Handläggare
Patrik Sellin

Datum
2013-01-02

Ärende

Er referens
SSM2011-2426-81

Ert datum
2012-12-07

Kvalitetssäkrad av
Allan Hedin
Helene Åhsberg

Kvalitetssäkrad datum
2013-12-19
2013-12-19

Godkänd av
Martin Sjölund

Godkänd datum
2013-12-20

Kommentar
Granskning, se SKBdoc 1387259

Strålsäkerhetsmyndigheten
Att: Ansi Gerhardsson
171 16 Stockholm

Svar till SSM på begäran om komplettering rörande lång återmättnadsfas

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har i skrivelse till Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, daterad 2012-12-07 begärt komplettering av ansökan om slutförvaring av använt kärnbränsle angående återmättnadsfasen för buffert och återfyllning. I begäran efterfrågar SSM kompletteringar på följande fem punkter:

1. *En analys av konceptuell modellosäkerhet i samband med beräkningar av återmättnad och homogenisering av bufferten som bör inkludera jämförelser med tillgängliga experimentella studier.*
2. *En analys och diskussion av möjliga fördelningar av återmättnadstider för bufferten med tanke på lokala hydrogeologiska betingelser på förvarsdjup vid Forsmark platsen.*
3. *Säkerhetsbetydelse av mättnadsgrad och eventuell inverkan av heterogena förhållanden inom bufferten.*
4. *Analys av termisk påverkan på bentonitens mekaniska och hydrauliska materialegenskaper.*
5. *Bedömning av möjligheten att med justering av vattenmättnadsgrad eller artificiell tillförsel av vatten påverka/förkorta återmättnadsförloppet.*

Nedanstående svar från SKB är en uppdatering av det svar som gavs i juni 2013. Svar på frågorna 1 till 4 har tillkommit i denna version. Svaret på fråga 5 är oförändrat. SKB anser nu att samtliga frågor i kompletteringen är besvarade.

1. En analys av konceptuell modellosäkerhet i samband med beräkningar av återmättnad och homogenisering av bufferten som bör inkludera jämförelser med tillgängliga experimentella studier.

SKB:s svar

Svaret på fråga 1 ges i fem delar, numrerade 1.1 - 1.5 nedan.

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

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

1.1 En sammanställning av observationer från andra studier än de som har använts som underlag till SR-Site. En diskussion kring de konceptuella osäkerheterna (framförallt termo-osmos och en hydraulisk tröskel). En kvantifiering av hur dessa osäkerheter skulle kunna påverka vattenmättnadstiden.

Konceptuella osäkerheter förknippade med termiska, hydrauliska och mekaniska processer i närområdet av ett slutförvar har undersökts sedan många år, både teoretiskt och genom storskaliga experiment, i ett antal EU-projekt och i det internationella DECOVALEX projektet. Åkesson (bilaga 1) har gjort en genomgång av tillgängligt material och analyserat hur resultaten skulle kunna påverka beräkningarna av återmättnad i SR-Site. Syftena med studien var:

- att ge en beskrivning av FEBEX in situ-försöket tillsammans med en sammanfattning av den modellering av försöket som genomförts,
- att ge en beskrivning av FEBEX-Mock-up-testet tillsammans med en sammanfattning av den modellering av försöket som genomförts; en viktig komponent här är beskrivningen av de tre icke-standard flödesmodeller som har föreslagits för att beskriva försöket (hydraulisk tröskel, termo-osmos och mikrostrukturens utveckling),
- att göra en analys av hur modellerna för hydraulisk tröskel, termo-osmos och mikrostrukturens utveckling skulle påverka resultaten i SR-Site analyserna samt
- att göra en analys av betydelsen av andra identifierade osäkerheter.

Utvärderingen av alternativa modeller gjordes med analytiska lösningar. Med ett **tröskelvärde** för den hydrauliska gradienten i Darcy's lag kommer bufferten aldrig att bli mättad. Betydelsen av detta är dock inte stor eftersom den slutliga mättnaden blir >99 % även med relativt låga gradienter. De modellresultat som presenteras i Sánchez och Gens (2006) visar också att tidsperspektivet för att uppnå ett stationärt tillstånd med en tröskelgradient är ungefär densamma som tiden till full vattenmättnad utan tröskelgradient. Detta har då ingen betydelse för buffertens hydromekaniska funktion i förvaret eftersom svälltryck utvecklas vid en mycket lägre mättnadsgrad. Detta beskrivs i svar 3.1 längre fram i detta dokument.

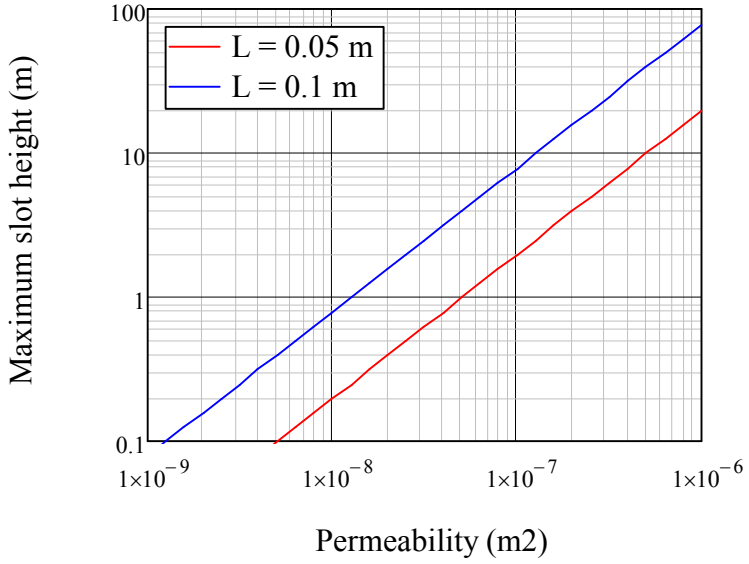
En modell med **termo-osmos** leder också till att full mättnad inte nås så länge som det finns en temperaturgradient. Den kvarvarande omättnaden blir dock inte stor i det fallet heller. De modellresultat som presenteras i Zheng and Samper (2008) visar också att tidsperspektivet för att uppnå ett stationärt tillstånd med termo-osmos är ungefär densamma som tiden till full vattenmättnad utan termo-osmos.

Mikrostrukturens utveckling har modellerats som en minskning av permeabiliteten som funktion av vattenmättnaden. Detta ger ett generellt långsammare vattenupptag. Till skillnad från modellerna med termo-osmos och tröskelvärde ger modellen med mikrostrukturens utveckling en slutlig full vattenmättnad. Betydelsen av denna process för de beräknade vattenmättnadstiderna i SR-Site har analyserats genom att ansätta en justerad ångdiffusivitet. Resultaten indikerar att tiden för vattenmättnad kan ha underskattats i SR-Site. Om SR-Site beräkningarna skulle ha genomförts med de lägsta empiriska värdena för ångdiffusion skulle vattenmättnadstiden ha ökat med en faktor 3,5 för förhållanden med fri tillgång till vatten. Detta påverkar då de deponeringshål där buffertens egenskaper är styrande för vattenmättnadstiden. Dessa hål har de kortaste beräknade vattenmättnadstiderna och med detta antagande skulle tiderna öka från ~10-20 år till ~35-70 år. I Forsmark är det bara en liten andel av hålen där detta är fallet. Figur 3 visar att vattenmättnaden i majoriteten av deponeringshålen styrs av bergets egenskaper.

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

Under arbetet med de alternativa flödesmodellerna identifierades ett par ytterligare osäkerheter som skulle kunna påverka vattenmättnadshastigheten. Detta rör naturlig konvektion i pelletspalten och retentionsegenskapernas temperaturberoende.

För förhållandevis torra bergförhållanden är den viktigaste transportprocessen diffusion av ånga, och detta är det enda sättet att överföra fukt från varma till kalla delar i de använda modellerna. Det potentiella bidraget av **naturlig konvektion** för en mer uttalad fuktomfördelning har därför identifierats som en konceptuell osäkerhet för utvecklingen av återmättnaden. Analysen visar att den naturliga konvektionen är starkt beroende av gaspermeabiliteten i pelletsspalten. Figur 1 visar den maximala höjden för naturlig konvektion som funktion av permeabilitet och spaltvidd. Permeabiliteten är inte systematiskt mätt för bentonitpellets, men med ett maximalt litteraturvärde på 10^{-7} m^2 visar det att den maximala höjden blir 2 meter för 5 cm spalt och 8 meter för 10 cm. Det är därför inte omöjligt att processen kan ha betydelse. Med antagandet att jämviktsläget är ett konstant ångtryck i hela deponeringstunneln så kommer en relativt stor mängd vatten att förloras från bufferten runt kapseln i ett fall med torr tunnel och deponeringshål. Detta skulle innebära att buffertens värmeledningsförmåga minskar och att temperaturen på kapselytan ökar. Detta förutsätter dock att ingen kondensation och svällning sker i pelleten i övre delen av deponeringshålet. Den troliga utvecklingen är dock att ånga kommer att kondensera i pelletspalten i överdelen av deponeringshålet. Pelletsen i spalten kommer då att svälla och täta. Därför förväntas ingen transport av ånga till deponeringstunneln.



Figur 1. *Maximal höjd med bibehållen naturlig konvektion.*

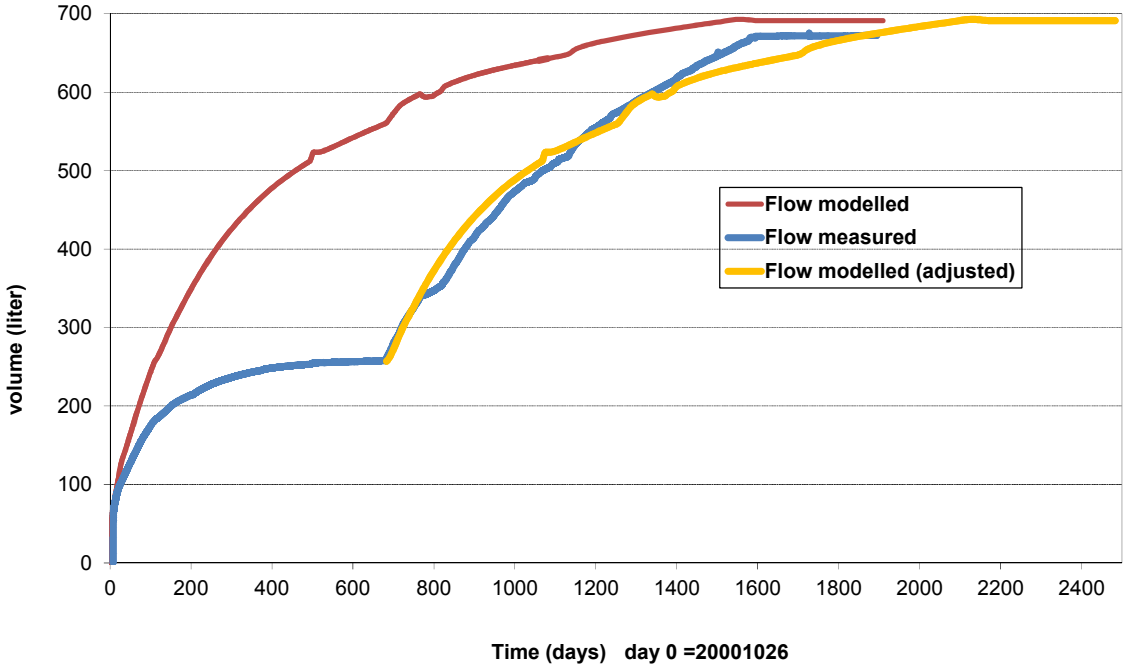
Experimentella data visar att bentonitens **retentionsegenskaper är temperaturberoende**. Den generella trenden är att den relativa fuktigheten ökar med ökande temperatur. Analysen i Åkesson (bilaga 1) visar dock att effekten av processen, för relevanta KBS-3 förhållanden, är mycket liten.

1.2 Jämförelser mellan uppmätta och beräknade inflöden. Finns det filtereffekter? Kan modellerna i TR-10-11 förbättras?

En jämförelse mellan uppmätta och beräknade inflöden i Återtagsförsöket (CRT) har genomförts och avrapporterats av Kristensson et al. (bilaga 2). Uppmätta inflöden i filter och avrapporterade uppskattningar av påfyllt vatten har jämförts med beräknade värden av

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

den totala tomvolymen i försöket. Jämförelsen mellan modellerat och mätt totalinflöde stämmer väl vid försökets slut, medan utvecklingen över tid inte stämmer lika väl och en rimlig orsak till detta har identifierats.



Figur 2. *Modellerat (röd) och uppmätt (blå) inflöde till försökshålet i CRT tillsammans med ett modellerat inflöde där hänsyn har tagits till den begränsade vattentillgången i filtren (gul).*

Orsaken till det låga uppmätta inflödet upp till 680 dagar beror troligtvis på att trycket i filtren var för lågt för att hålla dem mättade. När trycket höjdes (dag 680) tog vattenupptaget fart. Om hänsyn tas till detta i modellen fås en god överensstämmelse. En del andra osäkerheter i försöket diskuteras också och slutsatsen från dessa är att vattenupptagsmodellerna verkar underskatta det verkliga upptaget en aning och att det, baserat på mätningarna och modelleringen av CRT, inte går att identifiera någon ytterligare process som inte hanteras i modellerna som skulle ge ett långsammare vattenupptag.

1.3 Klargöra hur CRT-modellen har använts och förklara skillnaden mellan TH och THM-modellerna.

Kristensson (bilaga 3) har beskrivit de skillnader mellan TH- och THM-modellerna i CODE_BRIGHT som kan påverka vattenmättnadsprocessen. Författaren ger också en beskrivning av ”CRT-fallet” vilket också används som ett specifikt fall för att illustrera betydelsen av skillnaden mellan modellerna.

1.4 Sammanställning av data för andra bentonittyper än MX-80 och diskutera betydelsen av skillnaderna.

Åkesson (bilaga 4) har gått igenom tillgängliga data för andra tänkbara buffert- och återfyllningsmaterial och gjort en bedömning av hur dessa data skulle kunna påverka slutsatserna från SR-Site. Tillgängliga data avser primärt mätningar av hydraulisk konduktivitet, svälltryck och retentionsegenskaper från tester med vattenupptag. Förutom detta har även data för termisk ledningsförmåga och resultat från homogeniseringstester beaktats. De olika material som jämförts är buffertmaterialen MX-80, Deponit CA-N och

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

Febex, och återfyllningsmaterialen Ibeco RWC BF och Friedland. Två olika kvaliteter och flera sändningar av Asha-material ingår också i studien. Ett av materialen är av buffert- och det andra av återfyllningstyp.

Tidsskalan för återmättnad för ett visst material är till stor del bestämd av de hydromekaniska egenskaperna för materialet i fråga, men också av den initiala torrdensiteten och vattenhalten. Olika material kan därför uppvisa optimala egenskaper, med avseende på vattenupptagningsförmåga, för olika installerade initialtillstånd (densitet och vattenhalt). En detaljerad jämförelse av olika bentonitmaterial med avseende på tidsskalan för vattenupptag är därför inte helt rättfram. Istället kan utvärderade data för ångdiffusivitet användas för att göra en enkel jämförelse. Bakgrunden till detta är att tidsskalan för vattenupptag i princip är omvänt proportionell mot diffusiviteten (t ex $t_{febex} \sim t_{mx80} \cdot D_{mx80}/D_{febex}$). Även om skillnaderna i ångdiffusivitet befanns vara ganska små mellan olika material, ska det noteras att de lägsta värdena var för MX-80. Detta innebär att tidsskalan för återmättnad för andra material skulle vara något kortare än för MX-80 (minskningen skulle bli en faktor ca ½ för Friedland, och ⅓ för de andra analyserade materialen). Bortsett från dessa observationer kan det noteras att analysen visade en generell samstämmighet mellan olika datauppsättningar och gav en verifiering av materialmodellen utifrån oberoende mätningar.

Temperaturutvecklingen för ett visst bentonitmaterial är till stor del bestämd av den termiska ledningsförmågan för materialet i fråga. Olika mättnadsberoende samband som antagits för värmeledningsförmågan hos MX-80 jämfördes med rapporterade data för Febex-bentonit. Febex-data är i allmänhet ganska lika datasambanden för MX-80, även om sambanden tenderar att överskatta värmeledningsförmågan i mitten av mättnadsprocessen och underskatta den vid låg mättnadsgrad.

Homogenisering av buffert och återfyllning analyserades i THM-modelleringen i SR-Site (Åkesson et al. 2010). Beräkningarna baserades på konstitutiva lagar som utnyttjar parameteruppsättningar som har härletts från flera olika typer av tester och mätningar. Hittills har dessa endast utförts för MX-80. Utifrån den generella bristen på experimentella data och de inneboende osäkerheterna i den använda beräkningstekniken är det därför inte möjligt att göra en relevant jämförelse av homogeniseringsprocessen i olika material baserat på en numerisk modellering. Skaltest kan å andra sidan användas som en ganska enkel alternativ metod för jämförelser mellan olika material. Relevanta fullskaleprov visar generellt en skillnad mellan högsta och lägsta portal på 0,20-0,25 (Ibeco RWC BF) och motsvarande 0,15-0,30 (Friedland). Detta stämmer väl överens med homogeniseringsberäkningarna för återfyllningen i SR-Site, vilka visade en maximal skillnad i portal på drygt 0,2.

1.5 Inverkan av hydraulisk samverkan mellan flera närliggande hål på återmättnadsförloppet.

Om flera deponeringshål delar på samma vattenförande spricka skulle detta kunna påverka vattenmättnadsförloppet. Denna process har beskrivits i Malmberg et al. (bilaga 5). Den huvudsakliga effekten skulle kunna vara att hålet uppströms ”torkar ut” sprickan och att inget vatten når hålet nedströms. För att processen ska vara viktig måste flödet i sprickan vara tillräckligt stort för att påverka buffertens vattenmättnad, men inte större än att vattenupptagningsförmågan hos bufferten i ett hål ska kunna ta upp en betydande andel av flödet. Det är därför bara i intervallet av inflöden mellan 10^{-3} och 10^{-4} L/min, vid öppna förhållanden, som samverkan kan ha betydelse i Forsmark. Baserat på Joyce et al. (2013)

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

så är det 2,6 % av deponeringshålen i Forsmark som ligger i detta intervall. Av dessa är det hälften där sprickan delas mellan flera hål. I ett extremfall är det då möjligt att 1,3 % av deponeringshålen kan förlora sitt inflöde från en vattenförande spricka genom hydraulisk samverkan mellan deponeringshål. I Forsmark är det troligt att de flesta deponeringshål kommer att mättas av flöde genom bergmatrisen. Att ytterligare 1,3 % av deponeringshålen adderas till denna grupp kommer inte att påverka helhetsbilden av vattenmättnadsförloppet.

Slutligen bör noteras att i de analyser som görs av buffertuppmättnad via inflöde från bergmatrisen tas hänsyn till förvarets layout vid konstruktionen av den tvådimensionella axisymmetriska modellen för beräkning av mättnadstiden. Detta gäller både i SR-Site och i de nya analyser som presenteras av Malmberg et al. (bilaga 5). Modellen är konstruerad så att det blir ”no-flow boundaries” emellan deponeringshål och deponeringstunnlar. En utförlig beskrivning av hur modellen konstruerades finns i avsnitt 3.2.1 i Åkesson et al. (2010) (samt speciellt Figur 3-2).

2. En analys och diskussion av möjliga fördelningar av återmättnadstider för bufferten med tanke på lokala hydrogeologiska betingelser på förvarsdjup vid Forsmark platsen.

SKB:s svar

I Åkesson et al. (2010) studerades vattenmättnadsprocessen i bufferten för tre olika ”typhål”:

- Hål med en vattenförande spricka.
- Hål utan vattenförande spricka, men i närheten av en vattenförande spricka i deponeringstunneln.
- Hål utan vattenförande sprickor vare sig i själva hålet eller i tunneln.

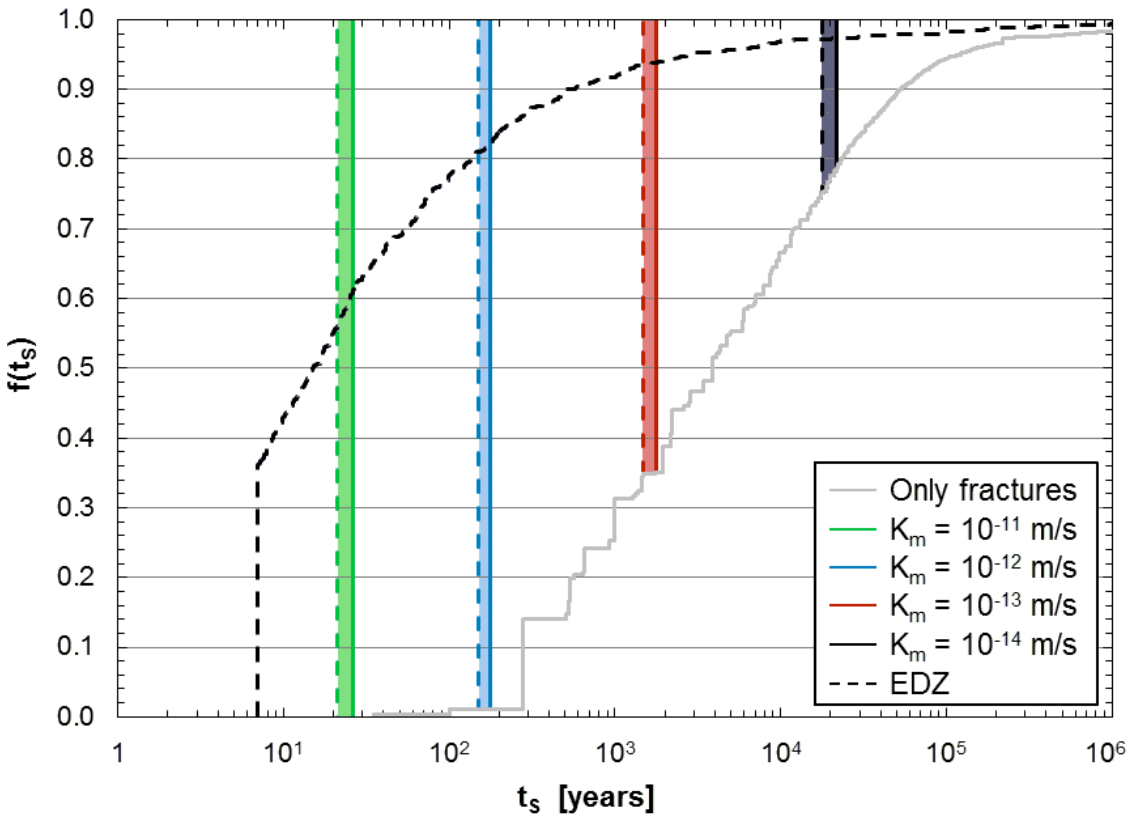
Vattenmättnaden i återfyllningen för olika fall studerades också. Fallen valdes för att täcka in alla tänkbara vattenmättnadstider. Det gjordes dock inget försök att koppla de olika fallen till den hydrauliska situationen i Forsmark och ingen fördelning av mättnadstider presenterades. I SR-Site konstaterades dock (SKB 2011, avsnitt 10.3.8) att förhållandena i Forsmark väl täcktes av fallen i Åkesson et al. (2010).

Malmberg et al. (bilaga 5) har kopplat vattenmättnadsmodellerna i Åkesson et al. (2010) till de förväntade inflödena i Forsmark baserat på Joyce et al. (2013). Inflödet till det öppna förvaret har använts för att kalibrera Code_Bright modellen. Efter det introduceras buffert och återfyllning och vattenmättnadstiden beräknas. Det kan konstateras att:

- Matrisflöden är inte hanterade i den hydrogeologiska modellen.
- Generellt är flöden i de sprickor som skär deponeringshål betydligt lägre än antagandena i Åkesson et al. (2010).
- Avståndet mellan de flesta deponeringshål och de sprickor som skär deponeringstunnlarna är längre än i typfallen i Åkesson et al. (2010).

Detta hanteras i modelleringen. De sammanfattade resultaten från studien visas i Figur 3.

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen



Figur 3. *Den heldragna grå linjen visar kumulativ fördelning av vattenmättnadstider för bufferten i Forsmark med förutsättningen att bergmatrisen är tät. De färgade linjerna visar det intervall då alla deponeringshål är fullt mättade för olika antaganden om hydraulisk konduktivitet i bergmatrisen. Den streckade linjen visar fördelningen av vattenmättnadstid för ett fall med en idealiserad mycket konduktiv EDZ i deponeringstunneln.*

Slutsatsen från studien är att antagandet om bergmatrisens hydrauliska konduktivitet är avgörande för uppskattningen av vattenmättnadstider i Forsmark. Mätningar av matriskonduktiviteter visar att dessa ligger i storleksordningen $K_M = 4 \cdot 10^{-14} - 5 \cdot 10^{-12}$ m/s (Vilks 2007). För värden i det intervallet kan det konstateras:

- **$K_m \geq 10^{-11}$ m/s:** bara en liten andel av hålen mättas från sprickflöden. Tunneln påverkar inte förloppet överhuvudtaget. Alla hål är mättade inom 30 år.
- **$10^{-12} > K_m \geq 10^{-13}$ m/s:** mellan 10 och 30 % av hålen mättas med vatten från sprickor eller från deponeringstunneln. Övriga deponeringshål mättas från bergmatrisen och dessa mättas inom en period på mellan 200 till 2 000 år.
- **$10^{-13} > K_m \geq 10^{-14}$ m/s:** en betydande andel (30-60 %) av deponeringshålen mättas med vatten från sprickor eller från deponeringstunneln. Övriga deponeringshål mättas från bergmatrisen och detta kan ta drygt 20 000 år
- **$K_m < 10^{-14}$ m/s:** I praktiken mättas alla deponeringshål med vatten från sprickor eller från deponeringstunneln. I tunnlar utan sprickor kommer detta att ta mycket lång tid. Beräkningarna visar på tider på > 1 000 000 år.

I underlaget till SR-Site (Åkesson et al. 2010) ansattes 10^{-13} m/s som en ”typisk” matriskonduktivitet. Med detta värde skulle, enligt Figur 3, 65 % av hålen i Forsmark mättas på ~2000 år och den största delen av de andra i intervallet 300-2000 år. Endast en liten andel mättas snabbare än 100 år.

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

Det är uppenbart att osäkerheten i uppskattningen av vattenmättnadstid är stor. Intervallet för matriskonduktiviteter i Vilks (2007) sträcker sig över två storleksordningar och detta skalar i princip linjärt med vattenmättnadstid, eftersom så få hål mättas från vattenförande sprickor.

3. Säkerhetsbetydelse av mättnadsgrad och eventuell inverkan av heterogena förhållanden inom bufferten.

SKB:s svar

Svaret på fråga 3 ges i två delar, numrerade 3.1 respektive 3.2 nedan.

3.1 Analys av betydelsen av olika faser i återmättnadsförloppet
I Åkesson et al. (2010) definierades 99 % som ”full” vattenmättnad. Bakgrunden till detta är att det möjliggjorde relevanta jämförelser mellan olika vattenmättnadsfall. Värdet i sig har ingen praktisk betydelse.

För att belysa betydelsen av olika faser i vattenmättnadsmättnadsprocessen har Kristensson (bilaga 6) studerat buffertens säkerhetsfunktioner som funktion av vattenmättnaden. Den mest relevanta säkerhetsfunktionen när det gäller vattenmättnad är svälltrycket. I SR-Site är de flesta säkerhetsfunktionerna bara relevanta för en mättad buffert. I den här studien har dock ingen hänsyn tagits till detta och svälltrycken har beaktats oberoende av mättnadstillstånd. Slutsatserna från studien visar följande:

- Den mekaniska materialmodellen är processberoende och måste kalibreras för olika situationer. Här studerades en långsam vattenmättnad och de mekaniska parametrarna hos pelletfyllningen måste därför väljas för att ge en representativ densitetsprofil vid full vattenmättnad.
- Processerna i bufferten är heterogena. Modellerna visar stora skillnader mellan block och pelletmaterial, men också internt i pelleten och blocken.
- Vattenmättnadsgrad är ingen lämplig parameter för att bedöma trycket i bufferten. Bufferten kan nå ett givet tryck för ett stort spann av vattenmättnadsgrader, absolut eller relativt. I närheten av kapseln kan 1 MPa nås utan att något som helst vattenupptag har skett.
- Säkerhetsfunktionsindikatorn 1-2 MPa nås heterogent i bufferten. Den generella trenden är ”nerifrån och upp” och ”senare i pelleten”.
- Bergets hydrauliska egenskaper är avgörande för svälltryckets utveckling och för tiden det tar att nå säkerhetsfunktionsindikatorn.

3.2 Risk och konsekvens av en heterogen återmättnad
Deponeringshålen i Forsmark förväntas i huvudsak vara torra. I de flesta hålen kommer det inte att finnas några vattenförande sprickor och de fall där det finns är inflödena oftast mycket små. Betydelsen av ett lågt inflöde i en enskild punkt i ett deponeringshål har studerats av Börgesson et al. (bilaga 7).

Studien bygger på en geometri där vatteninflödet sker i en punkt i bufferten vid kapselns mitthöjd. Ett konstant inflöde eller ett konstant tryck sätts som randvillkor i punkten. I fallet med flöde justeras dock detta om det kräver ett orealistiskt högt tryck i berget eller om det blir ett mottryck från vattenupptag i bufferten.

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

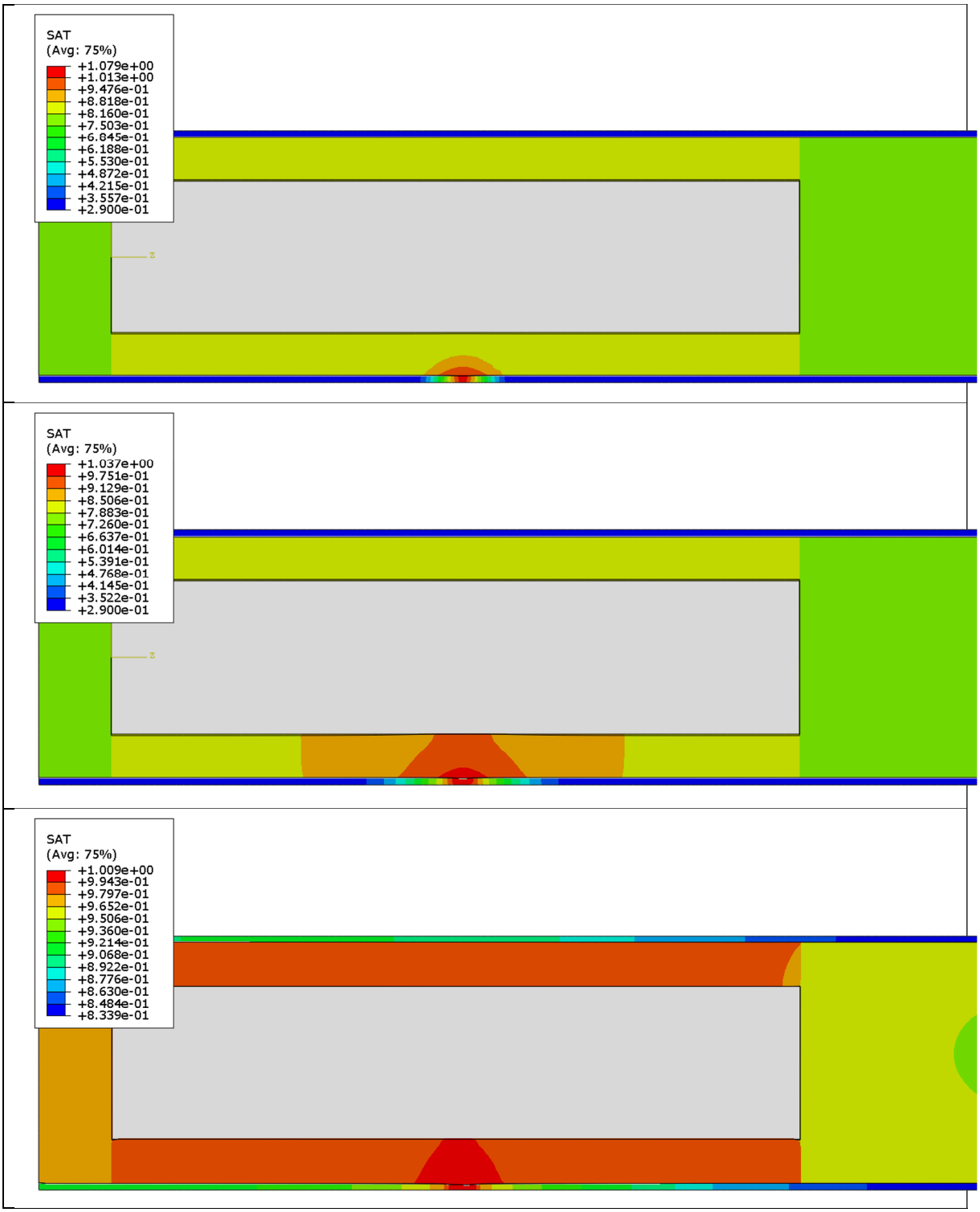
Generellt är det svårt att få modellen att konvergera och att få en ändamålsenlig representation av pelletspalten. Trots detta går det att dra en del slutsatser från studien:

- För att ett punktinflöde ska ge heterogen återmättad måste vattenmättnaden gå snabbare än om bufferten mättas via bergmatrisen. Med en antagen matriskonduktivitet på 10^{-13} m/s fås ingen ojämn bevätning för vattenmättnadstider längre än ~1 500 år.
- Tiden det tar att fylla alla tomma porer i bufferten är ~3 500 år för ett inflöde av 10^{-6} L/min och ~350 år för ett inflöde av 10^{-5} L/min. Det minimala inflödet av intresse ligger därför mitt i detta intervall.
- Om flödet är så högt att pelletspalten fylls innan blocken är mättade blir det heller ingen heterogen mättnad eftersom blocken då mättas från en fylld spalt. Det tar 1,55 år att fylla spalten vid ett inflöde av 10^{-3} L/min och ~2 år att mätta blocken med fri tillgång till vatten i hela spalten. För flöden $>10^{-3}$ L/min blir därför mättnaden homogen.
- Enligt Joyce et al. (2013) är det ungefär 400 deponeringshål där inflödet ligger i intervallet $5 \cdot 10^{-5}$ och 10^{-3} L/min och i dessa skulle därför ojämn mättnad kunna ske.
- De mekaniska analyserna som också redovisas av Börgesson et al. (bilaga 7) visar dock att effekten av de inhomogeniteter som orsakas är små. En liten lyftning av kapseln och några lokala effekter runt inflödespunkten kan dock konstateras. Effekten på densitetsfördelningen i deponeringshålet är liten.

Ett exempel på resultat visas i Figur 4. Även med ett extremfall där bufferten får allt vatten i enskild punkt och inflödeshastigheten är ogynnsam så fördelas vattnet relativt väl i buffertblocken. Risken för en extremt heterogent mättad buffert bedöms därför som försumbar.

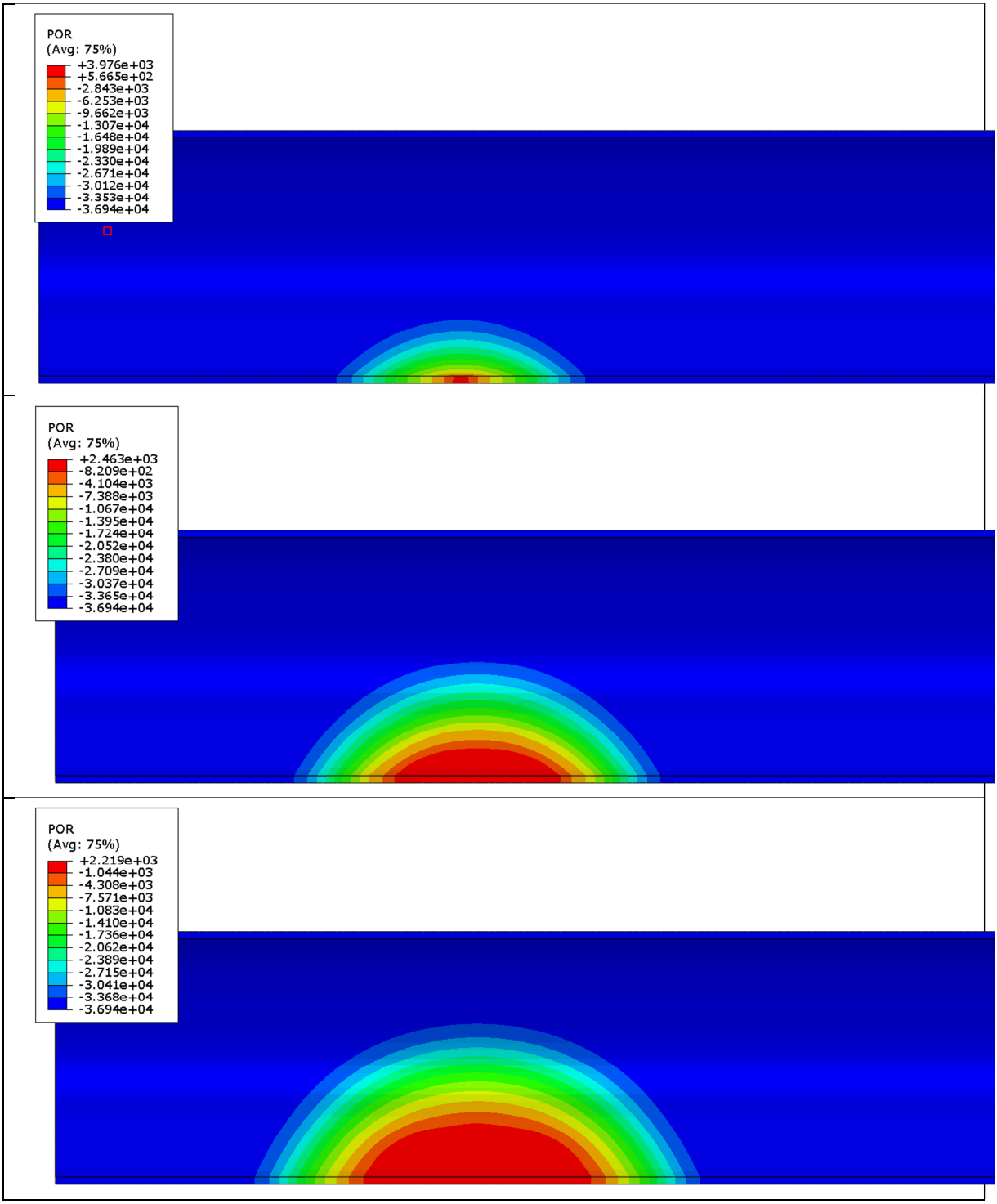
Det finns dock en del osäkerheter i den mekaniska och hydrauliska representationen av pelletspalten och det är inte klart hur detta påverkar resultaten. Betydelsen av alternativa modeller av pelletfyllningen har dock utvärderats i Börgesson et al. (bilaga 7). Figur 5 visar beräknade portryck i pelleten med tre olika representationer av pelletens konduktivitet.

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen



Figur 4. *HM-modellering av ett helt deponeringshål med ett punktinflöde med hastigheten 0,0001 L/min. Vattenmättnadsgrad efter 0,32 år (övre), 3,2 år (mitten) och 320 år (nedre) (Figur 4-2 i Börgesson et al. (bilaga 7)).*

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen



Figur 5. *H-modellering av pelletspalten med ett punktinflöde på 0,0001 L/min. Porvattentryck (kPa) efter 3,2 år. De alternativa modellerna avser pelletens konduktivitet som funktion av vattenmättnadsgrad.*

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

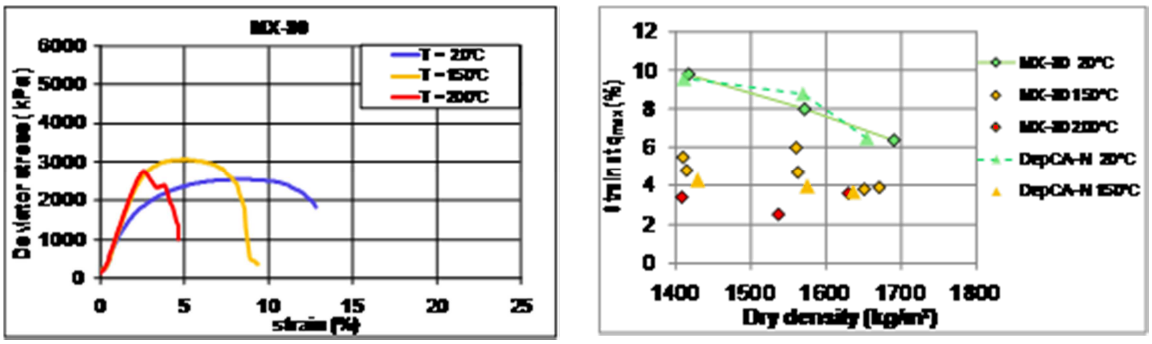
4. Analys av termisk påverkan på bentonitens mekaniska och hydrauliska materialegenskaper.

SKB:s svar

Svaret på fråga 4 ges i två delar, numrerade 4.1 respektive 4.2 nedan.

4.1 Analys av hur de mekaniska egenskaperna hos temperaturpåverkad bentonit inverkar på bergskjuvfallet.

Tester på bentonit som har utsatts för höga temperaturer har visat tendenser till sprött brott vid skjuvning i motsats till resultat från opåverkad bentonit, som visar jämn eller ingen minskning i styrka efter maximal skjuvspänning. Figur 6 visar ett exempel på sådana resultat.



Figur 6. *Exempel på sprött brott. Den vänstra figuren visar exempel på relationen spänning-töjning vid ett enaxligt test på provkroppar av bentonit med liknande densitet som har varit utsatta för olika temperaturer. Den högra figuren visar töjning vid maximal deviatorspänning, och det anses här utgöra brott, som funktion av torrdensitet för prover som utsatts för olika temperaturer.*

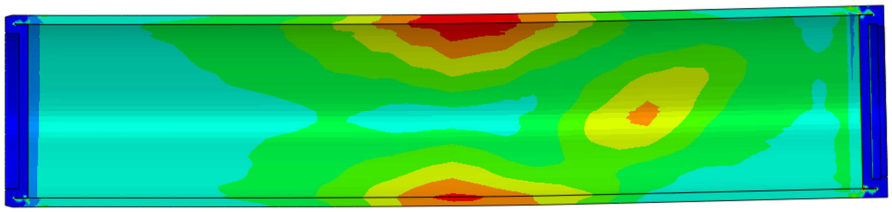
De allmänna slutsatserna från försöken var att skjuvhållfastheten inte påverkas, men brottet kan vara sprött, dvs ha en abrupt minskning av skjuvhållfasthet efter maximal skjuvspänning har uppnåtts. Den maximala deviatorspänningen är ett mått på skjuvhållfastheten och den är beroende av densiteten. Vid sprött brott ser man ofta även en lägre töjning vid brott och brottytan kan dessutom vara vertikal. Det som avses med: att skjuvhållfastheten inte påverkas är att maximala deviatorspänningen vid en viss densitet inte anses vara påverkad av ökad temperatur. Eftersom försöksresultaten till vänster i Figur 6 kommer från tre prov som har ungefär samma densitet, men inte exakt samma värde, kan man inte från denna figur klart avgöra om deviatorspänningen ökar med temperaturen.

Effekten av en bergskjuvning genom ett deponeringshål har undersökts både med laboratorietester vilka har varit grunden för en materialmodell för bufferten och med ett antal finita element-beräkningar vilka har studerat effekten av olika skjuvfall på spänningarna i kapseln. Ett antal beräkningsfall redovisas i Börgesson och Hernelind (bilaga 8). Bentoniten modellerades som ett elastoplastiskt material med töjningshastighets beroende spännings-töjnings-relationer. Fyra olika beräkningar har gjorts, en referensberäkning med opåverkad bentonit, två beräkningar med spröd bentonit och en fjärde beräkning med spröd bentonit och med skjuvplanet av bufferten borttaget för att

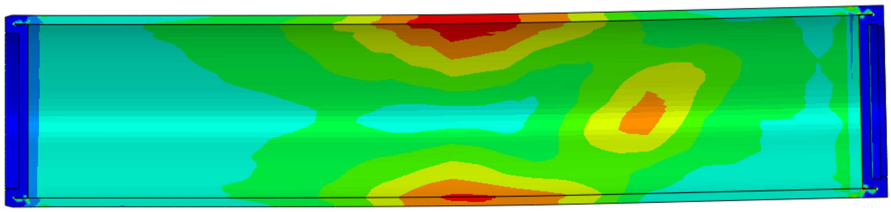
PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

simulera att skjuvhållfastheten helt har förlorats i den zonen. Materialmodellen för referensfallet är identisk med den materialmodell för bentonit som användes för SR-Site (Åkesson et al. 2010).

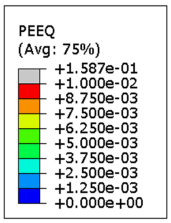
Ett exempel på resultat visas i Figur 7 som visar den plastiska töjningen i kopparhöljet. Den mest uppenbara skillnaden förekommer i fall 4 där skjuvplanet i bufferten är borttaget och spänningskoncentrationen (likaså den plastiska töjningen i kopparhöljet) nära skjuvplanet är större än i de övriga fallen. Den maximala plastiska töjningen är emellertid inte större och som helhet är skillnaden mellan de olika fallen liten.

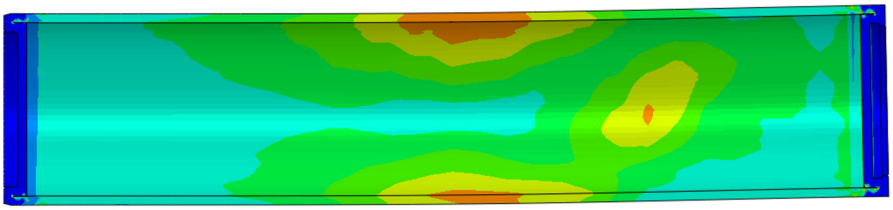


Calc. 1. Reference case. 5 cm shear. Max peeq 0.16

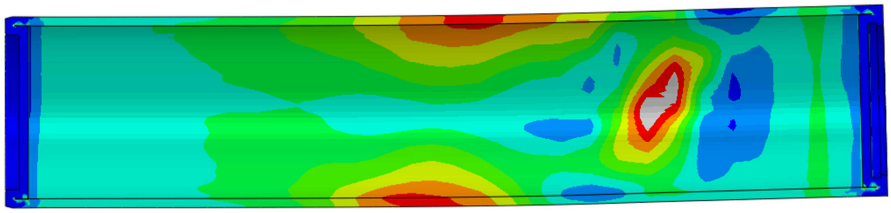


Calc. 2. Brittle. 5 cm shear. Max peeq 0.16





Calc. 3. Brittle2. 4.5 cm shear. Max peeq 0.16



Calc. 4. Brittle2. Shear plane removed. 5 cm shear. Max peeq 0.15

Figur 7. *Plastisk töjning i kopparhöljet.*

Den övergripande slutsatsen är att ett sprött beteende hos bufferten inte kommer att ha en betydande effekt för konsekvenserna av skjuvfallet. Detta är en logisk slutsats, eftersom sprödbrott inte betyder ökad utan minskad skjuvhållfasthet med töjning, dvs skjuvmotståndet från bufferten minskar. Tidigare beräkningar av skjuvfallet visar också att lägre skjuvmotstånd i bufferten innebär lägre spänningar i kapseln.

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

4.2 Analys av hur långsam återmättnad kan förändra materialegensakerna hos bufferten.

Bentoniten i bufferten består av lermineralet montmorillonit samt en mindre andel vanligt förekommande mineral som kvarts, fältspat, gips etc. De tätande egenskaperna hos bentoniten är i allt väsentligt kopplade till montmorilloniten, huvudsakligen genom interaktion mellan montmorillonitens motjoner och vatten.

Studier av bentonitmaterial under full vattenmättnad har kraftigt dominerat de allmänna forskningsinsatserna, eftersom detta är det vanligt förekommande tillståndet i naturliga system. Även studier för slutförvar har huvudsakligen rört vattenmättad buffert. Ett fåtal studier som specifikt rör strukturell och/eller mineralogisk omvandling av bentonit under omättade förhållanden har emellertid genomförts. Några studier har även berört de speciella förhållanden, med förhöjd temperatur och varierande mättnadsgrad, som kan komma att råda i ett slutförvar.

Långsam vattenmättnad medför i allmänhet att transienta förhållanden och gradienter upprätthålls under en längre tid än vad som är fallet vid en snabb vattenmättnad. Förhållanden med hög temperatur skulle potentiellt kunna påverka buffertegenskaperna i negativ riktning och bland annat har ångpåverkan, bakterieaktivitet, transport och anrikning av lösta specier diskuterats och undersökts i både laboratorieförsök och fältförsök. Karnland et al. (bilaga 9) har gjort en sammanställning av de studier som finns tillgängliga och de som pågår som behandlar dessa processer.

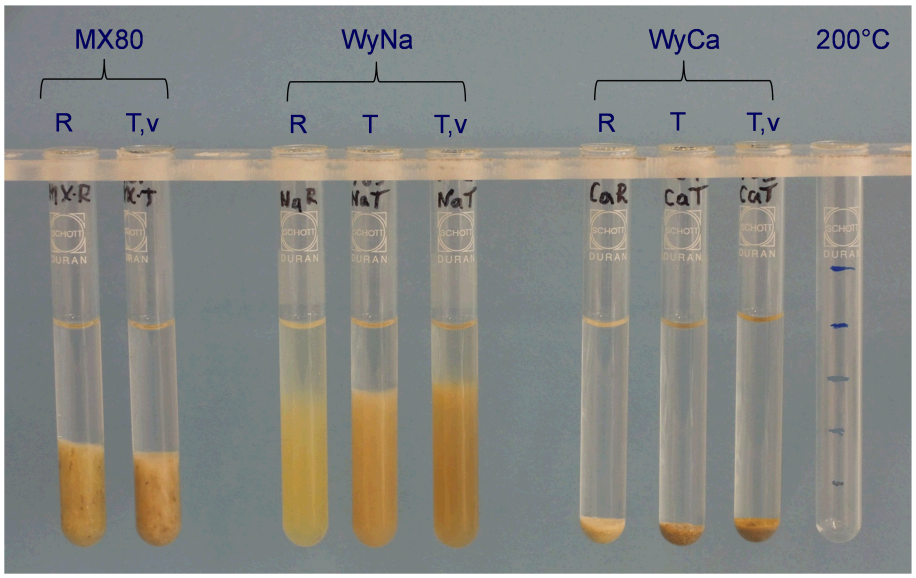
När det gäller fysikaliska egenskaper som skjuvhållfasthet, töjning vid skjuvning, svälltryck och hydraulisk konduktivitet som följd av kortvarig exponering i förhöjd temperatur (upp till 150°C) visar det sig att det finns en indikation på förhöjd skjuvhållfasthet och en signifikant förändring av töjningen vid brottlast som följd av kortvarig hydrotermal behandling. Effekten är dock lika stor eller större för prover som värmts under mättade förhållanden jämfört med de som värmts utan ett externt vattentryck. Svälltryck och hydraulisk konduktivitet påverkas inte av kortvarig uppvärmning oavsett förhållanden.

Tester med ångtransport i bentonit visar att ånga kondenserade under samtliga undersökta förhållanden, och att vattenupptag från kondenserat vatten totalt dominerade över vattenupptag direkt från ånga. Samtliga tester visade att vattenupptaget minskade med tiden, vilket indikerar att pelletsystemet tätade och att ångtransporten minskade med tiden.

Försöksserier med material som kortvarigt exponerats för temperaturer på upp till 200°C vid olika vattenmättnadsgrader visar inga tydliga skillnader som följd av hydrotermalbehandlingen mellan omättade och vattenmättade prov med avseende på svällningskapaciteten (Figur 8).

Generellt sett är skillnader i uppmätta svällningsegenskaper som följd av hydrotermalbehandling försumbara i jämförelse med skillnaderna mellan natriumdominerade och kalciumdominerade material. Effekterna av kortvarig ångpåverkan på fri svällning bedöms därför inte vara något problem för ett KBS-3 förvar.

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen



Figur 8. *Resultat från försök med fri svällning. Samtliga provrör innehåller 1,00 gram material som svällt till maximal volym. MX-80 bentonit var utgångsmaterial för samtliga prov som för vissa försök renats och jonbytts till natrium- (WyNa) respektive kalciumform (WyCa). R indikerar referensmaterial, T indikerar material hydrotermalbehandlat vid full vattenmättnad, och T,v indikerar material hydrotermalbehandlat i omättat tillstånd.*

En studie innefattade försök med bentonit vid olika vattenmättnadsgrad (0, 50, 85 och 100 %) som utsattes för temperaturer på upp till 150°C. Efter hydrotermalbehandlingen vattenmättades proven och svälltryck och hydraulisk konduktivitet bestämdes både vid förhöjd temperatur och vid rumstemperatur. Inte i något fall uppmättes någon signifikant förändring i egenskaperna i jämförelse med referensmaterialen.

Utfällning av sekundära mineral i bufferten, t ex $CaSO_4$, i en temperatur- och vattenmättnadsgradient har observerats i fältförsök. Dessa reaktioner är dock reversibla och de utfällda mineralen kommer att lösas upp när vattenmättnaden ökar. Utfällningarna förväntas därför inte påverka buffertens funktion.

Det finns dock ingenting i ovan beskrivna undersökningsmaterial som tyder på att förändringar egenskaperna skulle vara orsakade av mineralogiska förändringar som följd av kortvarig exponering för torra eller halvtorra förhållanden vid höga temperaturer. Transportkapaciteten av lösta specier kan generellt sett förväntas vara lägre vid lågt vatteninnehåll än vid full vattenmättnad, vilket motverkar de flesta kända omvandlingsprocesserna. SKB:s bedömer, baserat på ovanstående, att buffertens materialegenskaper inte kommer att påverkas negativt av en lång vattenmättnadsfas i en omfattning som påverkar den långsiktiga säkerheten negativt.

5. Bedömning av möjligheten att med justering av vattenmättnadsgrad eller artificiell tillförsel av vatten påverka/förkorta återmättnadsförloppet.

SKB:s svar (svar lämnat i juni 2013)

SKB har testat detta i två storskaliga projekt på Äspö; CRT och Lasgit. Vid dessa försök användes en betongplatta som förankrades i berget för att förhindra en uppsvällning av

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

pellets och buffertblock. Denna lades på det översta blocket så fort som möjligt efter att vatten fyllts i spalten. Trots detta uppstod stora deformationer i främst pelletsen.

SKB har också testat systemet pellets/block i mindre skala där systemet har fått begränsad tillgång till vatten under en vecka. Försöken utfördes utan någon vertikal last. Dessa försök uppvisar stora deformationer i såväl block som pellets (Sandén och Börgesson 2010). Motsvarande försök har också gjorts med fullskaliga block där två ringformiga block med en yttre pelletsfylld spalt bevätts (Åberg 2009) (se Figur 9). Resultaten från dessa försök bekräftar resultaten från de mindre försöken. Bedömningen är att även vid begränsad tillgång till vatten uppstår oacceptabelt stora deformationer i bufferten med åtföljande lägre densitet. Deformationerna blir större ju mer vatten som tillförs pelletsfyllningen. En förutsättning för att det ska gå att fylla vatten i spalten är då att buffertblocken hålls på plats med en vertikal last. Vid installation av ett förvar kan man inte återfylla tunnlarna i en sådan takt att man kan förhindra en uppsvällning av bufferten om artificiell bevätning används.

Att endast fylla ”porerna” mellan pellets med vatten skulle ge ett tillskott på ca 1000 liter. Den totala mängden vatten som behöver tillföras för att vattenmätta systemet av block och pellets är ca 1700 liter per deponeringshål. Således reduceras mängden vatten som krävs för att nå vattenmättnad till ungefär hälften vid artificiell bevätning. Eftersom bevätningsförloppet inte är linjärt med tiden, halveras inte tid till full vattenmättnad vid artificiell bevätning av den yttre spalten utan ”tidsvinsten” blir mindre.

Figur 9. *Deformationsskador i ett bentonitblock utan vertikal last vid artificiell vattentillförsel (Åberg 2009).*

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

Att tillföra systemet av buffertblock och pellets vatten efter att tunnelåterfyllningen är på plats innebär också risker och problem:

1. Det är svårt att påvisa att vatten har nått alla delar av den pelletsfyllda spalten.
2. En artificiell bevätning skulle innebära att ett system av tuber för att få in vatten måste installeras och sedan tas bort.
3. Vinsten med artificiell tillförsel av vatten i den pelletsfyllda spalten på hela bevätningsprocessen bedöms vara liten, se texten ovan.

SKB anser att det är mer prioriterat att snabbt få en vertikal last på buffertstapeln, dvs återfyllningen på plats, än att fylla spaterna i deponeringshålet med vatten.

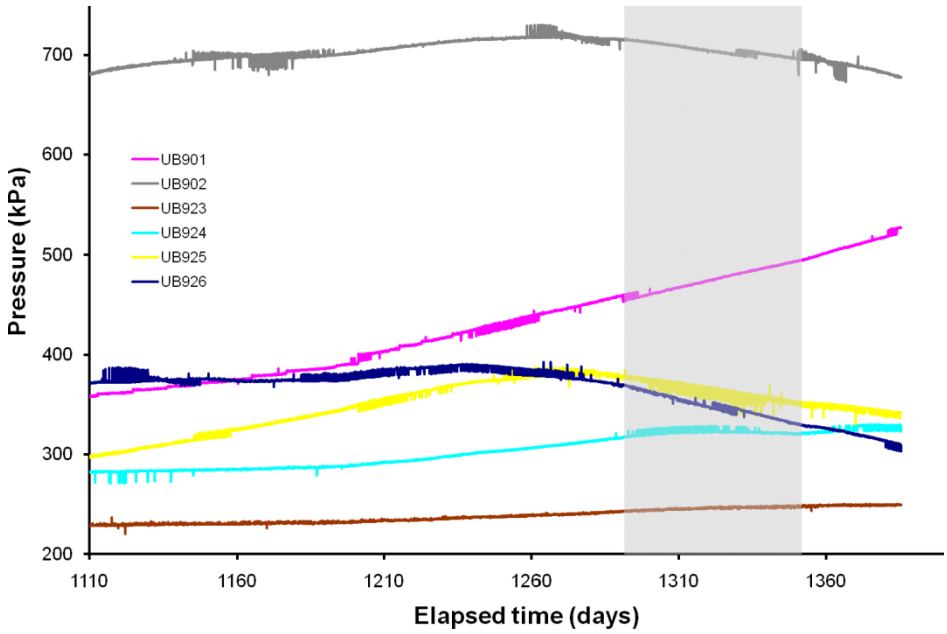
Det är möjligt att ha högre vatteninnehåll på blocken vid kompakteringen och ändå uppnå samma torrdensitet som för referensdesignen (17 % vattenkvot). SKB har tidigare tryckt block till storskaliga försök på Äspö (Lasgit (Cuss et al. 2010)) med hög initial vattenkvot och vattenmättnadsgrad. Tekniskt är det möjligt att uppnå en vattenmättnadsgrad på ca 95 %. För att uppnå detta kan de solida blocken kompakteras med ca 40 MPa med en vattenkvot på ca 21 %. Motsvarande värden för de ringformiga blocken är en kompakteringsspänning av 80 MPa med en vattenkvot på ca 20 %. SKB har i samband med Lasgit-projektet tittat på vad en hög initial vattenmättnadsgrad på bufferten har för betydelse för vattenmättnadsprocessen, eftersom det var önskvärt med en så snabb buffertmättnad och homogenisering som möjligt. I Lasgit kombinerades:

1. Block med hög vattenmättnadsgard.
2. Fyllning av pelletsspalt med vatten.
3. Artificiell bevätning från filtermattor i hålets topp och botten samt filter på kapselns yta.
4. Ingen uppvärmning.

En förutsättning för att detta skulle fungera var att buffertpelaren hölls på plats med ett 300 mm tjockt stållock, dimensionerat för 20MPa. Lasgit är knappt 4 år efter installationen i princip vattenmättat, men portrycksfördelningen (Figur 10) visar att systemet är långt ifrån hydromekanisk jämvikt. De olika kurvorna i figuren visar portrycket i olika punkter i bufferten. Eftersom trycken skiljer mellan punkterna har hydromekanisk jämvikt inte uppnåtts. Portrycket är inte heller i jämvikt med det omgivande bergets hydrostatiska tryck. Detta visar att även om man tar till alla tänkbara åtgärder för att snabbt nå full vattenmättnad så blir slutresultaten ändå inte ett system i jämvikt.

Det är möjligt att producera buffertblock med högre vattenkvot och bibehållen referensdensitet. Framtida teknikutvecklig får visa om det är lämpligt att använda den typen av block i förvaret. Detta har dock bara begränsad effekt på vattenmättnadsprocessen och på den termiska ledningsförmågan hos bufferten.

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen



Figur 10. *Portryck inuti i bentoniten i Lasgit i tidsintervallet 1110-1360 dagar efter installationen (Cuss et al. 2010).*

Med vänlig hälsning

Svensk Kärnbränslehantering AB
Avdelning Kärnbränsleprogrammet

Helene Åhsberg
Projektledare Tillståndsprövning

Bilagor

1. **Åkesson M, 2013.** 1.1 Conceptual uncertainties and their influence on bentonite hydration. SKBdoc 1415874 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

2. **Kristensson O, Börgesson L, Hernelind J, 2013.** 1.2 Water uptake in the CRT experiment. SKBdoc 1415870 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

3. **Kristensson O, 2013.** 1.3. Description of how the CRT-model was used and how THM and TH models differ in terms of analyzing the hydration process. SKBdoc 1415872 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

4. **Åkesson M, 2013**. 1.4 Bentonites other than MX-80. SKBdoc 1415875 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

5. **Malmberg D, Åkesson M, Kristensson O, 2013.** 2.0+1.5 The distribution of saturation times in the Forsmark repository. The effect of hydraulic connections between deposition holes. SKBdoc 1415879 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

6. **Kristensson O, 2013.** 3.1 Analysis of saturation intervals concerning long time safety during the hydration process. SKBdoc 1415873 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

7. **Börgesson L, Åkesson M, Hernelind J, 2013.** 3.2 Analysis of risks and consequences of uneven wetting in a dry deposition hole. SKBdoc 1415878 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

8. **Börgesson L, Hernelind J, 2013** 4.1 Analysis of how a buffer with brittle shear properties may affect the rock shear case. SKBdoc 1415876 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

9. **Karnland O, Birgersson M, Dueck A, 2013.** 4.2 Analys av i vilken mån en långsam återmättnad kan förvärra försämringar av buffertens materialegenskaper pga. kemiska och strukturella omvandlingar i förhållande till ett fall med snabb återmättnad. SKBdoc 1415886 ver 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Referenser

Dokument och referenser i ansökan

Cuss R J, Harrington J F, Noy D J, 2010. Large scale gas injection test (Lasgit) performed at the Äspö Hard Rock Laboratory. Summary report 2008. SKB TR-10-38, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Sandén T, Börgesson L, 2010. Early effects of water inflow into a deposition hole. Laboratory tests results. SKB R-10-70, 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.

Vilks P 2007. Forsmark site investigation – Rock matrix permeability measurements on core samples from borehole KFM01D. SKB P-07-162, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Åkesson M, Kristensson O, Börgesson L, Dueck A, Hernelind J, 2010. THM modeling of buffer, backfill and other system components – Critical processes and scenarios. SKB TR-10-11, Svensk Kärnbränslehantering AB

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen

Övriga referenser

Joyce S, Swan D, Hartley L, 2013. Calculation of open repository inflows for Forsmark. SKB R-13-21, Svensk Kärnbränslehantering AB

Sánchez M, Gens A, 2006. FEBEX Project, Final report, Final report on thermo-hydro-mechanical modelling. ENRESA publicación técnica 05-2/2006. Madrid.

Zheng L, Samper J, 2008. A coupled THMC model of FEBEX *mock-up* test. Physics and Chemistry of the Earth, **33**, 508-515.

Åberg A, 2009. Effects of water inflow on the buffer – an experimental study. SKB R-09-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Revisionsförteckning

Version	Datum	Revideringen omfattar	Utförd av	Kvalitetssäkrad	Godkänd
3.0	Se sidhuvud	Svar på fråga 1-4.	Se sidhuvud	Se sidhuvud	Se sidhuvud
2.0	2013-04-02	Redaktionella ändringar, sidbrytningar.	Helene Åhsberg	Saida Engström, Olle Olsson	Anders Ström
1.0	2013-04-02	Svar på fråga 5. Ej skickat till SSM.	Patrik Sellin	Saida Engström, Olle Olsson	Anders Ström

PDF rendering: DokumentID 1385067, Version 3.0, Status Godkänt, Sekretessklass Öppen