning av variabilitet för bergspänningarna för tilltänkta platsen utöver djupberoendet räknat från markytan.*
  - Tydlig definition av bergsvolymer för vilka den valda bergspänningsmodellen gäller.*
  - Motivering för valda linjära trender för variationen av bergspänningskomponenter med djupet och brytpunkter i dessa trender.*
  - Motivering för den antagna ”positiva korrelationen” mellan största, mellersta och minsta bergspänningskomponenterna.*
3. *Kvalitetssäkring av indata, metodik och slutsatser: SSM har stött på brister under granskningen av frågor gällande kvalitetssäkring, representativitet och spårbarhet av underlagsdata för den valda modellen för de initiala bergspänningarna i Forsmark. Därför begär SSM in kompletterande information i form av:*
- Redovisning av filtreringslogiken för att komma fram till data som utgör underlag till den valda bergspänningsmodellen.*
  - Redovisning av representativitet för bergspänningsdata som ingår i underlaget för framtagning av den valda bergspänningsmodellen.*
  - Redovisning av principerna för bestämning av variabilitet i den valda bergspänningsmodellen samt underlaget för dess kvantifiering.*
  - Redovisning av principerna för bestämning av osäkerheter i den valda bergspänningsmodellen samt underlag för dess kvantifiering.*
  - Redogörelse för kvaliteten i dataunderlaget för den valda bergspänningsmodellen i förhållande till ”state-of-the-art” för bergspänningsmätningar i kristallint berg i världen idag.”*

## SKB:s svar

### 1. Samlad redovisning

- a. Det är förmodligen en misstolkning som ligger till grund för fråga 1a. Alla kurvorna i Figur 6-6 i TR-10-23 visar spänningsutvecklingen i den lokala tidsskalan, d.v.s.  $t=0$  när den lokala kapseln deponeras. SKB påstår inte att man inte kan få spänningseffekter som beror på deponeringssekvensen. Vad Figur 6-6 i TR-10-23 visar är att om man deponerar som i Figur 6-5, vänster, dvs systematiskt från förvarets ena kant till den andra (heldragna linjer i Figur 6-6) så kommer spänningsutvecklingen att skilja sig försumbart från den man hade fått om alla kapslar deponerats samtidigt (diskreta punkter i Figur 6-6). Om man däremot skulle deponera som i Figur 6-5, höger, dvs så att man vid något tillfälle deponerar i närheten av ett område som byggts ut långt tidigare, så kan man få effekter av förvärmning/förspänning. Spänningsutvecklingen (streckade kurvor) blir då alltså en annan än den som gäller vid samtidig deponering. I värsta fall, dvs deponering startas och avslutas (totalt år senare) i samma område (punkt C i Figur 6-6) blir förspänningseffekterna märkbara: ca 6-10 MPa beroende på deponeringstakten (se också Figur 6-7 som visar spänningsutvecklingen i punkt C i annan tidskala och för två olika deponeringshastigheter). Observera att spänningstillskottet inte ens då är 15 MPa; kurvorna i Figur 6-6 visar utvecklingen från tiden  $t=1$  år.

Slutsatsen är alltså att den lokala spänningsutvecklingen inte påverkas av att deponeringen fördelas över tiden, förutsatt att man deponerar systematiskt från den ena kanten av förvaret till den andra dvs enligt den utbyggnadssekvens som föreslogs i LayoutD2 (se kapitel 5 i rapport R-08-16).

Eventuell termisk spänningspåverkan på transporttunnel inom deponerat och återfyllt område kan hanteras genom olika driftåtgärder; skrotning, kompletterande förstärkning eller rivning av installationer och återfyllnad.

- b. ”Bergspänningskoncentrationer i närheten av bergutrymmen vid jordbävning” diskuteras i TR-08-11 (Fälth et al. 2010) under ”seismic risk: rock failure”, sid 16. Det är riktigt att det kommer att finnas pulser av spänningskoncentrationer runt exempelvis deponeringshål i samband med att seismiskt genererade tryck- och skjuvspänningsvågor passerar. I TR-08-11 argumenterar SKB för att bufferten vid tiden för glacialt inducerade skalv kommer att vara fullt vattenmättad, vilket innebär ett svälltryck av minst 1 MPa, och att detta mothåll kommer att undertrycka de möjliga effekterna (spjälkning) av de förhöjda tangentialspänningarna i deponeringshållsväggarna. Man kan, om man resonerar utöver det som sägs i TR-08-11, grovt approximera magnituden hos spänningsvågorna med spänningsavlastning (*stress drop*) hos typiska ”intraplate”-händelser. Typiska värden är ca 15 MPa (Scholz 2002), vilket också är den spänningsavlastning som gäller för de syntetiska skalven i TR-08-11. I figur 5-13, TR-08-11, visas att spänningstransientens normalkomponent i ett antal hypotetiska sprickplan verkligen är mindre, eller mycket mindre, än 15 MPa vilket kan jämföras med de effektiva storskaliga

randspänningstillskotten i deponeringsområdena under den termiska fasen. Dessa är i storleksordningen 20 - 25 MPa (Hökmark et al. 2010, Figur 6-8), vilket alltså innebär att deponeringshålen tidigare har varit utsatta för större belastningar än de som möjligen kan förekomma i samband med seismiskt genererade spänningstransienter. I själva verket beror de termiskt genererade tangentialspänningstillskotten inte bara på randspänningstillskottet (20-25 MPa) utan också på den tillkommande lokala termiska lasten. Av detta följer att tangentialspänningarna vid eventuella seismiska spänningstransienter med god marginal kommer att vara lägre än de som gällt "historiskt", dvs under den termiska fasen.

I SR-Site räknades försiktigtvis med att termiskt inducerad spjälkning kommer att ha skett i alla deponeringshål vid tiden för lokalt spänningsmaximum ca 50 år efter deponering, bl.a. därför att den stabiliserande effekt som också den omättade, eller bara delvis mättade, bufferten kan ha på deponeringshållsväggarna inte ansågs bevisad. Eftersom skadan alltså redan är skedd och hanterad menar SKB att det inte finns någon anledning att, när det gäller brott av spjälkningstyp, beakta effekter av seismiskt inducerade spänningskoncentrationer som dels kommer att vara mindre än de som redan verkat, dels kommer att uppträda först när det stabiliserande mothållet från den vattenmättade bufferten är fullt utvecklat.

När det gäller skjuvrörelser i närheten av t ex deponeringshål, så håller SKB med om att sådana kan initieras lokalt av seismiskt genererade spänningskoncentrationer och också styras till belopp och riktning av dessa koncentrationer. För små sprickor kan dock inte skjuvrörelsen uppgå till mer än några enstaka millimeter (jfr den typ av samband som visas i figur 6-27 i Hökmark et al. (2010)). För stora sprickor, som sträcker sig tiotals meter ut i berg som är opåverkat av spänningskoncentrationer runt förvarets hålrum, kommer dessa lokala spänningskoncentrationer att ge endast marginella förändringar (ökning eller minskning) av de skjuvbelopp som bestäms av den belastning (seismisk eller aseismisk) som gäller på huvuddelen av sprickplanet. SKB bedömer att effekterna av sådana lokala, det vill säga verkande över bråkdelen av sprickplansytan hos stora sprickor, belastningsstörningar kan försummas i relation till effekterna av avvikelser (undulationer, bergbryggor och andra storskaliga ojämnheter) från den perfekt plana sprickgeometri som antas för alla sprickor i SKB:s beräkningar (t. ex. Fälth et al. 2010, Hökmark et al. 2010).

- c. Eftersom de post-glaciala skalv som skedde i anslutning till den senaste glaciationen var förkastningsrörelser av överskjutningstyp ("reverse faulting", se t ex Munier och Hökmark (2004, appendix 3) och Lagerbäck och Sundh (2008), har deformationszonerna i de schematiskt upplagda beräkningarna i TR-08-11 (Fälth et al. 2010) systematiskt orienterats med strykning i minsta horisontalspänningsriktningen. Då det i TR-08-11 bara görs analyser som med god marginal ger största möjliga skalv på deformationszoner av given storlek anser SKB att resultaten, i termer av inducerade rörelser på förvarsbergets sprickor, ger ett tillräckligt bra underlag för en försiktig bestämning av kritiska sprickradier. SKB genomför för närvarande nya, mindre schematiska, beräkningar med

deformationszoner (orientering och storlek) och postglaciala spänningar i överstämmelse med förhållandena i Forsmark. I dessa beräkningar avser SKB även att göra en spänningskänslighetsanalys för relevanta typfall. Därmed kommer SSM:s önskemål att tillgodoses. I dessa nya beräkningar anpassas också sprickornas riktningar till de som gäller Forsmark enligt Fox et al. (2007). Generellt förväntas de nya resultaten att bekräfta att de kritiska radierna som beräknades i TR-08-11 och som tillämpas i layoutregler och riskanalys är överdrivet försiktigt bestämda.

- d. Sprickor subparallella med bergöverytan, så kallade bankningsplan, är tämligen vanligt förekommande i Skandinaviens kristallina berggrund. Orsakerna till bildandet av dessa kan vara flera; av- och pålastning av sediment eller inlandsis, ojämn last av en inlandsis i rörelse (periferihöjningen, eng. "forebulge") eller temperaturinverkan (frysning – upptining). Även erosion (avlastning) av en berggrund som har överskott på in situ horisontalspänningar skulle kunna bidra till hävning mot den fria randen (bergytan) som i sin tur skulle kunna bidra till utveckling av bankningsplan. Ett antal förslag på bildningssätt för de sedimentfyllda sprickorna i Forsmarks har publicerats över åren (Stephansson och Ericsson 1975, Carlsson 1979, Pusch et al. 1990). Gemensamt för dessa är samverkan mellan olika transienta förlopp på grund av inlandsisens rörelse och hydrauliken under isen. Ett annorlunda angreppssätt föreslogs av Martel (2011) som menade att variationer i topografin kan ha avgörande betydelse för bildandet av bankningsplan.

SKB bedömer att de exogena processer som berggrunden utsätts för under en glaciationscykel (av- och pålastning, transienta hydrauliska tryck – även med sedimenthaltigt vatten) är den troligaste orsaken till uppkomsten av bankningssprickor. Närheten till glaciifluviala avlagringar, såsom Börstilsåsen strax utanför kusten i Forsmark kan vara en bidragande orsak till att dessa sprickor blir delvis sedimentfyllda. Liknande sedimentfyllda sprickor har observerats på olika platser där naturgrus-täkter fortsatt som berg-täkt. Det är inte möjligt att peka ut en enskild process som relaterar till glaciation/deglaciation som mest trolig; det bedöms rimligt att bildandet av nya bankningsplan förutsätter transienta laster av isen i kombination med avlastning via erosion och borttransport av material samt hydrauliskt transienta situationer i gränsskiktet is – berggrund.

Avlastning via erosion av sediment bedöms vara för långsam för att generera bankningsplan. Att ansenliga mängder sediment skulle hinna avlagras och erodera igen inom 1 million år bedöms dessutom osannolikt.

- e. Frågan om porvattentryck på olika djup under en glaciationsfas adresseras i den analys som gjordes beträffande det största djup där "hydraulic jacking" kan vara möjligt (Lönqvist och Hökmark 2010). Resultaten av analysen beskrivs också i Hökmark et al. (2010).

På stora djup är osäkerheterna om eventuella glaciala porövertryck alltför stora för att man ska kunna göra försvarbara, kvantitativa, antaganden. I jordskalvsrapporten TR-08-11 (Fälth et al. 2010) simuleras därför brottet

och brottpropageringen i deformationszonerna så att hela hållfastheten förloras och med bergspänningar som är tillräckliga för att rörelsen i deformationszonen, och därmed magnituden hos skalvet, ska bli den största möjliga, givet de korrelationer mellan zonstorlek och momentmagnitud som ges i litteraturen (t ex Wells och Coppersmith 1994, Leonard 2010). För resultatet är det därför inte viktigt huruvida hållfasthetsförlusten, som var maximerad i SKB:s beräkningar, är en effekt av förhöjda portryck eller av dynamiska mekanismer i brottpropageringsförloppet.

- f. Frågan tycks vara formulerad utifrån vad som förefaller vara en missuppfattning av slutsatserna i klimatrapporten (SKB 2010a, avsnitt 3.4 och 5.5):

Om ”permafrost”, *sensu stricto*, når förvarsdjupet betyder det, per definition, att 0-gradersisotermen har nått förvarsdjup. Detta medför emellertid inte att grundvattnet i berget fryser. Fryspunkten är lägre än 0 grader på grund av det rådande hydrostatiska trycket och innehållet av lösta salter i grundvattnet vilket finns redovisat i Hartikainen et al. (2010); se även klimatrapporten (SKB 2010a, avsnitt 3.4.4 och 5.5).

Om ännu kallare klimatförhållanden skulle råda så att frysning av grundvatten i bergmassan faktiskt sker på förvarsdjup, vilket är en möjlighet som SKB inte helt uteslöt under mest pessimistiska antaganden i SR-Site (SKB 2011, avsnitt 12.3.3), medför detta inte att vattnet i buffertleran fryser vid detta tillfälle. Det krävs ett orealistiskt kallt klimat för att även buffertleran ska frysa (bufferten hade i SR-Site ett temperaturfryskriterium satt till  $-4$  grader C). Detta utreddes i detalj i TR-09-17 (Hartikainen et al. 2010) och TR-10-49 (SKB 2010a). SKB avskrev därför i SR-Site möjligheten för frysning av bufferten (se SKB 2011, avsnitt 12.3).

Frysning av bufferten kan emellertid inte, oavsett vilken fryspunktsänkning som gäller, ge det problem som SSM:s fråga egentligen gäller, nämligen icke-försumbara grundvattentrycktillskott i omgivande berg; Den innehållna vattenvolymen är alldeles för liten.

För återfyllnaden är det dock något annorlunda. Dels rör det sig om mycket större vattenvolymer, dels kan man inte räkna med samma fryspunktssänkning som för bufferten. Det är möjligt att med relativt enkla beräkningar visa att grundvattentrycktillskottet blir litet för det hypotetiska fallet att tunnarna trots allt fryser till och överskottsvattnet trycks ut, se vidare Bilaga 1 nedan.

## 2. *Aspekter i modellen för de initiala bergspänningarna i Forsmark*

- a. Med hänvisning till den geologiska homogeniteten inom tektoniska linsen norr om den flacka deformationszonen ZFMA2 bedöms någon signifikant variabilitet i spänningsfältet inte förekomma, vilket styrks av Televiever data avseende s k mikro breakouts, som visar en konsistent orientering för största horisontalspänningen (Mas Ivars och Hakami 2005, Glamheden et al. 2007). Spänningsmodellering visar dock att den flacka deformationszonen ZFMA2 påverkar spänningsmagnituder lokalt, men ej

- orientering eftersom deformationszonen stupar ungefär i största huvudspänningens riktning (Mas Ivars och Hakami, 2005, Hakami 2006).
- b. Bergspänningsmodellen anses gälla inom det s.k. "target volume", vilket omfattar FFM01, FFM02 och FFM06 (SKB 2008, avsnitt 7.3.4).
  - c. Detta redovisas av Martin (2007), dels övergång mellan sprickdomän 2 och 1 (FFM02 – FFM01), dels med stöd av mätdata.
  - d. SKB motiverar den antagna positiva korrelationen mellan största, mellersta och minsta bergspänningskomponenterna med att den vertikala spänningskomponenten är lika med den gravitativa spänningen. De föreslagna spänningskvoterna diskuterades av Martin (2007, kapitel 6.3; se även figur 7-3 och tillhörande text).

### 3. *Kvalitetssäkring av indata, metodik och slutsatser*

Grundläggande för kvalitetssäkring av data från bergspänningsmätningarna under platsundersökningarna utöver de handhavanderutiner som gäller för respektive mätutrustning är de rekommendationer för kvalitetssäkring som ges av Christiansson och Hudson (2003). Eftersom bergets in-situ spänning är ett tillstånd, inte en parameter bygger alla mätmetoder på vissa antaganden. Sålunda förutsätter t.ex. överborrningsmetoder att berget är approximativt elastiskt. Martin och Christiansson (1991) påvisade effekten av mikro-uppsprickning i den överborrade kärnan. Evans och Engelder (1989) samt Doe et al. (2006) påvisade problem med hydraulisk spräckning i områden med höga bergspänningar.

SKB är medveten om dessa problem och påpekade i slutsatser från platsundersökningarna att säkrare bestämning av spänningsfältet kan göras först när det ges tillfälle att mäta spänningarna under jord. Konvergensmätning och bakåtanalys av bergspänningar är en etablerad metod som angetts, övriga utvecklingsplaner finns i Ramprogram för detaljundersökningar vid uppförande och drift av slutförvar för använt kärnbränsle (SKB 2010c, avsnitt 7.3.3). Dessa projekt har genomförts (Hakami 2011, Hakala et al. 2012).

- a. Den enda "filtrering" av data som gjordes vid framtagande av spänningsmodellen var att förkasta data som inte uppfyllde kvalitetskriterier baserat på kvalitetskrav i utförandet eller för metodens antaganden enligt ovan. Detta redovisas främst av Martin (2007, kapitel 5) där alla delutredningar avseende kvalitetssäkring refereras.
- b. Stephansson et al (1991) konstaterade att olika bergspänningsmätningmetoder kan leda till olika spänningsmodeller. Genom att föröka klargöra för varje mätning, oavsett metod att de teoretiska antagandena för metoden var uppfyllda har SKB försökt att eliminera influens av mätmetod på spänningsmodellen. Men som framgår av Martin (2007, kapitel 5 och 8) är det få direkta in-situ mätningar under ca 300 m djup som bedömdes realistiska. Som komplement användes även indirekta metoder, t.ex. ger studier av orientering av s.k. mikro breakouts i kärnborrhål en mycket konsistent orientering av största horisontalspänningen som bekräftar resultat från båda mätmetoderna (Martin 2007, Figur 7-18).
- c. Bedömning av variabiliteten i spänningsmagnituder diskuteras av Martin (2007, kapitel 7). Figur 7-2 summerar en bedömd osäkerhet i spänningsmagnituder, som sedan redovisas i Figur 7-3. Spridning i



orientering baseras på dokumentation av mikro-breakouts (se svar till b ovan). Se även svar till fråga 1c.

Angående hänvisningen till FUD-2010 som anges i förtydligandet av SSM:s fråga 3c rörande bergspänningar på större djup (s.9), gällde formuleringen i FUD (SKB 2010b, s 337) en teoretisk-numerisk ansats för att öka förståelsen av dynamiska processer i jordskorpan med huvudsakligt syfte att förbättra jordskalvssimuleringar. Forskningsinsatsen är inte begränsad till Forsmark. Formuleringen i FUD återges nedan:

”SKB planerar att öka kunskaperna om spänningstillståndet på djup större än en kilometer i den svenska jordskorpan. Kunskap om spänningsfältet är en grundläggande komponent i all förståelse av dynamiska processer i jordskorpan, och i allra högsta grad för modeller av mekanismerna som genererar jordskalv, postglaciala såväl som i dag. Det behövs en uppdatering, state-of-the-art-beskrivning baserat på djupa borrhål, jordskalvsmekanismer, deformationsdata (GPS), skorpan seismiska struktur samt en utvärdering av spänningsmodeller från topografi, den senaste nedisningen, plattetektonik. Vidare ska modeller för spänningsutvecklingen på djupet i litosfären analyseras. Studien ska beakta hur spänningsfältet maximalt kan variera i rummet, något som är av största betydelse för spänningskoncentration och därmed stora jordskalv, inklusive för uppskattningar av den maximala storleken av ett jordskalv. Detta bör göras både genom teoretiska/numeriska modeller och med data från områden i världen som är mer aktiva än Sverige i dag.”

- d. Osäkerhet i spänningsmodell diskuteras i Ask (2007) och Martin (2007). Ask (2007) gjorde integrerad modellering med data från överborrnings- och hydrauliska metoder. Ask konstaterade att resultaten inte kan bli bättre än osäkerheten i data från respektive mätmetod och att de båda metoderna gav signifikanta skillnader i magnitud, men att orientering av största horisontalspänningen är konsistent mellan de båda metoderna (Ask 2007, avsnitt 6.3). Martin (2007) kombinerade mätdata från de båda mätmetoderna med empirisk kunskap om borrhärens hållfasthet och gränssatte spänningsfältet (Martin 2007, kapitel 7), se även svar till fråga 3c ovan. De försök som gjordes för att modellera spänningsfältet och dess relativa variabilitet styrkte att spänningsfältet är tämligen homogent i den s.k. tektoniska linsen (Mas Ivars och Hakami, 2005, Hakami 2006). Inför analys för design och säkerhetsanalys användes dock de mest konservativa spänningsmodellerna (högsta magnituderna). Även de gamla resultaten från borrhål DBT-1 som publicerats och diskuterats i olika sammanhang användes som ”maximum unlikely” och konsekvensen av detta analyserades i projekteringen (SKB 2009, kapitel 8).  
Se i övrigt svar 3b och 3c ovan.
- e. Inför platsundersökningarna hade SKB jämfört olika metoder under kontrollerade förhållanden i Äspö (Janson och Stigsson 2002). Tre olika utrustningar för HF och HTPF användes under platsundersökningarna. Med Borre-proben anpassad för wire-line mätning och dokumenterade lyckosamma mätningar ner till 630 m djup på Simpevarp, samt

dubbelmanchettsystem högtryckspump och Monsier Tool för identifiering av inducerade sprickor med geoelektrisk metod (Ask et al. 2007). Mätningarna och data kvalitetssäkrades i enlighet med de rutiner som beskrivits tidigare i svaret. Enligt SKB:s bedömning utgör dessa mätningar den efterfrågade "state-of-the-art" för bergspänningsmätningar på stort djup i klena borrhål. Först med möjligheten att mäta i annan skala under jord, t ex konvergensmätning kommer osäkerheten i spänningsmodellen att kunna reduceras.

Med vänlig hälsning

**Svensk Kärnbränslehantering AB**  
Avdelning Kärnbränsleprogrammet

Helene Åhsberg  
Projektledare Tillståndsprövning

## Referenser

### *Dokument och referenser i ansökan*

**Ask D, 2007.** Forsmark site investigation. Evaluation of overcoring stress measurements in boreholes KFM01B, DBT-1 and DBT-3 and hydraulic stress measurements in boreholes KFM01A, KFM01B, KFM02A and KFM04A at the Forsmark site. SKB P-07-234, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Ask D, Cornet F, Brunet C, Fontbonne F, 2007.** Forsmark site investigation. Stress measurements with hydraulic methods in boreholes KFM07A, KFM07C, KFM08A, KFM09A and KFM09B. SKB P-07-206, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Carlsson A, 1979.** Characteristic features of a superficial rock mass in southern central Sweden: horizontal and subhorizontal fractures and filling material. Uppsala: Societas Upsaliensis pro geologia quaternaria. (Striae 11)

**Fox A, La Pointe P, Hermanson J, Öhman J, 2007.** Statistical geological discrete fracture network model. Forsmark modelling stage 2.2. SKB R-07-46, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2010.** Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository. Evaluation of modelling results and their implications for layout and design. SKB TR-08-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Glamheden R, Fredriksson A, Röshoff K, Karlsson J, Hakami H, Christiansson R, 2007.** Rock Mechanics Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-31, Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden.

**Hartikainen J, Kouhia R, Wallroth T, 2010.** Permafrost simulations at Forsmark using a numerical 2D thermo-hydro-chemical model. SKB TR-09-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.

- Hökmark H, Lönnqvist M, Kristensson O, Sundberg J, Hellström G, 2009.** Strategy for thermal dimensioning of the final repository for spent nuclear fuel. SKB R-09-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hökmark H, Lönnqvist M, Fälth B, 2010.** THM-issues in repository rock. Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. SKB TR-10-23, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Lagerbäck R, Sundh M, 2008.** Early Holocene faulting and paleoseismicity in northern Sweden. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning. (Research paper C 836)
- Lönnqvist M, Hökmark H, 2010.** Assessment of potential for glacially induced hydraulic jacking at different depths. SKB R-09-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Martin C D, 2007.** Quantifying in situ stress magnitudes and orientations for Forsmark. Forsmark stage 2.2. SKB R-07-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Munier R, Hökmark H, 2004.** Respect distances. Rationale and means of computation. SKB R-04-17, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Scholz C H, 2002.** The mechanics of earthquakes and faulting. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- SKB, 2008.** Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase. SDM-Site Forsmark. SKB TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2009.** Underground design Forsmark. Layout D2. SKB R-08-116, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010a.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-49, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010b.** Fud-program 2010. Program för forskning, utveckling och demonstration av metoder för hantering och slutförvaring av kärnavfall. Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2010c.** Ramprogram för detaljundersökningar vid uppförande och drift av slutförvar för använt kärnbränsle. SKB R-10-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB, 2011.** Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Stephansson O, Ljunggren C, Jing L, 1991.** Stress measurements and tectonic implications for Fennoscandia. Tectonophysics, 189(1-4), pp 317-322.
- Wells D L, Coppersmith K J, 1994.** New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America 84, 974–1002.

### *Övriga referenser*

- Christiansson R, Hudson J A, 2003.** ISRM Suggested Methods for rock stress estimation. Part 4: Quality control of rock stress estimation. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 40, 1021–1025.
- Doe T W, Zieger M, Enachescu C, Bohner J, 2006.** In-situ stress measurements in exploratory boreholes. Felsbau 24, 39–47.

**Evans K, Engelder T, 1989.** Some problems in estimating horizontal stress magnitudes in “thrust” regimes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 26, 647–660.

**Hakala M, Siren T, Kemppainen K, Christiansson R, Martin D, 2012.** In-situ stress measurements with the new LVDT-cell – method description and verification. Posiva 2012-43, Posiva Oy, Finland.

**Hakami E, 2011.** Rock stress orientation measurements using induced thermal spalling in slim boreholes. SKB R-11-12, Svensk Kärnbränslehantering AB

**Hakami H, 2006.** Numerical studies on spatial variation of the in situ stress field at Forsmark – a further step. Site descriptive modelling Forsmark – stage 2.1. SKB R-06-124, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Janson T, Stigsson M, 2002.** Test with different stress measurement methods in two orthogonal bore holes in Äspö HRL. SKB R-02-26, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Leonard M, 2010.** Earthquake fault scaling: self-consistent relating of rupture length, width, average displacement, and moment release. *Bulletin of the Seismological Society of America* 100, 1971–1988.

**Martel S J, 2011.** Mechanics of curved surfaces, with application to surface-parallel cracks. *Geophysical Research Letters* 38. doi:10.1029/2011GL049354

**Martin C D, Christiansson R, 1991.** Overcoring in highly stressed granite – the influence of microcracking. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 28, 53–70.

**Mas Ivars D, Hakami H, 2005.** Effect of a sub-horizontal fracture zone and rock mass heterogeneity on the stress field in Forsmark area – a numerical study using 3DEC. Preliminary site description Forsmark area – version 1.2. SKB R-05-59, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Pusch R, Börgesson L, Knutsson S, 1990.** Origin of silty fracture fillings in crystalline bedrock. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 112, 209–213.

**Stephansson O, Ericsson B, 1975.** Pre-Holocene joint fillings at Forsmark, Uppland, Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar* 97, 91–95.

## Bilaga 1 Tillskott i grundvattentryck om deponeringstunnlar fryser

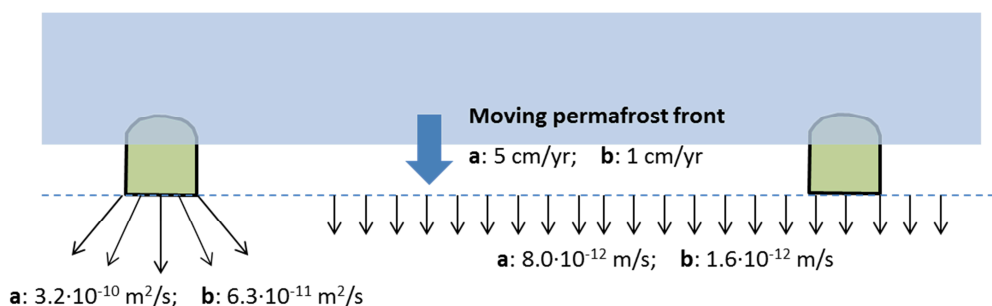
Inte ens för det ”severe permafrost case” som analyserades i SR-Site når permafrosten ner till försvarsdjup (SKB 2010a). För hypotetiska fall utan isolerande istäcke, och där yttemperaturen ligger långt under fryspunkten under tiotusentals år, kan permafrosten nå försvarsdjupet och ännu djupare (SKB 2010a, Figur 3-52). Vid en konstant yttemperatur av  $-20\text{ °C}$  kommer permafrostfronten att röra sig från 400 m till 500 m djup på ca 2000 år, förutsatt att inte restvärmets från förvaret inverkar (SKB 2010a, Figur 3-52), och alltså passera förvaret med en hastighet av ca 5 cm/år. Om yttemperaturen är ca  $-10\text{ °C}$  kan man på samma sätt grovt uppskatta passagehastigheten till ca 1 cm/år.

Två fall (se Figur 1) beaktas i det följande:

a:	permafrostfronten rör sig med en hastighet av 5 cm/år, dvs tunneltvårsnittet passeras på ca 100 år.
b:	permafrostfronten rör sig med en hastighet av 1 cm/år, dvs tunneltvårsnittet passeras på ca 500 år.

Om tunneltvårsnittsarean approximeras till  $20\text{ m}^2$ , porositeten hos återfyllningen till 0.6 och vattnets volymutvidgning vid frysning sätts till 9% (tabellvärde) kommer ett vattenvolymstillskott av ca  $1\text{ m}^3$  per meter tunnellängd att ha genererats när fronten passerat tvärsnittet. Om detta volymstillskott obegränsat trycks ut i det omgivande berget i takt med att fronten passerar fungerar tunnarna och deponeringsområdena som flödeskällor med flödena:

	Per enhet tunnellängd	Per enhet deponeringsområdesarea vid 40 m tunnelavstånd
a:	$3.2 \cdot 10^{-10}\text{ m}^2/\text{s}$	$8.0 \cdot 10^{-12}\text{ m/s}$
b:	$6.3 \cdot 10^{-11}\text{ m}^2/\text{s}$	$1.6 \cdot 10^{-12}\text{ m/s}$



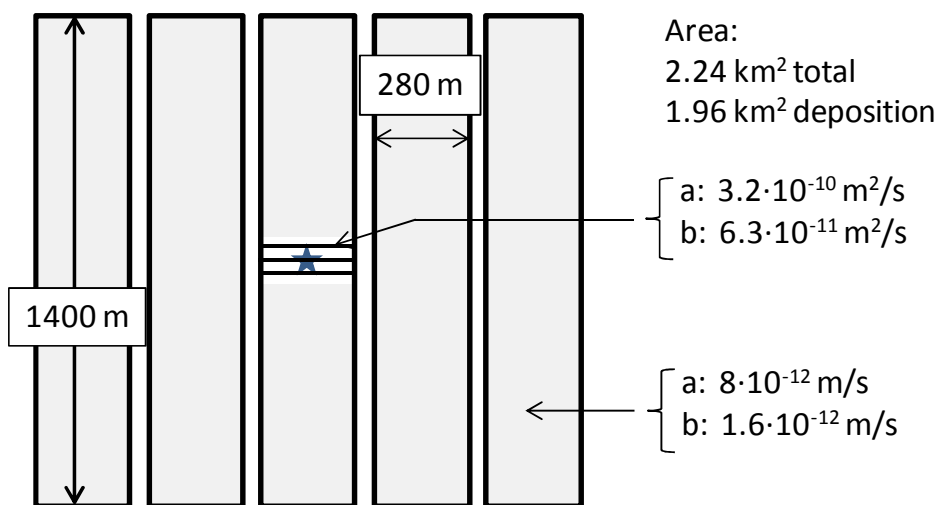
**Figur 1.** Lokaliserad (vänster) och utjämnad (höger) flödeslast för två fall av hastighet hos permafrostfronten. Notera att ”permafrostfront” här betyder gränssnittet mellan fruset och ofruset berg, oavsett vilken fryspunktsänkning som gäller och att fryspunkten här antas var densamma för berg och återfyllning.

Om man approximerar berget under försvarsnivån med ett homogent, poröst och mekaniskt okopplat hydrauliskt kontinuum kan man använda den analytiska

temperaturberäkningsmodell som beskrivs i TR-10-23 (Hökmark et al. 2010) och i R-09-04 (Hökmark et al. 2009) för att uppskatta det porvattenövertrycket som uppstår under permafrosten p.g.a. dessa flöden. Figur 2 visar en schematisk layout med fem deponeringsområden, skilda av 50 m breda tunnelfria korridorer. Med undantag för centrum av det centrala deponeringsområdet representeras flödet från tunnarna med det utjämnade ytflödet enligt ovan. De tre mittersta tunnarna i det mittersta deponeringsområdet representeras med linjekällor. För berget och grundvattnet antas följande parametervärden:

Hydraulisk konduktivitet	$k$	$6 \cdot 10^{-11}$ m/s	gäller för djup > 400 m i Forsmark (Hökmark et al. 2010, Figur 4-11)
Porositet	$n$	0.5%	Skattat från (Hökmark et al. 2010, Figur 4-11).
E-modul	$E$	70 GPa	Hökmark et al. 2010, Tabell 4-7
Poissons tal	$\nu$	0.24	Hökmark et al. 2010, Tabell 4-7
Kompressionsmodul, vatten	$K_w$	2.2 GPa	Standard tabellvärde
Densitet, vatten	$\rho$	1000 kg/m <sup>3</sup>	Standard tabellvärde

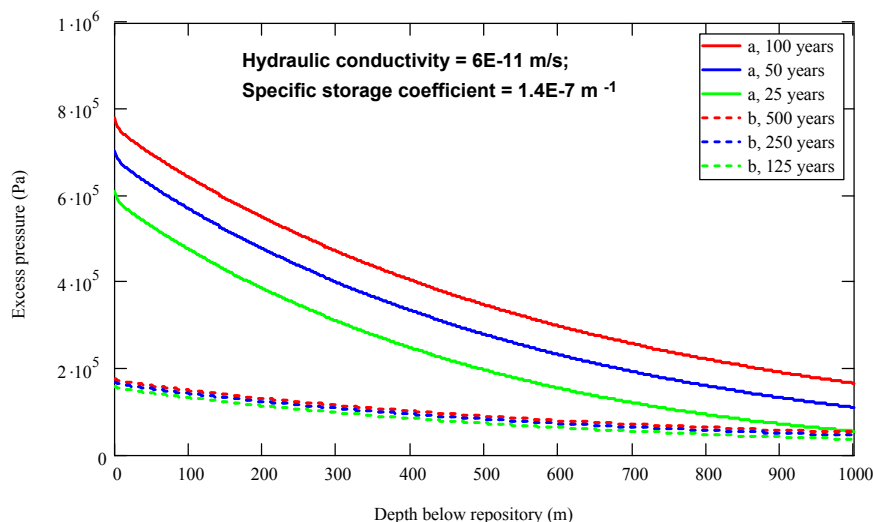
Detta ger, med jordaccelerationen  $g = 9.81$  m/s<sup>2</sup> (se Ekv. 4-3 och Tabell 4-7 i Hökmark et al. (2010), indata till den analytiska lösningen: den specifika storativiteten  $S_s = 1.4 \cdot 10^{-7}$  m<sup>-1</sup> och den hydrauliska diffusiviteten  $\kappa = 4.3 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s .



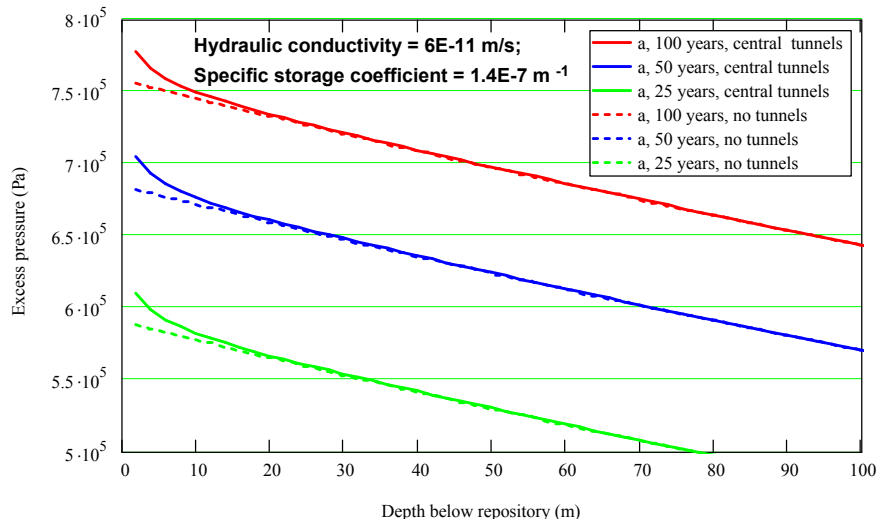
**Figur 2.** Schematisk förvarslayout. Flödet representeras med rektangelkällor utom i centrum där det representeras med linjekällor .

Det impermeabla permafrostlagret representeras genom att flödeskällorna (rektangelkällor, linjekällor) överlagras med identiska spegelkällor. Figur 3 visar resultatet för fallen a och b längs en vertikal linje genom förvarets centrum vid olika tider efter att permafrosten nått tunneltaknivån. Det maximala porövertrycket är mindre än 1 MPa för fallet med -20 °C vid ytan (a). För fallet b är det maximala porövertrycket mindre än 200 kPa. Figur 4 visar resultatet för fallet a strax under förvaret. De streckade kurvorna visar resultat om flödeslasten överallt (dvs också i centrum) fördelas jämnt över deponeringsarean. Jämförelsen mellan heldragna (explicit modellerade tunnlar) och streckade kurvor (överallt jämt fördelad flödeslast) visar att inverkan av den lokaliserade lasten är liten redan några

meter under förvaret. Ca 20 meter under förvaret (halva tunnelavståndet) är inverkan helt försumbar. Ur kurvorna i Figur 4 kan man också bestämma portrycksgradienten, ca 11.5 kPa/m, vilket givet den hydrauliska konduktiviteten ( $k = 6 \cdot 10^{-11}$  m/s) ger ett flöde av ca  $7 \cdot 10^{-12}$  m/s (dvs något mindre än det jämviktsflöde,  $8 \cdot 10^{-12}$  m/s, som skulle gälla för ett oändligt deponeringsområde i fallet a, se Figur 1).



**Figur 3.** Portryckstillskott under centrum av förvaret som funktion av djupet vid tre olika tidpunkter. Det maximala trycket uppnås när fronten passerat tunneltvärsnittet, dvs efter 100 år för fallet a och efter 500 år för fallet b.



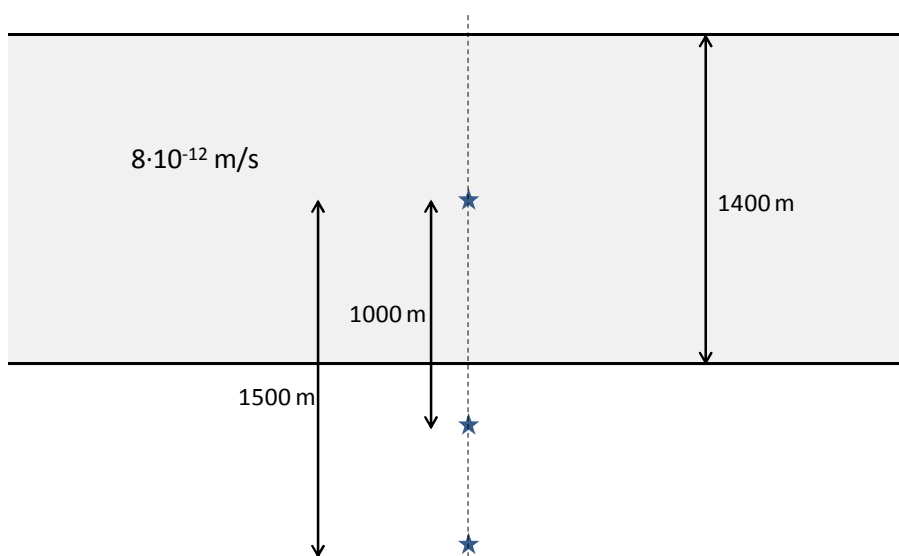
**Figur 4.** Portryckstillskott under centrum av förvaret som funktion av djupet för fallet a. De streckade kurvorna ger det portryckstillskott som skulle gälla om flödeslasten var utjämnad över deponeringsarean, dvs utan de explicit modellerade tunnarna i centrum.

Den analytiska ansatsen verifieras nedan för ett fall med förenklad geometri. Förvaret är sammanhängande och har oändlig utsträckning i tunnelriktningen (Figur 5). Portryckshöjningen registreras som ovan längs en vertikal centrumlinje och dessutom längs ytterligare två vertikala linjer på olika avstånd utanför förvarskanten (markerade med stjärnor i Figur 5). Figur 6 visar resultatet beräknat med den analytiska ansatsen enligt ovan, Figur 7 visar motsvarande resultat beräknade med Finita Elementkoden Code\_Bright

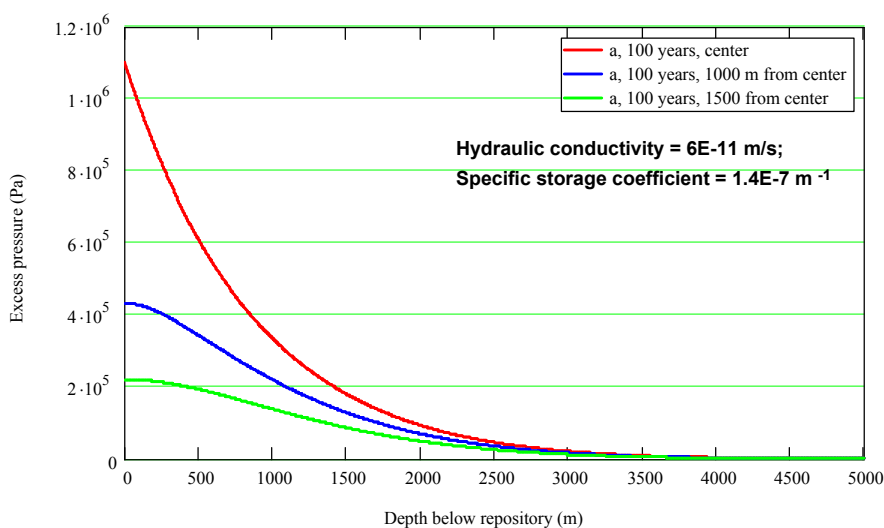
i en 2D-sektion tvärs tunnelriktningen. För den mekaniskt okopplade Code\_Bright modellen (oändlig skjuv- och kompressionsmodul) har vattnets kompressionsmodul modifierats för att kompensera för bergets mekaniska egenskaper så att den specifika storativiteten blir korrekt, dvs  $= 1.4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ . Den modifierade kompressionsmodulen blir 0.35 GPa. Som framgår av figurerna 6 och 7 blir överensstämmelsen mellan den analytiska och den numeriska lösningen mycket god.

I själva verket kommer porttryckstillskottet att bli mindre än det som beräknas här även för det hypotetiska klimatfallet med  $-20^\circ\text{C}$  vid markytan under tusentals år och utan isolerande istäcke eller inverkan av resteffekt från bränslet. Till exempel påverkas passagetiden av att tunnarna lutar och av att permafrostdjupet kommer att variera inom förvarsarean.

Den lilla vattenvolym som frigörs vid frysning av bufferten kan försummas i jämförelse med den som frigörs vid frysning av återfyllningen.

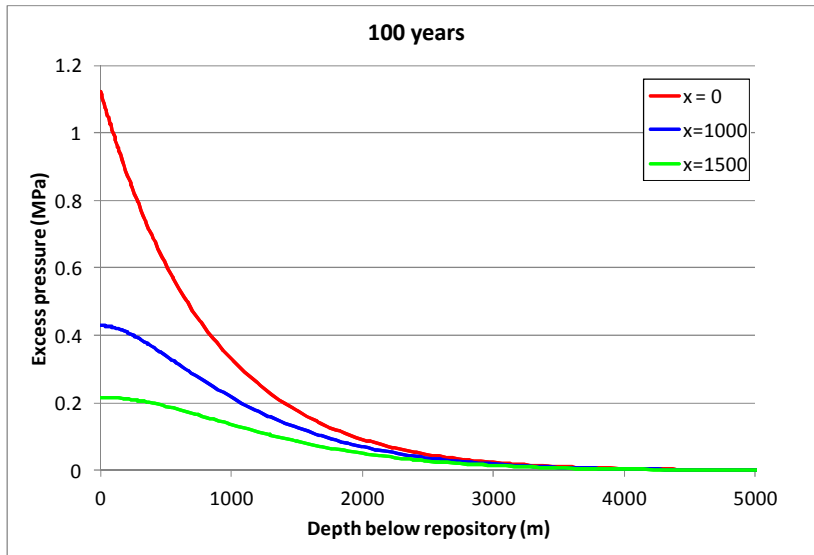


**Figur 5.** Förvarsgeometri utan linjekällor för verifieringsberäkning. Den streckade linjen visar den 2D-sektion som analyseras med Code\_Bright.

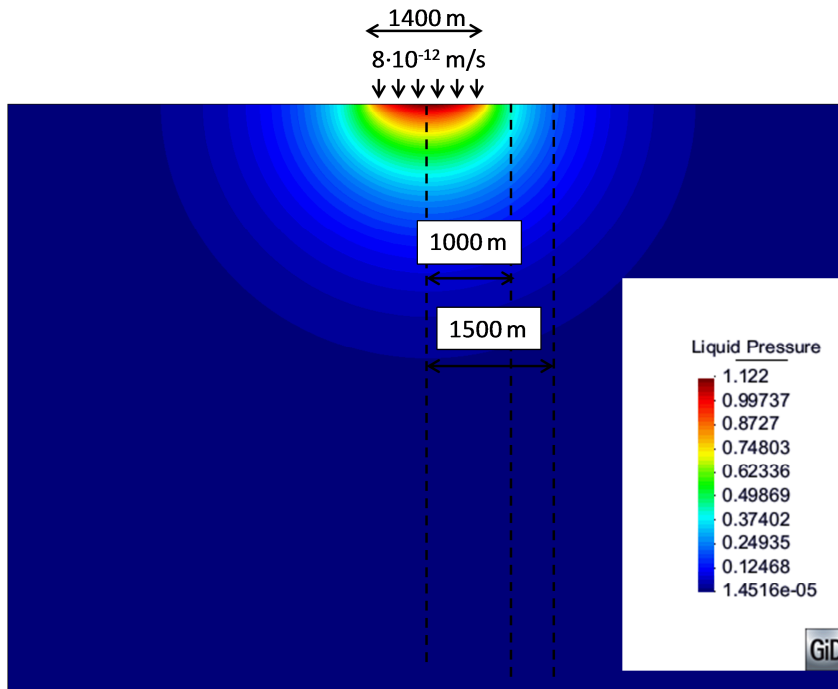


**Figur 6.** Verifieringsberäkning, analytiskt resultat.





**Figur 7.** Verifieringsberäkning, fall a, resultat från Code\_Bright model.



**Figur 8.** Portryckskonturer när tunnelvärsnittet passerats efter 100 år. Verifieringsberäkning, fall a, med Code\_Bright.