

Återfyllning med makadam

Förslutning av SFR

Björn Nyblad, Svensk Kärnbränslehantering AB

Hans Wimelius, NCC

December 2013

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



ISSN 1651-4416

SKB P-13-05

ID 1378644

Återfyllning med makadam

Förslutning av SFR

Björn Nyblad, Svensk Kärnbränslehantering AB

Hans Wimelius, NCC

December 2013

Nyckelord: SFR, Förslutning, Makadam, Återfyllning, Återfyllnad, Återfyllningsmaterial, Återfyllnadsmaterial.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se.

Innehåll

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Inledning | 5 |
| 2 | Förklaring av använda begrepp | 7 |
| 3 | Förutsättningar | 9 |
| 4 | Syfte och mål | 11 |
| 5 | Litteraturstudie | 13 |
| 5.1 | Faktorer som påverkar hydraulisk konduktivitet | 13 |
| 5.2 | Faktorer som påverkar sättning | 14 |
| 5.2.1 | Vibrationer | 14 |
| 5.2.2 | Vattenmättning | 14 |
| 5.2.3 | Krypning | 15 |
| 5.2.4 | Vattenströmning | 15 |
| 5.3 | Installationsmetoder | 16 |
| 6 | Återfyllnadsmaterialet makadam | 17 |
| 6.1 | Vald fraktion | 17 |
| 6.2 | Uppskattad hydraulisk konduktivitet | 17 |
| 6.3 | Uppskattad sättning | 18 |
| 6.4 | Övriga tekniska egenskaper | 19 |
| 7 | Installationsbeskrivning | 21 |
| 7.1 | Bergssalar | 22 |
| 7.2 | Tunnelsystem | 23 |
| 7.3 | Återfyllnad av betongkulvertar, schakt och övriga konstruktioner | 24 |
| 7.4 | Kontroller av installationen | 25 |
| 8 | Behov av vidare utredning | 27 |
| | Referenser | 29 |

1 Inledning

I Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall (SFR) i Forsmark slutförvaras det kortlivade låg- och medelaktiva driftavfallet från de svenska kärntekniska anläggningarna. Anläggningen ägs av SKB och har varit i drift sedan 1988. En utbyggnad av SFR behövs för att anläggningen ska kunna ta emot även kortlivat låg- och medelaktivt rivningsavfall från de kärntekniska anläggningarna, eftersom befintlig anläggning varken har utrymme eller tillstånd att ta emot rivningsavfall. Behovet har aktualiserats av att de båda reaktorerna i Barsebäck har stängts. För att reaktorerna ska kunna rivas måste det finnas kapacitet att ta emot och slutförvara rivningsavfallet. På grund av att kärnkraftverkens drifttider har förlängts har anläggningen inte heller utrymme att ta emot allt det kortlivade låg- och medelaktiva driftavfallet. En mindre del av detta kommer därför också att slutförvaras i utbyggnaden.

Det finns även ett behov av att mellanlagra långlivat låg- och medelaktivt avfall i väntan på slutförvaring. Avsikten är att mellanlagra detta avfall i en bergssal i det utbyggda SFR till dess att ett slutförvar för långlivat avfall står färdigt.

De tekniska barriärerna i ett slutförvar för kortlivat låg- och medelaktivt radioaktivt avfall har till syfte att förhindra eller fördröja utsläpp av radionuklider. Beroende på avfallets egenskaper ställs olika krav på val av barriärer. Vid förslutning av bergssalarna BTF, 1BMA, 2BMA och BRT kommer salarna att fyllas med krossat berg runt de tekniska barriärerna. Återfyllningen i bergssalarna kommer utgöra en hydraulisk kontrast mot berg och barriärer. Materialet och hur det kan installeras beskrivs i denna rapport. Vidare beskrivs även egenskaperna för det återfyllnadsmaterial som kommer installeras i övriga tunnlar, nischer och nedfartsramper i förvaret.

2 Förklaring av använda begrepp

I tabell 2-1 förklaras begrepp och fackuttryck som används i dokumentet.

Tabell 2-1. Begrepp med förklaring.

| Begrepp | Förklaring |
|------------------------|--|
| Makadam | Med makadam avses i detta dokument brutet krossat kristallint berg i fraktioner över 2 mm. |
| Fraktion | Egenskap för granulärt material som beskriver de enskilda kornens storlek. Exempel på fraktioner är "0-90" eller "2-5". Siffrorna anger övre och undre gräns (i mm) på de siktar som använts och därmed ett förenklat mått på storleken av de korn som ingår i blandningen. |
| Kornstorleksfördelning | Beskriver en fraktion med parametrarna kornstorlek och procentuell andel passerad mängd. Exempel: 50 % av kornen passerar siktstorlek 8 mm och 10 % av kornen passerar siktstorlek 2 mm. Kornstorleksfördelning presenteras vanligtvis i ett diagram (kornstorleksfördelningskurva). |
| Granulärt material | Avser i detta dokument material med tydligt definierade korn. Exempel: Krossat berg, alluvialt (naturligt) grus. |
| Sättning | Ett materials volymminskning beskrivet som dess överytas sjunkning. |
| Porvolym | Ett granulärt materials volym som ej upptas av solitt material. Porvolymen upptas vanligen av luft eller vatten. |
| Finmaterial | Avser i detta dokument granulärt material med kornstorlek under 2 mm. Enligt Larsson (2008) definieras gränsen mellan sand och grus gå vid kornstorlek 2 mm. |
| Ensgraderad | Ensgraderat material avser jordmaterial med brant kornfördelningskurva. I Larsson (2008) beskrivs ensgraderad jord ha graderingstal $C_u < 6$ ($C_u = D_{60}/D_{10}$). |
| Månggraderad | Månggraderat material avser jordmaterial med flack kornfördelningskurva. I Larsson (2008) beskrivs månggraderad jord ha graderingstal $C_u < 15$. |
| Graderingstal | Definition $C_u = D_{60}/D_{10}$. Där D_x är kornstorlek vid passerad mängd X % i en kornstorleksfördelningskurva. |
| Bergssalar | Ett utrymme i slutförvaret i vilket avfall placeras för slutlig förvaring t ex BLA och BMA. |

3 Förutsättningar

Vissa tunnlar vid SFR ska helt eller delvis återfyllas med krossat kristallint berg. Följande antaganden görs:

Detta material ska ha relativt hög hydraulisk konduktivitet. Detta antagande grundas på antagande i SKB (2008) vilket i sin tur härrör från antagande i Holmén och Stigsson (2001). I Holmén och Stigsson (2001) bedömdes att en hydraulisk konduktivitet över 10^{-5} m/s var att betrakta som ”hög”. Högre konduktiviteter var accepterade men användes inte av beräkningstekniska orsaker. Denna gräns används som riktlinje för nedre gräns för hydraulisk konduktivitet för det material som väljs i detta dokument (det finns ingen övre gräns för hydraulisk konduktivitet).

Materialet ska inte skada betongbarriärer vid installation samt ge förutsättning för en rationell installation. Materialets sättning ska uppskattas så att spalten i tunneltaket kan bedömas.

4 Syfte och mål

I tabell 4-1 visas rapportens huvuddelar med deras syfte och mål.

Tabell 4-1. Syfte och mål med detta dokument.

| Huvuddelar | Syfte | Mål |
|--------------------------------|---|--|
| Litteraturstudie | Beskriva relevant information om granulära materials egenskaper med avseende på hydraulisk konduktivitet och sättning. I studien söktes även information om hur återfyllning utförs inom gruvindustrin. | Ge underlag för att bestämma kornstorleksfördelningskurva för makdamen. |
| Återfyllnadsmaterialet makadam | Beskriva relevant information som beskriver hydraulisk konduktivitet och sättningsegenskaper för makadam av olika fraktioner. | Bestämma materialets kornstorleksfördelning med hänsyn till bl a hydraulisk konduktivitet och grovt uppskatta dess potentiella sättning. |
| Installationsbeskrivning | Beskriva hur återfyllnadsmaterialet makadam kan installeras effektivt med befintlig teknik. | Ge förslag på hur materialet kan installeras. |

5 Litteraturstudie

När material av krossat berg utan finmaterial används som konstruktionsmaterial till vägar, broar, hus, dammar eller dylikt är det för att det har goda egenskaper med avseende på dränering, deformation (sättning) och hållfasthet. Sättningar i ett korrekt packat friktionsmaterial sker till största delen momentant med pålastningen, därför är sättningar över tiden små. För den vardagliga användningen av materialet är tidsperspektivet kortare än det som gäller för SFR. För t ex broar är 120 år en vanligt förekommande teknisk livslängd. Därför bedöms det inte vara tillräckligt att använda data direkt från gällande normer.

Pusch (2008) har för SKB:s räkning gjort en likande studie för återfyllning med krossat berg för kärnbränsleförvaret. Den rapporten behandlar återfyllning utförd med månggraderat material som packas vid installation. Det ger anledning till fortsatta studier med fokus på ensgraderat material vilka redovisas i detta dokument.

5.1 Faktorer som påverkar hydraulisk konduktivitet

I litteraturen finns ett antal referenser med översiktliga värden på hydraulisk konduktivitet. I SGI:s information om jords egenskaper (Larsson 2008) så anges hydraulisk konduktivitet enligt tabell 5-1. Samma värden redovisas bland annat i Handboken bygg geoteknik (Avén 1984). Kudou et al. (2005) uppmätte liknande hydrauliska konduktiviteter på grovkrossad skiffer till $\sim 10^{-1}$ m/s.

Hydraulisk konduktivitet i ett granulärt material är kopplat till tvärsnittsarean på kanalerna genom porvolymen (Terzaghi et al. 1996). Detta innebär att en stor porvolym sannolikt ger ett material med hög hydraulisk konduktivitet. För granulära material föreslås materialets absoluta permeabilitet (som kan räknas om till hydraulisk konduktivitet) bedömas genom en ekvation given av Kennedy et al. (1984), ekvation 5-1. Detta gäller för packade material och bedöms därför vara på den säkra sidan för ett icke packat material med samma kornstorleksfördelning.

$$\kappa = A D_5^2 \quad (5-1)$$

där:

κ = absolut permeabilitet (mm^2).

A = dimensionslös konstant (anges vara 0,0005 till 0,001).

D_5 = kornstorlek där 5 % av materialet passerat kornstorleksfördelningskurvan (mm).

När den absoluta permeabiliteten räknas om till hydraulisk konduktivitet (enhet m/s) för vatten vid temperatur (5°C) visar det på god överensstämmelse för värden för grovt material givna av Das (2008) och Larsson (2008). Dessa värden förutsätter att det föreligger ett laminärt flöde genom materialet.

Tabell 5-1. Översikt av hydraulisk konduktivitet för olika fraktioner av alluvialt material (Larsson 2008). De lägre värdena avser packat material.

| Sediment (ensgraderad jord) | Fraktion (mm) | Hydraulisk konduktivitet (m/s) |
|--------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| Fingrus | 2–6,3 | 10^{-1} – 10^{-3} |
| Grovsand | 0,63–2 | 10^{-2} – 10^{-4} |
| Mellansand | 0,2–0,63 | 10^{-3} – 10^{-5} |

Vid höga hydrauliska gradienter i ett material övergår flödet till att vara turbulent. Vid turbulent flöde är ekvation 5-1 ej tillämplig. Ferreira et al. (2010) visar vid vilken storleksordning på hydraulisk gradient turbulent flöde kan uppkomma i ett granulärt material. Preliminära hydromodelleringar för SFR visar att de hydrauliska gradienterna kommer vara så små att laminärt flöde kommer råda och ekvation 5-1 därför är tillämplig. Det beror på att det är det omgivande berget som styr flödet genom utrymmen återfyllda med makadam (inte makadamens hydrauliska konduktivitet).

Att förutspå hydraulisk konduktivitet för ett material med hög permeabilitet är svårt. Detta illustrerar Carrier (2003) genom att jämföra en empiriskt framtagen faktor som relateras till ett jordmaterials kornstorlek för 10 % passerande mängd på en kornstorleksfördelningskurva (D_{10}). Från 10 stycken olika publikationer framkommer att faktorn för den specifika ekvationen varierar från 1–1 000. Därför bör beräknade värden för K användas med försiktighet och verifieras med experiment.

5.2 Faktorer som påverkar sättning

Identifierade mekaniska processer som leder till sättningar i materialet listas nedan.

- Vibrationer
- Vattenmättning
- Krypning
- Vattenströmning

Sättningar kommer skapa eller öka en spalt mellan återfyllnadsmaterial och överkant tunnel. Sättningar kommer även till viss del minska porvolymen och därmed minska den hydrauliska konduktiviteten.

5.2.1 Vibrationer

Vibrationer under installation och senare seismisk aktivitet kan orsaka kompaktering av materialet. Som värsta scenario skulle materialet gå från löst lagrat till hårt packat, det kan innebära en densitetsökning om cirka 10 % (Goltermann et al. 1997). Det förefaller dock mycket osannolikt att ett material uppnår maximal packning endast genom vibrationer. I ett dokument från svenska Vägverket (Vägverket 1984) finns uppskattningar för densitetsökning på det som där kallas ”krossgrus” (< 18 mm) under transport på upp till 4 %. I Terzaghi et al. (1996) nämns ett fåtal undersökningar av sättningar orsakade av vibrationer från jordbävningar. Sättningar (vertikal töjning) på upp till 6 % visar sig förekomma i löst lagrade jordar.

Den sättning som uppkommer av densitetsförändringar i en bergssal kan förenklat beskrivas enligt ekvation 5-2.

$$dH = H_0 (1 - \gamma_0 / \gamma_1) \quad (5-2)$$

där:

dH = sättning av materialets överyta (m).

H_0 = initial höjd för materialets volym (m).

γ_0 = initial densitet (kg/m^3).

γ_1 = ny densitet (kg/m^3).

5.2.2 Vattenmättning

Sättningar kan uppkomma vid vattenmättning av ett granulärt material eftersom friktionen mellan kornen minskar (Oldecop och Alonso 2007). Den initiala sättningen av egenvikt kompenseras för direkt under installationen. Utöver de initiala elastiska och plastiska sättningarna som uppkommer under installation, och som direkt blir kompenserade för, kan denna deformation öka med ungefär 50 % då materialet vattenmätts (Indraratna et al. 1997, Oldecop och Alonso 2007).

Den initiala sättningen kan beskrivas med elasticitetsmodulen (E , enhet Pa) eller kompressionsmodulen (K , enhet Pa). Opackad makadams modul kan rimligen antas variera kraftigt beroende på kornens egenskaper. I Indraratna et al. (1997) anges medelkompressionsmodul för packad makadam (av kristallin bergart) för järnväg till ca 20 MPa för relativt höga spänningar. I Alva-Hurtado et al. (1981) utförs försök på ballast av granit (5–30 mm, $D_{50} = 20$ mm, $C_u = 2$). Resultaten visar där att den initiala elasticitetsmodulen är 22 MPa–46 MPa. Elasticitetsmodulen 22 MPa kan räknas om till kompressionsmodul, se Larsson (2008), till $M = 30$ MPa. Lindblom (1973) anger kompressionsmodul för opackad sprängstensfyllning av hårda och ovittrade bergarter till i storleksordningen 20 MPa. Andréasson (1971, 1973) föreslår genom sammanställning av ett stort antal försök på friktionsjordar ett samband för beräkning av kompressionsmodulen för friktionsjord beroende av kornfördelningskurva och begynnelseportal.

5.2.3 Krypning

Långtidsprover i laboriemiljö visar att makadam kryper med tiden. Föreslagen huvudorsak är att de individuella kornen vid belastning bryts sönder via sprickor som propagerar över tid (Oldecop och Alonso 2007). Dessa tester är utförda på månggraderat material under 1 000 minuter vilket ger anledning att utföra nya tester med rätt material och över längre tid. I Lindblom (1973) redovisas ett antal försök utförda på krossat material med syfte att bestämma krypningsegenskaper. Dessa försök visar generellt att krossmaterial påvisar kryptöjningar med tiden. Lindblom (1973) skriver att kryptöjningarna är proportionella mot logaritmen på tiden och tryckspänningens magnitud. Krypdeformationernas storlek beror förutom tid och belastning också på kornstorlek, bergart och kornfördelning.

5.2.4 Vattenströmning

Strömningshastigheten för grundvattnet i bergssalarna kommer vara mycket låg. Det finns teoretiska samband som visar hur stor strömningshastighet som kan tillåtas innan korn kan transporteras med strömmande vatten. Detta sätter en teoretisk begränsning på minsta erforderliga kornstorlek för att undvika transport av korn och därmed potentiella sättningar genom erosion. Denna minsta kornstorlek kommer dock vara utan betydelse vid de låga vattenhastigheter som förväntas i SFR. I bergssalarna bedöms vattenhastigheten bli lägre än vad som krävs för att lyfta och transportera korn som är större än 2 mm.

Kornstorleksfördelningskurvas form är av betydelse för materialets motståndskraft mot inre erosion. Kennedy och Lau (1985) utförde experiment där de föreslog bedömningskriterier vilka applicerades på kornstorleksfördelningskurvas form. De visar att det är kornstorleksfördelningskurvas nedre 20–30 % passerade vikt som avgör om ett material är stabilt eller inte. Formen på den nedre delen bör uppfylla kriteriet givet i ekvation 5-3.

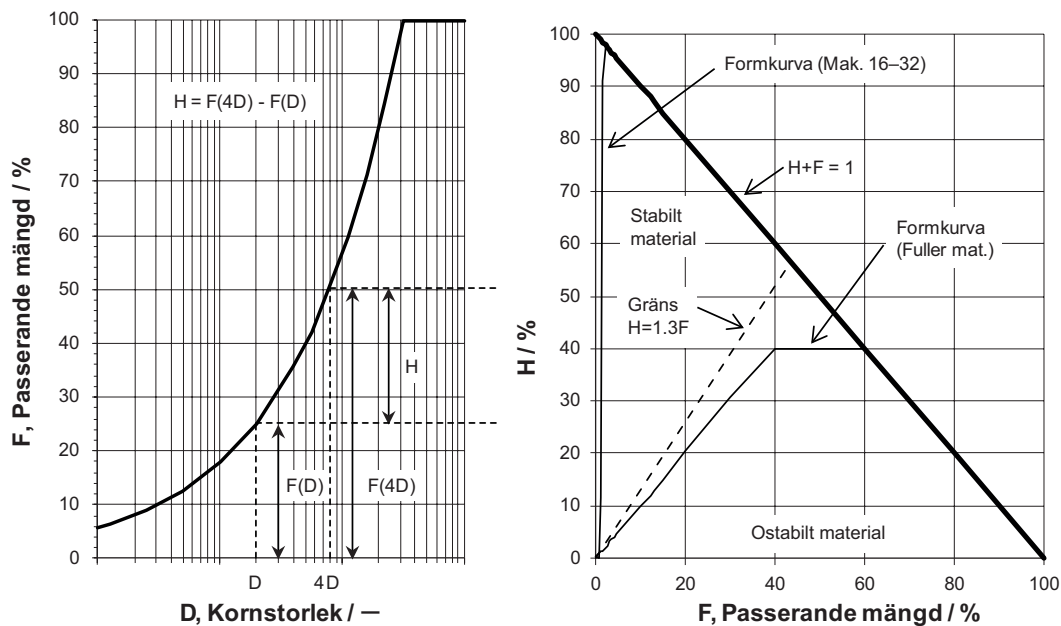
$$H \geq 1.3 F \quad (5-3)$$

där:

F = passerande mängd för godtycklig kornstorlek D .

H = differens i passerande mängd för kornstorlek D och $4D$.

Utvärderingen av H beskrivs i figur 5-1. Om formkurvas H -värde för $F < 30$ % ligger över gränslinjen $H = 1,3 F$ bedöms materialet vara stabilt. Ensgraderade material (t ex Makadam 16-32) är enligt denna utvärderingsmetod mycket stabila mot inre erosion. Däremot kan man notera att ett Fuller-material med liten porvolym ligger under gränslinjen. Det föreslagna bedömningskriteriet ska endast användas som riktlinje vid val av material. Ett materials verkliga stabilitet mot erosion bör utvärderas individuellt för enskilda material.



Figur 5-1. Bedömningskriterium för ett materials inre stabilitet mot erosion på grund av vattenströmning. I den vänstra delen av figuren visas hur H beräknas. I den högra delen av figuren visas formkurvan $H(F)$ tillsammans med gränslinje för bedömning av materialets inre stabilitet. Som exempel på formkurva visas i figuren ett Fuller-material med liten porvolym sam Makadam 16-32.

5.3 Installationsmetoder

Inom gruvindustrin är återfyllning av bergtrum ett välkänt och väl undersökt problem. Syftet med återfyllning inom gruvdrift skiljer sig dock från vad som ska åstadkommas vid SFR. När gruvor återfylls är det i huvudsak med nedanstående mål (Potvin et al. 2005):

- Förhindra sättningar på markytan som kan skada driften eller omgivningen.
- Minska behovet av bärande bergpartier.
- Deponering av gruvavfall.

För dessa ändamål finns i huvudsak tre typer av återfyllningsmetoder vilka samtliga var och en för sig kan användas för att uppfylla målen:

- Hydraulic fill.
- Paste fill.
- Rock fill (återfyllning med krossat berg).

Sammanfattningsvis kan sägas att de egenskaper på material som erhålls och de anordningar som krävs talar för att "Hydraulic fill" och "Paste fill" ej är lämpliga metoder för SFR. Det alternativ som återstår är "Rock fill". Enligt Potvin et al. (2005) används med fördel ett Fuller-material vid återfyllning av utrymmen i gruvor. Detta beror på att det uppvisar små sättningar trots begränsat packningsarbete.

6 Återfyllnadsmaterialet makadam

6.1 Vald fraktion

För att initialt uppnå antagandet på hög hydraulisk konduktivitet, över 10^{-5} , väljs nedanstående material.

- Makadam 16-32.

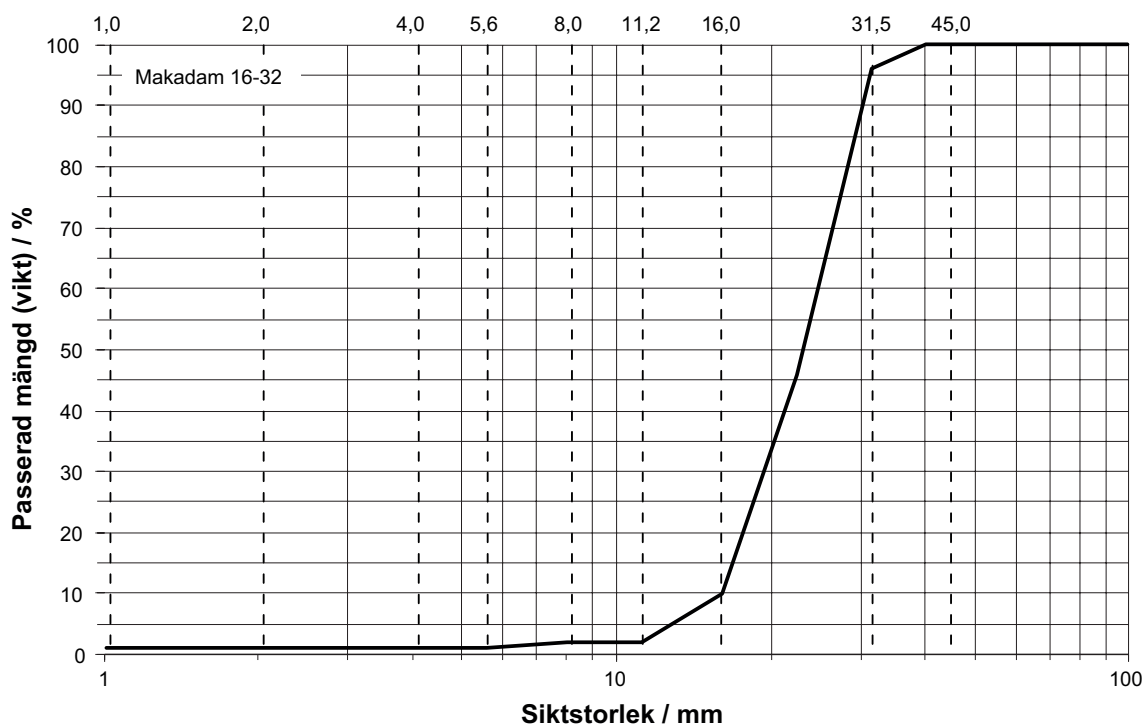
Detta är ett konventionellt material som finns att köpa från producenter av krossat berg. Installation av materialet bedöms heller inte leda till att betongbarriärerna skadas av stora korn vid installation. I figur 6-1 ges ett exempel på en kornfördelningskurva för detta material.

6.2 Uppskattad hydraulisk konduktivitet

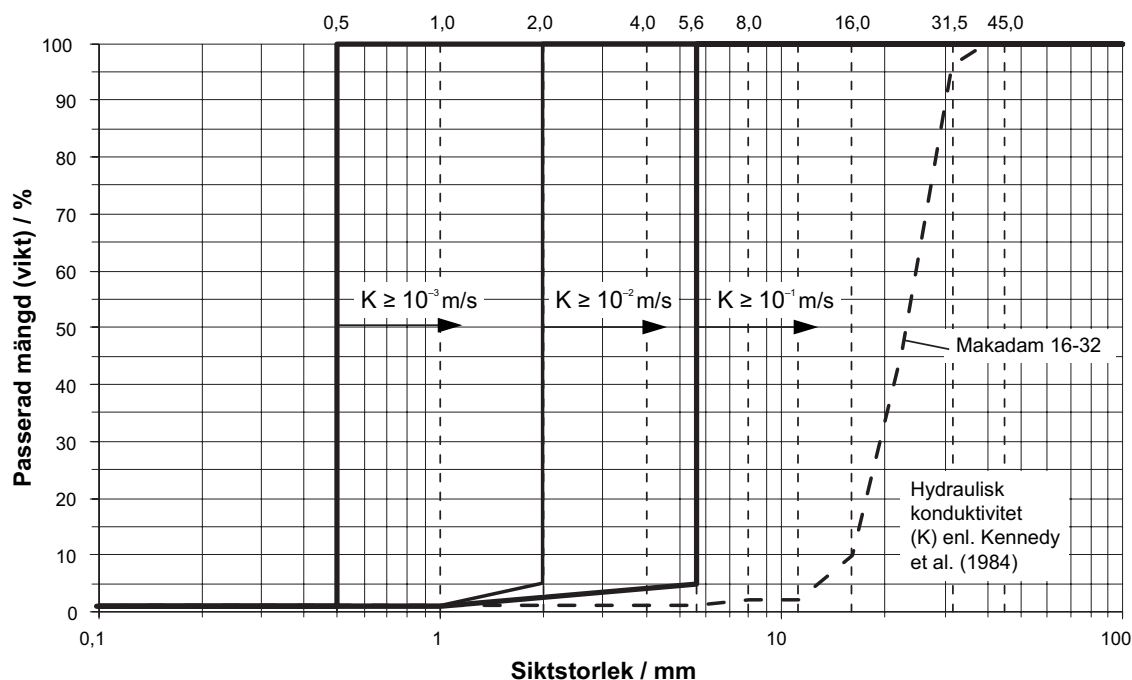
Det finns en mängd olika ekvationer för beräkningar av hydraulisk konduktivitet att tillgå i litteraturen (se avsnitt 5.1). Vid laminärt flöde genom återfyllnadsmaterialet kan konduktiviteten t ex uppskattas genom beräkning föreslagen av Kennedy et al. (1984). Enligt kornfördelningskurvan i figur 6-1 erhålls en uppskattad beräknad hydraulisk konduktivitet:

$K = 6 \times 10^{-1}$ m/s (vilket uppfyller antagande i kapitel 3).

Det bör utföras fortsatta studier för att bättre bestämma det valda materialets hydrauliska konduktivitet. I figur 6-2 visas undre gräns för kornstorleksfördelningskurvor för utvalda värden på hydraulisk konduktivitet enligt ekvation 5-1. Detta ger en indikation på känsligheten för förändringar av kornstorlekar till större andel mindre korn.



Figur 6-1. Kornstorleksfördelning för makadam som föreslås användas som återfyllnadsmaterial. Kornstorlekskurvan är ungefärlig.



Figur 6-2. Preliminär bedömning av hydraulisk konduktivitet för tre undre gränser på kornstorleksfördelningskurvor enligt Kennedy et al. (1984). Som referens visas exempelkurvan enligt figur 6-1 för Makadam 16-32.

6.3 Uppskattad sättning

En grov bedömning av sättning (s) för återfyllning med opackad Makadam 16-32 av mäktighet 10 m är:

$$s \cong 0,6 \text{ m}$$

Det är enligt denna litteraturstudie densitetsökning av vibrationer som är det dominerande bidraget till sättningar efter installationen. Osäkerheten i dessa data kommer sannolikt dominera över de övriga bidragen redovisade i detta dokument. De processer som här identifierats ge sättningar listas nedan tillsammans med en grovt bedömd sättning av överytan i en volym med konstant tvärsnitt över höjden.

- **Vibrationer:** Av seismisk aktivitet bedöms vibrationer innebära en densitetsökning på (högst) 5 % vilket innebär en sättning på knappt 5 % av materialvolymens höjd.
- **Krypning:** För krypning är underlaget i litteraturen litet och de referenser som hittats har utfört experiment under relativt kort tid. De resultat som erhållits indikerar att krypningen på låga spänningsnivåer (högst ett par hundra kPa) ger liten krypning på lång sikt (< 1 %). Denna siffra ska användas med försiktighet.
- **Vattenmättnings:** Sättning av vattenmättnings relateras till den initiala sättningen som kan beskrivas med kompressionsmodulen. Tillämpning av Andréassons ekvationer på Makadam 16-32 enligt figur 6-1 med rimligt antagen porositet för opackat material enligt Pusch (2008) kan en kompressionsmodul uppskattas till $M = 29 \text{ MPa}$. Med en ökning av de initiala deformationerna på 50 % och med bedömd kompressionsmodul på 20 MPa och densitet $1\,650 \text{ kg/m}^3$ erhålls en sättning som ökar med återfyllningens mäktighet. Detta kan ge sättningar i storleksordningen några promille av höjden.
- **Vattenströmning:** Med ett ensgraderat material kommer nästan samtliga korn ingå i ett lastbärande kornskelett och därmed kommer endast en mycket liten del av kornen kunna transporteras och orsaka inre erosion. Därför bedöms vattenströmning genom materialet ej orsaka sättning.

Summeras bidragen ovan erhålls en total sättning på ca 6–6.5 % av återfyllningens mäktighet. Dessa siffror ska användas med försiktighet. Få av de angivna referenserna avser experiment på makadam fraktion 16-32. Det ger orsak att genomföra ytterligare studier.

6.4 Övriga tekniska egenskaper

I detta dokument ges inte någon detaljerad beskrivning på återfyllnadsmaterialets övriga tekniska egenskaper. Med det avses krav på de enskilda kornens rundhet och hårdhet m m. Trafikverkets krav på makadamballast klass 1 för järnvägar föreslås som referenskrav tillsviare (Banverket 2004).

7 Installationsbeskrivning

I detta avsnitt beskrivs den föreslagna metoden för att fylla bergssalar och tunnlar med återfyllnads-material av makadam. För återfyllningen finns flera tänkbara alternativa lösningar. Här presenteras en installationsmetod som utnyttjar en kombination av transportfordon, lastningsfordon och bulk-transportörer. För att utvärdera det lämpligaste alternativet bör minst följande punkter beaktas:

- Risk för skada på betongbarriärer.
- Personsäkerhet och arbetsmiljö.
- Återfyllnadstakt.
- Potentiella driftstörningar.
- Resursbehov.
- Kvalitet och kontroll.
- Ekonomi.
- Logistik.

I detta dokument utförs ingen systematisk jämförelse mellan olika alternativ med hänsyn till ovanstående punkter. Några punkter kan nämnas: skada på betongbarriärer av installationsutrustning kommer ej uppkomma då statiska och dynamiska laster av utrustningen och det fallande materialet bedöms vara försumbara jämte statisk last av helt återfylld bergssal. Dammbildning bedöms kunna utgöra en betydande arbetsmiljörisk vilken kan åtgärdas genom att hålla makadamen våt. Återfyllnadstakten bör lämpligen vara högre än den takt tunnarna fylls med grundvatten från berget i de fall pumpning vid återfyllnadsfronten ej är lämpligt. Det bör säkerställas att återfyllningstakten och de dammbildningsbegränsande åtgärderna inte i betydande omfattning motsäger varandra. Den föreslagna graderingen är duglig som underlag att gå på om det avjämnas. Hänsyn till övriga punkter har tagits i den meningen att inga uppenbara negativa effekter har identifierats för presenterad installationsmetod.



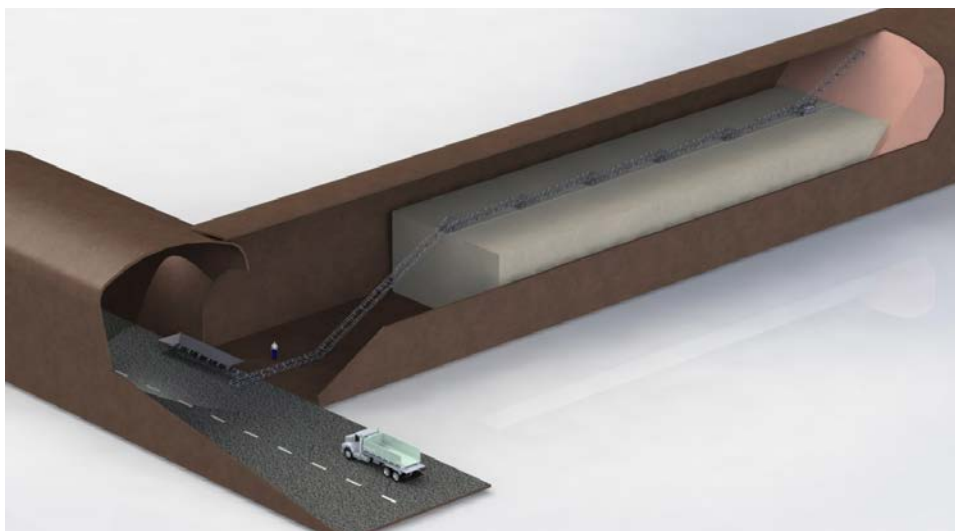
Figur 7-1. Översikt SFR, till vänster utbyggt SFR och till höger befintligt SFR.

7.1 Bergssalar

Installationen i bergssalarna kommer förmodligen att automatiseras. Materialet placeras in så att skadlig åverkan på betongbarriärerna undviks.

Bulktransportörer används i dag i ett flertal industriella tillämpningar. Bulktransportörer är relativt flexibla och en lösning kan anpassas till SFR:s bergssalar. Förutom återfyllnadsmaterialet i inlastningszonen som transporteras in via bergssalstunnlarna så transporteras allt återfyllnadsmaterial med bulktransportör via tvärtunnlarna. Då geometrin för bergssalarna är olika för befintligt SFR respektive utbyggnaden så kommer utformningen av transportbanden skilja sig åt men principen är den samma, se figur 7-2.

I tvärtunnel placeras en krossficka. Transportfordonen sidotippar direkt i fickan. Kapacitetsstyrande för återfyllnaden är leveranskapaciteten och storlek på fickan. Transportfordon med släp är inte rationellt för SFR. Lämpligen används dumperfordon. Från fickan går en transportör in till bergssalen. Transportören från fickan matar transportören som sträcker sig genom hela bergssalen. Transportören på betongbarriären går på en enkel räls som får ligga kvar under återfyllnaden. På rälsen ställs separata transportörssektioner, vilka överlappar varandra. Pålastningsändan på dessa sektioner vilar med hjul mot rälsen och avlastningsdelen vilar på fackverket uppe på nästa sektion. Transportören byggs enligt nyss nämnda beskrivning hela vägen fram till kastaren. Kastaren är en transportör som vid sin bas kan rotera runt en vertikal axel vilken är monterad på en transfervagn, figur 7-3.



Figur 7-2. Figuren visar exempel på transportbandslösning av återfyllnaden av bergssalar.



Figur 7-3. Figuren visar sista enheten på matarbandet, kastaren. Kastaren har frihetsgrader både vertikalt och horisontellt för att täcka hela frontarean.

Vid behov justeras kastaren även i höjdlid. Efterhand som kastaren återfyller salen backar den, när den backar skjuts bakomvarande sektioner ihop. När alla sektioners längd är utnyttjad plockas lämpligt antal sektioner bort och kastaren fortsätter att backa. För den avslutande återfyllnaden kan kastaren matas direkt från fickan.

Eftersom transportbanden etappvis måste kortas när återfyllnadsfronten rör sig mot tvärtunneln behöver kortare stopp under återfyllnaden göras. Transportbanden konstrueras så att systemet kan klara längdförändringar. För de bergssalar som ska återfyllas kan samma teknik och utrustning användas. Den avslutande kastarens utförande anpassas till de individuella bergasalarnas höjd mellan betongbarriär och tak.

7.2 Tunnelsystem

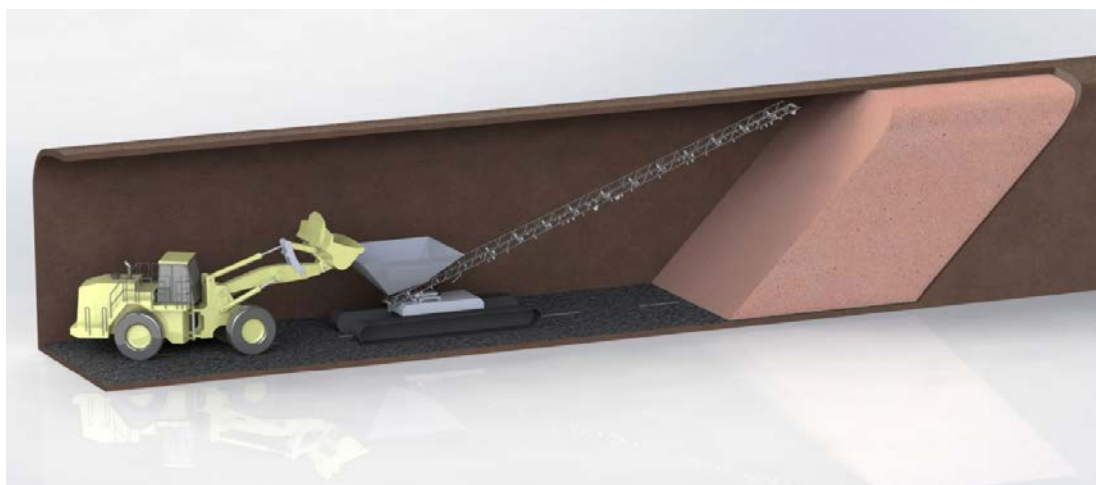
Samma typ av material som används för bergssalarna kan användas för tunnelsystem. För tunnelsystemet som ska återfyllas med makadam kan befintlig terrass och körbana ligga kvar. Tvärsnittsarean är varierande beroende vilken tunnel och sektion som ska återfyllas.

Flera alternativ för materialtransport är tänkbara. Vald lösning för detta dokument är baserad på att transportfordon tippas i anslutning till återfyllnadsfronten, d v s ingen omlastning eller mellanlager på förvarsdjup. Mellanlager har också spelat ut sin roll när nedfartstunnlarna ska återfyllas och mellanlager ska heller inte vara nödvändigt med hänsyn till återfyllnadstakten. Leveranskapaciteten bör vara beräknad något högre än återfyllnadstakten. Leveranskapaciteten måste vara flexibla för lossning åt sidor eller bakåt. Leveranskapaciteten ska kunna möta varandra i tunnlarna.

Att återfylla tunnlarna innebär tekniskt inga betydande problem. Flera tänkbara alternativ finns. Vid val av lämpligaste teknik bör man beakta, flexibilitet, potentiella produktionsstörningar, kapacitet, kvalitet, ekonomi, arbetsmiljö samt logistik. Det utbyggda SFR har många varierande utrymmen som ska återfyllas, varför flera metoder kommer att behövas. En generell metod som kan användas i huvuddelen av tunnelsystemet och en mera flexibel metod för besvärliga geometrier redovisas.

Den generella metoden är lik metoden för återfyllnad av bergssalar; ett larvburet transportband med teleskopfunktion och frihetsgrader både vertikalt och horisontellt, så att bandet kan styras mot bergväggar i sida och tak, dock med större kapacitet och storlek. Transportören byggs på ett larvburet chassi.

Transportbandens hastighet kan också styras så materialet kan ”kastats” iväg i lämplig längd. För att ytterligare öka kastlängden används ett slavband vilken medför bättre friktion mot bandet och därmed ökad kastlängd. Transportbandet förflyttar sig i samma takt som återfyllnadsfronten rör sig utåt. Transportören ställs i något flackare vinkel än rasvinkel, för att enklare kunna kasta materialet in mot tak, figur 7-4.



Figur 7-4. Bilden visar transportsystemet vid återfyllnad av tunnelsystemet.

Transportören matas av en lastmaskin direkt i lastfickan som är integrerad bak på kastaren. Transportfordonen sidotippar materialet mot ena bergsväggen i tunneln ca 20 m ifrån återfyllnadsfronten, vid möjlighet direkt i ficka. Tunneln till återfyllnadsfronten får inte blockeras av material eftersom den alltid ska vara körbar. Rivet väg- och terrassmaterial från tunnlar vilka ska fyllas med bentonit kan vara för grovt och används först och främst för de utrymmen där inte transportbanden är utförandemässigt lämpliga. Möjlighet finns dock att tippa riven vägbana direkt i släntfot vid återfyllnadsfronten.

Det som är begränsande för transportbandets kapacitet är lastmaskinen och storleken på transportbandets lastficka. Flaskhalsen riskerar att bli transporterarna med fordon. Den framtida logistikplaneringen och optimering får projekteras så transporter och återfyllnads metodik harmonierar. En jämn och kvalitativ process som harmonierar med övriga parallella processer är målet för utveckling och planering.

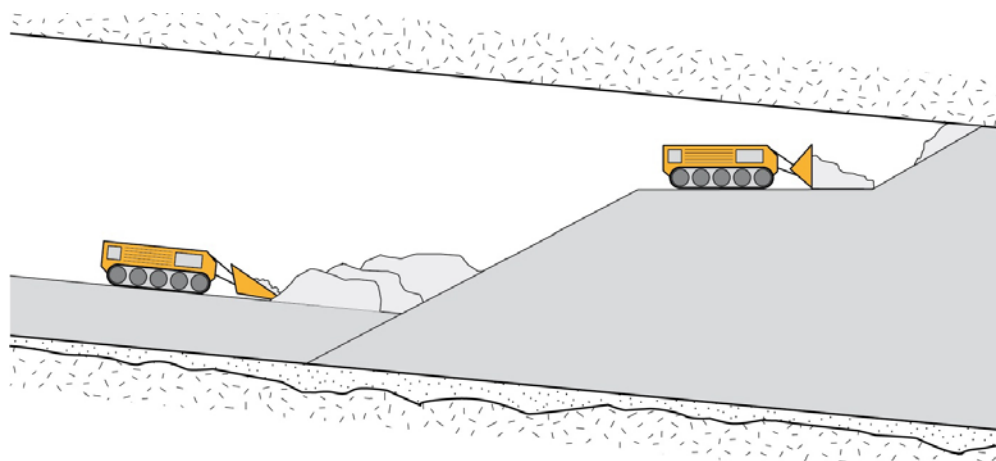
Som komplement till det larvburna transportbandet där geometrin begränsar utrustningen kan larvburna last och schaktmaskiner vara ett alternativ. Metodiken för återfyllnad med last och schaktmaskiner varierar beroende vilket utrymme som ska fyllas.

7.3 Återfyllnad av betongkulvertar, schakt och övriga konstruktioner

I SFR finns många utrymmen och konstruktioner för driften av anläggningen. Volymmässigt är det dock en ringa del jämfört mot det övriga tunnelsystemet. Betongkonstruktioner för utrymmen och kulvertar behövs inte rivas om de inte omöjliggör återfyllnad. Betongkulvertar kan sektionvis lämnas öppna (ej återfyllda), och endast rivas där pluggar ska upprättas samt där kravbilderna medför fyllnad.

Utrymmena kan vara svårtillgängliga med transportbandslösningen vilken är tänkt för tunnelsystemet generellt. För små utrymmen kan mindre transportbandsaggregat vilka bärs fram av lastmaskiner användas. För större utrymmen och mindre nischer kan larvburna last och schaktmaskiner användas, se figur 7-5.

Återfyllnaden med lastmaskin installeras i två nivåer, parallellt som återfyllnadsfronten rör sig utåt. Lastmaskinerna styrs/kontrolleras ifrån kontrollrum. Lastmaskinerna är larvburna och kan byggas låga med hänsyn till att de är förarlösa, bedömd höjd ca 2,0 m (skopan är skrymmande). Återfyllnadsmetodiken bygger på att en lastmaskin med ca 7 tons lastkapacitet (ca 4 m³) återfyller upp till två meter ifrån tak, etapp nivå 2. För att nå till etapp nivå 2 byggs återfyllnaden upp i flera terrasslager om ca 1 m. På etappnivå 2 jobbar lastmaskin 2 med något mindre och modifierad skopa och trycker lämpade högar upp mot tak i ca 30° lutning. Den andra lastmaskinen lastar upp material parallellt där utrymme finns annars får lastmaskinerna gå omlott med varandra.



Figur 7-5. Figuren visar en principbild för två lastmaskiner vilka återfyller utrymme där den generella återfyllnadsmetodiken inte är lämplig.

7.4 Kontroller av installationen

I tabell 7-1 ges exempel på identifierade kontroller som bör utföras och varför de är viktiga.

Innan återfyllnad av tunnlar, bergssalar och dylikt utförs ska volymen bestämmas. Med dagens teknik kan detta utföras med laserscanning. Denna scanning används som referens. Referensscanningen ger hela tunnelns geometri och kan bli underlag till en detaljerad volymberäkning. Utvecklingen är snabb på detta område och teknisk lösning för volymberäkning och kontroll är svår att prediktera, men det finns applicerbar teknik i dag och är ingen stor fråga för förslutningsprocessen. Exempel för kontroll: Bergets kontur fungerar som referens vid kontroll av återfyllnaden. Innan installation av återfyllnadsmaterial startas anges tillåtna intervall för mätvärden definieras i kontrollprogrammet. Installerad mängd vägs i samband med installation av återfyllning. Återfyllnadsfronten scannas regelbundet för kontroll mot den i förväg uträknade teoretiska mängden återfyllnadsmaterial. Om installerad mängd avviker från tillåtet intervall larmar systemet. Systemet larmar även om avståndet mellan återfyllnad och tak överstiger gränsvärde. Vid larm kan installationen avbrytas för åtgärder.

Tabell 7-1. Förslag på kontroller och syftet med kontrollerna.

| Kontroll | Syfte |
|-------------------|--|
| Utrymmets volym | Avser det utrymme som ska återfyllas. Ger underlag till beräkning av installerad volym. |
| Installerad vikt | Underlag till beräkning av medeldensitet. |
| Installerad volym | Underlag till beräkning av medeldensitet. |
| Medeldensitet | Säkerställa att avsedd densitet erhålls. För hög densitet kan innebära att avsedd hydraulisk konduktivitet ej uppnås. För hög eller låg densitet kan även innebära att installationen misslyckats på andra sätt. |
| Spalt vid tak | En för stor spalt i taket innebär att fallande bergblock erhåller för hög energi och kan leda till skador på avfallets barriärer och därmed till oönskad spridning av nuklider. |

8 Behov av vidare utredning

Kemisk nedbrytning av återfyllnadsmaterialet som potentiellt kan orsaka sättning och minskad hydraulisk konduktivitet är ej utrett.

Tillväxt av bakterier i materialets porer som potentiellt kan minska den hydrauliska konduktiviteten har ej utretts. Det antas att detta är en process som måste utredas vidare för att bedöma den hydrauliska konduktiviteten på lång sikt.

Tester bör utföras på ett referensmaterial där mer tillförlitliga uppgifter om sättningsegenskaper och hydraulisk konduktivitet kan styrkas. I arbetet med detta dokument bedöms vibrationer ge det dominerande bidraget till makadamens sättning. På lång sikt kan eventuell seismisk aktivitet orsaka sättning i makadamen. Om höjden på den spalt som vid sättning bildas vid taket är kritisk bör en bedömning av framtida seismisk aktivitet och vibrationer som uppkommer av detta användas för att förutspå återfyllnadsmaterialets sättning.

Det valda materialet är ensgraderat. Detta innebär att en del av grundmaterialet (sprängsten) inte kommer gå att utnyttjas då det får fel kornstorlek vid bearbetning. Om en högre utnyttjandegrad av grundmaterialet önskas kan det utredas om även andra fraktioner kan användas som återfyllnadsmaterial.

Hantering av inkommande vatten med hänsyn till installationsordning och installationsmetod bör utredas. I Carlsson och Christiansson (2007) redovisas mätvärden för inläckande vatten i den befintliga anläggningen.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer.

Alva-Hurtado J E, McMahon D R, Stewart H E, 1981. Apparatus and techniques for static triaxial testing of ballast. In Yong R N, Townsend F C (eds). Laboratory shear strength of soil. Philadelphia: American Society for Testing and Materials. (ASTM Special Technical Publication 740), 94–113.

Andréasson L, 1971. Friktionsjordars kompressibilitet, Byggmästaren 4 1971, 4–7.

Andréasson L, 1973. Kompressibilitet hos friktionsjord: laboratoriestudium. Doktorsavh. Institutionen för geoteknik med grundläggning, Chalmers tekniska högskola.

Avén S, 1984. Handboken Bygg. G, Geoteknik. Stockholm: Liber.

Banverket, 2004. BVS 585.52: Makadamballast för järnväg. Borlänge: Banverket, Trafikverket.

Carlsson A, Christiansson R, 2007. Construction experiences from underground works at Forsmark. Compilation report. SKB R-07-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Carrier W D, 2003. Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 129, 1054–1056.

Das B M, 2008. Advanced soil mechanics. 3. utg. New York: Taylor & Francis.

Ferreira J T, Ritzi R W, Dominic D F, 2010. Measuring the permeability of open-framework gravel. Ground Water 48, 593–597.

Goltermann P, Johansen V, Palbøl L, 1997. Packing of aggregates: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix. ACI Materials Journal 94, 435–443.

Holmén J G, Stigsson M, 2001. Modelling of future hydrogeological conditions at SFR. SKB R-01-02, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Indraratna B, Ionescu D, Christie D, Chowdhury R, 1997. Compression and degradation of railway ballast under one-dimensional loading. Australian Geomechanics Journal, December 1997, 48–61.

Kennedy T C, Lau D, 1985. Internal stability of granular filters. Canadian Geotechnical Journal 22, 215–225.

Kennedy T C, Lau D, Ofoegbu G I, 1984. Permeability of compacted granular materials. Canadian Geotechnical Journal, volume 21, 726–729.

Kudou A, Nishigaki M, Torii T, Asada S, 2005. A new concept for rockfill dams – protecting the surrounding environment. In Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, Japan, 12–16 September 2005. Rotterdam: Millpress, 2399–2402.

Larsson R, 2008. Jords egenskaper. 5. utg. Linköping: Statens geotekniska institut.

Lindblom U, 1973. Kompressionsegenskaper hos traktorutbredda sprängstensfyllningar: sättningar hos grundplattor. Rapport R12:1973, Statens institut för byggnadsforskning.

Oldecop L A, Alonso E E, 2007. Theoretical investigation of the time-dependent behaviour of rockfill. Géotechnique 57, 289–301.

Potvin Y, Thomas E, Fourie A, 2005. Handbook on mine fill. Nedlands WA: Australian Centre for Geomechanics.

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, 2008. Safety analysis SFR 1. Long-term safety. SKB R-08-130, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Terzaghi K, Peck R B, Mesri G, 1996. Soil mechanics in engineering practice. 3. utg. New York: Wiley.

Vägverket, 1984. DDa Bygg-data 1984. Borlänge: Statens vägverk.