



DokumentID
1372560

Handläggare
Johan Andersson
Er referens
SSM2011-2426-84
Kvalitetssäkrad av
Saida Engström
Olle Olsson
Godkänd av
Anders Ström
Kommentar
Granskning, se SKBdoc id 1387259

Sida
1(23)
Datum
2012-12-13
Ert datum
2012-12-07
Kvalitetssäkrad datum
2013-03-26
Godkänd datum
2013-03-26
2013-03-28

Strålsäkerhetsmyndigheten
Att: Ansi Gerhardsson
171 16 Stockholm

Svar till SSM på begäran om komplettering rörande kritiska faktorer för val av deponeringspositioner

Strålsäkerhetsmyndigheten, SSM, har i skrivelse till Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB, daterad 2012-12-07 begärt komplettering rörande kritiska faktorer för val av deponeringspositioner.

1. Redovisning av faktorer som påverkar nyttjandegraden för deponeringstunnlarna i Forsmark:

I sin begäran om komplettering efterfrågar SSM beräkningsunderlag som visar hur faktorer som t.ex. dåligt berg, förinjekterade områden, vågiga eller förgrenade sprickor, och eventuella ytterligare av SKB identifierade faktorer, påverkar nyttjandegrad för deponeringstunnlarna i det planerade slutförvaret i Forsmark, d.v.s. den praktiska tillämpningen av det s.k. "Extended Full Perimeter Intersection Criterion" (EFPC) för val av deponeringspositioner i deponeringstunnlarna.

Frågeställningarna förtydligas i avsnittet "Skälen för begäran om komplettering". Där framförs bland annat att SKB har utvecklat EFPC-kriteriet (Munier, 2006; Munier, 2007; Munier 2010), delvis som verktyg för att uppskatta nyttjandegraden för deponeringstunnlarna i slutförvaret, delvis som verktyg för val av deponeringspositioner samt godkännande av deponeringshål. Enligt SSM är EFPC-kriteriet ensamt inte kapabelt att särskilja de "kritiska sprickorna" från övriga långa sprickor när det tillämpas i praktiken i deponeringstunnlarna (Stephansson, 2010). I SSM:s begäran framförs även att den praktiska tillämpningen av EFPC-kriteriet i tunnlar kan göra att nyttjandegraden för deponeringstunnlarna ytterligare förändras. Exempel på faktorer som påverkar tillämpningen av EFPC-kriteriet i tunnlar är enligt SSM t.ex.:

- a) Förekomsten av deponeringspositioner i dåligt berg som kan behöva förkastas: I sin begäran om komplettering framför SSM att i och med att de partier där bergmassa av dålig byggbarhet har en viss utsträckning i deponeringstunnlarna påverkar dessa den resulterande nyttjandegraden. Påståendet förutsätter att SKB bedömer att deponeringspositioner i dåligt berg ska förkastas (se även punkt 4.a).*
- b) Förekomsten av vattenförande sprickzoner som kräver förinjektering längs en viss sträcka i deponeringstunneln: I sin begäran om komplettering framför SSM att vattenförande sprickzoner sammanfaller ofta, men nödvändigtvis inte, med tunnelpartier med berg av dåligt kvalitet. De förinjekterade områdena har en icke*

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

försumbar utsträckning längs med deponeringstunnlarna. SSM antar att SKB kommer att undvika deponeringspositioner i förinjekterat berg. Därför påverkar dessa förinjekterade områden nyttjandegraden för deponeringstunnlarna i slutförvaret.

- c) Vågighet hos långa sprickor i berg: I sin begäran om komplettering framför SSM att råheten hos långa sprickor i berg resulterar i att dessa sprickor upptar en viss volym i bergmassan. Inom denna volym förekommer det lokala sprickplanet i borrhålen eller tunnelväggarna. Detta medför att antagandet i EFPC-kriteriet om perfekt plana sprickytor generellt inte gäller för långa sprickor. SKB kvantifierar inte konsekvens för detta i tillämpningen av EFPC-kriteriet i tunnlar.*
- d) Vidd hos sprickor och tjocklek hos sprickzoner: I sin begäran om komplettering framför SSM att avståndet mellan bergväggarna hos en bergspricka kan variera beroende på normalspänningen och skjuvdeformationen som sprickan har undergått. Samma princip gäller för sprickzoner som består av en bergvolym med förhöjd sprickfrekvens. Konsekvensen av det faktum att sprickor samt sprickzoner, utöver att uppta en viss volym på grund av dess råhet, upptar en volym på grund av dess vidd eller tjocklek kvantifieras inte i SKB:s ansökan.*
- e) Förekomsten av sprängskadezonen samt mekaniska skadezonen parallellt med golvet för deponeringstunneln: I sin begäran om komplettering framför SSM att den teoretiska formuleringen av EFPC-kriteriet tar hänsyn till de naturliga sprickorna i bergmassan före schaktning av tunnlar samt deponeringshålerna genom användning av DFN-modellerna. Tillkomna sprickor i samband med sprängskadezonen och mekaniska skadezonen kan därför interferera med tillämpningen av EFPC-kriteriet i tunnlar (se även Technical Note SSM 2012:39) och leda till bortfall av deponeringspositioner jämfört med teoretiskt utfall av kriteriet. SKB kvantifierar inte denna konsekvens i ansökan.*
- f) Förekomsten av diskontinuerliga sprickor med bergbryggor eller förgrenade sprickor: I sin begäran om komplettering framför SSM att tillämpningen av EFPC-kriteriet på diskontinuerliga, förgrenade sprickor eller sprickor med bergbryggor i sprickplanet skulle kunna resultera i att vissa kritiska sprickor/sprickzoner förblir oupptäckta (se även Technical Note SSM 2012:39 och SSM 2012:57). SSM framhåller att inte SKB kvantifierar konsekvensen för detta i ansökan.*
- g) Tillväxt av sprickor inom tidsperspektivet på en miljon år för analysen av den långsiktiga säkerheten i SR-Site: I sin begäran om komplettering framför SSM att EFPC-kriteriet hanterar sprickor som har funnits eller tillkommit i bergmassan i samband med schaktning av deponeringstunnlarna. I flera rapporter (se Backers och Stephansson, 2011, samt Technical Note SSM 2012:39, SSM 2012:52 och SSM 2012:57) har det påpekats att EFPC-kriteriet inte tar hänsyn till spricktillväxt i samband med lastfall i framtida scenarier som är betraktade i analysen av den långsiktiga säkerheten i SR-Site. Spricktillväxten kan i vissa fall länka ihop närliggande sprickor som på så sett uppnår den kritiska storleken; i andra fall kan spricktillväxten leda till att kritiska sprickor/sprickzoner som inte nådde deponeringshålerna gör det efter att de har vuxit till.*

SKB:s bemötande:

SKB gör bedömningen att SSM:s begäran om komplettering för denna punkt kan hanteras genom att förtydligande information lämnas avseende de uppgifter som sedan tidigare redovisats i ansökan eller dess underlag, enligt följande.

Bakgrund

SKB identifierade tidigt (Fälth och Hökmark 2006, Fälth et al. 2007) stora sprickor som skär kapselpositioner som en fråga som kan påverka långsiktig säkerhet. Detta för att stora sprickor skulle kunna hysa skjuvrörelser som är tillräckligt stora för att kunna skada kapseln.

Det är mycket svårt att bestämma den absoluta storleken på sprickor, särskilt under jord. Det finns emellertid samband (Cosgrove et al. 2006) mellan storleken på sprickor och andra egenskaper såsom apertur, vittring, kinematiska indikatorer, vattenföring med mera, vilka kan utnyttjas för att indirekt bestämma en sprickas (relativa) storlek. Ju större sprickan är, desto tydligare är sambanden. För sprickor med ekvivalent radie överstigande 250 m har SKB gjort bedömningen att de kan identifieras otvetydigt under jord. Problemet har därmed av SKB avgränsats till sprickor med en storlek understigande en ekvivalent radie av 250 m.

För en säkerhetsanalys är det väsentligt att kvantifiera mängden kritiskt belägna kapslar och inför säkerhetsanalysen SR-Can, togs FPI-kriterierna (FPC och EFPC) fram som ett robust och konservativt tillfälligt kriterium ("proxy") för att simulera vad konsekvensen blir om detaljundersökningarna, trots befintliga geofysiska och strukturgeologiska tekniker, inte lyckas hitta alla kritiska strukturer som skär kapselpositioner.

Avsikten med framtagandet av FPI-kriterierna var således inte primärt att beräkna nyttjandegrad eller att nyttjas som enda sovringskriterium för deponeringshål under jord. SKB har tvärtom utgått ifrån att detaljundersökningsprogrammet (SKB 2010c) kommer att ta fram metoder som bas för rutiner för acceptans av deponeringshål som bygger på beprövade geofysiska-, hydrogeologiska- och strukturgeologiska karteringsmetoder. Däremot visade SKB att nyttjandegraden var acceptabel, trots den konservatism som finns inbyggd i FPI-kriterierna, vilket motiverade användandet av FPI-kriterierna för säkerhetsanalyserna SR-Can och SR-Site. Det är dock troligt att FPI-kriterierna i någon form kommer att komplettera övriga metoder som planeras inom detaljundersökningsprogrammet för att identifiera potentiellt kritiska strukturer, se också vårt svar på fråga 5 i SSM:s begäran.

Det är omöjligt att från början ange alla detaljerade konstruktionsförutsättningar på en viss produkt eller process, utan framtagande av krav, teknikutveckling och säkerhetsanalys måste ske iterativt. Enligt de gällande konstruktionsförutsättningar, som i ansökan redovisas i berglinjerapporten (SKB 2010a, tabell 2-1) anges att deponeringshål ska, så långt som rimligen är möjligt, väljas så att de inte utsätts för kraftigare skjuvning än vad kapseln kan motstå. För att uppnå detta ska EFPC tillämpas vid valet av deponeringspositioner.

Eftersom SKB förväntar sig att EFPC kan komma att ersättas eller kompletteras med andra kriterier vill SKB även lämna följande kompletterande information: En omfattande revidering av gällande konstruktionsförutsättningar genomförs nu baserat på erfarenheter från arbetet med produktionsrapporterna och de säkerhetsanalyser som gjordes i ansökan. För att kunna tillvarata de resultat som förväntas från bland annat utvecklingen av detaljundersökningsprogrammet kommer även konstruktionsförutsättningarna avseende mekanisk skydd av kapseln att revideras på ett sådant sätt att det framgår att EFPC är ett verktyg för att identifiera sprickor med potential för förskjutningar som kan leda till

skjuvbrott på kapseln, men att det kan ersättas eller kompletteras med andra verktyg. De reviderade konstruktionsförutsättningarna kommer att redovisas till SSM senast i samband med att SKB lämnar in den preliminära säkerhetsredovisning (PSAR) som ska godkännas innan byggstart.

a) Förekomsten av deponeringspositioner i dåligt berg som kan behöva förkastas

Den relativt sett lägsta bergkvaliteten ur bergbyggnadssynpunkt förväntas i deformationszoner. Platsundersökningarnas bedömning avseende främst de mindre deformationszonerna är att de utgör partier med svag vittring, ibland hematitomvandling och något förhöjd sprickfrekvens – jämfört med den i övrigt tämligen massiva bergmassan. Deformationszonernas utbredning har modellerats baserat på både geologiska och geofysiska data, där geofysiska data påvisar omvandling som inte alltid är synlig för blotta ögat, annat än som en svag rödfärgning (oxidering). Bergkvaliteten ur bergbyggnadssynpunkt är därför hög i större delen av de mindre deformationszoner som skär planerade deponeringstunnlar. Ett exempel på detta uttryckt i jämförelse mellan klassificeringssystem finns i figur 6-1 i Bäckström och Lanaro (2007). Det förhållande att bergkvaliteten är god inom delar av de modellerade bergvolymerna som avser mindre deformationszoner har dock inte alls utnyttjats i bedömning av nyttjandegrad. För att uppfylla kravet att undvika skjuvning av kapseln har inga deponeringspositioner placerats i dessa mindre deformationszoner (se bl a SKB 2009b).

Egenskaperna hos varje deformationszon i termer av vittring och sprickfrekvens kommer att karaktäriseras med metoder som beskrivs översiktligt i ramprogram för detaljundersökningar (SKB 2010c) och som ska vidareutvecklas inför driftstart. Deformationszonens utbredning, mekaniska och hydrauliska egenskaper samt de byggnadstekniska åtgärder som utförts avseende injektering (se svar på 1b nedan) och bergförstärkning kommer att vara avgörande för beslut om huruvida någon del av dessa mindre deformationszoner, så som de modellerats baserat på platsundersökningarna, kommer att vara lämpliga deponeringspositioner.

Om bergförhållandena där ett deponeringshål borrats är sådana att de geometriska kraven på deponeringshål inte kan uppfyllas kommer hålet att förkastas. Risken för detta bedömdes i R-08-116 (SKB 2009b, avsnitt 8.4) som låg, baserat på bedömda berg- och spänningsförhållanden.

b) Förekomsten av vattenförande sprickzoner som kräver förinjektering längs en viss sträcka i deponeringstunneln

Som framgår av de i ansökan redovisade konstruktionsförutsättningarna (SKB 2009a) finns det där inget direkt krav på att deponeringshål inte får förekomma inom injekterade bergvolymerna så länge injekteringen utförts med s k ”låg-pH” injekteringsbruk, dvs injekteringsmaterial som håller $\text{pH} < 11$. Däremot är det, som diskuteras i SR-Site avsnitt 15.5.13, lämpligt att undvika positioner med tänkbart höga framtida Darcyflöden. I samma avsnitt i SR-Site konstateras därför också ”... att deponeringshål som skärs av sprickor som uppvisar synlig mängd injekteringsmaterial (bör) uteslutas, eftersom förekomsten av injekteringsmaterial tyder på att sprickan var relativt vattenförande före injekteringen.”

Att identifiera sprickor i deponeringshål med synligt injekteringsmaterial blir en av flera metoder i kommande urvalskriterier för att välja och godkänna deponeringshål, men påverkar inte nuvarande prognoser av nyttjandegrad. De prognoser för bortfall av

deponeringshål på grund av hydrauliska förhållanden som gjorts i SR-Site baseras på att EFPC används, se SR-Site avsnitt 5.2.2, och utnyttjar därmed indirekt att det finns en korrelation mellan sprickstorlek och transmissivitet. Dessutom antas att små deformationszoner, med en radie större än 250 m och med en effektiv transmissivitet större än 10^{-6} m²/s kommer att upptäckas under detaljundersökningarna så att deponeringspositioner som skärs av sådana strukturer kan undvikas. Vid framtagandet av layouten för deponeringsområdet tilläts inga deponeringshål korsade de kända deterministiska deformationszonerna, oavsett storlek eller transmissivitet. Det resulterande beräknade bortfallet av deponeringspositioner och därmed prognosen av nyttjandegrad blir därmed oberoende av om injektering har utförts eller ej.

Som ett underlag för projekteringen av slutförvaret har dessutom en prognos gjorts av injekteringsbehovet i slutförvarsanläggningen (se SKB 2009b, avsnitt 7.2.1). Där bedöms att injektering i deponeringstunnlarna kan utföras som selektiv förinjektering där diskreta vattenförande sprickor påträffas baserat på undersökningar med pilot- och sonderingshål. Möjliga deformationszoners läge och egenskaper identifieras med pilothål (kärnbörning). Baserat på sonderingsbörning tas beslut om injektering. Injekterings-skärmarnas längd anpassas efter lokala förhållanden för att minimera injekterade sträckor. På djup större än ungefär 400 m är den observerade frekvensen av vattenförande sprickor och deformationszoner mycket låg. I deponeringstunnlarna kommer i genomsnitt mindre än 2 procent av bergmassan mellan deformationszonerna att kräva injektering med en antagen skärmlängd av 20 m. Förlusten av deponeringspositioner på grund av injektering är med andra ord liten.

Sammanfattningsvis kan konstateras att de prognoser som gjorts av nyttjandegraden redan indirekt tar hänsyn till att deponeringshål som korsas av injekterade sprickor bör undvikas, eftersom gjorda prognoser baseras på frekvens och vattengenomsläpplighet hos sprickor och deformationszoner i oinjekterat berg (se svar 1a ovan). Dessutom är den observerade frekvensen av vattenförande sprickor och deformationszoner mycket låg på djup större än cirka 400 m varför injekteringsbehovet blir litet. Injekteringen bedöms därför ha liten inverkan på nyttjandegraden.

c) Vågighet hos långa sprickor i berg

Perfekt plana ytor är en nödvändig idealisering för modelleringsändamål. FPI-kriterierna, som ju togs fram som proxy för stora sprickor, gäller oavsett om sprickorna är plana eller undulerande. Naturligtvis försvåras identifieringen av kritiska sprickor om de är geologiskt och geofysisk helt anonyma, vilket SKB inte anser vara realistiskt. Har sprickorna emellertid någon form av geologisk eller geofysisk signatur, vilket SKB anser vara normalfallet (Cosgrove et al. 2006), är det möjligt att spåra en specifik spricka över flera deponeringshål oavsett undulation (dvs vågighet eller råhet). Notera att avvikelser från det ideala planet är fördelaktigt för långsiktig säkerhet på så sätt att de inducerade skjuvrörelserna blir mindre (se svar till "f" nedan).

I tillämpningen har (implicit) vidare antagits att undulationens amplitud är en funktion av avståndet över vilket undulationen gäller (t ex Brown och Scholz 1985, Wang et al. 1988, Kumar och Böövarsson 1990). För FPI-kriterierna är det relevanta avståndet i storleksordningen 15 – 25 m. Över så korta avstånd anser SKB att undulationen är negligerbar och idealiseringen i form av en perfekt plan yta är försvarbar.

d) Vidd hos sprickor och tjocklek hos sprickzoner

Se även svar till "c" ovan.

FPI-kriterierna är tillämpbara endast för strukturer understigande en ekvivalent radie av 250 m. Större strukturer bedöms av SKB kunna detekteras utan FPI-kriterier. Deformationszoner modelleras deterministiskt och är definitionsmässigt otillåtna i deponeringshål.

Idealiseringen av sprickor utan tjocklek var nödvändig för att reducera kodutvecklings- och simuleringstider. Tjockleken/vidden på strukturer relevanta för FPI, dvs. strukturer mindre än 250 m ekvivalent radie, är mycket liten i relation till arean och bedöms maximalt uppgå till storleksordningen någon decimeter. SKB har gjort bedömningen att förändringen blir försumbar med de empiriska samband mellan tjocklek/area/längd som ges av litteraturen (t ex Vermilye och Scholz 1995, 1998).

e) Förekomsten av sprängskadezonen samt mekaniska skadezonen parallellt med golvet för deponeringstunneln

Enligt i ansökan redovisade konstruktionsförutsättningar ska deponeringshål så långt möjligt placeras så att de inte skärs av sprickor med potential för skjuvrörelser som kan leda till skjuvbrott på kapseln. För att uppnå detta ska EFPC tillämpas vid valet av deponeringspositioner.

Förutsättningarna för uppkomst av en sprängskadezon, liksom hur existerande sprickor kan reaktiveras vid bergguttar redovisas i SR-Site (SKB 2011, avsnitt 10.2.3). Om det alls initieras sprickor i samband med sprängning eller som följd av den mekaniska avlastningen vid bergguttaget, sker detta närmast tunnelkonturen och sådana sprickor är i regel riktade ut radiellt ifrån tunneln. Befintliga sprickor parallella med tunnelgolvet kan dock öppnas och bli mer vattenledande på grund av spänningsavlastningen som uppstår efter bergguttaget, men detta påverkar inte tillämpningen av EFPC. SKB bedömer det vidare som osannolikt att de nya, små sprickor som bildas skulle sammanfalla med och påverka utbredningen av ett sprickplan som korsar tunnelns omkrets och som inte samtidigt är så omfattande att den redan korsar deponeringshålet. Om ett sådant fall skulle uppstå är det rimligen ändå rätt att inte acceptera det aktuella deponeringshålet. Om sprickor bildas parallellt med tunnelkonturen skulle de visserligen kunna korsa fler än ett deponeringshål, men i en position högt över den deponerade kapseln och är därmed inte av betydelse för eventuella skjuvbrott på kapseln. Förekomst av sprickor som inducerats på grund av sprängskador eller som följd av den mekaniska avlastningen vid bergguttaget påverkar därmed inte risken för skjuvningar som skulle kunna leda till skjuvbrott på kapseln och ej heller prognoser av nyttjandegraden.

I ansökan, och i SR-Site används dock även EFPC som ett indirekt kriterium för att hitta deponeringshål med potentiellt höga framtida Darcyflöden. Det är möjligen denna aspekt som lett SSM:s konsulter till att på sidan 41 i Technical Note SSM 2012:39 göra följande rekommendation: *"A discussion would be beneficial regarding whether a connected EDZ, in the event one develops along the walls of a Deposition Hole or in the floor of a Deposition Tunnel, should be treated as a fracture in the same way other large fractures are considered in the EFPC? The treatment of interconnected fractures that intersect and*

connect the respective (potential) EDZs of the Deposition Hole and tunnel are not discussed in the EFPC.”

Ett sådant tillägg till konstruktionsförutsättningarna torde dock vara överflödigt eftersom detta täcks in av den redan gällande konstruktionsförutsättningen att sprängskador ska begränsas och inte leda till en sammanhängande effektiv transmissivitet, utefter en betydande del (minst 20–30 m) av deponeringstunneln och beräknat som ett medelvärde över tunnelsulan, som är högre än 10^{-8} m²/s. I SR-Site avsnitt 15.5.16 konstateras att ”*de variationsfall som analyserats i SR-Site bekräftar att den föreslagna övre gränsen på 10^{-8} m²/s för konnekterad transmissivitet i skadade zoner är lämplig och inte behöver sänkas. En konnekterad transmissivitet i skadade zoner som överstiger detta värde börjar dock påverka risken och behöver undvikas*”. Förekomst av en konnekterad transmissiv zon över en sträcka längre än cirka 20-30 m innebär med andra ord redan med gällande krav att denna sträcka inte får användas för deponeringshål, oavsett om de dessutom uppfyller EFPC eller inte.

Som redan framförts ovan i inledningen till bemötandet genomförs dessutom en revidering av gällande konstruktionsförutsättningar. Vad gäller hydrauliska förhållanden är utgångspunkten det förslag som presenteras i SR-Site avsnitt 15.5.13, där kraven mer direkt kopplas till att undvika deponeringshål med potential för framtida höga Darcyflöden och därmed inte i huvudsak utnyttjar indirekta samband baserat på uppskattade sprickstorlekar. De reviderade konstruktionsförutsättningarna kommer att redovisas till SSM senast i samband med att SKB lämnar in den preliminära säkerhetsredovisning som ska godkännas innan byggstart.

f) Förekomsten av diskontinuerliga sprickor med bergbryggor eller förgrenade sprickor

Ett övergripande svar på denna frågeställning ges i inledningen av vårt bemötande. Som framgår av FPI-rapporten (Munier 2010, tabell 7-3) och SR-Sites huvudrapport (SKB 2011, figur 10-123) utgörs merparten av kritiska kapselpositioner av skärningar med sprickor större än 150 m ekvivalent radie, dvs mycket stora sprickor eller smärre sprickzoner. SKB anser det sannolikt, med hänvisning till bland annat Cosgrove et al. (2006), att de flesta, om inte samtliga, verkligt kritiska sprickor kan identifieras under detaljundersökningsskedet.

Vidare, om en stor spricka undgår upptäckt på grund av geometriska komplikationer som förgreningar och bergbryggor i sprickplanet, så minskar sannolikheten att den mekaniskt skall uppträda som en perfekt plan spricka vid seismiska och aseismiska laster, vilket ju är en av förutsättningarna för kritisk-radie-relationerna.

En spricka med 150 m radie kan med andra ord bara vara kritisk om den är approximativt ”perfekt plan”, approximativt kontinuerlig och därmed identifierbar. En spricka med storlek motsvarande 150 m radie men som egentligen utgörs av två eller flera delsprickor åtskilda av bergbryggor kommer inte att röra sig med mer än bråkdelar av motsvarande för perfekt plan spricka.

Det bör också noteras att den förvarslayout som redovisas i ansökan, med en bruttokapacitet om 7818 tänkbara kapselpositioner relativt enkelt kan expanderas för att klara större bortfall. I R-08-116 (SKB 2009b, figur 4-14) redovisas t ex hur en mindre expansion av deponeringsområdet möjliggör att bruttokapaciteten ökar till cirka 8 500

positioner. Det finns även andra sätt att öka bruttokapaciteten, till exempel genom att minska tunnelavstånden och samtidigt öka kapselavstånden i tunnarna för att upprätthålla kraven på maximalt tillåten temperatur i bufferten. En minskning av tunnelavståndet från 40 m till 30 m skulle innebära en ökning av bruttokapaciteten med ca 12% (Hökmark et al. 2010, figur 6-9). En sådan förändring kräver visserligen mer tunnellängd per kapsel, men minskar ytbehovet. I själva verket kan bruttokapacitetsökningen bli avsevärt större eftersom man inte nödvändigtvis måste öka alla kapselavstånd så mycket som visas i figur 6-9 för att klara temperaturkravet; minskar man tunnelavståndet finns större möjligheter att tillgodogöra sig den optimeringspotential som beror av att bergets medelvärmtransportegenskaper är gynnsammare än de som använts för den termiska dimensioneringen.

SKB har emellertid hittills inte tagit i beaktande sammanlänknings av subkritiska sprickor till kritisk storlek. Denna aspekt diskuteras i svaret till delfråga ”g” nedan.

g) Tillväxt av sprickor inom tidsperspektivet på en miljon år för analysen av den långsiktiga säkerheten i SR-Site

Propagering av sprickor diskuteras i SR-Sites huvudrapport (SKB 2011, s 474). Spricktillväxt som en effekt av reaktivering har undersökts av bland andra Cowie och Scholz (1992). Dessa har föreslagit att varje reaktiveringstillfälle genererar en tillväxt av 0,2-2,5% av sprickan under det försiktiga antagandet att hela sprickytan finns tillgänglig för rörelse. Det finns vidare ett antal studier som visar att skjuvbeloppet avtar mot sprickans kant (Walsh och Watterson 1987, 1989, Marrett och Allmendinger 1990, Dawers et al. 1993, Shipton och Cowie 2003). För att en subkritisk spricka ska växa så mycket att den dels växer in i deponeringshålet och dessutom så långt att deponeringshålet befinner sig där sprickan kan hysa tillräckligt stor skjuvning för att kunna skada kapseln krävs ett mycket större antal reaktiveringar av sprickan än vad som kan motiveras av rimliga deformationshastigheter av jordskopen (dvs väsentligen snabbare än 10^{-10} /år). Fallet med tillväxt av subkritiska sprickor och därpå följande skjuvning överstigande kapselns hållfasthet har av SKB bedömts som ytterst osannolik och därför uteslutits från analyserna.

För det fall kapseln befinner sig nära centrum av en initialt subkritisk spricka finns naturligtvis möjligheten att upprepade reaktiveringar, med tillväxt av sprickytan, skulle medföra att kapseln på sikt är kritiskt positionerad. Detta fall är emellertid redan behandlat i SR-Site (SKB 2010b, avsnitt 4.3.7, SKB 2011, s 479 ff) i termer av upprepade primärskalv. Beräkningarna av kapselskaderisken för två på varandra följande primärskalv baserades på att halvera (kritiska) radier för sprickor som skär kapselpositioner. För att det ackumulerade skjuvbeloppet hos en spricka med halva kritiska radien skall överstiga kapselns hållfasthetskriterium om 5 cm krävs att de två skjuvrörelserna inte bara är maximala till beloppet utan också att de är identiskt riktade. Detta i sig kräver bland annat identiska spänningsförhållanden kring de kritiska målsprickorna, identiska brottpropageringsförlopp, skjuvbelopp, geometrier och magnituder hos de två primärskalven vilket SKB anser vara ytterst osannolikt. SKB anser därför att ansatsen med halverade kritiska radier är överdrivet försiktig och med god marginal täcker in också möjliga effekter av tillväxt av sprickradier. Givet, dessutom, att SKB i analyserna konsekvent använt de sprickmodeller (DFN) som ger de mest ogynnsamma resultaten anser inte SKB det vara befogat att analysera de få, osannolika, fall där den kritiska radien skulle behöva reduceras till mindre än hälften.

För fallet att två subkritiska sprickor skulle länkas samman genom brott av mellanliggande plint, anser SKB det vara ytterst osannolikt att den resulterande sprickan kommer att vara tillräckligt plan och ha tillräcklig utsträckning i alla riktningar för att radie-avstånd-magnitud-sambanden skall gälla också för denna. SKB anser därför inte att någon särskild hantering av detta fall är befogad. Om sammanlänkningen, dvs brottet i plinten, sker i samband med ett skalv hanteras dessutom fallet automatiskt genom ansatsen med halverade kritiska radier, se ovan. De två subsprickorna (eller åtminstone en) kommer nämligen att räknas som kritiska oavsett om de sammanlänkas eller ej.

På ett generellt plan avser SKB att, i enlighet med tillbörlig säkerhetskultur, fortsätta forskningen om processer av betydelse för säkerheten, även om den rådande synen är att befintlig kunskap räcker för att styrka långsiktig säkerhet. En fråga som kommer att behandlas är den om skjuvrörelser hos stora sprickor, speciellt hur olika typer av avvikelser från den perfekt plana geometri som hittills genomgående antagits i SKB:s bergmekaniska analyser, kommer att påverka skjuvbeloppet, t ex vid seismiskt inducerade rörelser. SKB avser också att fortsätta med fördjupade studier av sprickpropagering med särskild hänsyn till osäkerhetsspannet avseende portryck, spänningsvariabilitet och deformationshastighet, bl a för att tydligare klargöra den problematik som har att göra med spänningskoncentrationer och energiförbrukning vid tillväxt och sammanlänkning av stora sprickor. Resultaten av dessa studier kommer att redovisas i samband med kommande säkerhetsredovisningar, som ett led i den stegvisa prövningen av slutförvaret.

2. Kvantifiering av osäkerheter i beräkning av nyttjandegrad för deponeringstunnlarna i Forsmark

I sin begäran om komplettering efterfrågar SSM en kvantitativ redovisning av hur de antagna geologiska spricknätverksmodellerna (DFN) och dess osäkerheter påverkar nyttjandegraden för deponeringstunnlarna i Forsmark och tillhörande osäkerheter.

Frågeställningen förtydligas i avsnittet "Skälen för begäran om komplettering". Där framförs bland annat att SKB uppskattar att nyttjandegrad för deponeringstunnlarna i Forsmark varierar mellan ca 72% och 88%. Kvarstående osäkerheter i de geologiska DFN-modellerna är så pass stora att de kan resultera i ännu större spridning i nyttjandegrad när platsspecifik data från förvarsdjup tillämpas. Faktorerna i punkt 1 påverkar också nyttjandegraden för deponeringstunnlarna. Därför bör osäkerheten för nyttjandegraden redovisas kvantitativt.

SKB:s bemötande:

SKB gör bedömningen att SSM:s begäran om komplettering för denna punkt kan hanteras genom att förtydligande information lämnas avseende de uppgifter som sedan tidigare redovisats i ansökan eller dess underlag, enligt följande.

SKB håller med SSM om att osäkerheterna är stora vad gäller DFN, men anser trots detta att användandet av tre olika konceptuella DFN-modeller väl täcker osäkerhetsspannet som beräknats på basis av känd information. Som redovisats i de av SSM citerade rapporterna beräknades nyttjandegraden på basis av FPI-kriterier med följande försiktiga huvudantaganden:

- i. FPI-kriterierna är den enda befintliga tekniken att identifiera stora sprickor

ii. Endast information från en tunnel i taget är användbar

I praktiken kommer emellertid, enligt SKB:s bedömning, information från flera tunnlar att användas samtidigt som strukturgeologisk och geofysisk kartering kommer att nyttjas för att identifiera om sprickor som korsar en enskild tunnel (dvs skulle innebära att en deponeringsposition faller bort pga FPI) är mindre än kritisk radie och därmed inte behöver beaktas samt identifiera kritiska sprickor som FPI-kriterierna inte kan identifiera. Därmed, vilket också påvisas av Munier (2010, avsnitt 6.6), kan nyttjandegraden avsevärt förbättras samtidigt som antalet förbisedda kritiska kapselpositioner kraftigt kan reduceras, se vidare vårt svar på delfråga 5 nedan. SKB finner inget stöd i platsundersökningsdata för att spricknätverkets beskaffenhet skulle kunna ge väsentligen sämre nyttjandegrad än den, vad gäller nyttjandegrad, sämsta DFN-modell (den s k "TCM-modellen", se Fox et al. 2007 för detaljer) som använts i SR-Site.

3. Kvantifiering av osäkerheter i beräkning av tillförlitligheten hos EFPC-kriteriet för val av deponeringspositioner i Forsmark

I sin begäran om komplettering efterfrågar SSM en kvantitativ redovisning av osäkerheterna för de geologiska karteringarna som erfordras för tillämpning av EFPC-kriteriet och som påverkar dess prestationsförmåga att identifiera kritiska sprickor/sprickzoner i deponeringshålen. Vidare bör SKB redovisa sin uppskattning av osäkerhetsminskning som kommer att resultera från tillämpning av geofysiska metoder för att karaktärisera och kvalitetsbedöma bergmassan i närheten av en föreslagen deponeringsposition.

SKB:s bemötande:

SKB gör bedömningen att SSM:s begäran om komplettering för denna punkt kan hanteras genom att förtydligande information lämnas avseende de uppgifter som sedan tidigare redovisats i ansökan eller dess underlag, enligt följande.

Den s k "prestationsförmågan" av FPI-kriterierna, kallad "effektivitet (efficiency)" i FPI-rapporten (Munier 2010, avsnitten 3.4 och 8.2), som även reflekterar osäkerheterna i DFN-modellerna, är ett mått på hur många positioner skurna av kritiskt stora sprickor som kan identifieras i relation till att ingen kartering eller FPI-tillämpning görs. SKB har visat att osäkerheterna i DFN-modellerna inte på ett avgörande sätt påverkar FPI-kriteriernas förmåga att identifiera kritiskt stora sprickor (Munier 2010, avsnitt 8.2). De kapslar som är belägna i positioner som skärs av kritiskt stora sprickor och som FPI-kriterierna emellertid inte lyckas identifiera, betraktas som "kritiska positioner" i säkerhetsanalysen, med innebörden att kapslarna skulle kunna skadas, om skjuvning sker längs dessa sprickor. Osäkerheten i beräkningen av antalet kritiska positioner i tabellerna 10-17 och 10-18 i SR-Sites huvudrapport (SKB 2011) reflekterar variabiliteten i respektive DFN-modell och den totala osäkerheten på grund av konceptuell osäkerhet vad gäller spricknätverken.

Osäkerheten inom varje DFN-modell skulle kunna propageras så att min-max värden på antalet kritiska kapslar ges med ett spann, men det har varit SKB:s bedömning att variabiliteten inom respektive DFN-modell är avsevärt mindre än variabiliteten mellan DFN-modeller och propagering av samtliga DFN-specifika osäkerheter till tabellerna 10-17 och 10-18 har därför inte ansetts motiverad.

Som SKB även argumenterar i svar till fråga 1 ovan, är SKB:s avsikt att FPI-kriterierna endast ska vara ett av flera stöd i identifiering av kritiskt stora sprickor. Arbetet med att ta fram detaljundersökningsprogrammet pågår, se svaret under punkt 5. Det är vidare tveksamt om en kvantifiering av karteringseffektiviteten ens är görlig då det skulle innebära att på något hittills okänt sätt ha kännedom om det verkliga antalet kritiska sprickor i relation till karterade, eller med DFN-modeller prognostiserade sprickor i tunnlarna.

Se även svar till frågorna 1 och 2.

4. Konstruktionsförutsättningar för acceptans/förkastningskriterier för val av deponeringspositioner

I sin begäran om komplettering efterfrågar SSM kompletterande uppgifter/motivering gällande eventuellt behov av följande konstruktionsförutsättningar: a. Minimivärden för bergmassans kvalitet där deponeringspositioner kan tillåtas b. Kriterier för tillåtet vatteninflöde i deponeringshål c. Respektavstånd från förinjekterade områden i deponeringstunnlar. d. Respektavstånd från långa sprickor som korsar deponeringstunnel samt deponeringshål, e. Respektavstånd från korta sprickor som korsar deponeringshålet i anslutning till toppen och botten av kapseln f. Förekomsten av gångbergarter eller andra mindre förekommande bergarter med avvikande mekaniska eller termiska egenskaper.

Frågeställningarna förtydligas i avsnittet ” Skälen för begäran om komplettering”. Där framförs bland annat att SSM redan i granskning av Fud-programmet 2010 påpekade att det är viktigt att SKB kan visa att alla krav på slutförvaret ska kunna omsättas och uppfyllas i praktiken (SSM 2011:10). SSM anser att SKB därvid bör eftersträva att de teoretiska krav som den långsiktiga säkerheten ställer på slutförvaret omsätts till praktiska parametrar som går att mätas under uppförande och drift av slutförvaret. Kompletterande uppgifter eller motivering efterfrågas för eventuella tillkommande konstruktionsförutsättningar.

- a) Minimivärden för bergmassans kvalitet där deponeringspositioner kan tillåtas: I sin begäran om komplettering framför SSM att i de fall där SKB bedömer att deponeringspositioner bör förkastas p.g.a. att bergmassan är av dålig kvalitet ur byggbarhetssynpunkt bör kvantitativa kriterier fastställas som t.ex. erhållna minimivärden från bergmassans klassificeringssystem (Q och/eller RMR) i målområdet för slutförvaret i Forsmark. SKB bör även specificera om dessa krav gäller även med hänsyn till den långsiktiga säkerheten av slutförvaret.*
- b) Kriterier för tillåtet vatteninflöde i deponeringshål: I sin begäran om komplettering framför SSM att det är otydligt hur SKB planerar att praktiskt verifiera konstruktionsförutsättningen för vatteninflöde i deponeringshålet (se även Technical Note SSM 2012:41). SSM menar också att information som lämnas i bilaga 1 i ramprogrammet för detaljundersökningar strider mot innehållet i SR-Site och i berglinjerapporten. SSM framför även att SSM framför även att det är otydligt hur EFPC-kriteriet tar hänsyn till sprickor som kan leda till inflöde i deponeringshålen (se även Technical Note SSM 2012:39).*
- c) Respektavstånd från förinjekterade områden i deponeringstunnlar: I sin begäran om komplettering ställer SSM frågan om SKB bör införa ett respektavstånd från förinjekterade områden. I ett affirmativt fall bör SKB även motivera valet ur ett*

långsiktigt säkerhetsperspektiv för slutförvaret. Huruvida detta respektavstånd behövs eller inte kommer det också att påverka nyttjandegraden för deponeringstunnlarna.

- d) Respektavstånd från långa sprickor som korsar deponeringstunnel samt deponeringshål: I sin begäran om komplettering framför SSM att SKB bör redovisa om respektavstånd från flacka sprickor/sprickzoner som leder till att deponeringspositioner måste förkastas bör införas.*
- e) Respektavstånd från korta sprickor som korsar deponeringshålet i anslutning till toppen och botten av kapseln: I sin begäran om komplettering ställer SSM frågan om korta sprickor, d.v.s. icke-kritiska sprickstorleka, som faller inom dessa områden bör undvikas och inom vilket respektavstånd från kapselns topp och botten.*
- f) Förekomsten av gångbergarter eller andra mindre förekommande bergarter med avvikande mekaniska eller termiska egenskaper: I sin begäran om komplettering efterfrågar SSM en redovisning av behov av kompletterande konstruktionsförutsättningar som innefattar t.ex. maximalt tillåtna förekomsten i volym av bergarter som amfibolit, tonalit, diorit- och pegmatitgångar, omvandlad metagranit (episyenit).*

SKB:s bemötande:

SKB gör bedömningen att SSM:s begäran om komplettering för denna punkt i huvudsak kan hanteras genom att förtydligande information lämnas avseende de uppgifter som sedan tidigare redovisats i ansökan eller dess underlag. I vissa fall redovisas även kompletterande information för att ytterligare förstärka det underlag och de slutsatser som redovisas i ansökan. För de fall kompletterande information lämnas, tydliggörs detta speciellt i svaret nedan.

a) Minimivärden för bergmassans kvalitet där deponeringspositioner kan tillåtas

Som framgår av svaret på fråga 1a görs bedömningen att redan gällande krav avseende acceptans av deponeringshål är mer direkt anpassade till de frågeställningar som påverkar slutförvarets säkerhet än vad som kan erhållas från de generella klassificeringssystemen av typ Q eller RMR.

b) Kriterier för tillåtet vatteninflöde i deponeringshål

Enligt gällande konstruktionsförutsättningar, som i ansökan redovisas i berglinjerapporten (SKB 2010a, tabell 2-1), gäller följande hydrologiska krav på deponeringshål.

- Den totala vattenvolymen som strömmar in i ett deponeringshål, för tiden från det att bufferten exponeras för inströmmande vatten till mättnad, ska begränsas för att säkerställa att högst 100 kg av det initialt deponerade buffertmaterialet går förlorat på grund av kanalbildning/erosion. Detta betyder, enligt nuvarande kunskap, att den totala vattenvolymen som strömmar in i ett godkänt deponeringshål måste vara mindre än 150 m³.
- Sprickor som skär deponeringshålen ska ha tillräckligt låg konnekterad transmissivitet. (Ett specifikt värde anges inte, men det antas att kravet uppfylls om kravet på inflöde uppfylls).

Dessa krav återges i princip ordagrant i SR-Site (SKB 2011). I konstruktionsförutsättningarna kvantifieras med andra ord inte något annat krav på högsta acceptabla inflöde än det indirekta krav som kopplar till den största accepterade inflödande totala vattenvolymen.

SKB håller med om, vilket även konstateras av SSM:s konsulter i SSM 2012:41 att det inte är helt uppenbart hur kravet på ett maximalt totalt inflöde ska verifieras. I berglinjerapporten (SKB 2010a) står det också i avsnitt 5.3.3 att ”SKB will develop a reference method for the selection of deposition hole positions with acceptable inflows. There are several parameters and associated criteria that have potential for predicting and verifying the performance of such a reference method. For example geo-hydrological characterisation can be carried out and inflows can be measured both in the pilot hole that will be drilled in the planned deposition hole position, and in the deposition hole after excavation”. I SR-Site avsnitt 15.5.13 noteras att ”Ytterligare utveckling behövs för att ta fram en mer praktisk konstruktionsregel än en begränsning av den totala vattenmängden som kan komma in i ett deponeringshål från den tidpunkt då bufferten exponeras för inströmmande vatten fram till mättnad. En betydelsefull faktor i detta sammanhang rör de praktiska möjligheterna att begränsa flödet genom pluggen i deponeringstunneln innan återfyllningen mättats”. Arbete med att utveckla en sådan verifieringsmetod pågår och kommer att redovisas senast i samband med att SKB lämnar in PSAR till SSM för granskning och godkännande inför uppförandet av Kärnbränsleförvaret.

En bedömning har dock gjorts att det, speciellt i Forsmark, i praktiken inte borde vara svårt att identifiera de tänkbara deponeringshål där det skulle kunna finnas risk för en alltför omfattande erosion. En stor andel deponeringspositioner i Forsmark kan förväntas sakna detekterbart inflöde och där inflöden förekommer i deponeringsområdet kommer detta företrädesvis att ske in till deponeringstunnlarna. I bilaga 1 i ramprogrammet för detaljundersökningar (SKB 2010c) anges att konstruktionsförutsättningen avseende totala vattenvolymen bedöms vara uppfylld om inflödet till deponeringshålet understiger ca 0,1 l/min. Detta strider knappast mot de angivna kraven på högsta accepterade inflöden i deponeringstunnlar, men grunden för denna bedömning redovisas inte, varför SKB härmed lämnar följande kompletterande information.

Den avgörande frågan är hur länge ett inflöde som orsakar kanalbildning/erosion kan förväntas fortgå. Senast när hela deponeringstunneln blivit vattenfylld kommer inflödet till de enskilda deponeringshålen att upphöra. Enligt tabell 5-21 i SR-Site är den kvarvarande luftvolymen i deponeringstunnlarna, när återfyllningen precis har installerats, mellan 4 och 5,7 m³ per m tunnelsträcka. För en tunnel om längst 300 m, motsvarar detta en totalvolym mellan ca 1200 – 1700 m³. För att den totalt inflödade volymen vatten i ett enskilt deponeringshål ska överstiga 150 m³, under antagande om att tunnelpluggningen är tät, krävs därför att mer än cirka 10% av allt inflöde i tunneln kommer från det enskilda deponeringshålet. Så länge det totala inflödet till en hel deponeringstunnel är väsentligt större än 1 l/min är det bara deponeringshål med inflöde större än 0,1 l/min som kan få en totalt inflödande vattenvolym större än 150 m³. Tar man hänsyn till att tunnelpluggen inte kan göras helt tät blir det acceptabla vatteninflödet i deponeringshålen något lägre. Detsamma gäller om totalinflödet till deponeringstunneln är lägre. Grunden för att i detta enkla exempel utgå från ett största acceptabelt inflöde om 0,1 l/min är att ett sådant inflöde enkelt kan mätas, men mätmetoder för att detektera väsentligt lägre inflöden i deponeringshål finns också tillgängliga. Dessutom bedöms själva installation av bufferten

bli alltför komplicerad vid högre inflöden än 0,1 l/min, varför detta värde ändå bör betraktas som en övre gräns för acceptabla inflöden.

Den nuvarande regeln om max 150 m³ blir mer komplicerad att tillämpa för fallen när inflödena är så låga både till tunnlar och tänkbara deponeringshål att de blir svåra att mäta. SKB har därför ett pågående utvecklingsprojekt för att ytterligare studera kanalbildning/erosion. En målsättning med detta projekt är att kunna ange ett lägsta inflöde för vilket regeln om totalt inflödad volym behöver tillämpas. Resultat från detta kan dock tidigast förväntas under 2013.

Hur EFPC-kriteriet tar hänsyn till sprickor som kan leda till inflöde i deponeringshålen framgår av diskussion i SR-Site avsnitt 15.4.15. Stora sprickor har betydligt större sannolikhet att vara förbundna (konnekterade) med andra sprickor. Dessutom finns en korrelation mellan sprickstorlek och transmissivitet, även om den är osäker. På grund av dessa statistiska korrelationer, vars effekt kvantifieras i konsekvensberäkningarna i SR-Site, minskar antalet deponeringshål med högt Darcyflöde betydligt då EFPC tillämpas. Denna observation understryker det faktum att det inte är EFPC i sig som är viktigt för att undvika höga flöden, utan i stället att identifiera en observerbar egenskap med vars hjälp det går att hitta potentiella flödessprickor.

Som redan påpekats i svaret på fråga 1 genomför SKB en omfattande revidering av gällande konstruktionsförutsättningar. Avseende hydrauliska förhållanden är utgångspunkten det förslag som presenteras i SR-Site avsnitt 15.5.13, där kraven mer direkt kopplas till att undvika deponeringshål med potential för framtida höga Darcyflöden och därmed inte i huvudsak utnyttjar indirekta samband baserat på uppskattade sprickstorlekar. Bland annat utreds möjligheten att ersätta eller åtminstone komplettera nuvarande krav med krav baserade på resultat från hydrauliska tester i pilothål för deponeringshål. De reviderade konstruktionsförutsättningarna planeras gälla som underlag för den preliminära säkerhetsredovisning som SKB måste lämna in och få godkänd innan byggstart och kommer att redovisas till SSM senast i samband med att PSAR lämnas in till granskning.

c) Respektavstånd från förinjekterade områden i deponeringstunnlar

I svaret till fråga 1b har redan konstaterats att det inte finns något direkt krav på att deponeringshål inte får förekomma inom injekterade bergvolymen så länge injekteringen utförts med s k ”låg-pH” injekteringsbruk, dvs injekteringsmaterial som håller pH < 11, men att ett skäl att inte acceptera deponeringshål som uppvisar synlig mängd injekteringsmaterial bör uteslutas, eftersom förekomsten av injekteringsmaterial tyder på att sprickan var relativt vattenförande före injekteringen.

I SR-Site används inget respektavstånd till de vattenförande sprickor som förekommer utanför de deterministisk kända deformationszonerna. Detta motiveras av att det väsentligen enbart är Darcyflödet i sprickor som korsar deponeringshål som påverkar risken. Som noteras i SR-Site avsnitt 15.5.14 talar analyserna i SR-Site dessutom för att om det vore möjligt att innan deponering identifiera de få deponeringshål som har de största Darcyflödena under mätade förhållanden, skulle den redan låga risken markant minska utan något betydande bortfall av användbara deponeringspositioner. Svårigheten vid den detaljerade undersökningen blir i stället att hitta dessa positioner. Att av detta skäl

införa ett respektavstånd till injekterade sektioner skulle knappast bidra till ytterligare minskad risk.

Ett annat tänkbart skäl att införa respektavstånd till injekterade sektioner är att dessa skulle kunna innehålla deformationszoner med så höga framtida flöden att en så omfattande erosion av återfyllnadsmaterial uppstår att detta påverkar densiteten hos bufferten i näraliggande deponeringshål. För fallet med förlust av återfyllningsmaterial kan, enligt SR-Site, en maximal förlust av 220 ton i en sektion av en deponeringstunnel tillåtas innan advektiva förhållanden måste beaktas i deponeringshålet i denna sektion. Som konstaterats i SR-Site avsnitt 10.3.11 kan advektiva förhållanden inte uteslutas i några enstaka deponeringshål som ligger närmast den spricka som skär tunneln, men bidraget från förlust av återfyllning i deponeringstunnlar till den möjliga uppkomsten av advektiva förhållanden i deponeringshål betraktas som försumbart. För ett fåtal lägen där tunneln skärs av en mycket transmissiv deformationszon kan eventuellt mer än 220 ton förloras. Eftersom dessa lägen uteslutits som möjliga deponeringspositioner gjordes i SR-Site bedömningen att detta inte är relevant för kapselns integritet. I SR-Site gjordes dock ingen bedömning om hur lång utbredning dessa förluster skulle kunna få, eller om de skulle kunna påverka densiteten hos bufferten för de deponeringshål som låg närmast de lägen där förlust av återfyllnadsmaterial uppstått.

För att ytterligare underbygga svaret på denna delfråga lämnas dessutom följande kompletterande information: De fåtal lägen där det framtida flödet skulle kunna bli så stort att det skulle finnas risk för en så betydande erosion av återfyllningsmaterial att mer än den allra närmaste omgivningen påverkas bör vara lätta att identifiera. Det gäller både sektioner med höga inflöden och sektioner där omfattande injektering behövts. Inom dessa sektioner är det uppenbarligen inte lämpligt eller ens möjligt att installera återfyllningen och sektionerna behöver därmed avskiljas från övriga delar av deponeringstunneln. Detta sker lämpligen med någon form av plugglösning, som utformas för att säkerställa att erosion av återfyllningsmaterial utanför pluggen begränsas. Åtminstone en konceptuell utformning av en sådan plugg, tillsammans med en prognos över hur stor andel av all tillgänglig deponeringstunnellängd som skulle behöva upptas av dessa avgränsade sektioner, kommer att redovisas senast i samband med att SKB lämnar in PSAR till SSM för granskning och godkännande inför uppförandet av Kärnbränsleförvaret.

d) Respektavstånd från långa sprickor som korsar deponeringstunnel samt deponeringshål

SKB har beräknat respektavstånd till samtliga strukturer som bedömts kunna hysa skalv av magnitud 5 eller större, oavsett stupning, vilket i praktiken har inneburit zoner med spårlängd överstigande 3 km eller motsvarande area för zoner som inte skär markytan. Det vill säga att även flacka zoner skulle, om de förekom inom förvarsvolymen och vara tillräckligt stora, ha respektavstånd. SKB finner emellertid inget stöd i befintliga platsundersökningsdata för flacka zoner utöver de som redovisas i Stephens et al. (2007). Den flacka deformationszon som ligger närmast förvaret, ”ZFMA2” belägen i förvarsvolymens sydöstra del, har också följdriktigt med sitt respektavstånd påverkat förvarslayouten. Skulle detaljundersökningsprogrammet detektera hittills okända, flacka, och för kritisk seismicitet tillräckligt stora zoner kommer naturligtvis respektavstånd beaktas även för dessa zoner.

Respektavstånd till så kallade kritiska strukturer, främst stora sprickor och små

sprickzoner, har dock av SKB inte bedömts behövt från ett seismiskt perspektiv. Det främsta skälet är att SKB anser det som osannolikt att inducerade skjuvrörelser längs dessa i sammanhanget små strukturer skulle överstiga primärskalvets skjuvbelopp. Följaktligen anser SKB det osannolikt att den dynamiska och statiska last som mikroskalv längs kritiska strukturer utlöser skulle kunna inducera skjuvrörelser på ytterligare andra, kapselskärande sprickor, av sådan art att kapselns integritet hotas eller att den inducerade lasten skulle skada övriga barriärer.

e) Respektavstånd från korta sprickor som korsar deponeringshålet i anslutning till toppen och botten av kapseln

Respektavstånd till enskilda sprickor bedöms inte av SKB vara nödvändigt för långsiktig säkerhet från ett seismiskt perspektiv (se även svar till 4b ovan).

Dimensioneringskraven på insatsen utgår från det mest påkännande skjuvlastfallet: skjuvning på 3/4 höjd, vinkelrätt infall och med 5 cm skjuvamplitud. I de utvidgade skjuvanalyserna som genomförs på SKB, och som bl.a. innehåller analyser av skjuvning nära kapselns lock och botten, visar resultat att skjuvning på 3/4 höjd fortfarande är det mest belastande fallet, på samma sätt som framgår av analyserna som är underlag till designanalysen i ansökan (Raiko et al. 2010). Arbetet med dessa utvidgade skjuvanalyser beräknas bli klart mot slutet av 2013 (SKBdoc 1373301, Svar till SSM på kompletteringsfråga 1 i SSM:s begäran SSM 2011-2426-58). Några tillkommande restriktioner avseende tillåten skjuvamplitud på kapselns ändar finns därför inte.

f) Förekomsten av gångbergarter eller andra mindre förekommande bergarter med avvikande mekaniska eller termiska egenskaper

Förekomsten av gångbergarter med bättre mekaniska eller termiska egenskaper än genomsnittet för dominerande bergartstyper har endast positiv effekt. Lägre hållfasthet finns i främst pegmatit. Mafiska bergarter (främst amfibolit) har signifikant lägre värmeledningsegenskaper än genomsnittet. Enligt Stephens et al. (2007, tabell 4-5) är fördelningen av pegmatit i de två bergdomänerna (RFM029 och RFM045) 13% respektive 14% och fördelningen av mafiska bergarter 4% respektive 7%. Författarna bedömer även tjocklek och orientering av amfibolit, bland annat på basis av borrhålsinformation (Stephens et al. 2007, figur 3-10 samt figur A5-3 i appendix 5). Författarna summerar att de flesta gångarna är mycket smalare än 1 m i bergdomän RFM029, men i RFM045 förekommer amfiboliter med signifikant större tjocklek. Vidare rapporterar författarna att gångbergarterna inom linsen normalt är brantstående och orienterade NV-SO, det vill säga ungefär parallellt med planerade deponeringstunnlar. Orienteringen av gångbergarter är parallell med foliationen.

Back et al. (2007) använde den geologiska beskrivningen för att modellera bergets termiska egenskaper baserat på bergartsfördelningar i de olika bergdomänerna, inklusive gångbergarters eventuella bidrag till anisotropi i värmeledning (se tabell 5-4 för orientering och bedömda bredd/längd/höjdförhållanden av amfibolitgångar). De förenklade amfiboliten till stav-formade kroppar och pegmatiten till skivor med samma längd och höjd. Längden av gångbergarterna har bedömts vara begränsad (några till 10-tal meter), vilket bedöms realistiskt med hänsyn till att gångarna är påverkade av plastisk deformation (veckning, boudinage) och tämligen tunna. Observationer i hållar styrker den bilden.

Både pegmatit och amfibolit avviker så mycket i färg och textur från dominerande bergarter att de är lätta att urskilja i tunnlar. Inom ramen för utveckling av detaljundersökningsprogram utreds möjligheten att identifiera amfibolitgångar utanför tunnlar med hjälp av geofysiska metoder.

Konsekvensen av pegmatitens lägre hållfasthet, jämfört med dominerande bergarter är främst risk för spjälkning i deponeringshål med en pegmatitgång i ogynnsamt läge relativt de högsta spänningskoncentrationerna runt deponeringshålet. Med deponeringstunnlar orienterade nära parallellt med största horisontalspänningen är det således större risk för lokalt spjälkbrott med en pegmatitgång som skär någon av deponeringshålets sidor närmast tunnelväggarna än för en gång mer centralt i tunneln. Främst med hänsyn till den relativt stora spridningen i pegmatitens hållfasthet baserat på provning av borrhärdar, pegmatitgångens tjocklek samt eventuella undulering på grund av plastisk deformation har en bedömning av konsekvensen av en eventuell spjälkning stor osäkerhet. Med hänsyn till den låga andelen pegmatit bedöms dock konsekvensen på nyttjandegrad som liten. Troligen får bedömning göras från fall till fall när pegmatitgångar skär planerade deponeringshålspositioner. Deponeringshål med spjälkning utöver det acceptabla kommer att förkastas för att uppfylla geometrikrav på deponeringshål.

Konsekvensen av amfibolitens lägre värmeledningsförmåga beror mycket på var längs tunneln amfibolitgången förekommer. Dessa gånger bedöms i huvudsak vara sub-parallella med deponeringstunnlar, och brantstående. Värmeavgången begränsas därför främst i riktning ut horisontellt genom en sådan amfibolitgång, men den största värmeavgången sker uppåt. Gångens tjocklek och längdutbredning har betydelse för om temperaturutvecklingen närmast deponeringshålet och i bufferten påverkas negativt eller ej. Hökmark et al. (2009, avsnitt 3.4.3) konstaterar bland annat avseende osäkerhet i temperaturutveckling: *If the rock conductivity is unfortunately distributed along the height of the deposition hole, i.e. with low-conductivity rock systematically concentrated around the top and bottom parts of the canister, ΔT_{tot} will increase. Extreme cases may give about 0.5°C (Appendix A). 0.25°C is judged to be a realistic upper bound estimate of this effect.* Notera dock alla andra osäkerheter som anges i aktuellt avsnitt. Hökmark et al. (2009, avsnitt 5.3.1) redogör för hur den termiska modellen från en plats – inklusive eventuell inverkan av anisotropi från t ex gångbergarter nyttjas i strategin för termisk dimensionering och beräkningsstrategin redovisas i avsnitt 5.4. De tunnel- och kapselhålsavstånd som ges i R-08-16 (SKB 2009b, avsnitt 7.3) har tagits fram med denna strategi, och med platsdata från den termiska modellen (Back et al. 2007). Så långt möjligt har, i detta skede, således även förekomst av ogynnsamt belägna amfibolitgångar tagits i beaktande (se Hökmark et al. 2009, avsnitt 5.2).

SKB bedömer därför sammanfattningsvis att den termiska dimensioneringen är konservativ. Möjligheten till optimering föreslås av Hökmark et al. (2009, avsnitt 7.4).

5. Demonstration av tillämpning av EFPC-kriteriet och övriga acceptans-förkastningskriterier för val av deponeringspositioner

I sin begäran om komplettering bedömer SSM att SKB bör demonstrera den praktiska tillämpbarheten av EFPC-kriteriet och övriga acceptans/förkastningskriterier för val av deponeringspositioner i verklig tunnelmiljö med liknande geologiska förhållande som i Forsmark. Förutom den geologiska karteringen behöver SKB löpande redovisa status för

sina planer för att anskaffa samt resultat från praktiskt tillämpning och utveckling av geofysisk utrustning med vars hjälp man kan karaktärisera och kvalitetsbedöma bergmassan i den omedelbara närheten av en föreslagen deponeringsposition.

Frågeställningarna förtydligas i avsnittet "Skälen för begäran om komplettering". I rapporten SSM 2011:10 anser SSM att metodiken för detektering av kritiska sprickor är viktig och att SKB bör fullfölja planerna som är beskrivna i Fud-program 2010. SSM anser även att det är betydelsefullt att möjligheten till detektering kopplas till konstruktionsförutsättningarna på ett lämpligt sätt och att osäkerheterna analyseras. Förutom den geologiska karteringen behöver SKB löpande redovisa status för sina planer för att anskaffa samt resultat från praktiskt tillämpning av geofysisk utrustning med vars hjälp man kan karaktärisera bergmassan och kvalitetsbedöma den i den omedelbara närheten av en föreslagen deponeringsposition. Därför bedömer SSM att SKB bör demonstrera tillämpbarheten av EFPC-kriteriet samt övriga erforderliga acceptans/förkastningskriterier för val av deponeringspositioner (bl.a. vatteninflöde i deponeringshål, förekomsten av gångbergarter, bergteknisk kvalitet, respektavstånd från sprickzoner eller vågiga sprickor, respektavstånd från vattenförande deformationszoner) i verklig tunnelmiljö med liknande geologiska förhållande som i Forsmark (se även Technical Note SSM 2012:39 och SSM 2012:41).

SKB:s bemötande:

Som komplement till den information som redovisas i "Ramprogram för detaljundersökningar vid uppförande och drift av slutförvar för använt kärnbränsle" (SKB 2010c) lämnas härmed följande information.

SKB vidareutvecklar program, metoder och verktyg för detaljundersökningar i projekt DETUM-1. Projektet omfattar både den teknikutveckling som behövs för undersökningar och modellering under kärnbränsleförvarets uppförande och att utveckla strategier för undersökningar vid val av deponeringspositioner och verifiering av att krav på berget avseende säkerhet efter förslutning uppfylls. Denna senare projektuppgift kommer inte att slutföras inom projekt DETUM-1 utan kommer fortsatt att behandlas inom ett efterföljande projekt (här benämnt "DETUM-2").

Val och acceptans av deponeringsposition kommer att vara det avslutande steget i en beslutsprocess som inkluderar successiva val av lägen för deponeringsområden och enskilda deponeringstunnlar. Vid varje beslutssteg kommer uppfyllelse av givna konstruktionsförutsättningar att prövas genom analys och kontroll mot de successivt uppdaterade modellerna i relevanta skalor. Denna stegvisa process är särskilt viktig för identifiering och kvantifiering av stora sprickor som kopplar till FPI-kriterierna, se vårt bemötande av SSM:s fråga 1a. Den ny- och vidareutveckling som kommer att genomföras i nämnda DETUM-projekt bygger vidare på de strategier som presenterades i "Ramprogram för detaljundersökningar vid uppförande och drift av slutförvar för använt kärnbränsle" (SKB 2010c). Parallellt med denna utveckling håller konstruktionsförutsättningarna på att ses över och specificeras (se vårt inledande svar till fråga 1).

Vid tillämpning av FPC/EFPC som kriterium för identifiering av stora sprickor bedöms uppställda krav kunna verifieras med god säkerhet med stöd av empirisk erfarenhetsgrund.

Att identifiera FPI är en ren karteringsuppgift som kommer att genomföras enligt utarbetad metodik. Den del av kriteriet som avser sprickor som skär minst fem deponeringshål men inte deponeringstunneln är svårare att verifiera med direkta metoder under arbetet med utbyggnad av deponeringstunnlar och deponeringshål. Detta förutsätter en mer utarbetad detaljundersökningsmetodik, i synnerhet som det är en stor fördel om dessa sprickor kan identifieras innan-deponeringshålen borrhats.

Strategin som presenterades i R-10-08 (SKB 2010c) och som kommer att utvecklas vidare i DETUM-projekten inkluderar användning av volymavkännande geofysiska undersökningsmetoder, som radar, seismik och resistivitet samt hydrauliska interferensmetoder i kombination med ordinarie karterings- och borrhålsmetoder, och integrerad modellering (SKB 2010c, se figur 4-8). Genom successiv undersökning och modellering integreras och vidareutvecklas den platsspecifika kunskapen om de stora sprickornas karakteristiska egenskaper. I den stegvisa utbyggnads- och beslutssekvensen inom ett deponeringsområde kommer undersökningarna och modelleringen att leda till högre detaljeringsgrad och ökad determinism. De volymavkännande metodernas förmåga att identifiera och kvantifiera stora sprickor är beroende av aktuella kontraster i materialegenskaper hos berg och grundvatten, och dessutom av de stora sprickornas tjocklek och geometri. Identifieringen är således i hög grad beroende av mätkonfiguration och mätningarnas orientering som i sin tur bestäms av planerad layout (deponeringstunnlarnas orientering). Givet ett deponeringsområdes planerade layout och utbyggnadssekvens kommer mätningarna att kunna genomföras på ett strukturerat sätt i pilothål och tunnlar med i stort sett ortogonala riktningar.

Denna strategi utgör basen för den utveckling som SKB kommer att bedriva i DETUM-projekten. Ett första tillämpat steg som genomförs i DETUM-1 består av utredningar, undersökningar och modellering, med följande inriktning:

- Studie av petrofysiska egenskaper för olika bergmaterial och sprickfyllnader, med fokus på sprickmineralens betydelse för att bedöma detekterbarhet med geofysiska metoder.
- Tillämpning av seismik, radar och resistivitetsmetoder i och mellan tunnlar i den nyligen utbyggda delen av Äspölaboratoriet med utgångspunkt från den integrerade modell som upprättats i samband med utbyggnadsarbetet av den aktuella bergvolymen. För optimalt genomförande ingår modellsimuleringar som en del i testernas planering och undersökningsresultaten analyseras integrerat med den befintliga strukturmodellen. Data från utförda hydrauliska interferenstester utgör ett viktigt underlag i analysen.
- I en efterföljande testkampanj planeras att från en av de ovannämnda undersökta tunnarna borra två parallella kärnborrhål med ett inbördes avstånd som motsvarar avståndet mellan två deponeringstunnlar. I dessa hål (motsvarande pilothål för deponeringstunnlar) genomförs geofysiska mellanhålstester och hydrauliska interferenstester och integrerad modellering (geologi, geofysik hydrogeologi) med fokus på stora sprickor. Beskrivning av osäkerheter utgör en viktig del av arbetet. De två testkampanjerna motsvarar sammantaget en viktig del av den undersökningssekvens som ingår i den tidigare nämnda strategin.
- I en avslutande kampanj planeras ett borrhål för att utvärdera resultatet från genomförda mätningar och modellering i den aktuella bergvolymen. De tre mätkampanjerna förväntas resultera i en förbättrad kunskap om stora sprickor och integrerad metodik för identifiering och karakterisering av dessa.

- Informationsutbyte och samverkan med Posiva avseende resultat från deras undersökningar i ONKALO och studier av krav på berg enligt RSC (Rock Suitability Criteria) utgör en del av detta utvecklingsarbete (McEwen et al. 2012). Detta kan komma att innebära gemensamt genomförande av tester i fält, t ex i ONKALO.

Eftersom DETUM-1 genomförs i Äspölaboratoriet kommer arbetet att fortsätta under ”DETUM-2” i Forsmark med tester och vidareutveckling av metodiken i slutförvarsberget.

Om utvecklingsarbetet slutligen resulterar i en effektiv detaljundersökningsmetodik som möjliggör identifiering av de stora sprickorna i bergvolymen kring deponeringspositioner och bestämning av gränssatt geometrisk utbredning av individuella FPI-strukturer, behöver FPC/EFPC-kriteriet endast tillämpas när bestämningen är osäker. Platsspecifik kunskap om de stora sprickornas förekomst och egenskaper är en grundläggande förutsättning. Konfidensen i identifiering och kvantifiering av stora sprickor bedöms under driftskedets inledning att vara förhållandevis låg, men kommer successivt att öka genom den platsspecifika databas och empiriska kunskap som successivt kommer att växa i takt med att deponeringsområden byggs ut.

Beträffande övriga parametrar relaterade till val av deponeringspositioner kommer detaljundersökningsmetodik för verifiering av direkta eller indirekta krav på berget avseende säkerhet efter förslutning att specificeras under ”DETUM-2”. Kunskap från Äspölaboratoriet exempelvis från undersökningar i samband med injektering (TASS, TASQ, Äspö utbyggnad) och experiment (BRIE, TRUE) utgör underlag för att beskriva effekter av hydraulisk heterogenitet, vilket förväntas vara av betydelse vid de successiva besluten rörande deponeringspositioner.

Baserat på resultaten från utvecklingsarbetet i Äspölaboratoriet och i Forsmark kommer den utvecklade metodiken för val och verifiering av deponeringspositioner att ingå som en del i de integrerade tester av bergutbyggnad och deponering som planeras bli genomförda dels i Äspölaboratoriet, dels inom ramen för samfunktionsprovning i Forsmark.

SKB kommer att i PSAR redovisa hur utvecklingsarbetet framskrider beträffande hur kraven på säkerhet efter förslutning kommer att verifieras med detaljundersökningar. Det ytterligare arbete som kommer att genomföras inom detta område kommer att redovisas i SAR inför ansökan om drifttillstånd.

Med vänlig hälsning

Svensk Kärnbränslehantering AB
Avdelning Kärnbränsleprogrammet

Helene Åhsberg
Projektledare Tillståndsprövning

Referenser

Dokument och referenser i ansökan

Back P-E, Wrafter J, Sundberg J, Rosén L, 2007. Thermal properties. Site descriptive modelling Forsmark – stage 2.2. SKB R-07-47, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Bäckström A, Lanaro F, 2007. Forsmark site investigation. Rock mechanics characterisation of boreholes KFM01B, KFM07C, KFM09A and KFM09B. SKB P-07-115, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Cosgrove J, Stanfors R, Röshoff K, 2006. Geological characteristics of deformation zones and a strategy for their detection in a repository. SKB R-06-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Cowie P A, Scholz C H, 1992. Growth of faults by accumulation of seismic slip. Journal of Geophysical Research 97, 11085–11095.

Dawers N H, Anders M H, Scholz C H, 1993. Growth of normal faults; displacement-length scaling. Geology 21, 1107–1110.

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, 2006. Seismically induced slip on rock fractures. Results from dynamic discrete fracture modeling. SKB R-06-48, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Fälth B, Hökmark H, Munier R, 2007. Seismically induced shear displacements in repository host rock fractures. In Proceedings of the 9th Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Canada, 26–29 June 2007.

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.

Marrett R, Allmendinger R W, 1990. Kinematic analysis of fault-slip data. Journal of Structural Geology 12, 973–986.

Munier R, 2010. Full perimeter intersection criteria. Definitions and implementations in SR-Site. SKB TR-10-21, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Raiko H, Sandström R, Rydén H, Johansson M, 2010. Design analysis report for the canister. SKB TR-10-28, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009a. Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB TR-09-22, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2009b. Underground design Forsmark. Layout D2. SKB R-08-116, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010a. Design, construction and initial state of the underground openings. SKB TR-10-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.

SKB, 2010b. Geosphere process report for the safety assessment SR-Site. SKB TR-10-48, 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.

Stephens M B, Fox A, La Pointe P, Simeonov A, Isaksson H, Hermanson J, Öhman J, 2007. Geology Forsmark. Site descriptive modelling Forsmark stage 2.2. SKB R-07-45, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Walsh J J, Watterson J, 1987. Distributions of cumulative displacement and seismic slip on a single normal fault surface. *Journal of Structural Geology* 9, 1039–1046.

Walsh J J, Watterson J, 1989. Displacement gradients on fault surfaces. *Journal of Structural Geology* 11, 307–316.

Övriga referenser

Brown S R, Scholz C H, 1985. Broad bandwidth study of the topography of natural rock surfaces. *Journal of Geophysical Research* 90, 12575–12582.

Kumar S, Böövarsson G S, 1990. Fractal study and simulation of fracture roughness. *Geophysical Research Letters* 17, 701–704.

McEwen T (ed), Aro S, Kosunen P, Mattila J, Pere T, Käpyaho A, Hellä P, 2012. Rock suitability classification – RSC 2012. Posiva Oy, Finland. In preparation.

Shipton Z K, Cowie P A, 2003. A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstone. *Journal of Structural Geology* 25, 333–344.

Wang J S Y, Narasimhan T N, Scholz C H, 1988. Aperture correlation of a fractal fracture. *Journal of Geophysical Research* 93, 2216–2224.

Vermilye J M, Scholz C H, 1995. Relation between vein length and aperture. *Journal of Structural Geology* 17, 423–434.

Vermilye J M, Scholz C H, 1998. The process zone: a microstructural view of fault growth. *Journal of Geophysical Research* 103, 12223–12237.