

INTRÄNGNINGSFÖRMÅGA HOS CEMENTBASERADE INJEKTERINGSMEDEL

Daniel Eklund

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

INTRÄNGNINGSFÖRMÅGA HOS CEMENTBASERADE INJEKTERINGSMEDEL

**Penetrability due to filtration tendency
of cement based grouts**

Daniel Eklund, Vattenfall Utveckling AB

Stockholm 2006
ISSN 1104 - 1773
ISRN SVEBEFO-R--73--SE

FÖRORD

Under flera år har forskning pågått för att öka kunskan om de mekanismer som styr injekteringsförloppet vid tätning av bergtunnlar. Det har gällt karakterisering av bergsprickor och sprickmönster, undersökning av injekteringsmaterialens flödeskaraktäristik (reologi) och modeller för att simulera olika injekteringssituationer. Det har gjorts teoretisk utveckling, laboratorieförsök och fältförsök för att verifiera modeller. Med allt högre krav på tätningseffekten har det visat sig att cementbaserade injekteringsmaterial inte alltid klarar att tränga in i de fina sprickor som måste tätas, inte heller de extra finmalda cementsorter som tagits fram för detta ändamål (injekteringscement, mikrocement).

Projektet ”Inträngningsförmåga hos cementbaserade injekteringsmedel” har särskilt studerat filtreringseffekter vid materialets inträngning i tunna spalter, inledningsvis med inerta material och därefter med cementbaserade material. Projektet har drivits som ett doktorsarbete vid KTH av Daniel Eklund vid Vattenfall Utveckling AB, under vetenskaplig handledning av Håkan Stille och Jan Alemo. Doktorsavhandlingen har publicerats sommaren 2005 och här presenteras en svenskspråkig sammanfattning av de väsentligaste delarna av forskningsarbetet för att sprida informationen till en bredare krets av läsare. Arbetet har också presenterats som föredrag vid Bergmekanikdagen 2006.

Projektet har genomförts inom SveBeFos ramprogram och med stöd av Elforsk, SKB, Cementa och Vattenfall Utveckling. En referensgrupp har följt arbetet och givit värdefullt stöd, bestående av Lars Hammar, Elforsk, Magnus Eriksson, KTH, Ann Emmelin, SKB, Sten-Åke Pettersson, Atlas Copco, Staffan Hjertström och Erik Viggh, Cementa, Tommy Ellison, Besab samt undertecknad.

Stockholm i mars 2006

Tomas Franzén

SAMMANFATTNING

Injektering är en metod för att förstärka och täta berg, betong och andra porösa material. Metoden används i stor utsträckning. Möjligheter att täta konstruktioner är av stor vikt för både ekonomi och miljö. Kostnaderna för injektering har för vissa tunnelbyggen varit lika höga som för sprängning och utforslingen av berg. För att förbättra tekniken med cementbaserad injektering, är det troligen nödvändigt att fokusera på cementblandningens egenskaper. Injekteringsbrukets inträngningsförmåga i håligheter, sprickor och porösa material, beror på två egenskaper, reologi och dess filtreringsbenägenhet (pluggbildning). Omfattande laboratorietester på bruk med lågt vct, visar en signifikant begränsning av inträngningsförmågan beroende på att cementkornen klumpar sig samman till en ogenomtränglig plugg (filterkaka). Egenskaperna för injekteringsbruket vilka styr pluggbildning i dess flödesväg och därmed förhindrar fortsatt inträngning av injekteringsbruket kallas här för filtreringsbenägenhet. Blandningar med inert- och cementbaserat material har använts i den här undersökningen. Det inerta materialet är mald kalksten, även kallad Myanit. Myanit reagerar inte med vatten (inert material). De cementbaserade injekteringsbruket kommer från tre olika typer av kommersiellt tillgängliga Portlandcement, samt fyra Portlandcement vilka har modifierade kornkurvor.

Utförda prover visar att kornstorlek, kornkurva samt kornkoncentration har en betydande roll för filtreringsbenägenheten. Enligt utförda tester med inert och cementbaserade blandningar, i syfte att erhålla en god inträngningsförmåga, bör blandningen ha en kornkurva innehållande varken stor andel fina eller grova korn, samt en relativt brant kornkurva. Max kornstorlek är viktig uttryckt som d_{95} . För stora kornstorlekar kommer förhindra genomflöde och skapa pluggbildning. Enligt utförda tester skall värdet d_{95} , vara mellan 4-10 gånger mindre än den apertur som skall injekteras. Mängden små korn är av stor vikt för att uppnå en låg filtreringsbenägenhet hos injekteringsbruket. Detta beror på en ökande tendens för mindre korn att flocka sig till större klumpar, jämfört med större korn. Låg koncentration av korn (t.ex. högt vct) medför generellt lägre filtreringsbenägenhet. Låg kornkoncentration i det injekterade bruket medför dock sämre beständighet (hårdnat tillstånd), jämfört ett bruk med lägre vct.

Filtreringsexperimenten med cementbaserat injekteringsbruk visar att inverkan av parametrar som ytkemi (användande av tillsatsmedel) och cementets kemiska egenskaper (hydratisering av cementkornen) har en stor effekt på filtreringsbenägenheten av bruket.

För att åskådliggöra filtreringsbenägenheten kan denna undersökas i en större skala än vad som sker i verkligheten. Filtreringsexperiment i en skala på ungefär 100:1 har utförts för att se hur kornkoncentration, kornstorlek och kornform inverkar på pluggbildning vid ingången till en spricka. Man kan ur dessa experiment se att kornstorleken inte skall vara större än 2-3 gånger mindre än sprickaperturen, för att förhindra pluggbildning. Detta gäller vid användande av monodispers blandning (alla korn har samma storlek) samt inerta korn.

Numeriska experiment på filtreringsbenägenhet har också utförts för att undersöka möjligheterna att teoretiskt simulera inverkan av kornkoncentration och sprickapertur. De numeriska experimenten är baserade på Eulersk flödesmodellering.

SUMMARY

Grouting as a method for strengthening and sealing rock, soil and concrete is widely used. The possibilities of sealing structures are of great importance from both an economical and environmental point of view. The cost of grouting has in certain projects been as high as the cost for the blasting and excavation of the tunnel. To improve the technique for grouting with cement based material, it is necessary to focus on the properties of the used grout mixture. The ability of a grout to penetrate cavities, channels and porous material, the penetrability, depends on two things, the rheology and the filtration tendency. Extensive laboratory tests on stable, low w/c-ratio, injection grouts show that the most significant limitation to their penetrability is the tendency of cement grains to agglomerate into an impermeable filter cake. The properties of a grout that may prevent passing obstructions in the flow path without the cement grains clogging and preventing further penetration is in this work called filtration tendency. An inert material mixture and a cement-based mixture are used for the investigations in this work. The inert material, which is crushed dolomite stone, does not react with the added water in the mixture. The used cement grouts are based upon three types of commercially available Portland cements and four Portland cements with modified grain size distribution curves.

Performed tests show that the grain size and grain size distribution are of great importance for the filtration tendency. According to performed experiments with inert and cement material, it seems to be advantageous for the penetrability to have a grain size distribution that contains neither too many fine or coarse grains. It is reasonable to believe that the grain size distribution should be relatively steep (narrow grain size range) between minimum and maximum grain size. The maximum grain size is of importance in terms of for example d_{95} . Too large maximum grain size will prevent penetration of the mixture through obstructions in the flow path. According to performed tests, the value of d_{95} , should be between 4-10 times smaller than the aperture to be penetrated by the cement based mixture. The small grain sizes are also of importance in order to achieve a low filtration tendency of the grout. This is because of the increased tendency for the small grains to flocculate into larger agglomerates, compared to larger grain sizes.

The filtration experiments with cement based grouts show that influences of parameters like surface chemistry (use of superplasticisers) and cement chemistry (hydration of cement grains) will strongly affect the filtration tendency of the mixture.

To visualize the phenomenon of filtration tendency it can be investigated on a larger scale than usually takes place. Filtration experiments in the scale of approximately 100:1 have been performed in order to see influences of grain concentration, grain shape and the penetrated slot aperture. It can be seen that used grain sizes (monodisperse and inert mixture) should be approximately at least 2-3 times smaller than the aperture to be penetrated by the mixture. Numerical experiments of filtration tendency have also been performed to investigate the possibilities to numerically simulate the influence of grain concentration and slot aperture. The numerical experiments are based on Eulerian flow modelling.

Innehållsförteckning

FÖRORD	I
1 INTRODUKTION	1
ALLMÄNT	1
2 BERGSPRICKOR	3
ALLMÄNT	3
SLUTSATSER	4
3 INTRÄNGNINGSFÖRMÅGA	5
ALLMÄNT	5
FILTRERINGSBENÄGENHET	6
FLERFASFLÖDE	8
4 CEMENTBASERADE INJEKTERINGSMEDEL	9
ALLMÄNT	9
5 UTFÖRDA FILTRERINGSFÖRSÖK	9
ALLMÄNT	9
EXPERIMENT I STÖRRE SKALA	11
6 RESULTATANALYS	12
ALLMÄNT	12
SLUTSATSER	14
7. REFERENSLISTA	17
LITTERATUR	17
STANDARDER	19

1 INTRODUKTION

Allmänt

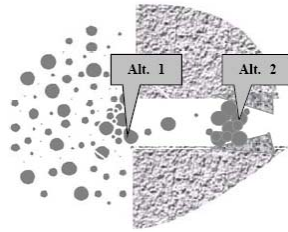
Injektering är en mycket vanlig metod för bergtätning samt reparationsmetod för betongkonstruktioner. Som ett första steg i injekteringsprocessen borrar hål i berg/betongmassan för att möjliggöra injektering i sprickorna. En översiktlig sammanställning över olika injekteringsmetoder har utförts av Houlsby (1990). Injektering är generellt av stor betydelse ur både ekonomisk och miljösynpunkt (Palmqvist K, 1983). Som exempel kan nämnas att kraven på inläckage i tunnlar både påverkar tunnelmiljön (isbildning, korrosionsproblem mm.) samt omgivande miljö (sättningar på bebyggelse mm.). Kraven på injekteringen kan grovt indelas i två delar, en som berör korttidsegenskaper (t.ex. hydraulisk uppspräckning och urspolning av injekteringsmedel från borrhålet). De långsiktiga kraven berör främst den långsiktiga beständigheten av injekteringsmedlet. För att uppfylla kraven på beständighet bör vattenseparation under härdning, härdningstid samt injekteringsmedlets lösbarhet i den omgivande miljön beaktas. Självklart skall även injekteringsmedlet uppvisa en god inträngningsförmåga. Mer om krav i samband med injektering finns att läsa i Nonveiller (1989) samt Dalmalm (2004).



Figur 1.1, Beskrivning av nödvändiga egenskaper för att erhålla ett gott injekteringsresultat.

Med injektering avses i detta arbete den process där flytande material flödar in i sprickor i berg- eller betongkonstruktioner. Inträngningsförmåga är en sammanfattande term för injekteringsmedlets förmåga att passera sprickor och förträngningar i sprickor. Den begränsande faktorn kan vara injekteringsmedlets reologi eller filtreringsbenägenhet.

Med injekteringsmedlets filtreringsbenägenhet avses den egenskap som styr att kornen bildar plugg i en spricka eller vid ingången till denna, se figur 1.2.



Figur 1.2, Figuren visar pluggbildning vid ingången till sprickan (Alt 1) samt vid en förträngning av sprickan (Alt 2). Hansson (1994).

Borrmotoden vid injektering har även visat sig vara av intresse. Den metod som vanligen används idag är hammarborrning. Utformning av borrhålskrona och borrhålsstång samt korsningen mellan borrhål och sprickplan är av betydelse för injekteringsbrukets inträngningsförmåga. Närmare beskrivning av injekterings- och borrhålsutrustning, se Pettersson (1999).

För att uppfylla de hårdnade kraven på inläckage i tunnlar behöver sprickaperturer på ned till ca 50 µm tätas. Detta för att uppfylla inläckagekrav under bebyggda områden på mellan 1-4 l/ min/ 100 m tunnel. Det är i dagsläget möjligt att via modern förinjekteringsteknik uppnå ett inläckage motsvarande en permeabilitet på ca 10^{-6} m/s (Emmelin et al 2004). Möjligheterna till att sedan kraftigt reducera inläckaget med hjälp av efterinjektering är generellt sett små. Slutsatsen är därmed att uppsatta krav på inläckage i tunneln bör uppfyllas med hjälp av förinjektering. Kostnaden för injektering har i vissa tunnelprojekt uppgått till samma kostnad som för sprängning och utlastning av bergmassorna. För att förbättra den cementbaserade förinjekteringstekniken är det nödvändigt att fokusera på injekteringsmedlets egenskaper (reologi och filtreringsbenägenhet).

Vanliga typer av betongkonstruktioner vilka repareras via injektering är vattenkraftskonstruktioner (dammar, kraftverksbyggnader). Sprickor i betongkonstruktioner uppkommer vanligen på grund av för stor värmeutveckling under den unga betongens härdning. Urlakning av cementpastan i betongen förekommer även relativt ofta bland äldre betongkonstruktioner inom vattenkraften. Båda dessa typer av reparationer utförs oftast mha av cementbaserad injektering.

Injekteringsmedel kan baseras på kemiska lösningar som t.ex. alkali-silikat hydrater, epoxy, polyuretaner, alternativt kan det baseras på cement eller andra mineralbaserade bindemedel. Denna indelning av de kemiska injekteringsmedlen är grov, då deras enda gemensamma nämnare är att de alla är lösningar. Jämförelsevis kan nämnas att de cementbaserade injekteringsmedlen består av korn av varierande storlek, suspenderade i vatten.

Båda typerna har sina för och nackdelar. Den huvudsakliga fördelen med de cementbaserade medlen är deras låga kostnad, kompatibilitet med omgivande material samt kända långtidsegenskaper. Den huvudsakliga fördelen med de kemiska injekteringsmedlen är deras goda inträngningsförmåga jämfört med de cementbaserade medlen.

En sammanfattning över olika författares syn på den injekterbara sprickaperturen kan återfinnas Brantberger et al (1998). Bergman (1970) angav att en sprickapertur är injekterbar om sprickaperturen är 3ggr större än d_{95} för använt injekteringscement.

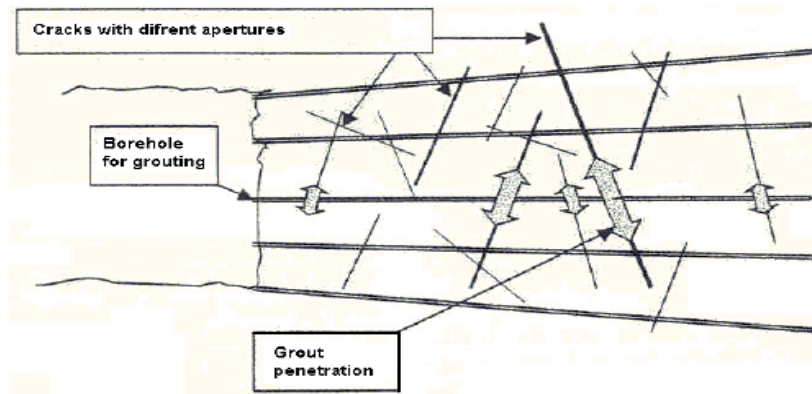
2 BERGSPRICKOR

Allmänt

Hårt berg kan beskrivas som ett system med sprickor och försvagningar i bergmassan. Sprickor och försvagningar kan bero på tektoniska, termiska, petrologiska förlopp och högt vattentryck. Det finns olika typer av sprickor, vattenförande sprickor täta sprickor, sprickor med olika ledningsförmågor genom olika förträngningar mm. Från en ingenjörssynvinkel är det väldigt viktigt att kunna katalogisera sprickornas antal och riktning för ett lyckat injekteringsresultat.

I en bergskonstruktion finns diskontinuiteter som kan beskrivas för sig eller som ett system. Vattenflöden i sprickor är generellt ett problem när man driver en tunnel eller vid byggande av andra underjordiska byggnader. Metoder för att beskriva sprickor eller spricksystem har presenterats av flera forskare se exempelvis (Fransson 1999). Det finns huvudsakligen två tillvägagångssätt, kontinuum- samt diskretmodellering. Kontinuum modellen beskriver homogena och porösa material, där porerna är sammanlänkade med varandra. Kontinuum modellens beskrivning av sprickförekomst samt konfigurationen av dessa är generellt sätt begränsad. Volymen av berg eller betong som behövs för kontinuum modellen är relativt stor, mellan 100-1000 m³, även om mängden sprickor är hög (~10 st/m). Detta i syfte att väl beskriva inträngningsförmågan i berg- eller betongmassan.

Diskret modellering försöker att inkludera varje viktig spricka medförmåga att föra bruket vidare i volymen. Sprickor i diskret modellering är definierad med ett nummer för sprickans karakteristiska egenskaper (Dershowitz och Doe 1997). För att kunna förutse inträngningen för en volym av injekteringsbruk så är diskret modellering av sprickor troligen att föredra. Kanalnätverk är en typ av diskret modellering av sprickor som flera har använt sig av för olika applikationer. Hässler (1991), Gylling (1997), och Eriksson (2003) använde sig av den här modellen för att förutsäga spridning av injekteringsbruk.



Figur 2.1, Beskrivning av hur injekteringsbruk sprider sig i en bergstruktur (Gustavson 2004).

Slutsatser

Baserat på litteraturstudier har följande faktorer framkommit som några av de mest betydelsefulla för injekteringsbrukets inträngningsförmåga i sprickor.

- Storleken på sprickorna är av högsta betydelse för inträngningen av injekteringsbruk i sprickor.
- Sprickmönstret är svårt att kartlägga i berg eller betongkonstruktioner. En uppskattning av sprickor och sprickaperturer kan utföras med hjälp av vattenförlustmätning.
- Sprickvidden kan variera mycket utmed sprickplanet, detta resulterar i att huvudflödet går genom ett fåtal sprickor. Stora delar av sprickplanet kan vara tät, dessa delar benämns som kontaktytor.
- Det är viktigt att studera varför sprickorna har uppkommit i berg- eller betongstrukturer för att kunna reparera sprickorna på rätt sätt. Detta inkluderar även val av material, utrustning och injekteringsmetod.
- Läget och fördelningen av stora och mindre sprickor bör lokaliseras för att kunna upprätta en plan för injektering.
- För att få en representativ mätning av den hydrauliska konduktiviteten bör en stor massa berg eller betong inkluderas i mätningen. Den hydrauliska konduktiviteten kan översättas till en hydraulisk apertur om antalet sprickor är känt.

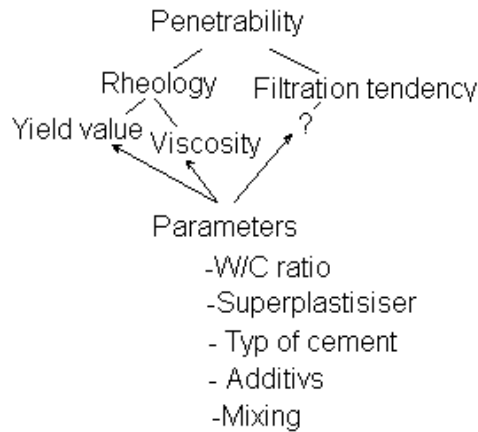
3 INTRÄNGNINGSFÖRMÅGA

Allmänt

Inträngningsförmågan på färskt injekteringsbruk kan indelas i två delar, en som rör de reologiska delarna (flödesegenskaper) och den andra som rör filtreringsbenägenheten (pluggbildning). Båda delarna måste optimeras för att få en god inträngning av injekteringsbruket. Med injekteringsbrukets filtreringsbenägenhet avses som tidigare nämnts den egenskap vilken medför att en plugg av korn bildas över öppningen till sprickan eller vid en förträngning av denna.

Inträngningsförmågan av det färska injekteringsbruket kan ses som en av de absolut viktigaste egenskaperna för ett lyckat injekteringsresultat. Ett bra injekteringsresultat medför en åldringsbeständig fyllning av det geometriska hålrummet. Beständigheten av det härdade injekteringsbruket ökar generellt genom att använda ett så lågt vct som möjligt (Hansson 1998). Lägsta möjliga vct varierar beroende på injekteringsbrukets egenskaper och ändamål (kornstorlek, kornfördelning i torrcement, tillsatsmedel och sprickans storlek och utseende). Vanligtvis med användande av mikrocement kan vct variera mellan 0,7 till 1,5 och ändå bibehålla sina goda egenskaper (begränsad vattenseparation). Utförda laboratorieexperiment (Alemo, 1988) visar att en ökning av vct från 0,3 till 0,5 kan öka urlakningen av cementpastan med upptill 90 %. Inträngningsförmågan hos injekteringsbruk med relativt höga kornkoncentrationer (motsvarande vct 0,7-1,5), kan inte enbart beskrivas med hjälp av en reologisk modell. Detta på grund av att cementkornen mer eller mindre är i ständig kontakt med varandra. Injekteringsbruk med lågt vct medför att korntätheten nästan är lika stor som i torrcement. Detta kan illustreras i en blandning med vct 0,8 vilken har ungefär samma kornpackningsgrad som torrcement.

För att få en god inträngning av injekteringsbruket är det nödvändigt att optimera brukets reologi och filtreringsbenägenhet. Bristande kunskaper om de egenskaper vilka styr filtreringsbenägenheten hos cementbaserad injekteringsbruk, är bakgrunden till detta projekt. En metod för att bestämma inträngningsförmåga av injekteringsbruk med avseende på dess filtreringsbenägenhet har utvecklats i projektet. Provningsen är utförd på färskt injekteringsbruk där olika egenskapers inverkan på inträngningsförmågan har studerats, se figur 3.1.



Figur 3.1, Inverkan av olika egenskaper på injekteringsbrukets inträngningsförmåga. Parameter för att mäta filtreringsbenägenhet, är i dagsläget ej fullständigt klarlagd.

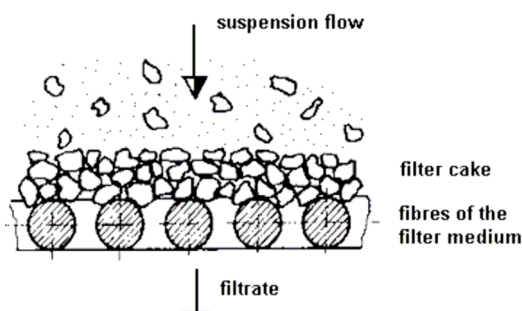
Filtreringsbenägenhet

När man studerar filtreringsbenägenhet för injekteringsbruk finns vanligtvis två angreppssätt, det gamla och nya. Det gamla anger att man skall använda en tunn instabil blandning (betydande vattenseparation), som efter transport i sprickplanet blir alltmer urvattnad och skapar på så sätt en plugg vid någon förträngning längs sprickplanet. Det nyare angreppssättet förespråkar att använda en stabil blandning (begränsad vattenseparation) från början.

Metoden med att urvattna injekteringsbruket för att på så sätt skapa en förseglingsplugg är inte acceptabel på grund av att det är svårt att förutsäga var pluggbildningen sker. Om förseglingen enbart består av en enskild pluggbildning och resten av sprickutrymmet är tomt eller dåligt injekterat (fyllt), räcker det med små rörelser i berg- eller betongkonstruktionen innan genomsippning sker genom förseglingspluggen. Den här gamla metoden är något av en paradox eftersom bruk med högre vct är svårare att urvattna än ett mer stabilt bruk (Hansson 1995). Meningen med urvattning är att skapa en pluggbildning. Pluggbildning förekommer mer sällsynt med högre vct jämfört med en blandning av lägre vct, vilket tidigare har visats av (Eriksson, 2002).

När man injekterar tunna sprickor bör man beakta att cement innehåller fasta korn som kan tilltäppa sprickaperturer vilka är 3 till 10 gånger större än kornens max storlek (d_{95}), även om bruket är initieellt ordentligt dispergerat i en effektiv blandare.

För andra industriella maskiner med filtreringsfunktion, brukar man vanligtvis beskriva två typer av filtreringsfenomen, "cake filtration" och "deep bed filtration" (Svarovsky, 1985). Principen vid uppkomst av filtreringskaka är att fasta partiklar i injekteringsbruket filtreras från vätskan igenom ett tunt filter. Det filtrerade materialet bygger upp ett grövre och tjockare lager, där det efter en stund utbildas ett eget filter. Detta filter kommer efter fortsatt filtrering medföra att en ogenomtränglig plugg utbildas.



Figur 3.2, "Cake filtration" av cementbaserat injekteringsbruk (Svarovsky, 1985).

"Deep bed filtration" är en gradvis filtreringsprocess i ett poröst medium, det kan ses som massor av små filterkakor. "Deep bed filtration" kan jämföras med injekteringsbruk som gradvis filtreras i sprickor i ett poröst material exempelvis jord. (Svarovsky, 1985).

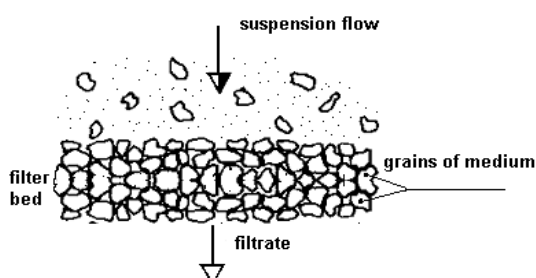


Figure 3.3, "Deep bed filtration" av cementbaserat injekteringsbruk (Svarovsky, 1985).

Denna studie omfattar enbart inträngningsförmåga av cementbaserat injekteringsbruk i laboratoriemiljö. I det här projektet är det bruk med låga vct och därmed liten vattenseparation (mindre än 5 %) som studerats. Olika filtreringstester kan utföras med exempelvis filterpump (SS-EN 14497), tryckbehållare (VU:SC 48) sand kolonn test och sprickinjektering i konstgjorda sprickor.

Filtreringsbenägenheten för injekteringsbruk är som ovan nämnts beroende på blandningens alla egenskaper samt kombinationer av dessa, inte enbart på enskilda egenskaper som kornstorlek eller specifik kornyta.

I grova drag kan man konstatera att vissa parametrar har större betydelse för injekteringsbrukets filtreringsbenägenhet än andra. Tidigare utvärderingar baserade på andra uppdrag åt Vattenfall Utveckling AB, påvisar att inverkan av dessa parametrar kan beskrivas som tabellen nedan.

Tabell 3.1, Parametrar som inverkar på filtreringsbenägenheten (Hansson, 1995)

Parametrar	Inverkan på Filtreringsbenägenhet
Öka vct	Lägre
Tillsätta flytmedel	Lägre
Tillsätta stabiliseringsmedel	Högre
Tillsätta svällningsmedel	Högre
Tillsätta Accelerator	Högre
Begränsa kornstorleksfördelning	Lägre
Effektiv blandare	Lägre

Lägre filtreringsbenägenhet innebär att en större mängd av blandningen kommer att passera filtret (nät eller spalt) i testutrustningen. Högre filtreringsbenägenhet avser det motsatta.

Flerfasflöde

Grundidén är att med hjälp av teori samt verktyg för analys av flerfasflöde, förutsäga pluggbildning i injekteringsprocessen. Teoretiskt och matematiskt angreppssätt för flerfasflöde på bruk med lågt vct är generellt svårt och komplicerat. Därför har numeriska metoder utnyttjats för att lösa uppsatta ekvationer. Vanligtvis i ekvationerna regleras det simulerade flödet i modellen av koncentrationsförändringar i blandningen, vilket i sin tur medför formulering och lösning av ett antal differentialekvationer. Dessa typer av beräkningar benämns vanligen CFD (Computational Fluid Dynamics).

Studier av olika typer av flerfasflödesmodeller är kanske ett sätt att studera pluggformationer i täta kornblandningar. Flerfasflöde kan delas upp i flera grupper av olika applikationer beroende på flödets natur. För att studera filtreringsbenägenheten på injekteringsbruk är det lämpligt att studera ett fasflöde som beskriver samverkan mellan den solida- (korn) samt vätske fasen (vatten).

Olika reologiska modeller är tillgängliga för att förutse strömningsegenskaperna på injekteringsbruket. Den vanligaste modellen är Bingham modellen. Bingham modellen beskriver blandningens flytgräns och viskositet. Blandnings flytgräns och viskositet används därefter i CFD beräkningarna som indata för använt injekteringsbruk.

Flytgränsens värde är enligt många forskare (Eriksson 2002, Hässler 1991 etc.) den viktigaste parametern för att förutsäga inträngningsförmågan på färskt injekteringsbruk. Viskositeten är huvudsakligen ett flödestal (flödeshastighet) på injekteringsbruket under injekteringsprocessen (Håkansson 1993, Schwarz 1997).

4 CEMENTBASERADE INJEKTERINGSMEDEL

Allmänt

Cement är sammansatt av en mängd mineraler som vid kontakt med vatten börjar reagera med detta (hydratisera) och bildar en hård hållfast massa. De kemiska reaktioner som är av intresse för filtreringsbenägenheten uppträder under den första timmen efter blandning. Gipsreaktionen är en av de mest dominanta reaktionerna i nyblandat injekteringsbruk. Gipsreaktioner bedöms ha stor betydelse för filtreringsbenägenheten (Fjällberg, 2003). Andra reaktioner som sker under ett tidigt stadium är aluminat och silikat reaktioner, vilka har effekt på bindetiden av injekteringsbruket. Tillsatsmedel som retardatorer och acceleratorer har också inverkan på bindetiden. Vct är alltså troligen den mest överskuggande parametern för injekteringsbrukets bindningstid.

Ytkemins egenskaper är av stor vikt för att förhindra flockbildning (ihopklumpning) av kornen i blandningen. Det är viktigt att undvika flockbildning för att på så sätt få en så låg filtreringsbenägenhet som möjligt. Ett vanligt sätt att uppnå en god dispergering i blandaren är att tillsätta superplasticerare (flytmedel) i injekteringsbruket. Det finns huvudsakligen två stycken typer av superplasticerare, elektrostatiska och steriska. Experiment från (Fjällberg 2003) visar att steriska tillsatsmedel är mest effektiva för att få ett bra injekteringsbruk med god inträngningsförmåga.

Jonnehållet i det mixade vattnet är av betydelse för de reologiska egenskaperna, förmodligen också för filtreringsbenägenheten. Det finns idéer om att sänkt jonhalt är associerat med bättre inträngningsförmåga. (Yang et al, 1997). Eventuellt skadliga joner i blandningen kan neutraliseras med en tillsats av komplexbildare, beroende på typ av jon som anses försämra inträngningsförmågan

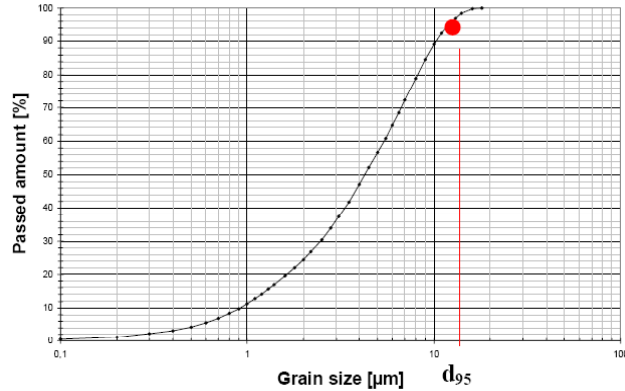
5 UTFÖRDA FILTRERINGSFÖRSÖK

Allmänt

Injekteringsbrukets egenskaper samt samverkan mellan dessa, vilka styr brukets filtreringsbenägenhet beskriver ett komplicerat samband. Studien har därför utförts genom "trial and error", i den mening att nya och komplementärare prover behövde utföras och provas baserat på resultat av tidigare tester. Det övergripande syftet var att utforska huruvida filtreringsbenägenheten påverkas av olika parametrar och hur dessa samverkar med varandra. Den här sortens tillvägagångssätt (trial and error) har i sin tur medfört att ett omfattande provningsprogram har framtagits för att kontrollera och kombinera så många parametrar som möjligt.

De första testerna utfördes på ett inert material för att titta på filtreringsbenägenheten, utan inverkan från cementens reaktiva (kemiska) egenskaper. Tester på cementinjekteringsbruk utfördes sedan på både standard Portlandcement och specialframställda cementsorter (även dessa baserade på Portlandcement)

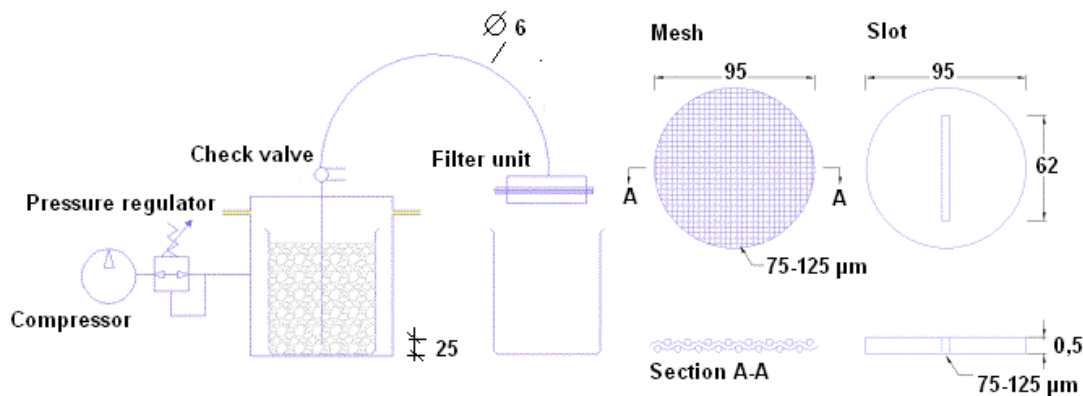
Kornstorleksfördelningen i torrceMENT är av stor vikt för filtreringsbenägenheten av blandningen. Det finns olika sätt att indirekt eller direkt beskriva fördelningen av kornstorlekar. Ett vanligt sätt att beskriva korninnehållet i torrceMENT med värdet d_{95} som motsvarar maskvidden på siktningsduken där 95 % av materialet passerar, se figur 5.1



Figur 5.1, Översikt av kornfördelningen, d_{95} är inritat.

Filtreringsbenägenheten bestäms med en provningsutrustning som pressar cementbruket igenom ett filter eller genom en spalt. Idén med en sådan utrustning föreslogs av Pär Hansson, Vattenfall Utveckling AB i början av 90-talet. Utrustningen har sedan vidareutvecklats av Eriksson, 2002a. Anledningen till att filterpump (SS-EN 14497:2004) inte användes i denna studie var för att den kräver en relativt stor blandningsmängd för varje test.

Den tillgängliga mängden av siktat material (myanit och cement) var begränsad på grund av att det var väldigt dyrt och tidsödande att sikta fram dessa material. För att jämföra resultaten mellan myanit och cement användes samma utrustning. Utrustningen som användes i redovisade försök är enligt VU:SC 48 standard, se figur 5.2



Figur 5.2, Provningsutrustning enligt VU:SC 48.

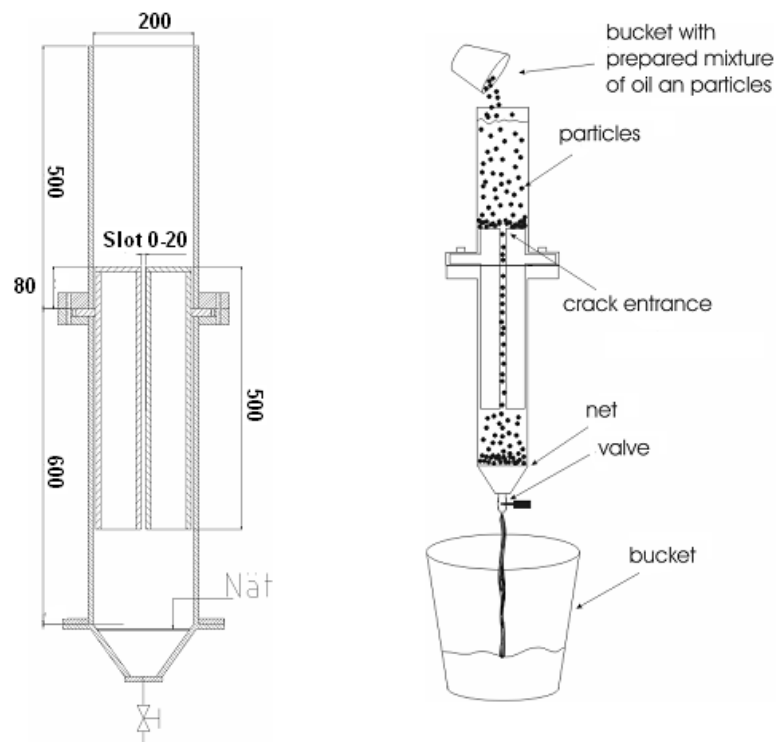
Tryckgradienten är applicerad över hela filtret. Den mängd injekteringsbruk som passerar är ett mått på blandningens filtreringsbenägenhet. När en större mängd passerar filtret, medför detta en lägre filtreringsbenägenhet. (låg filtreringsbenägenhet). En liten passerad mängd indikerar att en filtreringsskaka bildas, som efterhand gör att injekteringsbruket inte har någon möjlighet att passera filtret, en så kallad pluggbildning uppstår (hög filtreringsbenägenhet).

Resultaten från experimenten med den här testmetoden är beroende på den mängd (vikt) som passerar filtret. Den ursprungliga mängden av injekteringsbruk är också viktig. Provning med olika ursprungliga mängder injekteringsbruk genererar förmodligen en skillnad mellan relativ passerad mängd uttryckt som andel passerat av den ursprungliga mängden.

Två typer av filtergeometrier har provats, första geometrin är nät med tunt vävda ståltrådar som skapar ett kvadratisk nätmönster. Andra geometrin är tillverkad av en tunn plåt med en spalt utskuren med en laserstråle se figur 5.2

Experiment i större skala

För att visuellt kunna belysa fenomenet pluggbildning av korn, skapades en storskalig modell (skala 100:1 jfr storlek på korn och sprickgeometri i filtreringsförsök), se figur 5.3.



Figur 5.3, Genomsnitt av fysisk storskalig modell (Saaidi, 2004).

6 RESULTATANALYS

Allmänt

Det är svårt att ge generella råd för hur injekteringsbruk bör sammansättas för att skapa förutsättningar för ett lyckat injekteringsresultat. För att kunna beskriva påverkan av olika egenskaper i injekteringsbruket (kornstorlek, vct, kornfördelning mm.) i relation till den injekterade sprickaperturen, kan en faktor k användas. Denna baseras på passerad mängd blandning genom en spricka. Förutsatt att faktor k relaterar till en spricka med aperturen b μm , kan relationen mellan passerad spaltvidd (b) samt passerad mängd, uttryckas enligt bild 6.1.

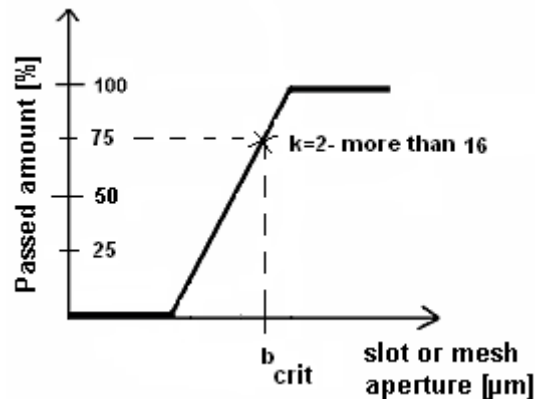


Bild 6.1, Relation mellan sprickvidd (b) samt passerad mängd, uttryckt som en faktor k .

Minsta värdet av $k=2$ erhöles vid användande av den storskaliga modellen när man testade filtrering mha. av en monodispers blandning (plastkulor av samma storlek) och spaltgeometri. Det största värdet $k > 16$ hittades när man testade en finkornig cementbaserad blandning med spaltgeometri.

För att mer i detalj utvärdera provresultaten kan den passerade mängden blandning uttryckas i relation till olika spaltvidder eller maskvidder vid användande av nätgeometri. Filtreringsbenägenheten har därför uttryckts med hjälp av parametrarna b_{crit} , b_{req} och b_{min} se bild 6.2.

b_{crit} är den minsta sprickvidden där närmast all tillgänglig mängd av blandningen kan passera, vilket i denna studie motsvarar mer än 75 % av den ursprungliga mängden blandning. (viss mängd blandning kommer alltid att fastna i slangar och i utrustning, se figur 5.2.

b_{min} anger den spalt- eller maskvidd där mindre än 10 % av blandningen passerar.

b_{req} är en parameter som godtyckligt bestäms till att motsvara en erforderlig passerad mängd blandning, vilken anses behövas för att uppfylla ställda krav för den specifika situationen. Exempelvis kan detta krav sammankopplas till att en viss längd av det injekterade sprickplanet skall fyllas (den minsta mängden injekteringsmedel för ett lyckat injekteringsresultat). I denna studie motsvaras b_{req} av en inträngningslängd på minst 5 m vid användande av spaltgeometri.

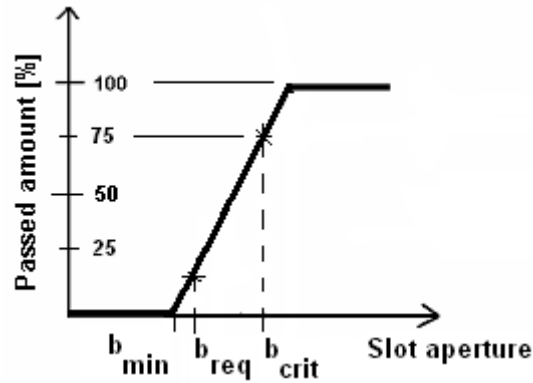


Bild 6.2, Definitioner av parametrarna b_{crit} , b_{req} och b_{min} ,

Nedanstående tabeller anger relationen mellan den passerande mängden av olika blandningar (kornstorlek) samt spaltöppning.

Tabell 6.1, Relation (kvot) mellan använd spaltöppning och kornstorlek (d_{95}). De skuggade kvoterna anger vilka kombinationer som uppfyller kraven för b_{req} , vid ett vct 1,0.

Mixture	d_{95} [μm]	slot aperture		
		75 μm	100 μm	125 μm
UF 12	12	6,3	$\geq 8,3^1$	10,4
UF 16	16	$\geq 4,7$	6,3	7,8
IC 30	30	$\geq 2,5^{2,3}$	$3,3^3$	$4,2^3$
Cem 2	10	-	-	-
Cem 4	9	-	-	-
UF 12, fine	8	9,4	12,5	15,6*
UF 12, coarse	16	-	$\geq 6,3^{4,3}$	$7,8^{4,3}$

* Kvoten större än 15,6

¹ L 15 Inträngningsförmågan är mindre än 5 m med vct 1,0.

² Cemflux visar att Inträngningsförmågan är mindre än 5 m med vct 1,0.

³ Vattenseparationen av passerad mängds blandning är större än 5 % med vct 1,0.

⁴ Melcrete är inte med i filtreringstestet.

Tabell 6.2, Relation (kvot) mellan använd spaltöppning och kornstorlek (d_{95}). De skuggade kvoterna anger vilka kombinationer som uppfyller kraven för b_{crit} , vid ett vct 1,0.

Mixture	d_{95} [μm]	slot aperture		
		75 μm	100 μm	125 μm
UF 12	12	6,3	8,3	$\geq 10,4^1$
UF 16	16	4,7	6,3	$\geq 7,8^2$
IC 30	30	2,5	3,3	$\geq 4,2^{3,4}$
Cem 2	10	-	-	-
Cem 4	9	-	-	-
UF 12, fine	8	9,4	12,5	15,6*
UF 12, coarse	16	4,7	$\geq 6,3^{2,4}$	$7,8^{2,4}$

* Kvoten större än 15,6

¹ Cemflux uppfyller inte kraven för b_{crit} med vct 1,0.

² L 15 uppfyller inte kraven för b_{crit} med vct 1,0.

³ L 15 och Melcrete uppfyller inte kraven för b_{crit} med vct 1,0.

⁴ Vattenseparationen av passerad mängds blandning är större än 5 % med vct 1,0.

Slutsatser

Baserat på utförda tester och litteraturstudier har följande slutsatser antagits.

- Filtreringsbenägenhet är ett komplext fenomen som bygger på olika egenskaper (kornstorlek, kornfördelning, vct mm.) i injekteringsbruket, även samverkan mellan dessa finns.
- Utformningen av projektet medför att man bör vara aktsam med att dra alltför långtgående slutsatser. Projektet har huvudsakligen varit fokuserat på principer rörande filtreringsbenägenhet.
- b_{crit} och b_{min} är två viktiga parametrar som har diskuterats tidigare. Man kan ifrågasätta om det finns något entydigt värde för b_{crit} . Testerna indikerar att bedömningen av b_{crit} många gånger beror på den ursprungliga testmängden. Den relativa mängden som passerar igenom filtret måste därför relateras till den ursprungliga mängden.
- b_{req} är ett nytt begrepp som introducerades för att visa att den passerade mängden injekteringsbruk kan vara tillräcklig med avseende på injektering av sprickor, även om det sker en pluggbildning under injekteringsbrukets inträngning i sprickan.
- Inverkan av vald metod för att testa injekteringsbrukets filtreringsbenägenhet är förmodligen viktig. Viktiga parametrar är exempelvis den ursprungliga mängden av injekteringsbruk, filtergeometrin och tryckgradienten över förträngningen, se figur 6.3.

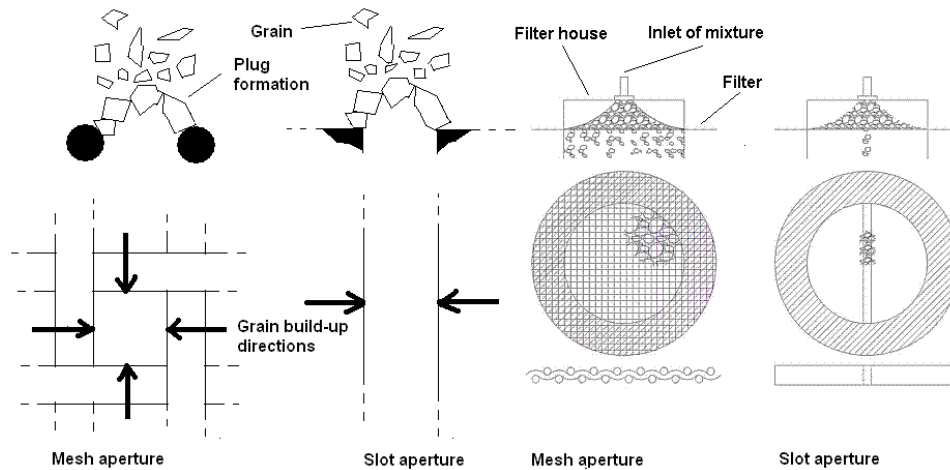


Bild 6.3, Inverkan av använd filtergeometri vid provning av blandningens filtreringsbenägenhet.

Filtreringsbenägenhet kan uttryckas enligt utförda tester som ett samband mellan använd spaltvidd/ maskvidd (b_{crit}) samt blandnings egenskaper enligt formel 6.1

Formel 6.1

$$b_{crit} > k \cdot d_{95} \quad 2 \leq k \leq 16$$

$k = f(\text{kornstorlek, kornstorleksfördelning, flytmedel, vct, kemisk reaktion, filtergeometri, mängd blandning})$

- Enligt utförda filtreringstester med inert och cementbaserade blandningar, bör k vara mellan 2 till 16, för att en betydande mängd av injekteringsbruket skall passera (75-100 % av tillgänglig volym). Variationen av k är beroende av en mängd olika parametrar, se formel 6.1
- Provning av inert bruk mha av spaltgeometri, visar att värdet k måste vara mer än 12. Resultaten avser användande av en spaltbredd mellan 75 till 125 μm och ett vct på 0,7.
- Provning av inert bruk mha nätgeometri, visar att värdet k inte får vara mindre än 3-4. Resultaten avser användande av en nätgeometri med 36, 45 och 75 μm maskvidd samt vct på 0,7.
- Provning av cementbaserat bruk visar att värde k måste vara mellan 4-10, vissa blandningar med finkornigt bruk visar på att värde k måste var mer än 16. Dessa resultat avser användande av spaltöppningar på 75, 100 och 125 μm med vct på 1,0.

På liknande sätt kan man beskriva värdet k med användandet av b_{req} .

Formel 6.2

$$b_{crit} > k \cdot d_{95} \quad 2 \leq k \leq 16$$

$k = f$ (kornstorlek, kornstorleksfördelning, flytmedel, vct, kemisk reaktion, filtergeometri, mängd blandning)

Sambandet i formel 6.2 visar att k värdet varierar mellan snävare gränser för att uppfylla kraven för b_{req}

För att belysa den bedömda säkerheten i de olika parametrarnas inverkan på filtreringsbenägenheten, har tabell 6.3 skapats.

Tabell 6.3, Beskrivning av parametrar som inverkar på filtreringsbenägenheten på injekteringsbruk.

Parameter	Influence	Degree of safety
Steep grain size distribution	Decreasing of k	Large
Higher W/C ratio	Decreasing of k	Large
Cement chemistry	Increasing of k	Large
Superplastisiser	Decreasing of k	? ¹
Filter geometry	? ²	? ³

¹ Inverkan av vattenreducerare har inte varit i fokus för detta projekt. Om dosering och typ av vattenreducerare skulle ändrats, skulle troligen även resultaten blivit annorlunda. Förmodligen kan man konstatera att rätt användande (dosering) av vattenreducerare kommer att minska blandnings filtreringsbenägenhet.

^{2,3} I det här projektet har geometrin för filtret visats sig vara en viktig parameter. Resultaten är dock inte fullständiga. Mer studier behövs nog för att kunna analysera filtergeometrins inverkan på mätning av blandningens filtreringsbenägenhet.

7. REFERENSLISTA

Litteratur

- 1) Alemo J, Johansson N, Bronner N (1988). *Urlakning av cementinjektering*. Vattenfall FUD-rapport. Räcksta, Sweden.
- 2) Bergman , S.G.A. Lindman, K. Söderman, P (1970). *Injekteringsmedels inträngning i sand och tunna spalter*. BFR-rapport R 45:1970, Stockholm.
- 3) Brandberger M, Dahlmalm T, Eriksson M, Stille H (1998) Styrande faktorer för täthet kring en förinjekterad tunnel, Division of Soil and Rock Mechanics, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- 4) Dalmalm, T., (2004), Grouting Prediction Systems for Hard Rock- based on active design. Doctoral . Thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- 5) *Dershowitz W, Doe T, (1997). Analysis of Heterogeneously Connected Rock Masses By Forward Modelling of Fractional Dimension Flow Behaviour*, Int. J. Rock Mech. & Min. Sci 34:3-4, Paper No. 061, Elsevier.
- 6) Eklund, D (2005) Penetrability Due to Filtration Tendency of Cement Based Grouts, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- 7) Emmelin, A, Eriksson M, Åsa Fransson (2004), *Characterisation, design and execution of two grouting fans at 450 m level, Äspö HRL*, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, Stockholm, Sweden.
- 8) Eriksson, M, (2002) Prediction of grout spread and sealing effect, a probabilistic approach, Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- 9) Eriksson, M, Stille, H (2002a), A Method for measuring and evaluating the penetrability of grouts, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- 10) Eriksson, M, (2003) *A method for measuring and evaluating the penetrability of grouts*, Grouting and Ground treatment, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden. Proc. Of the third international conference, New Orleans, USA, 2004.
- 11) Fjällberg L, Lagerblad B (2003), *Cement based injection grouts- different types, cement reactions, setting time and flowability*. CBI rapport. ISRN CBI/R-2003/1-SE. Stockholm, Sweden.

- 12) Fransson Å (1999), *Grouting Predictions Based on Hydraulic Test of Short Duration*, Department of Geology, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden.
- 13) Gustavson G (2004). *Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering*, Väg och Vattenbyggaren nr 4, Department of Geology, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden.
- 14) Gylling B, (1997). *Development and Applications of the Channel Network Model for Simulation of Flow and Solute Transport in Fractured Rock*. Doctoral thesis, Department of Chemical Engineering and Technology, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- 15) Hansson P. (1994). *Cementinjektering- Handbok för injekterare*, Elforsk rapport 94:12, Sweden.
- 16) Hansson P, (1995) *Provningsmetoder för cementbaserade injekteringsmedel och deras användning*, Vattenfall Utveckling AB, proc. of Vann og frostsikring av trafiktunneler- Injektion og kledning, Trondheim.
- 17) Hansson P, (1998). *Materialmässiga aspekter på injektering*, Vattenfall Utveckling AB, PM UC98:5, Älvkarleby.
- 18) Houlsby A.C (1990). *Construction and design of cement grouting*, John Wiley and Sons, Inc
- 19) Håkansson U. (1993). *Rheology of Fresh Cement-Based Grouts*. Ph D Thesis, Dept. Of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- 20) Hässler, L. (1991). *Grouting of Rock- Simulation and Classification*. Ph D Thesis, Dept. Of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- 21) Nonveiller E (1989), *Grouting Theory and Practice*, Elsevier Science Publishers B.V, ISBN 0-444-87400-3, Amsterdam, Netherlands.
- 22) Palmqvist K (1983), *Tätning av bergtunnlar –Injekteringsutförande och resultat*, BeFo 66:1/83, Sweden.
- 23) Pettersson S Å, Molin H (1999) *Grouting & Drilling for grouting*, Atlas Copco Craelius AB, Sweden.
- 24) Schwarz, L.G., (1997), *Roles of rheology and chemical filtration on injectability of microfine cement grouts*, Doctoral Thesis, Northwestern University, Evanstone, Illinois, UMI number 9814310.
- 25) Saaidi S (2004), *Numerical and Physical Simulation of Grout Penetration*, Master Thesis, Department of Thermo and Fluid Dynamics, Chalmers University of Technology, Sweden.

- 26) Svarovsky L. Handbook of Powder Technology. Solid-Liquid Separation Process and Technology. Elsevier 1985.
- 27) Yang M, Neubauer C M, Jennings H M. (1997). Interparticle Potential and Sedimentation Behaviour of Cement Suspensions. Advanced Cement Based Materials 1997;5:1-7. pp 1-6.

Standarder

SS-EN 14497 : 2004 Bestämning av filtreringsstabilitet hos injekteringsmaterial
VU:SC 48 Filtreringsbenägenhet i injekteringsbruk

SveBeFo

Box 47047
SE-100 74 Stockholm

Telefon 08-692 22 80 • Fax 08-651 13 64
info@svebefo.se
Besöksadress: Mejerivägen 4

ISSN 1104 - 1773 • SVEBEFO-R--73--SE

tblk.