

# Långtidsutveckling av materialegenskaper för grundläggning och återfyllnad i 1-2BMA

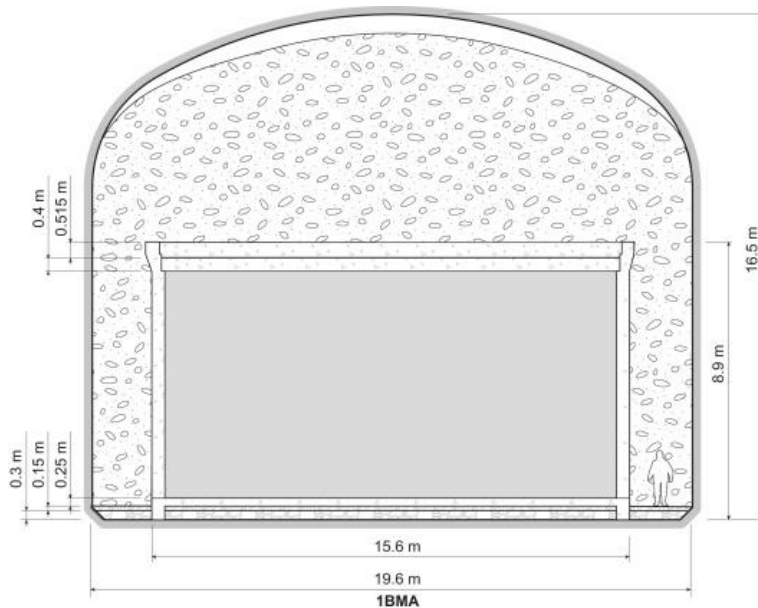
SSM efterfrågar i denna komplettering en redovisning av hur långtidsutvecklingen av återfyllnaden och makadam under barriärkonstruktionen påverkar säkerhetsfunktionen hydraulisk kontrast samt dess osäkerheter.

## 1 Inledning

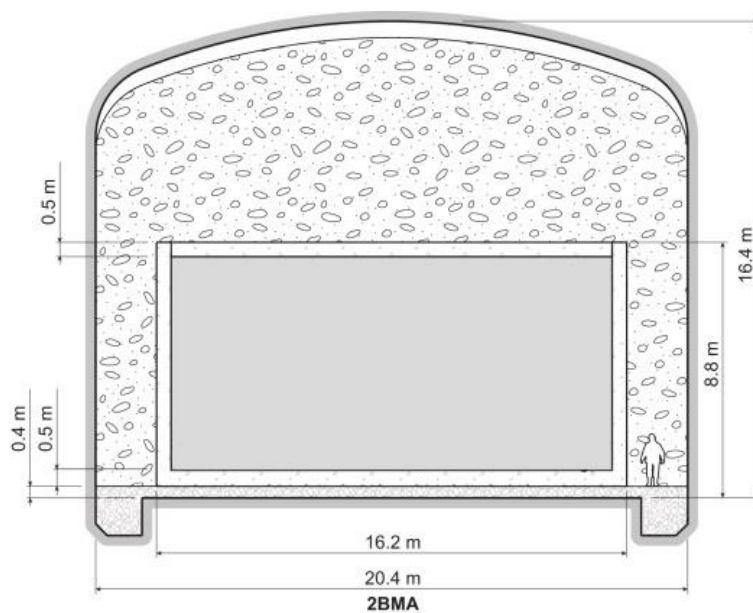
De material och installationsmetoder som leder fram till initialtillståndet för 1BMA och 2BMA finns beskrivna i initialtillståndsrapporten (SKB2014a, kapitel 4 och 5) och förslutningsplanen för SR-PSU (Luterkort et al. 2014, kapitel 4). De processer som påverkar egenskaperna hos återfyllnadsmaterial och makadam i dessa förvarssalar beskrivs i sin tur i processrapporten för tekniska barriärer för SR-PSU (SKB 2014b, kapitel 10). En kompletterande redovisning av långtidsutvecklingen av återfyllnad och makadam i 1BMA och 2BMA görs med ovanstående rapporter som utgångspunkt. Materialens hydrauliska konduktivitet är i fokus, men även porositet och mekaniska egenskaper ingår i redovisningen.

### 1.1 Återfyllnadsmaterial, grundläggning och angränsande material

Initialtillståndsrapporten för SR-PSU beskriver förvarssalarna 1BMA och 2BMA (SKB 2014a, kapitel 4 och 5). Makadam används i grundläggning samt i återfyllnad vid sidan om och ovanpå betongkonstruktionen. Med makadam avses allmänt stenkross med kornstorleken 2-65 mm där finfraktionen avlägsnats (kornstorlekar diameter < 2 mm). Återfyllnadsmaterialet i båda förvarssalarna består av makadam i fraktionen 16-32 mm (SKB 2014a). Makadamen är ensgraderad vilket innebär att materialet har en brant kornstorleksfördelning, där graderingstalet,  $C_u$ , är mindre än 6 (Nyblad och Wimelius 2013). Grundläggningen skiljer sig åt mellan de två förvarssalarna. I 1BMA är bottenplattan grundlagd på ett lager av makadam, som i sin tur ligger på en packad sprängstensfyllning. Bottenplattan är försedd med förstyrningsbalkar och kantbalkar, vilka är grundlagda på oarmerade sulor av grovbetong. Grovbetongen är gjuten mot rensat berg. För att dränera utrymmet under bottenplattan under driftperioden finns dräneringsrör ingjutna i bottenplattans kantförstyvning (se Figur 1-1). I 2BMA kommer kassunerna stå direkt på en bädd av makadam (se Figur 1-2). Materialen i återfyllnad och grundläggning betraktas som jämförbara med avseende på de processer som kan påverka dem.



Figur 1-1. Schematiskt tvärsnitt av 1BMA efter förslutning (SKB 2014a, figur 4-3).



Figur 1-2. Schematiskt tvärsnitt av 2BMA efter förslutning (SKB 2014a, figur 5-2).

En förstärkt betongkonstruktion i 1BMA har beskrivits av Elfving<sup>1</sup> och Elfving<sup>2</sup> et al. Här föreslås injektering av stenbädden under betongkonstruktionen med ett cementbaserat material, samt förstärkning

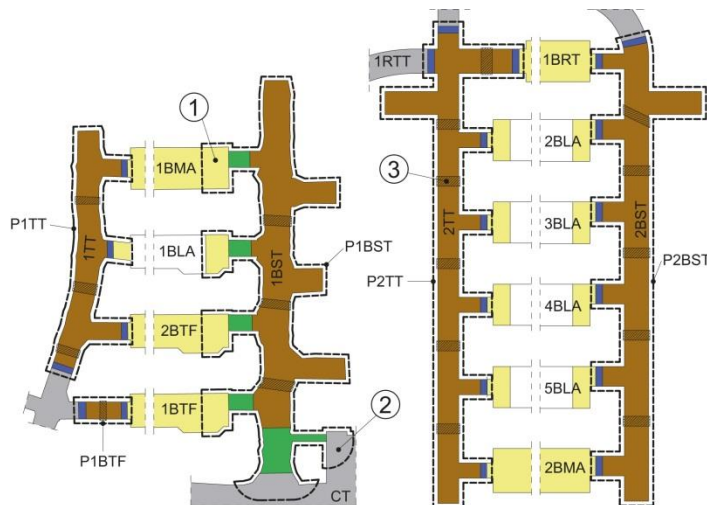
<sup>1</sup> Elfving M, 2015. Huvudrapport – handlingsalternativ och åtgärder för 1BMA i SFR1. SKBdoc 1440857 ver 2.0. Svensk Kärnbränslehantering AB. Internt dokument.

<sup>2</sup> Elfving M, Mårtensson P, Petterson A, von Schenck H, 2016. Fördjupad redovisning av förstärkningsmetod för betongkonstruktionen i 1BMA i SFR1. SKBdoc 1534701 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB. Internt dokument.

av ytterväggar och lock. För detta fall beskrivs utvecklingen av grundläggningens långtidsegenskaper i Elfving<sup>3</sup> et al. Utvecklingen av långtidsegenskaperna hos återfyllnaden av makadam beskrivs i föreliggande dokument.

En vidareutvecklade utformning av betongkonstruktionen i 2BMA beskrivs av Elfving et al. (2017), där kassunernas ytterdimensioner ökar något i förhållande till referensutformningen i SR-PSU (SKB 2014a, kapitel 5). Utvecklingen av långtidsegenskaperna hos återfyllnaden av makadam och grundläggning beskrivs i föreliggande dokument.

Återfyllnadsmaterial och grundläggning avgränsas av förvarssalarnas bergväggar och av betongkonstruktioner. I 1BMA avgränsas den täta sektionen av bentonit i 1TT med en betongplugg. Bentoniten i 1BST avgränsas av ett övergångsmaterial bestående av 30 % bentonit och 70 % krossat berg, som tillsammans med tåtkärnan av bentonit bildar en jorddammsplugg. För 2BMA avgränsas täta sektioner i bentonit i 2TT och 2BST av betongpluggar (se Figur 1-3).



**Figur 1-3.** Schematisk bild över material angränsande till förvarssalarna i SFR 1 och SFR 3 (SKB 2014a, figur 11-2). Återfyllnadsmaterialet (gult) i 1BMA avgränsas från täta sektioner av bentonit (brunt) med en betongplugg (blå) och ett övergångsmaterial (grönt) bestående av 30 % bentonit och 70 % krossat berg. Återfyllnadsmaterialet (gult) i 2BMA avgränsas från täta sektioner av bentonit (brunt) med två betongpluggar (blå).

## 2 Processer

Kapitel 10 i processrapporten för tekniska barriärer för SR-PSU (SKB 2014b) beskriver de processer som kan påverka återfyllnadsmaterialets hydrauliska egenskaper. Sammanfattningsvis konstateras att påverkan på återfyllnadsmaterialets porgeometri kan leda till förändringar i den hydrauliska konduktiviteten.

### 2.1 Termiska processer

I klimatscenariot för tidigt periglacialt klimat påverkas grundvattenflödet i berget av permafrost runt 17 500-20 500 e Kr. Generellt minskar vattenflödet genom berget och genom förvarssalarna vid permafrost. Under denna period förväntas ingen frysning av återfyllnad eller betongmaterial i 1BMA och 2BMA. Nästföljande periglaciala period förväntas inträffa senare än 50 000 år efter förslutning. I detta skede kan det inte uteslutas att betong fryser på försvarsdjup (SKB 2015). När temperaturen ökar igen kan betongkonstruktionerna och betongpluggar ha spruckit. Fullständigt degraderat betongmaterial kan lokalt blanda sig med återfyllnaden i gränsen mellan betongkonstruktion/makadam och betongplugg/makadam.

<sup>3</sup> **Elfving M, Mårtensson P, Pettersson A, von Schenck H, 2016.** Fördjupad redovisning av förstärkningsmetod för betongkonstruktionen i 1BMA i SFR1. SKBdoc 1534701 ver 2.0, Svensk Kärnbränslehantering AB. Internt dokument.

Detta kan påverka de hydrauliska egenskaperna och därmed vattenflödet lokalt. Frysning av vatten i makadamens porsystem i samband med permafrost/glaciation väntas inte orsaka någon större förändring av materialets porgeometri eller hydrauliska egenskaper efter att vattnet tinat.

## 2.2 Hydrauliska processer

Återfyllnaden vattenmättas i den takt som bestäms av hastigheten på inkommande grundvatten. Vattenmättnad av ett granulärt material kan leda till sättningar då friktionen mellan korn minskar. För ett ensgraderat material i fraktionen 16-32 mm har denna sättning uppskattats till någon promille av mäktigheten (Nyblad och Wimelius 2013). Vidare är materialet stabilt mot inre erosion då nästan samtliga korn ingår i ett lastbärande kornskelett. Vattenhastigheten i förvarssalarna bedöms bli lägre än vad som krävs för att lyfta och transportera korn som inte låsts fast (Nyblad och Wimelius 2013).

Flödet genom BMA-salarna begränsas av täta sektioner av bentonit i ändarna. Betongpluggar och ett övergångsmaterial av 30 % bentonit och 70 % krossat berg håller bentoniten på plats och avgränsar denna från makadamen i förvarssalarna (se Figur 1-3). När betongpluggarna degraderat kommer återfyllnadsmaterialet verka som mekaniskt mothåll mot bentonitens svälltryck. I detta skede blir den degraderade betongen motsvarigheten till jorddammspluggens övergångsmaterial (Luterkort et al. 2014). En viss förskjutning av övergångsmaterialet kan komma att ske. Detta kan leda till att hydrauliska egenskaperna påverkas lokalt och att vattenflödet i anslutning till pluggar påverkas (SKB 2014b), men påverkan på det huvudsakliga flödesmönstret i 1BMA och 2BMA blir försumbar.

## 2.3 Mekaniska processer

Nyblad och Wimelius (2013) har uppskattat hur vibrationer, krypning, vattenmättnad och vattenströmning påverkar sättningen av opackad makadam. Vibrationer under och efter installation förväntas dominera sättningen som uppskattas till < 6 % av mäktigheten.

Tryck från angränsande sektioner kan påverka återfyllnadsmaterialet. För 1BMA avgränsas den täta sektionen av bentonit i 1TT med en betongplugg. Bentoniten i 1BST avgränsas av ett övergångsmaterial av 30 % bentonit och 70 % krossat berg, som tillsammans med tåtkärnan av bentonit bildar en jorddammsplugg. För 2BMA avgränsas täta sektioner i bentonit i 2TT och 2BST av betongpluggar. Övergångsmaterialet i jorddammspluggen sväller i kontakt med vatten och verkar på återfyllnadsmaterialet med ett tryck (SKB 2014b). Betongpluggarna utövar inget tryck på återfyllningen under den tid som betongen är intakt. När betongpluggarna degraderat kommer återfyllnadsmaterialet verka som mekaniskt mothåll mot bentonitens svälltryck. I detta skede blir den degraderande betongen motsvarigheten till jorddammspluggens övergångsmaterial (Luterkort et al. 2014).

Sättningar och yttre tryck från angränsande sektioner kan kompaktera ett löst återfyllnadsmaterial men förväntas inte bryta sönder korn i makadamen. Inom SR-PSU har egenskaper för ett kompakterat grusmaterial antagits för att ansätta porositet och hydraulisk konduktivitet vid initialtillståndet (se avsnitt 4.2). Ingen påverkan på dessa egenskaper förväntas som funktion av mekaniska laster.

Betongdegradering påverkar de mekaniska egenskaperna i 1BMA och 2BMA. Portlanditlakning leder till en porositetsökning vilket påverkar betongens mekaniska egenskaper (Babaahmadi 2015). Betongkonstruktionerna påverkade av portlanditlakning förväntas kunna bära lasten som utgörs av återfyllnadsmaterialets egentygnd (Mårtensson 2017). Efter 50 000 år har betongen väsentligen lakats på sina cementshydrater. Vidare kan frysning komma att spräcka betongmaterialet under denna tidsperiod. Det återstående betongmaterialet kan lokalt blanda sig med återfyllnadsmaterialet.

Återfyllnaden med makadam syftar bland annat till att skydda betongkonstruktionerna i 1BMA och 2BMA från bergutfall. Det är minst 6 meter makadam ovanför betongkonstruktionernas tak. Då bergförstärkningar i form av sprutbetong och bergbultar försvagas över tid kan mindre bergblock falla ut. Utfall av mindre bergblock förväntas inte påverka återfyllnadsmaterialets porgeometri.

För att förvarssalarnas stabilitet ska påverkas, med väsentligt bergutfall som följd, krävs att ett jordskalv eller en glaciationscykel påverkar SFR (Mas Ivars et al. 2014). Referensutvecklingen för SR-PSU över

100 000 år omfattar perioder av periglacialt och tempererat klimat. Ingen inlandsis förväntas under dessa perioder (SKB 2014c). Utfall av stora bergblock kan bryta sönder korn i makadamvolymen närmast nedslaget. Ingen påverkan förväntas i makadamvolymen nära betongkonstruktionerna i 1BMA och 2BMA, varför det huvudsakliga flödesmönstret i förvarssalarna lämnas opåverkat.

## 2.4 Kemiska processer

Inkommande grundvatten kan reagera med lösta ämnen lakade från betongmaterial i 1BMA och 2BMA. Kalcit faller ut då inkommande löst karbonat reagerar med löst kalcium från lakad betong. Kalcit är det huvudsakliga sekundära mineral som påverkar geometri och hydraulisk konduktivitet i återfyllnaden av makadam i 1BMA och 2BMA (Höglund 2014, avsnitt 7.4.2).

Karbonatkoncentrationerna i grundvattnet ökar när landhöjningen leder till att landförhållanden råder över förvaret. Utfällning av kalcit börjar i gränzonen mellan berg och makadam, där grundvattnet först kommer in i förvarssalarna. Under de första 5000 åren efter förslutning har modellering visat en något minskad porositet (från 0,3 till 0,27) i detta område (Höglund 2014). I tidsintervallet 10 000 till 100 000 år efter förslutning fortskrider kalcitutfällningen och påverkar en större volym av makadam, i första hand på inflödessidan. Den största lokala förändring av makadamens porositet som beräknats är en sänkning från 0,3 till 0,2 efter 100 000 år. Återfyllnadens porositet förblir förhållandevis hög under hela analysperioden och huvuddelen av makadamen påverkas i mindre omfattning. I linje med detta förväntas liten påverkan på den hydrauliska konduktiviteten (Höglund 2014).

Mikrobiell aktivitet förväntas i återfyllnaden i 1BMA och 2BMA (SKB 2014b). Tillväxten ökar under vattenmättnadsfasen, med tillförsel av energi och lösta näringsämnen, för att sedan stabiliseras. Mikrobiell aktivitet avtar under hyperalkalina (pH>12) förhållande (SKB 2015). Hyperalkalinitet i makadamen råder under tiotusentals år, i återfyllnadsmaterialet närmast betongkonstruktionerna och nedströms dessa (Höglund 2014). Experiment har genomförts där grundvatten med mikroorganismer strömmats förbi ett finkrossat stenmaterial, i syfte att fastställa hur många celler som fastnar på krossets ytor (Eriksson et al. 2016). Under gynnsamma förhållanden för cellerna fastnade ca  $1 \cdot 10^8$  celler per  $\text{cm}^2$  av krossat berg. Den bildade biofilmen har en försumbar påverkan på makadamens porgeometri och därmed hydrauliska egenskaper.

## 3 Referensutveckling

Följande avsnitt beskriver referensutvecklingen för makadam i grundläggning och återfyllnad för 1BMA och 2BMA, med avseende på porgeometri och hydraulisk konduktivitet. Referensutvecklingen definieras som en uppsättning möjliga utvecklingar för systemet baserade på sannolika processer och händelser relevanta för säkerhet efter förslutning (SKB 2015).

### 3.1 De första 1000 åren efter förslutning

Återfyllnadsmaterialet och grundläggningen av makadam mätts i den takt som grundvattnet når förvarssalarna. Övergångsmaterialet i jorddammspluggen i 1BMA sväller i kontakt med vatten och verkar på återfyllnadsmaterialet med ett tryck. Nyblad och Wimelius (2013) har uppskattat hur vibrationer, krypning, vattenmättnad och vattenströmning påverkar sättningen av opackad makadam. Vibrationer under och efter installation förväntas dominera sättningen som uppskattas till <6% av mäktigheten. Sättningar och yttre tryck från angränsande sektioner kan kompaktera ett löst återfyllnadsmaterial, men förväntas inte bryta sönder korn i makadamen. Inom SR-PSU har egenskaper för ett kompakterat grusmaterial antagits för att ansätta porositet och hydraulisk konduktivitet vid initialtillståndet. Ingen påverkan på dessa egenskaper förväntas som funktion av mekaniska laster.

Återfyllnadsmaterialet i båda förvarssalarna består av ett ensgraderat material i fraktionen 16-32 mm där finfraktionen avlägsnats. Materialet är stabilt mot inre erosion då nästan samtliga korn ingår i ett lastbärande kornskelett. Vidare bedöms vattenhastigheten i förvarssalarna bli lägre än vad som krävs för att lyfta och transportera korn som inte låsts fast (Nyblad och Wimelius 2013).



Kalcit är det huvudsakliga sekundära mineral som påverkar geometri och hydraulisk konduktivitet i återfyllnaden av makadam i 1BMA och 2BMA. Karbonatkoncentrationerna i grundvattnet ökar när landhöjningen leder till att landförhållanden råder över förvaret. Under de första 1000 åren efter förslutning är utfällning av kalcit försumbar (Höglund 2014). Tillväxten av mikrober ökar under vattenmättnadsfasen, med tillförsel av energi och lösta näringsämnen. Mikrobiell aktivitet avtar allteftersom hyperalkalina (pH>12) förhållande utvecklas (SKB 2015). Bildad biofilm har försumbar påverkan på geometri och hydraulisk konduktivitet.

### 3.2 Perioder av tempererat klimat mer än 1000 år efter förslutning

Betongdegradering påverkar de mekaniska egenskaperna i 1BMA och 2BMA. Lakning av portlandit dominerar under de första 10 000 – 20 000 åren efter förslutning (Höglund 2014). Portlanditlakning leder till en porositetökning i materialet och experiment visar att portlanditlakning påverkar betongens mekaniska egenskaper (Babaahmadi 2015). Betongkonstruktionerna påverkade av portlanditlakning förväntas fortfarande kunna bära lasten som utgörs av återfyllnadsmaterialets egentyngd (Mårtensson 2017). 50 000 år efter förslutning sker en gradvis omvandling till mineral med lägre kalciuminnehåll. Parallellt sker utfällning av ettringit och thaumasit som kan skapa sprickor i betongmaterialet. Begränsad mekanisk stabilitet förväntas hos det återstående materialet som lokalt kan blanda sig med återfyllnaden av makadam.

Utfällning av kalcit börjar i gränzonen mellan berg och makadam, där grundvattnet först kommer in i förvarssalarna. Under de första 5000 åren efter förslutning har modellering visat en något minskad porositet (från 0,3 till 0,27) i detta område (Höglund 2014). I tidsintervallet 10 000 till 100 000 år efter förslutning fortskrider kalcitutfällningen och påverkar en större volym av makadam, i första hand på inflödessidan. Den största lokala förändring av makadamens porositet som beräknats är en sänkning från 0,3 till 0,2 efter 100 000 år. Återfyllandens porositet förblir förhållandevis hög under hela analysstiden och huvuddelen av makadamen påverkas i mindre utsträckning. I linje med detta förväntas liten påverkan på den hydrauliska konduktiviteten (Höglund 2014). När betongpluggar gradvis degraderar kommer återfyllnadsmaterialet verka som mekaniskt mothåll mot bentonitens svälltryck. I detta skede blir den degraderande betongen motsvarigheten till jorddammspluggens övergångsmaterial (Luterkort et al. 2014). En viss förskjutning av övergångsmaterialet kan komma att ske. Detta kan leda till att de hydrauliska egenskaperna påverkas lokalt och att vattenflödet i anslutning till pluggar påverkas (SKB 2014b), men påverkan på det huvudsakliga flödesmönstret i 1BMA och 2BMA blir försumbar.

### 3.3 Perioder av periglacialt klimat

I klimatscenariot för tidigt periglacialt klimat så påverkas grundvattenflödet i berget av permafrost runt 17 500–20 500 e Kr. Generellt minskar vattenflödet genom berget och genom förvarssalarna. Under denna period förväntas ingen frysning av återfyllnad eller betongmaterial i 1BMA och 2BMA (SKB 2014c). Nästföljande periglaciala period förväntas inträffa senare än 50 000 år efter förslutning. I detta skede kan det inte uteslutas att betong fryser på förvarsdjup (SKB 2015). När temperaturen ökar igen har betongkonstruktionerna och pluggar spruckit. Fullständigt degraderat betongmaterial kan lokalt blanda sig med återfyllnaden i avgränsningen mellan betongkonstruktion/makadam och plugg/makadam. Detta kan påverka de hydrauliska egenskaperna och därmed vattenflödet lokalt.

## 4 Antaganden och hantering av osäkerheter

### 4.1 Materialval

Analysen av egenskaper och processer som långsiktigt kan påverka makadamens egenskaper visar att osäkerheterna inte bedöms vara av betydelse för säkerheten efter förslutning och att osäkerheterna begränsas genom ett kontrollerat val av återfyllnadsmaterial och material för grundläggningen.

Långtidsutveckling av materialegenskaper för grundläggning och återfyllnad i 1-2BMA

För ett grusmaterial styrs den hydrauliska konduktiviteten i första hand av storleken på det finaste materialet i kornstorleksfördelningen (Kenney et al. 1984). Valet av ensgraderad makadam 16-32 utan finmaterial ger en hög hydraulisk konduktivitet. Utifrån materialets kornstorleksfördelning har den hydrauliska konduktiviteten uppskattats till  $6 \cdot 10^{-1}$  m/s (Nyblad och Wimelius 2013). Ett ensgraderat material har vidare god mekanisk stabilitet och är okänsligt mot erosion (se avsnitt 2.2). Indirekt påverkan på porgeometri och hydraulisk konduktivitet begränsas därmed vidare.

Installation av makadam 16-32 bedöms inte skada betongkonstruktionen (Nyblad och Wimelius 2013).

## 4.2 Antaganden inom analys av säkerhet efter förslutning

### 4.2.1 Egenskaper vid initialtillståndet

Egenskaper har utvärderats för ett packat material. Grundläggningen i 2BMA är packad i initialtillståndet. Återfyllnadsmaterialet runt betongkonstruktionerna i 1BMA och 2BMA går mot packat material efter installation och de processer som leder till sättningar (se avsnitt 2.3). Kompakterat krossat stenmaterial samt naturligt grus med kornstorlekar liknande makadam har en porositet nära 0,3 (Pusch 2008, Kenney et al. 1984), vilket också är det värde som antagits för återfyllnadsmaterialet inom SR-PSU (SKB 2014a). Ensgraderat makadam 16-32 utan finmaterial ger en hög hydraulisk konduktivitet. Utifrån materialets kornstorleksfördelning har den hydrauliska konduktiviteten uppskattats till  $6 \cdot 10^{-1}$  m/s (Nyblad och Wimelius 2013). Den hydrauliska konduktivitet för makadam som antagits som initialtillstånd inom SR-PSU är  $K > 1 \cdot 10^{-2}$  m/s (SKB 2014a). I modelleringen av närzonhydrologin har en hydraulisk konduktivitet på  $1 \cdot 10^{-3}$  m/s antagits (Abarca et al. 2013). Detta ger marginal till den förväntade hydrauliska konduktiviteten och är ett försiktigt antagande.

### 4.2.2 Egenskaper efter förslutning och påverkan på hydraulisk kontrast

Den hydrauliska kontrasten i 1BMA och 2BMA är given av kvoten mellan betongkonstruktionernas hydrauliska konduktivitet och konduktiviteten hos materialet i återfyllnad och grundläggning (SKB 2015, avsnitt 6.3.8). Redovisningen av de processer som påverkar makadam i återfyllnad och i grundläggning pekar på en begränsad påverkan på porgeometri och hydrauliska konduktivitet och att påverkan på det huvudsakliga flödesmönstret i 1BMA och 2BMA är försumbart.

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

## Referenser

**Abarca E, Idiart A, de Vries L M, Silva O, Molinero J, von Schenck H, 2013.** Flow modelling on the repository scale for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-08, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

**Elfving M, Lundin M, von Schenck H, 2017.** Vidareutvecklad utformning av förvarsutrymmet 2BMA i SFR3. SKBdoc 1569813 ver 1.0. Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Eriksson L, Edlund J, Johansson L, Rabe L, Bengtsson A, Pedersen K, 2016.** Methods for sampling and analysis of attached and planktonic microorganisms in deep granitic rock aquifers. SKB R-16-09, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

**Kenney T C, Lau D, Ofoegbu G I, 1984.** Permeability of compacted granulated materials. Canadian Geotechnical Journal 21, 726–729..

**Mas Ivars D, Veiga Ríos M, Shiu W, Johansson F, Fredriksson A, 2014.** Long term stability of rock caverns BMA and BLA of SFR, Forsmark. SKB R-13-53, Svensk Kärnbränslehantering AB.

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

**Mårtensson P, 2017.** Kompletteringsbegäran utveckling av betongegenskaper 1-2BMA - 3. SKBdoc 1577237 ver. 1.0, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Nyblad B, Wimelius H, 2013.** Återfyllning med makadam. Förslutning av SFR. SKB P-13-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**Pusch R, 2008.** Rock fill in a KBS-3 repository. Rock material for filling of shafts and ramps in a KBS-3V repository in the closure phase. SKB R-08-117, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2014a.** Initial state report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2014b.** Engineered barrier process report for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-14-04, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2014c.** Climate and climate-related issues for the safety assessment SR-PSU. SKB TR-13-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.

**SKB, 2015.** Redovisning av säkerhet efter förslutning för SFR. Huvudrapport för säkerhetsanalysen SR-PSU. Svensk Kärnbränslehantering AB.