

## SEPARATION OCH FILTRERING AV CEMENTBASERAT INJEKTERINGSBRUK

Almir Draganović  
Håkan Stille

Omslagsbild:

Inträngning uppmätt med lång och kort spalt och filterpress i steg 2.

Bilden tagen ur rapporten, avsnitt 2.1 sid. 59, Figur 48: Foton på den långa spalten efter det genomförda testet som har presenterats i Figur 47. Foto 1 och 2 visar filterkakan i övre plattan och foto 3 visar en del av filterkakan på den nedre plattan. Foto 5 visar de nedre plattorna från denna test.

# SEPARATION OCH FILTRERING AV CEMENTBASERAT INJEKTERINGSBRUK

## **BLEEDING AND FILTRATION OF CEMENT- BASED GROUT**

Almir Draganović, KTH

Håkan Stille, KTH

BeFo Rapport 96

Stockholm 2010

ISSN 1104 – 1773

ISRN BEFO-R—96—SE



## Förord

Separation och inträngning av cementbaserat injekteringsbruk är två ämnen som diskuteras i samband vid injektering i berg. I diskussionen förekommer frågor om hur väl dagens standardmätmetoder är relevanta vid mätning av dessa egenskaper. Få undersökningar har gjorts för att klarlägga frågan. Följande rapport är en svenskspråkig sammanfattning av Almir Draganović doktorsavhandling, som försvarades på KTH december 2009. Avhandlingen redovisar laboratorieförsök i syfte att visa vad som händer med ett bruk under injektering och vilka faktorer och processer påverkar separation och inträngning.

Studien visar att separation i sprickor huvudsakligen är resultat av sedimentering och att separation uppmätt med standardmetod är inte representativ för separation i bergsprickor. Genomförda mätningar med två speciella mätutrusningar för mätning av inträngningen som framtagits under studien visar att inträngning är komplex och styrs av cementets kornstorlekskurva, vct, injekteringstryck, hydratisering och flockulering samt blandning av bruk. Vidare visar studien att filterpress kan betydligt underskatta inträngningsförmågan hos cementbaserade injekteringsbruk.

Doktorsarbetet har utförts av Almir Draganović och finansierats inom BeFo's forskningsprogram med kompletterande finansiering från Cements AB och Atlas Copco. Arbetet har följts av en referensgrupp bestående av: Staffan Hjertström, Cements AB, Thomas Janson, Tyrens, Tomas Franzen & Mikael Hellsten, BeFo, Ann Emmelin, SKB, Fernando Martins, Atlas Copco och Janne Eriksson, Atlas Copco. Projektet har genomförts under handledning av professor Håkan Stille, KTH.

Stockholm i september 2010

Mikael Hellsten

# Innehållsförteckning

FÖRORD.....	I
INNEHÅLLSFÖRTECKNING.....	II
SAMMANFATTNING.....	1
SUMMARY.....	2
<b>1. SEPARATION AV CEMENTBASERAT INJEKTERINGSBRUK.....</b>	<b>3</b>
1.1. DEFINITION OCH PROBLEMBESKRIVNING.....	3
1.1.1 <i>Processer i systemet</i> .....	4
1.2. SEPARATION MÄTT MED CYLINDERMETODEN.....	5
1.2.1 <i>Genomförda tester med cylindermetoden</i> .....	5
1.2.2 <i>Använd cement och blandning</i> .....	7
1.2.3 <i>Resultat av genomförda tester med cylindermetoden</i> .....	9
1.3. SEPARATION MÄTT MED SPALTMETODEN.....	11
1.3.1 <i>Separation och påfyllning i en spalt under injektering (hypotes)</i> .....	11
1.3.2 <i>Testutrustning, injekteringsmetoder och bestämning av separationen</i> .....	12
1.3.3 <i>Genomförda tester med spaltmetoden</i> .....	16
1.3.4 <i>Resultat av genomförda tester med spaltmetoden när bruket når slutet av spalten (konstant flöde, ingen påfyllning i spalten)</i> .....	17
1.3.5 <i>Diskussion om genomförda tester med spaltmetoden när bruket når slutet av spalten</i> .....	20
1.3.6 <i>Resultat av genomförda tester med spaltmetoden när bruket stannar i spalten (våldigt lågt flöde vid slutet av injekteringen, påfyllning sker i spalten)</i> .....	21
1.3.7 <i>Diskussion om genomförda tester med spaltmetoden när bruket stannar i spalten</i> .....	23
1.3.8 <i>Separation mätt med lång spalt positionerad på dess sida. Provhöjd är 100 mm.</i> .....	23
1.4. SUMMERING AV SEPARATIONEN UPPMÄTT MED SPALTMETODEN OCH CYLINDERMETODEN.....	24
1.5. SLUTSATSER.....	25
<b>2. INTRÄNGNING OCH PLUGGBILDNING AV CEMENTBASERAT INJEKTERINGSBRUK.....</b>	<b>27</b>
2.1. INTRÄNGNING, PLUGGBILDNING OCH FILTERERING AV CEMENTKORN I SPRICKOR MED VARIERANDE SPRICKVIDD ..	27
2.2. MATERIAL OCH METODER.....	27
2.3. INTRÄNGNING UPPMÄTT MED KORT SPALT I STEG 1.....	33
2.3.1 <i>Inträngningstester med bruk baserade på grövre och finare cement</i> .....	33
2.3.2 <i>Inträngningstester med varierande vct tal</i> .....	40
2.3.3 <i>Inträngningstester med varierande injekteringstryck</i> .....	42
2.3.4 <i>Inträngningstester med tillsatsmedel</i> .....	46
2.3.5 <i>Inträngningstester med cement-alkohol blandningar</i> .....	47
2.3.6 <i>Diskussion av testresultat uppmätta med kort spalt i steg 1</i> .....	51
2.4. INTRÄNGNING UPPMÄTT MED LÅNG OCH KORT SPALT OCH FILTERPRESS I STEG 2.....	52
2.4.1 <i>Inträngningstester med INJ30 vct=0.6 bruk</i> .....	52
2.4.2 <i>Inträngningstester med UF12 vct=1.2 bruk</i> .....	56
2.4.3 <i>Inträngningstester med MF20 vct=0.9 bruk</i> .....	61
2.4.4 <i>Diskussion av testresultat uppmätta med lång och kort spalt och penetrationmeter i steg 2.</i> .....	64
2.5. SLUTSATSER.....	66
<b>3. TILLÄMPNING PÅ PRAKTISK INJEKTERING.....</b>	<b>69</b>
REFERENSER.....	71

## Sammanfattning

Separation och inträngning av cementbaserade injekteringsbruk är två huvudfrågor som har studerats i denna studie. Syftet med studien var att visa vad som händer med ett bruk under injektering och vilka faktorer och processer som påverkar separation och inträngning.

Idag ställs krav på att separationen i injekteringsbruk ska vara mindre än 5 % uppmätt med dagens standardmetod. Studien visade att separation i sprickor huvudsakligen är ett resultat av sedimentering och att separation uppmätt med standardmetod inte är representativ för separation i bergsprickor. Separationen är betydligt mindre; om den överhuvudtaget utvecklas. Det betyder att det ställda kravet på tillåten separation inte är relevant.

Inträngningsförmåga är en viktig egenskap hos cementbaserade injekteringsbruk som styr tätningen av bergmassan runt exempelvis tunnlar. Bestämningen av denna förmåga är en av de viktigaste frågorna inom injekteringsforskningen. Idag kan man uppskatta inträngningen med olika metoder, men resultaten skiljer sig åt m.a.p. hur inträngningen påverkas av vissa faktorer. I denna studie har två utrustningar för mätning av inträngningen, kallade kort och lång spalt, framtagits. Genomförda mätningar visade att inträngningen är komplex och styrs av flera faktorer. Några av dem är cementets kornstorlekskurva, vct, injekteringstryck, hydratisering och flockulering samt blandning av bruk. Vidare visade studien att filterpress kan underskatta inträngningsförmåga hos cementbaserade injekteringsbruk betydligt.

Denna BeFo-rapport är ett sammandrag av den forskning som utförts vid KTH av Almir Draganović och redovisas i sin helhet i doktorsavhandlingen "*Bleeding and Filtration of Cement-Based Grout*" (Draganović, 2009). TRITA\_JOB PHD 1015, ISSN 1650-9501

## Summary

Grouting is a common method of sealing rock around tunnels to reduce or stop water inflow. Successful grouting significantly minimizes the maintenance cost and safety of the tunnel. Some questions about bleeding and penetrability of the grouts have to be examined more closely to carry out a successful grouting.

Bleeding of cement-based grout is a complex problem. Measuring methods used today originate from the measuring of the bleeding of cement pastes used in ordinary building industry. Whether bleeding measured with a standard method is relevant for bleeding in small fractures in rocks is one of the main questions in this study. The aim of the study is to illustrate what really happens with a grout during bleeding and which factors and processes influence it. In this way relevant measuring methods can be developed as well as the knowledge regarding interpretation of the measured results. The study has shown the most important factors which governs bleeding in cement-based grout. It has also shown that the results measured with standard methods are not relevant for bleeding of grout in rock joints and that voids in the joints caused by bleeding could be refilled during grouting itself.

An important aspect of grouting is penetration of the grout. The penetration is defined as the length of how far grout penetrates in the rock through fractures from a bore hole. Filtration of the grout is a result of a plug building at fracture constrictions which reduces the penetrability of the grout. This is the other important issue discussed in the study which examines the question whether this can be measured by some measuring method and which factors and processes influence penetrability and filtration. A hypothesis of how the factors w/c ratio, pressure and relative constriction influence penetrability are presented and tested by special constructed measuring equipment. The results obtained by this measuring equipment are compared with the results measured with a penetrability meter.

This BeFo-report is a summary of the Doctoral Thesis presented by Almir Draganović at KTH: "*Bleeding and Filtration of Cement-Based Grout*" (Draganović, 2009). TRITA \_JOB PHD 1015, ISSN 1650-9501

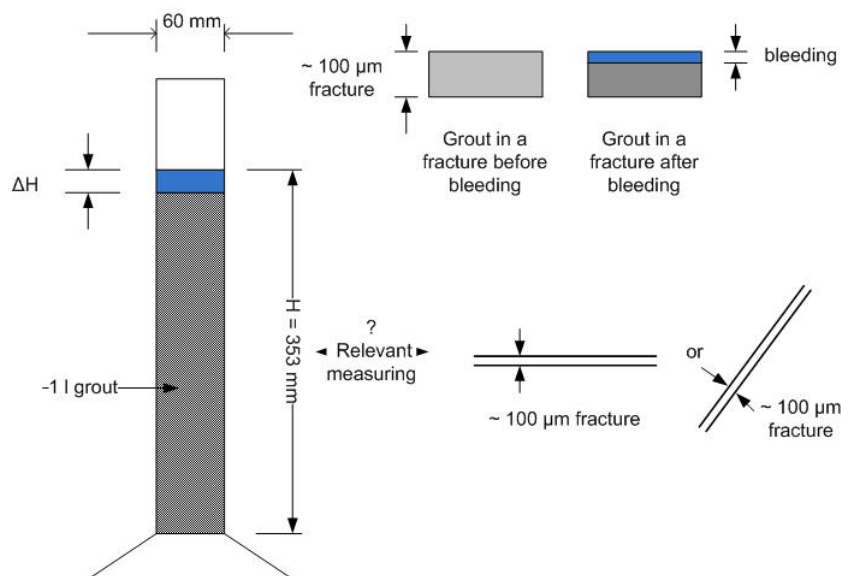


# 1. Separation av cementbaserat injekteringsbruk

## 1.1. Definition och problembeskrivning

Separation är en process där cementpartiklar i bruket sjunker pga. gravitationen vilket resulterar i en vattenansamling på brukets yta. Separation är definierad som förhållandet mellan höjden av det ansamlade vattnet och den initiala provhöjden.

I en mätmetod föreslagen av Widmann (1996) mäts separation med en cylinder med 60 mm diameter, se Figur 1. En liter bruk hålls i cylindern vilket ger en provhöjd av 353 mm och separationen mäts efter en viss tid. Det ställs krav att separation uppmätt med denna metod ska vara mindre än 5 %. Huruvida den uppmätta separationen med denna metod är relevant för separation i bergsprickor är en av huvudfrågorna i denna studie. Motsvarar den separationen i tunna sprickor? Är separationen oberoende av provhöjden? Kommer separationen att ske under injekteringen? Är det möjligt att sprickor kan fyllas på med nytt bruk om separationen sker under injekteringen?



Figur 1: Separationstest enligt Widmann (1996). Bleeding test according to Widmann (1996).

För att svara på dessa frågor behövs det mera kunskap om de processer som styr separation. Enligt Powers 1939, Steinour 1945, Tan et al. 1987 och Tan et al. 1997 är det sedimentering och konsolidering som orsakar separation. Enligt Yang et al. 1997 och Juenger 2005 är det flockulering och hydratisering som påverkar den. Andra viktiga faktorer som påverkar separation är vattencementtalet (vct), cementets kornkurva och cement ålder (Rosquoet et al. 2003, Eriksson et al 1999).

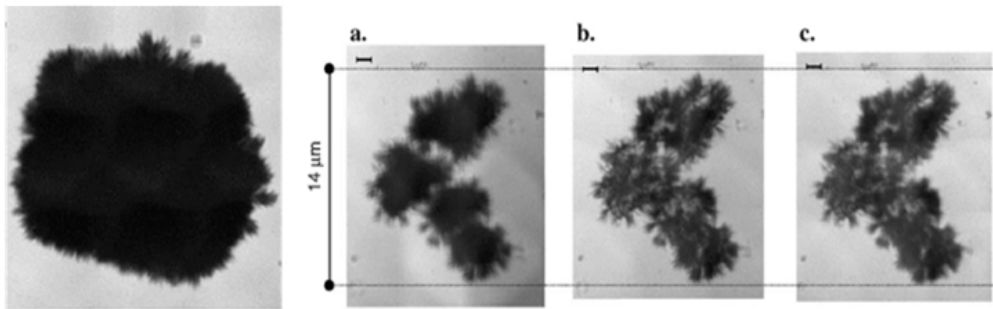
### 1.1.1 Processer i systemet

Sedimentering är en process där cementpartiklar i bruket sjunker p.g.a. gravitationen. Processen är färdig när alla partiklar i bruket är i kontakt med varandra. Resultat är en vattenansamling på brukets yta. Stokes lag kan användas för att bestämma sedimenteringshastigheten av partiklar i en stationär suspension där bara gravitation påverkar sedimentering. I bruket finns andra processer som hydratisering, attraktion och repulsion mellan partiklar som påverkar sedimentering. Därför är det svårt att använda Stokes lag för att bestämma sedimenteringshastighet. Det kan också vara viktigt att veta om partiklarna sedimenterar som enskilda eller i flockar. Sedimentering av enskilda partiklar borde resultera i en partikelgradient i bruket. Större partiklar borde vara mera koncentrerade på botten och finare i den högra delen av provet eftersom sedimenteringshastighet, enligt Stokes lag, är proportionell mot kvadraten av partikeldiametern. Om det inte finns någon partikelstorleksgradient i bruket kan det betyda att bruket är flockulerat.

Konsolidering i ett bruk startar när redan sedimenterade partiklar trycks samman av vikten från nya sedimenterade partiklar ovanifrån. Processen fortsätter tills alla partiklar har sedimenterat och krafterna från egenvikt är i jämvikt med brukets inre resistans. Konsekvensen blir att porvatten pressas upp till brukets yta vilket ökar separationen.

Flockulering är en process där enskilda partiklar bygger klumpar av flera partiklar. Detta sker när attraktionskrafterna mellan partiklar är större än de repulsiva. Detta kan ses i den högra bilden i Figur 2. Herzig et al (1970) visade att egenskaper av kolloidala partiklar är mera kontrollerade av yteffekter än av gravitationen.

Andra processer viktiga för separation är hydratisering av cementpartiklar och härdning av bruket. Hydratiseringen har bland annat beskrivits i Betonghandboken (1994). Bilderna i Figur 2 visar hur en hydratiserad cementpartikel kan se ut. Härdning av bruket är relaterad till utveckling av hydratiseringsprodukter och avstånd mellan partiklar. Bruket härdar med tiden om partiklarna är i kontakt.



Figur 2: Bilden till vänster visar C3S i en lösning mättad med kalcium hydroxid och gips efter 20 minuter. Bilden till höger visar C3S i en lösning mättad med kalcium hydroxid och gips efter a) 30 min, b) 65 min och c) 158 min. Skala sträck = 1  $\mu\text{m}$ . Från Juenger (2005). The image on the left shows C3S in solution saturated with calcium hydroxide and gypsum after 20 minutes. The images on the right show C3S in solution saturated with calcium hydroxide and gypsum after a) 30 min, b) 65 min and c) 158 min after mixing. Scale bar = 1  $\mu\text{m}$ . From Juenger (2005).

Separation har studerats med två olika mätmetoder. En metod är "cylindermetoden" (Figur 1). Separation har mätts för provhöjder från 5 till 700 mm. Cylindermetoden är en statisk metod, vilket betyder att bruket inte flyter (penetrerar) under separationen.

Den andra metoden är "spaltmetoden". Under mätningen med denna metod kan bruket penetrera och separera samtidigt vilket kan påverka den slutliga separationen. Provhöjden i denna metod är 0.5mm.

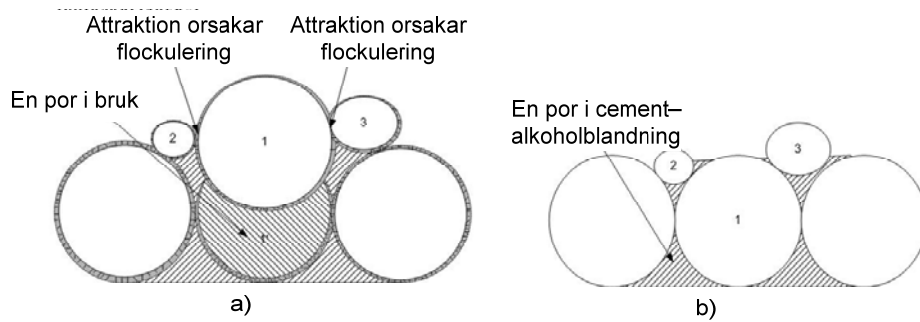
## 1.2. Separation mätt med cylindermetoden

### 1.2.1 Genomförda tester med cylindermetoden

Två olika testserier har genomförts med cylindermetoden. I den första serien har separation av bruk jämförts med separation i motsvarande cement-alkoholblandningar. Syftet med dessa tester är att mäta påverkan av hydratisering och flockulering på separation i ett bruk.

Porositeten i ett färdigt separerat bruk är mycket större än i en motsvarande cement-alkoholblandning pga. hydratiseringen och flockuleringen i bruket. Detta har illustrerats i Figur 3. Figur 3 a) visar cementpartiklarna 1, 2 och 3 i ett bruk och Figur 3 b) visar motsvarande partiklar i en cement-alkoholblandning. Cementpartikel 1 i bruket har flockulerat med partiklar 2 och 3 och kan inte sedimentera hela vägen ner vilket leder till en större porositet i bruket än i motsvarande cement-alkoholblandning. En större porositet ger mindre separation. Del av porositet orsakad av hydratisering och flockulering i ett bruk kan uppskattas genom att subtrahera separation i detta bruk från separation i en motsvarande cement-alkoholblandning.

Hydratiserings och flockuleringspåverkan på separation borde vara mycket större i ett bruk baserat på en finare granulerat cement p.g.a. en större cementsyta och en större andel av fina partiklar som har en större flockuleringsbenägenhet.



Figur 3: Porositet illustrerad i a) ett flockulerat bruk och b) i en cement-alkohol blandning. Porosity illustrated in a) a flocculated grout and in b) a cement-alcohol mixture.

Tabell 1 visar genomförda tester med bruk och motsvarande cement-alkoholblandningar för att testa denna hypotes. Provhöjden i dessa tester var 10 mm och detta valdes för att minska konsolideringens påverkan på separationen.

För att behålla likadant avstånd mellan partiklar i ett bruk som i en motsvarande cement-alkoholblandning mäts mängden alkohol i cement-alkoholblandningen i liter för att alkohol är 20 % lättare än vatten. Således är act definierad i denna rapport som (liter av alkohol/kg av cement).

Tabell 1: Genomförda tester med bruk och motsvarande cement-alkoholblandningar med ANL (grov cement) och UF12 (mycket fin cement). Provhöjd är 10 mm. Performed bleeding test by water and alcohol mixture with ANL (coarse) and UF12 (very fine cement) cement. Sample height is 10 mm.

Cement	vct	act
ANL	2	2
ANL	0.5	0.5
UF12	2*	2

\* Provhöjd är 250 mm.

I den andra testserien har separationen testats hos bruk med varierande provhöjder. Syftet med dessa tester var att undersöka hur provhöjden påverkar separationen med avseende på konsolideringens bidrag i bruk baserade på grövre och finare cement. En hypotes om denna påverkning har utvecklats och illustreras i Figur 4.

Generellt ger bruk baserade på grövre cement en större separation p.g.a. en lägre påverkning av hydratisering och flockulering.

Vid analysen av konsolideringens påverkan på separationen har det antagits att varje bruk har en maximal provhöjd där egenvikten är så låg att den inte kan konsolidera partiklarna. Upp till denna provhöjd är separationen enbart ett resultat av sedimenteringen. Med en ökande provhöjd ökar konsolideringens bidrag till separationen.

Attraktionskrafterna som har illustrerats i Figur 3 är svagare i bruk baserade på grövre cement vilket betyder att dessa bruk kan konsolideras vid en lägre egenvikt.

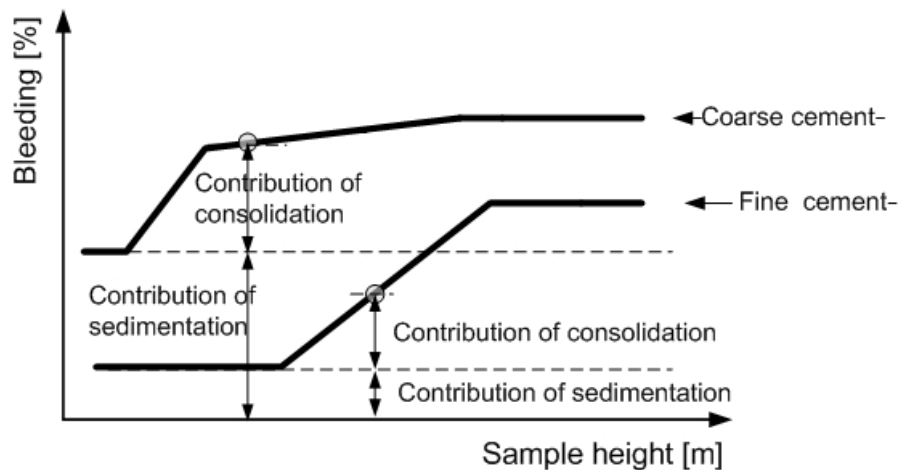
Konsekvensen blir att separation orsakad av konsolidering ökar betydligt vid en relativt låg provhöjd vilket visas i Figur 4.

I bruk baserade på finare cement är attraktionskrafterna starkare och det behövs en större egenvikt för att konsolidera dessa bruk. Det betyder att den maximala provhöjden är större i bruk baserade på finare cement.

Vid högre provhöjder kommer friktionen mellan bruk och cylinder (randvillkor) att minska separationen. Påverkan blir större hos bruk baserade på finare cement p.g.a. en större kontaktyta för samma vct tal. Vid en viss provhöjd kommer friktionen att totalt motverka egenvikten och då börjar den relativa separationen att minska.

För att testa hypotesen genomfördes ett antal tester med varierande provhöjder som visas i Tabell 2.

Ett ytterligare syfte med dessa tester med olika provhöjder var att mäta separationshastigheten. Baserat på resultaten från testerna kan det bedömas hur snabbt separationen i sprickor kan ske.



Figur 4: Separationsmodell för bruk baserade på grov och fin granulerad cement för olika provhöjder och samma vct tal. Bleeding model for grouts based on coarse and fine cement as a function of sample height for same w/c ratio.

Tabell 2: Genomförda tester med olika provhöjder. Performed bleeding tests where sample height is varied.

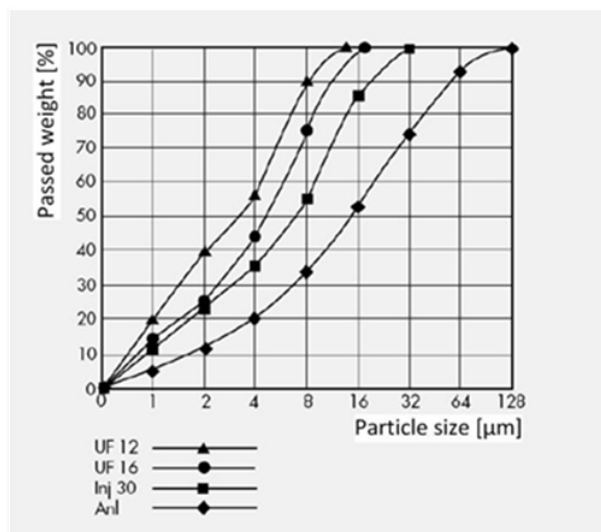
Bruk	Provhöjd [mm]					
	5	10	30	100	250	700
INJ30, vct=2	x	x	x	x	x	x
ANL, vct=2	x	x	x	x	x	-

### 1.2.2 Använd cement och blandning

Diagram i Figur 5 visar kornkurvor av cement som har använts i dessa tester. ANL cement med  $d_{95}$  av 128  $\mu\text{m}$  har definierats i denna studie som en grov cement. INJ30

med  $d_{95}$  av 32  $\mu\text{m}$  är definierad som relativt fin granulerad cement och UF12 med  $d_{95}$  av 12  $\mu\text{m}$  är definierad som mycket fin granulerad cement. Labblandare som har använts i denna studie visas i Figur 6.

Cement har förvarats inomhus och vanligt kranvatten (Stockholm) har använts för blandning. Blandningstiden var 4 minuter och varje sats innehöll 4 l vatten. Separation har mätts i cylindrar med 100 mm diameter. Separation för prover mellan 30 och 700 mm provhöjd har mätts genom fotografering med en webbkamera. Varje bild ger en tidstämpel vilket ger möjlighet att bestämma separationen i tiden. Separationen för 5 och 10 mm provhöjder har mätts i cylindrar med 10 mm höjd och bilderna är tagna med en vanlig digital kamera. Tiden för varje bild har noterats.



Figur 5: Kornkurvor av cement som har använts i denna studie. Particle size distribution of the cements used in this study.



Figur 6: Labblandare som har använts att blanda bruket i denna studie. The laboratory mixer used to mix the grouts in this study

### 1.2.3 Resultat av genomförda tester med cylindermethoden

#### Tester med alkohol

Påverkan av hydratisering och flockulering på separation har studerats genom att jämföra separation i ett bruk med separation i en motsvarande cement-alkoholblandning.

Resultatet av genomförda tester med tre olika bruk visas i Tabell 3. Mätningarna med alkohol visade att bruk baserade på mycket finmalna cement är mera påverkade av hydratisering och flockulering än bruk baserade på grövre cement.

Porvolymen orsakad av hydratisering och flockulering i slutseparerat UF12 vct 2 bruk är lika stor som 60 % av den initiala provvolymen . Motsvarande påverkan i bruk baserade på ANL cement är endast cirka 17 % vilket bevisar att bruk baserade på mycket finmalna cement är mera hydratiserade och flockulerade.

Tabell 3: Uppmätt separation i bruk och motsvarande cement-alkohol blandningar. The measured bleeding in grouts and corresponding cement-alcohol mixture.

Bruk/ cement-alkohol blandning	Uppmätt separation [%]	Porvolym i bruket resulterad av hydratisering och flockulering [%] av initial provvolym
UF12, vct=2	0	60-0 = 60
UF12, act=2	60	
ANL, vct=2	58	75-58=17
ANL, act=2	75	
ANL, vct=0.5	0	18-0=18
ANL, act=0.5	18	

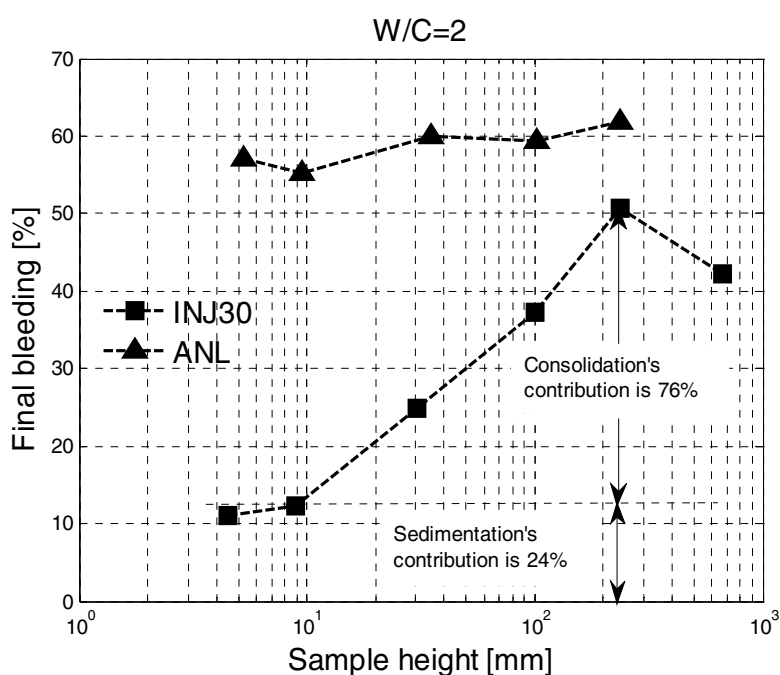
#### Tester med olika provhöjder

Resultatet av tester med bruk med olika provhöjder visas i Figur 7.

Mätningarna visade att separation är mycket mer provhöjdsberoende hos INJ30 med vct=2 bruk. INJ30 vct=2 bruk med provhöjder 5 och 10mm visade i princip samma separation vilket indikerar att den kritiska provhöjden för detta bruk är cirka 10mm. Det betyder att upp till 10mm provhöjd är separationen bara resultat av sedimenteringen. Därefter börjar egenvikten bryta attraktionskrafterna mellan partiklarna och separationen ökar betydligt. Denna del av separationen är resultat av konsolideringen. Enligt mätningarna för INJ30 vct=2 bruk och 250mm provhöjd är 76% av den slutliga separationen ett resultat av konsolideringen.

I INJ30 vct=2 bruk och 700mm provhöjd var den relativa separationen mindre än i provet med 250mm provhöjd. Denna relativt lägre separation kan vara ett resultat av en högre påverkan av friktion som har nämnts i hypotesen.

ANL vct=2 bruk och 5 samt 10mm provhöjder visade en separation av cirka 55%. Därefter ökade inte separationen betydligt som i INJ30 vct=2 bruk. Det kan betyda att ANL vct=2 bruk är lätt att konsolidera p.g.a. att svaga attraktionskrafter råder mellan partiklarna även vid 5 mm provhöjd. Separationen i alla prover med ANL vct=2 bruk är ett resultat av både sedimentering och konsolidering.



Figur 7: Slutseparation i bruk med olika provhöjder. Final bleeding as a function of different sample heights.

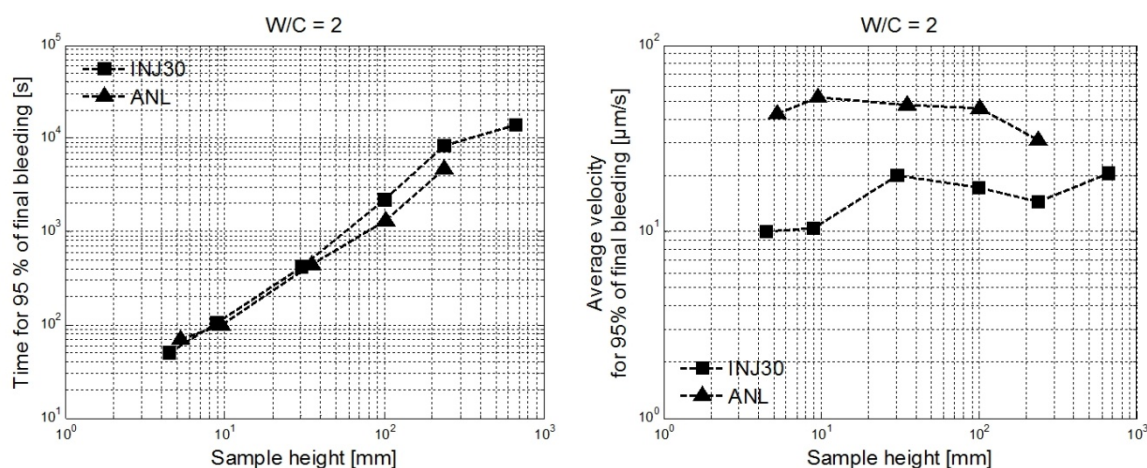
Vid mätningen av separationen hos prover med olika provhöjder har separationstider uppmätts. De uppmätta resultaten visas i Figur 8. Tiden för 95 % av slutseparationen har valts för att eliminera tiden för de sista 5 % av separationen som sker relativt långsamt.

Det högra diagrammet i Figur 8 visar separationens medelhastighet. Det syns att bruk baserade på ANL cement separerar snabbare med en relativt jämn hastighet i alla prover med undantag för provet med 250mm provhöjd.

Bruk baserade på INJ30 cement med lägre provhöjder (5 och 10mm) har något lägre separationshastigheter än de med högre provhöjder. Bruket med 10mm provhöjd hade en separation på 12 % vilket var färdigt efter cirka 2 minuter. Det ger en medelseparationshastighet av cirka 10  $\mu\text{m/s}$ . Det är något lägre än 14  $\mu\text{m/s}$  som har



uppmäts för prov med 250mm provhöjd, men det är i samma storleksordning. Med en sådan separationshastighet ger en separation av 10% i en spricka med 200 $\mu$ m sprickvidd en slutseparationstid på 2 sekunder. Det betyder att separation i smala sprickor sker mycket fort och kan ske direkt under injekteringen. Det betyder också att denna separation kan bli påfylld med nytt kommande bruk.



Figur 8: Tiden för 95 % av slutseparationen och medelhastighet av tester visade i Figur 7. Time for 95% of the final bleeding and average velocity as functions of different sample heights of tests shown in Figur 7. .

### 1.3. Separation mätt med spaltmetoden

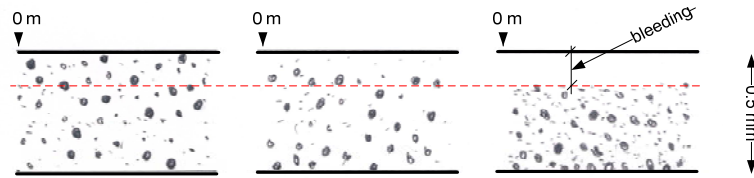
Som diskuterat i föregående kapitel, kan en separation på 10% i en horisontell spricka med 200 $\mu$ m sprickvidd ske på 2 sekunder. Det betyder att separationen som sker i den övre delen av sprickan kan vara påfylld under injekteringen medan separationen mätt i en cylinder inte kan det. Föregående mätningar visade också att provhöjden har en betydande påverkan på separationen i bruk baserade på finare cement. Den lägsta provhöjden var 5mm vilket är 25 gånger högre jämfört med en horisontell spricka med 200 $\mu$ m spaltvidd.

I detta kapitel kommer separationen att mätas med en lång spalt. Spaltvidden är 0.5mm vilket är i samma storleksordning som verkliga sprickvidder i bergmassor. Längden av spalten kan varieras mellan 2 och 8 meter och separationen kan bli påfylld under injekteringen.

#### 1.3.1 Separation och påfyllning i en spalt under injektering (hypotes)

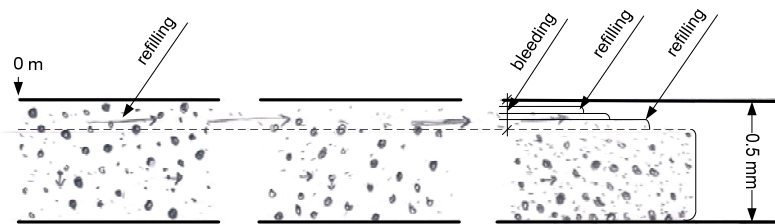
En hypotes avseende separation av ett bruk i en spalt och påfyllning under injektering illustreras i Figur 9 och Figur 10. Figur 9 illustrerar en spalt injekterad med ett relativt

högt tryck under kort tid. Flödet kan vara turbulent och bruket kan "blandas" under inträngningen. Bruket separerar efter injekteringen. Ingen påfyllning sker i systemet och brukets yta blir jämn och fin längs hela spalten.



Figur 9: En hypotes avseende separation av cementbaserat injekteringsbruk i en spalt med en spaltvidd av 0.5 mm. Spalten är injekterad med relativt hög tryck (hög flöde) under en kort tid. A hypothesis regarding bleeding of the grout in a slot with an aperture of 0.5 mm. The slot is grouted with relatively high pressure (high flow) under a short time.

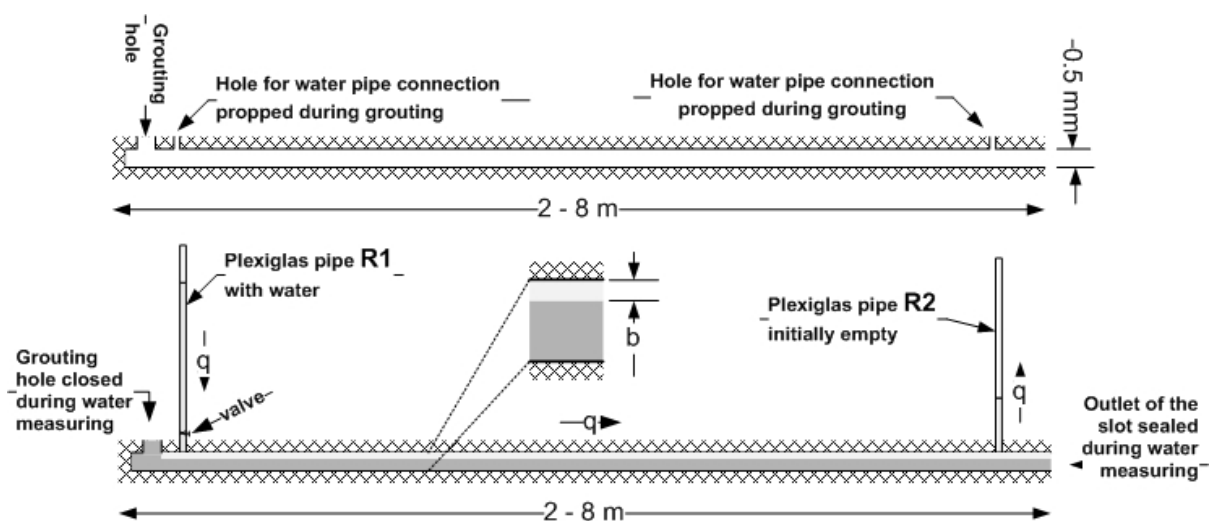
Figur 10 illustrerar en hypotes avseende påfyllning av separationen i en spalt under injektering. Spalten är injekterad med ett relativt lågt tryck under en längre tid. Efter en viss tid kommer inträngningshastigheten att vara mycket låg och bruk kan separera utan att blandas. Nytt kommande bruk kommer att trycka det separerade vattnet framåt och fylla igen den övre delen av spalten.



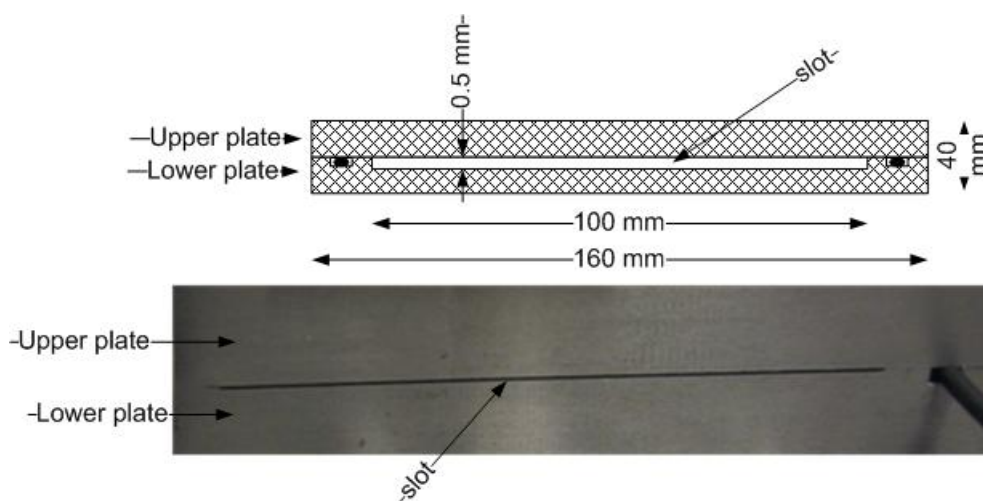
Figur 10: En hypotes avseende separation och påfyllning under injekteringen av en spalt med en spaltvidd av 0.5 mm med cementbaserat injekteringsbruk. Spalten är injekterad med relativt lågt tryck (låg flöde) under en längre tid. A hypothesis regarding bleeding and refilling of the grout in a slot with an aperture of 0.5 mm. The slot is grouted with relative low pressure (low flow) under a long time.

### 1.3.2 Testutrustning, injekteringsmetoder och bestämning av separationen

För att mäta separation i en spalt som det har beskrivits i Figur 9 och Figur 10 har en speciell mätutrustning byggts. Figur 11, Figur 12 och Figur 13 illustrerar denna utrustning. Det är en 2 till 8m lång och 10mm bred spalt med 0.5mm spaltvidd. Figur 12 visar en skiss av spaltens tvärsnitt och ett foto på spaltens slut.



Figur 11: Longitudinal sektion av spalten. Den övre bilden illustrerar spalten före injekteringen och den nedre illustrerar en injekterad spalt under transmissivitetmätningar. Vatten flyter från rör R1, mellan det färdig separerade bruket och den övre plattan till rör R2. Sketch of a longitudinal section of the slot. The upper figure illustrates the slot before grouting and the lower figure illustrates a grouted slot during transmissivity measurement. The water flows from the pipe R1 between the final-bled grout and the upper plate to the pipe R2.

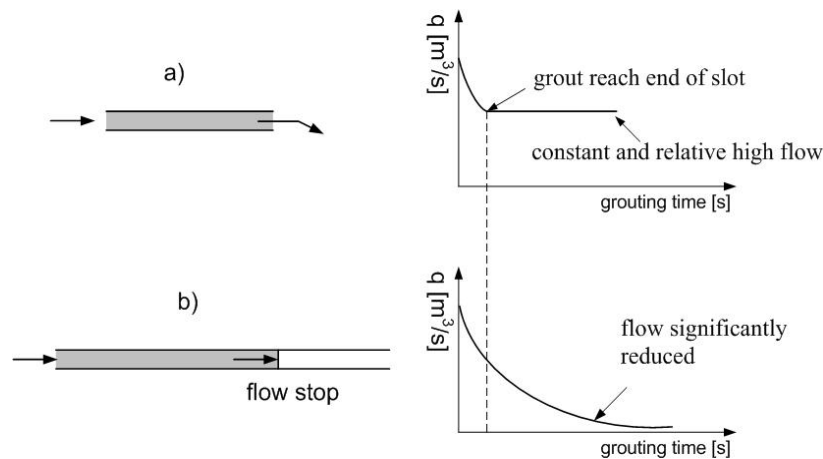


Figur 12: En skiss av spaltens tvärsnitt och foto av spaltens slut. Sketch of the cross section of the slot and a photo of the end of the slot.



Figur 13: Foton av den 8m långa spalten under injekteringen(1) och under okulär undersökning(2). Photos of the slot during grouting (1) and during visual examination (2)

En spalt med en bestämd längd kan injekteras på två olika sätt och det har illustrerats i Figur 14. Vid injekteringen med injekteringsmetoden som visas i Figur 14 a) når bruket slutet av spalten och injekteringen fortsätter efter det en viss tid till. Vid injekteringen med injekteringsmetoden som visas i Figur 14 b) når bruket inte slutet av spalten. Den väsentliga skillnaden mellan dessa två metoder är flödet av bruk. I det första fallet blir flödet konstant och relativt högt efter att bruket nått slutet av spalten. I det andra fallet kommer flödet att minska betydligt och blir väldigt lågt efter att bruket uppnått en viss inträngningslängd.



Figur 14: Två olika sätt att injektera en spalt. Illustration of two different ways to grout a slot.

Metoden när bruket når slutet av spalten har använts för att testa hypotesen där bruket separerar efter injekteringen utan påfyllning vilket har illustrerats i Figur 9. Spalten injekteras en relativt kort tid både med ett högt (4 bar) och ett lågt (0.14 bar) tryck. Metoden när bruket stannar i spalten har använts för att testa hypotesen där separation och påfyllning i spalten sker vilket har illustrerats i Figur 10. Spalten injekteras en relativt lång tid med ett lågt tryck (0.14 bar).

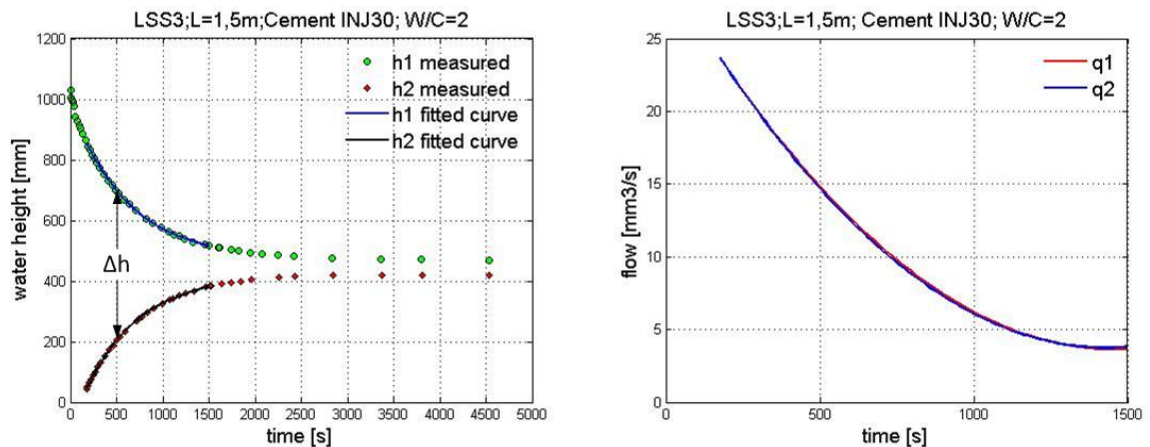
Slutseparation i en lång spalt bestäms med transmissivitetsmätningar. Den övre bilden i Figur 11 visar spalten före injektering och den nedre visar en injekterad spalt under transmissivitetsmätningar. Under injekteringen är hålen för röranslutning (R1 och R2) pluggade. Transmissivitetsmätningar utförs cirka 20 timmar efter injekteringen för att bruket ska hinna härda och inte spolats ut under mätningarna. Vatten flyter från rör R1 till rör R2 mellan det separerade bruket och den övre plattan. Separationen bestäms med ekvation (1) som är härledd från "the cubic law" vilket beskriver vattenflöde mellan två parallella plattor.

$$b = \sqrt[3]{\frac{q12m\mu}{n\gamma_w\Delta h}} \quad (1)$$

För att man ska kunna bestämma separation ( $b$ ), måste man mäta vattenflödet ( $q$ ) och trycket ( $\Delta h$ ) i en given tid. De andra parametrarna i ekvationen är vattnets specifika vikt ( $\gamma_w$ ), vattnets viskositet ( $\mu$ ), antal kanaler ( $n$ ) och antal element per kanal ( $m$ ) i ett strömningsnät som konstrueras över brukets yta i spalten.

Figur 15 visar resultat av en transmissivitetsmätning från test LSS3. Diagrammet till vänster visar uppmät vattenhöjd över tiden i rör R1 och R2. Varje mätpunkt i diagrammet är bestämt från ett foto som visar vattenhöjden i röret vid en given tid. Rördiametern är 7.1 mm. Vattenhöjderna mäts i båda rören. Vattenflödet i R1 ( $q_1$ ) och

R2 (q2) borde vara lika (Figur 11). Flöden q1 och q2 som visas i det högra diagrammet i Figur 15 är nästan identiska vilket visar noggrannheten av transmissivitetmätningarna. Trycket  $\Delta h$  bestäms från kurvor som är anpassade från de uppmätta vattenhöjderna och flödet (q) är medelvärde av flödena q1 och q2 vid en given tid.



Figur 15: Det vänstra diagrammet visar den uppmätta vattenhöjden i rör R1 och R2 över tiden. Det högra diagrammet visar det beräknade vattenflödet i båda rören. The left diagram shows the measured water height  $h_1$  in pipe R1 and  $h_2$  in pipe R2 over time. The right diagram shows the calculated flow in both pipes.

### 1.3.3 Genomförda tester med spaltmetoden

Tester har genomförts med INJ30 vct=2 samt ANL vct= 2 bruk. Utförda tester redovisas i Tabell 4 och Tabell 5. Tre olika injekteringsmetoder och två olika spaltlängder har använts vid testningen. Varje testbeteckning i tabellerna presenterar en mätning. Vissa tester är gjorda två gånger för att testa repeterbarheten för metoden. Receptet för alla tester är likadant som i cylindermetoden (4 l vatten, 2 kg cement) och bruket har blandats 4 minuter med den labblandare som visas i Figur 6.

Tabell 4: Genomförda tester med INJ30 vct=2 bruk. Performed test with INJ30, w/c=2 grout.

Spaltlängd [m]	Injekteringsmetod		
	Högt injekteringstryck (4 bar), bruk når slutet av spalten	Lågt injekteringstryck (0.14 bar), bruk når slutet av spalten	Lågt injekteringstryck (0.14 bar), bruk når inte slutet av spalten
2	LSS3	LSS6, LSS10	-
8	LSS2	-	LSS8, LSS11

Tabell 5: Genomförda tester med ANL vct=2 bruk. Performed test with ANL w/c=2 grout.

Spaltlängd [m]	Injekteringsmetod		
	Högt injekteringstryck (4 bar), bruk når slutet av spalten	Lågt injekteringstryck (0.14 bar), bruk når slutet av spalten	Lågt injekteringstryck (0.14 bar), bruk når inte slutet av spalten
2	-	LSS4, LSS12	-
8	-	-	LSS13, LSS18

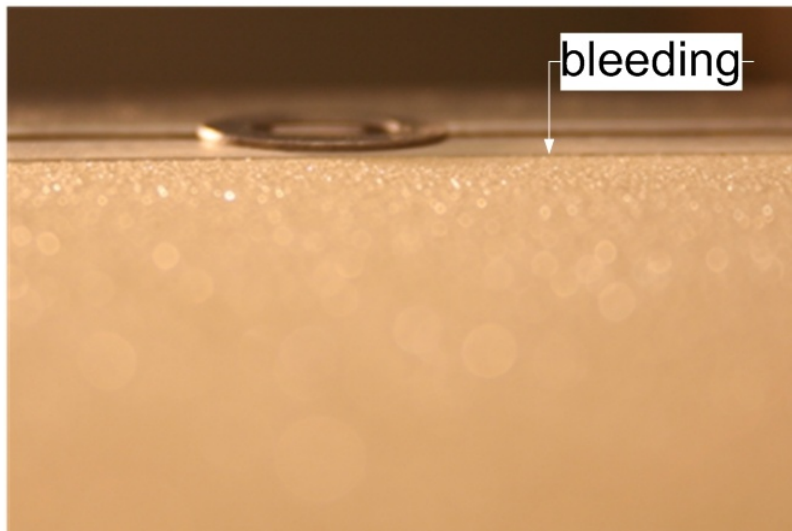
Presentationen av testresultat startar med de tester där bruket når slutet av spalten och där chansen för påfyllning är minst. Därefter presenteras resultat av de tester där bruket stannar i spalten och där påfyllning kan ske.

#### 1.3.4 Resultat av genomförda tester med spaltmetoden när bruket når slutet av spalten (konstant flöde, ingen påfyllning i spalten)

Hypotesen som har illustrerats i Figur 9 är testad med dessa mätningar. Enligt hypotesen sker separationen efter injektering och brukets yta är jämn och fin längst hela spalten. Ingen påfyllning sker i spalten.

##### Test med kort spalt (2m) och hög tryck (4 bar); LSS3

Detta test gjordes med INJ30 vct=2 bruk. Injekteringstiden ( $t_g$ ) var 6 sekunder och tiden som bruket behövde för att nå slutet av spalten var 1.5 sekunder. Vattenflödet mellan rör R1 och R2 visade att separationen av bruket har skett och okulär undersökning visade att brukets yta var jämn och fin över hela spalten, se foto i Figur 16. Det finns ingen kontakt mellan bruket och den övre plattan. Ingen påfyllning kunde observeras i systemet. Den beräknade separationen är 80 $\mu$ m eller 16 % (Tabell 6) och kan jämföras med tjockleken av den placerade brickan som är 0.5mm tjock.



Figur 16: Separation av bruket i test LSS3. Tjockleken av den placerade brickan är 0.5 mm. Bleeding of the grout in test LSS3. The thickness of the paced washer is 0.5 mm. Bleeding of the grout in test LSS3. The thickness of the paced washer is 0.5 mm.

Tabell 6: Beräknad separation vid olika tider baserat på flödet och vattentrycket från Figur 15. Calculated bleeding at various times based on the flow and the water height from Figur 15.

Tid [s]	175	500	1000	1500
Separation [ $\mu\text{m}$ ]	81	82	77	80
Separation [%]	16	16	15	16

### Test med lång spalt (8m) och högt tryck (4 bar); LSS2

Ett alternativ i syfte att öka chansen för påfyllning av bruket är att använda en längre spalt. Injekteringstiden ( $t_g$ ) i denna test var 16 sekunder. Bruket nådde slutet av spalten ( $t_0$ ) efter cirka 6 sekunder vilket ger en medelhastighet för bruket på 1.3 m/s. Volymen av bruket som passerade genom spalten var cirka 2 gånger spaltvolymen.

Den okulära undersökningen visade att brukets yta var jämn och fin utan några kanaler eller kontakter mot den övre plattan. Den beräknade separationen var 127 $\mu\text{m}$  eller 25 % för alla valda tider (500, 1000 och 1500 s). Det är ett högre resultat än den separation som uppmättes i den 2m långa spalten injekterad med ett högt tryck.

### Tester med kort spalt (2m) och låg tryck(0.14 bar); LSS6, LSS10, LSS4,LSS12

Nästa alternativ i syfte att öka möjligheten för påfyllning är användning av ett lägre tryck.

Tester utförda med INJ30 vct=2 är LSS6 och LSS10. Injekteringstiden ( $t_g$ ) i båda testerna var 15 minuter. Detta borde öka chansen för påfyllning. Bruket nådde slutet av spalten ( $t_0$ ) efter 21 sekunder i LSS6 och 18 sekunder i LSS10. Den beräknade separationen i



båda testerna var i princip lika, vilket verifierar repeterbarheten av mätningarna (Tabell 7). Separationen var också i princip lika stor som i test LSS3 där injekteringstrycket var hög. Separationen i LSS6 och LSS10 tester var 2 % lägre.

Den okulära undersökningen visade smala parallella kanaler på vissa platser på brukets yta i båda testerna. Kanalerna var något mera utvecklade i LSS6.

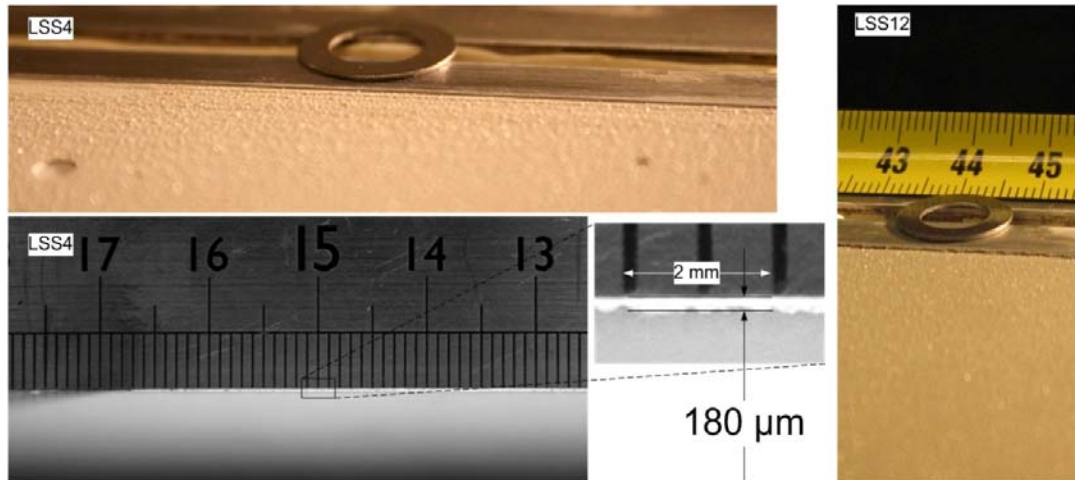
LSS4 och LSS12 är tester genomförda med ANL vct=2 bruk. Injekteringstiden ( $t_g$ ) var 123 sekunder och tiden som behövdes för bruket att nå slutet av spalten ( $t_0$ ) var 23 sekunder i båda testerna. Resultaten av den beräknade separationen för respektive test visas i Tabell 7. De är också i princip lika vilket ytterligare stärker repeterbarheten av mätmetoden. Den uppmätta separationen var cirka 35 % vilket är ett rimligt resultat.

Den okulära undersökningen visade också en jämn och fin yta hos bruket utan någon påfyllning, se foton med brickor i Figur 17.

Den nedre fotot i Figur 17 från test LSS4 har tagits cirka 15 cm från slutet av spalten. Det är samma plats där brickan i det övre fotot står. En linjal har placerats på denna plats tvärs över spalten och belyses bakifrån med en stark lampa. Kameraobjektiven har positionerats i samma nivå som brukets yta. Separationen har bestämts genom att förstora och mäta i det tagna fotot. Utrymmet under linjalen uppmättes till 180  $\mu\text{m}$ , vilket är samma värde som uppnåddes med transmissivitetsmätningarna.

Tabell 7: Beräknad separation från tester genomförda med INJ30 vct=2 och ANL vct=2 bruk när bruket når slutet av spalten. Calculated bleeding for test performed by INJ30 w/c=2 and ANL w/c=2 grouts when the grout reaches the end of the slot.

	INJ30 w/c=2							ANL w/c=2					
	LSS6			LSS10				LSS4			LSS12		
Tid [s]	0	500	1000	500	1000	1500	2000	50	100	150	50	100	150
Separation [ $\mu\text{m}$ ]	70	76	82	68	73	77	81	178	168	154	160	174	188
Separation [%]	14	15	16	13	14	15	16	35	33	31	32	35	38



Figur 17: Foton från testerna LSS4 och LSS12. Photos from tests LSS4 and LSS12.

### 1.3.5 Diskussion om genomförda tester med spaltmetoden när bruket når slutet av spalten

Okulär undersökning av bruket från det genomförda testet med kort spalt och högt tryck visade att brukets yta blir jämn och fin längs hela spalten och att vattenflödet under transmissivitetmätningarna sker över hela ytan. Vattenflödet som sker mellan den övre plattan och brukets yta kan antas bete sig som ett flöde mellan två parallella plattor då transmissivitetmätningarna ger rimliga resultat.

Mätningarna visade att det inte sker någon påfyllning under injektering. Separationen sker efter injektering vilket orsakar en öppning längst hela spalten. Öppningen uppmätt med transmissivitetmätningarna var cirka 16 % av spaltvidden vilket är i samma storleksordning som i mätningarna uppmätta med cylindermetoden (12 %).

Även i testet med lång spalt och högt tryck skede inte påfyllning under injekteringen. Den återstående öppningen är bara ett resultat av den separation som sker efter injekteringen vilket är samma som i fallet med kort spalt och högt tryck.

Injektering av en kort spalt med lågt tryck, som ger ett lägre injekteringsflöde och en längre injekteringstid men utan stopp av flödet, ger inte heller någon betydande påfyllning. Brukets flöde blir inte tillräckligt lågt. Separationen som sker efter injekteringen orsakar en återstående öppning i samma storleksordning som vid injekteringen med ett högt tryck.

Den högre uppmätta separationen vid injektering med ANL vct=2 bruk än med INJ30 vct=2 bruk är ett förväntat och rimligt resultat vilket förstärker metodens noggrannhet.

Separationen bestämd med transmissivitetmätningar var lika stor som separationen bestämd med bildanalys vilket bekräftar noggrannheten av resultaten bestämda med transmissivitetmätningar.

### **1.3.6 Resultat av genomförda tester med spaltmetoden när bruket stannar i spalten (våldigt lågt flöde vid slutet av injekteringen, påfyllning sker i spalten)**

Injektering i dessa tester genomfördes med den andra injekteringsmetoden när bruket stannar i spalten. Flödet minskar betydligt vid slutet av injekteringen. Detta "låga" flöde innebär en längre injekteringstid och ett stadigt och jämnt flöde utan blandning. Den återstående öppningen orsakad av separation kan bli ominjekterad med nytt kommande bruk vilket har definierats som påfyllning.

#### **Tester med lång spalt (8m) och lågt tryck (0.14 bar); LSS8, LSS11, LSS13, LSS18**

Tester genomförda med INJ30 vct=2 är LSS8 och LSS11. Injekteringstiden ( $t_g$ ) i de båda testerna var 30 minuter. Inträngningslängd i LSS8 var 5.5m. I ett annat test med en 4m lång spalt med samma tryck och bruk nådde bruket slutet av spalten ( $t_0$ ) efter 2 minuter och 9 sekunder. Baserat på denna mätning har de sista 1.5m av inträngningslängden i LSS8 test injekterats under de sista 28 minuterna. Sannolikt har majoriteten av dessa 28 minuter gått åt till att injektera den sista metern.

Transmissivitetmätningarna gav en separation på  $44\mu\text{m}$  eller 9 % vilket indikerar påfyllning i spalten.

Den okulära undersökningen bekräftade påfyllningen i spalten. Se Figur 18. Den första 1.8m långa delen av spalten hade den största kontaktytan. Från 1.8 till 2.6m var kontaktytan mindre och i den sista 2m-delen av inträngningslängden hade bruket en fin och jämn yta utan kontakter med övre plattan. Längst fram av penetrationslängden på den fina och jämna ytan kunde man observera tre påfyllningsfronter av bruk. Foton i Figur 19 visar de tre påfyllningsfronterna på 4.9, 5.2 och 5.4 meters avstånd från injekteringshållet. Detta bevisar hypotesen om påfyllning som har illustrerats i Figur 10.



Figur 18: Ett foto från test LSS8 som visar brukets yta mellan 44 och 73 cm. Den mörkare ytan är kontaktyta och den ljusare är kanaler. A photo from test LSS8 showing the grout surface between 44 and 73 cm. The darker surface is the contact surface and the lighter surface is the channels.



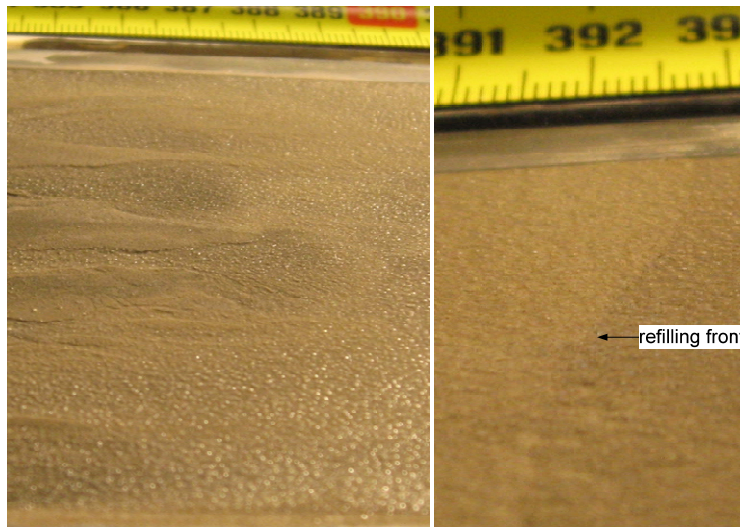
Figur 19: Tre foton från test LSS8 som visar tre påfyllningsfronter vid 490, 520 och 540 cm avstånd från inloppet. Man kan också se att brukets yta är fin och jämn samt att bruket stannade vid avståndet 5.44m från inloppet. Tree photos from test LSS8 which show the fronts of the refilling grout at 490, 520 and 540 cm distances as illustrated in Figur 10. It could also be seen that the grout surface is very even and that the grout stopped at a distance of 5.44 m.

Test LSS11 visade ett liknande resultat som LSS8. Skillnaden var att kontaktytan och kanalerna nästan hade utvecklats längs med hela inträngningslängden som var 5.86m (7 % längre). En längre påfyllningslängd resulterade också i en lägre separation som var 19 $\mu$ m eller 4 %.

Testerna LSS13 och LSS18 är genomförda med ANL vct=2 bruk. Injekteringstiden ( $t_g$ ) i båda testerna var 30 minuter. Inträngningslängden i LSS13 var 4.49m och i LSS18 4.56m. Överensstämmelsen i inträngningslängd mellan testerna visar att repeterbarheten av testmetoden är god.

Den uppmätta separationen var också ganska lika. 14 % i LSS13 och 18 % i LSS18. Det är en lägre och förväntad separation jämfört med de tester där bruket nådde slutet av spalten (LSS4, LSS12). Det indikerar att påfyllning ägt rum vilket bekräftades i den okulära undersökningen.

Det vänstra fotot i Figur 20 visar platsen i test LSS18 där kontaktytan slutar och brukets yta blir fin och jämn i resten av inträngningslängden. Det läge kan tolkas som längden av den påfyllda separationen (3.88m) i LSS18. Den andra intressanta detaljen från detta test är påfyllningsfronten på avståndet 3.92m från injekteringshålet som visas i den högra bilden i Figur 20. Samma påfyllningsprocess ägde rum i test LSS8 med INJ30 vct=2 bruket som visas i Figur 19. Detta styrker ytterligare hypotesen om påfyllning.



Figur 20: Två foton från LSS18. Det vänstra visar slutet av kontaktytan på avståndet 3.88m från injekteringshålet. Det högra visar påfyllningsfronten vid avståndet 3.88m från injekteringshålet. The photos from LSS18. The left photo shows the end of the contact surfaces at 3.88 m. The right photo shows the front of the refilling grout at 3.92 m.

### 1.3.7 Diskussion om genomförda tester med spaltmetoden när bruket stannar i spalten

Genomförda tester där bruket når slutet av spalten visade att brukets yta blir fin och jämn och att påfyllning i spalten inte kunde observeras vid okulär undersökning. När spalten däremot är injekterad med ett lägre flöde och under en längre tid sker påfyllning i systemet vilket har bekräftats med okulär undersökning vid flera försök med olika bruk. Transmissivitetmätningar indikerar också att påfyllning ägt rum i systemet och ger ett mått på kanalernas transmissivitet.

### 1.3.8 Separation mätt med lång spalt positionerad på dess sida. Provhöjd är 100 mm.

En annan möjlighet att använda denna spalt vid separationsmätningar är att positionera spalten på dess sida. I detta fall blir provhöjden 100mm och avståndet mellan provets väggar blir 0.5mm. Därför är det förväntat att separationen kommer att

påverkas med valvbildning och friktion mellan bruk och väggarna. Dessa resultat kan jämföras med de uppmätta resultaten med cylindermetoden med 100 mm provhöjd och 100 mm provdiameter.

Utöver test av möjlig valvbildning och friktion har påfyllning i systemet testats.

### Beskrivning av tester

Spalten har injekterats med ett högre tryck och en kortare tid samt med ett lägre tryck under en längre tid. I båda fallen når bruket slutet av spalten. Tabell 8 visar de genomförda testerna. I LSS14 och LSS15 har spalten injekterats med ett relativt högt tryck (4 bar) och injekteringstiden ( $t_g$ ) var cirka 6 sekunder. Bruket nådde slutet av spalten ( $t_0$ ) efter cirka 1.5 sekunder i båda testerna. I LSS16 och LSS17 har spalten injekterats med relativt lågt tryck (0.14 bar) under en längre tid. Injekteringstiden ( $t_g$ ) var 15 minuter och bruket nådde slutet av spalten ( $t_0$ ) efter cirka 16 sekunder i båda testerna. Utloppet från spalten tätades direkt efter att injekteringen stoppats. Spalten är 2 m lång och bruket har blandats som i föregående tester.

### Resultat och diskussion

Resultaten av de genomförda testerna redovisas i Tabell 8. Separationen var cirka 32 % i spalten injekterad med högt tryck utan påfyllning. Det är något lägre resultat än den 37 % -iga separationen som uppmättes med cylindermetoden (Figur 21). Skillnaden på 5 % kan vara ett resultat av valvbildning och friktion i systemet.

Separationen i spalten injekterad med lägre injekteringstryck och längre tid var 23 %. Den uppmätta skillnaden på cirka 10 % är ett resultat av påfyllningen i systemet.

*Tabell 8: Resultat av genomförda tester med spalt positionerad på dess sida. Bruk INJ30 vct=2. Spalltlängd är 2m. The results of the performed tests with the slot positioned on its side. Grout INJ30 w/c=2. Slot length is 2 m.*

Injekteringsmetod	Högt injekteringstryck (4 bar), bruk når slutet av spalten		Lågt injekteringstryck (0.14 bar), bruk når slutet av spalten	
Test	LSS14	LSS15	LSS16	LSS17
Separation [%]	31	33	23	22

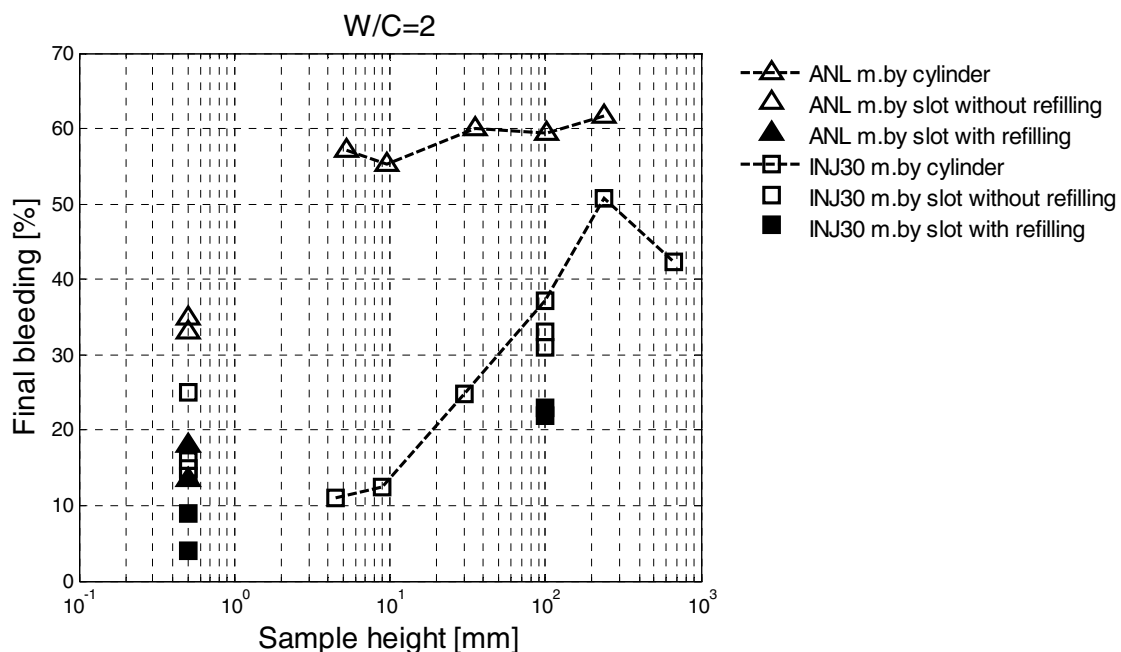
## 1.4. Summering av separationen uppmätt med spaltmetoden och cylindermetoden

Separation uppmätt med spaltmetoden, med och utan påfyllning, och cylindermetoden visas i Figur 21.

Separationen av INJ30 vct=2 bruk uppmätt med spaltmetoden utan påfyllning följer i princip separationstrenden uppmätt med cylindermetoden. Endast test med 8 m spalt och högt tryck (4 bar) visade en högre separation än förväntat. En möjlig orsak till detta kan vara noggrannheten i transmissivitetmätningarna när spalten är 8 m lång.

Separationen av ANL vct=2 bruk uppmätt med spaltmetoden utan påfyllning var betydligt lägre än separationen av 5 och 10 mm provhöjd uppmätt med cylindermetoden. Anledningen till detta kan vara att egen vikten vid denna provhöjd (0.5 mm) inte kan bryta attraktionskrafterna mellan partiklarna och konsolidera dem. Provhöjden är bara tre gånger större än  $d_{95}$  av detta cement. Denna separation är enbart ett resultat av sedimenteringen, jämfört med INJ30 vct=2 bruk där attraktionskrafterna mellan partiklarna är starkare och bruket inte är konsoliderat även vid 10 mm provhöjd. Attraktionskrafterna mellan partiklar i ANL vct=2 bruk är svagare och bruket är konsoliderat redan vid 5 mm provhöjd.

Båda bruken visade en betydligt lägre separation i testerna där påfyllning ägde rum.



Figur 21 Separation vid olika provhöjder uppmätt med cylinder- och spaltmetod. Bleeding for different sample heights measured with the cylinder and the slot methods.

## 1.5. Slutsatser

Separation är en komplex process styrd av olika fysikaliska och kemiska processer som sedimentering, konsolidering, flockulering och hydratisering.

Studien visar att konsolidering har en låg påverkan på separation. Separationen i sprickor är huvudsakligen ett resultat av sedimentering. Sedimentering i en horisontell

spricka sker mycket snabbt d.v.s. under själva injekteringen. Separationen kommer därför att, åtminstone delvis, bli påfylld.

I vertikala och lutande sprickor kommer valvbildning och hydratisering att motverka separation eftersom separationen sker långsamt i detta fall. Därför kommer en hög separation inte att utvecklas.

Resultat uppmätt med standardmetoden är därför inte representativ för separation i sprickor i berg. Separationen är betydligt mindre om den överhuvudtaget kommer att utvecklas.

Slutsatsen som kan dras från denna studie är att bruk baserade på UF12 och INJ30 med vct 1 inte ger någon separation i bergsprickor. Bruk baserat på ANL cement med vct 1 ger cirka 5 % separation. Bruk med vct 2 baserat på UF12 ger inte heller någon separation. Bruk med vct 2 baserat på INJ30 ger cirka 5 % och baserat på ANL cirka 15 % separation.



## **2. Inträngning och pluggbildning av cementbaserat injekteringsbruk**

### **2.1. Inträngning, pluggbildning och filtrering av cementkorn i sprickor med varierande sprickvidd**

Ett bruk, under inträngning genom en spricka, kan stanna p.g.a. den ackumulerade friktionen mellan bruket och berget eller p.g.a. att cementkorna bygger ett valv över sprickviddsminskningen. Den andra processen är känd som pluggbildning eller filtrering. Pluggbildning kan också inträffa i borrhålet i kontakten med en spricka.

Frågeställningen är vilka faktorer och processer som påverkar inträngning? Kan inträngning och filtrering mätas med någon mätmetod? Kan egenskaperna av ett bruk ändras för att undvika pluggbildning?

Design av dessa egenskaper har studerats av andra forskare på många olika sätt och med olika mätmetoder (Schwarz 1997, Axelsson et al. 2009, Hansson 1995, Eriksson and Stille 2003, Sandberg 1997, Nobuto et al. 2008, Hjertström 2001, Eklund and Stille 2008). Litteraturstudien har visat att en del forskare är oeniga om hur vissa faktorer påverkar inträngning. Det är viktigt att betona att en del av dessa slutsatser är baserade på testresultat gjorda med olika mätmetoder och olika bruk vilket gör jämförelser svåra.

I denna studie har påverkan av olika faktorer på inträngning testats med speciellt byggd mätutrustning. En spricka i berg simuleras med en spalt mellan två parallella plattor och spalten har en spaltviddsminskning. Två olika testutrustningar har byggts. En av dem har benämnts som kort spalt och en som lång spalt. Den långa spalten är byggd att testa inträngning vid en lägre tryckgradient över spaltviddsminskningen.

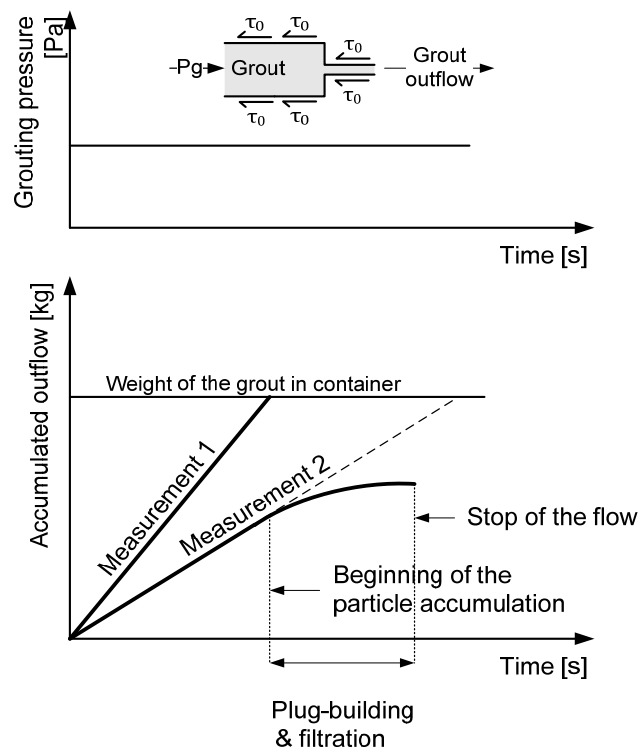
### **2.2. Material och metoder**

Inträngning har studerats i två steg. I steg 1 har inträngningen studerats med kort spalt och i steg 2 har inträngning studerats med tre olika testmetoder. Det är lång spalt, kort spalt och filterpress (Eriksson och Stille, 2003).

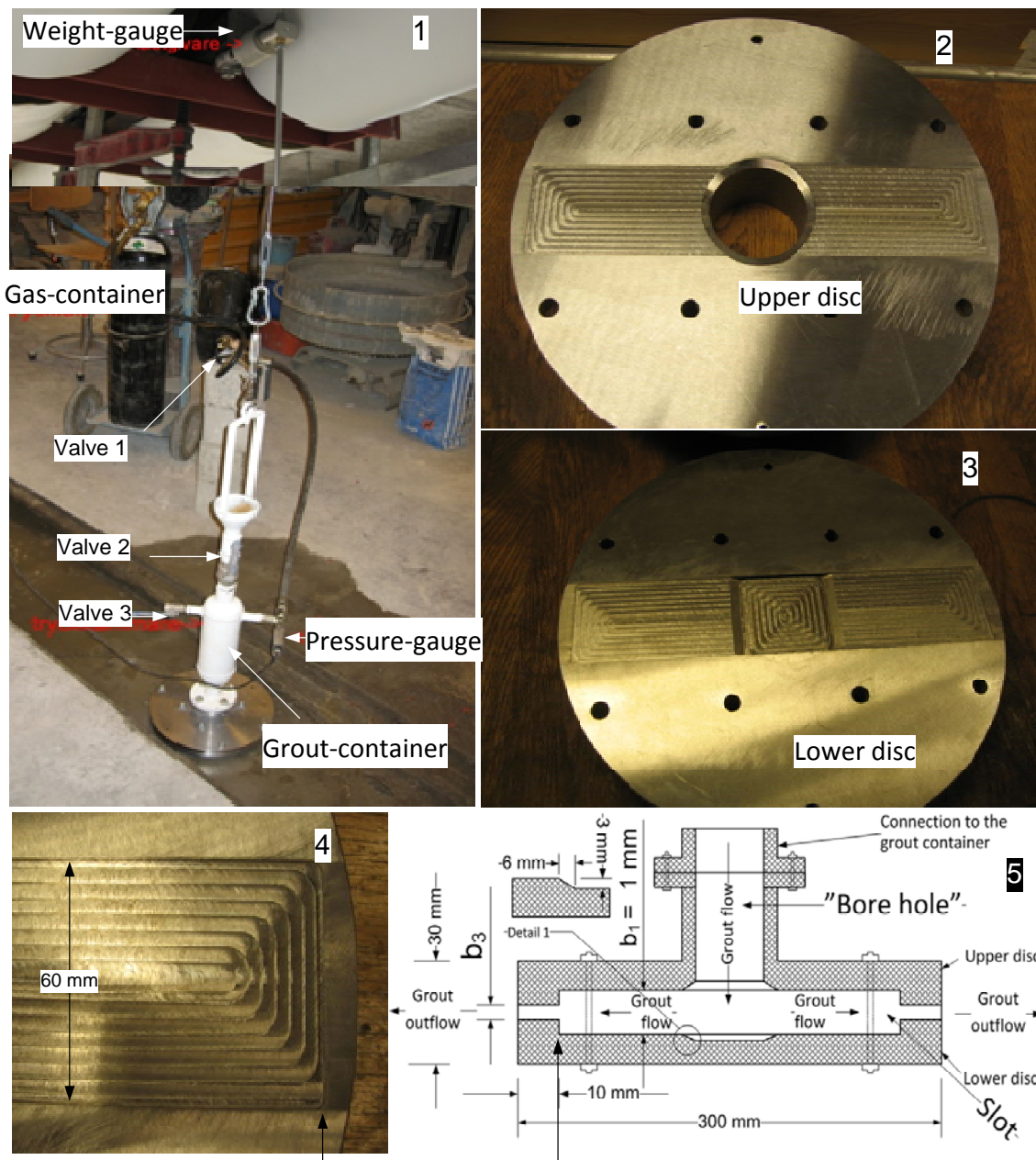
Figur 22 illustrerar mätningen med en kort spalt och Figur 23 visar hur utrustningen ser ut. Man mäter tryck och flöde genom spalten över tiden. Starttiden i diagrammet är tiden när bruk har fyllt hela spalten och börjar rinna ut. I denna stund har flödet anpassats till motstånd av hela spaltens längd. Därefter kommer flödet att förbli konstant under förutsättning att injekteringstrycket är konstant samt att ingen partikelackumulering sker i spalten som skulle minska flödes yta. En sådan mätning illustreras i Figur 22 med kurva "Measurement 1". Kurva "Measurement 2" illustrerar

en mätning där det ackumulerade utflöde börjar minska efter en viss tid. Eftersom injekteringstrycket är konstant, måste det avtagande flödet vara ett resultat av en reducerad flödesyta som har orsakats av partikelackumulering i spalten. Start av pluggbildning och filtrering av bruk detekteras med avtagandet av flödet och det slutar när flödet stannar.

Faktorer som kornstorlek, vct och tryck har testats med kort spalt. Påverkan av hydratisering och flockulering har också testats genom att jämföra inträngning av olika bruk med inträngning av motsvarande cement-alkohol blandningar och bruk med tillsatser.



Figur 22: Illustration av mätningen med en kort spalt. Measuring of the grout-filtration by the short slot.



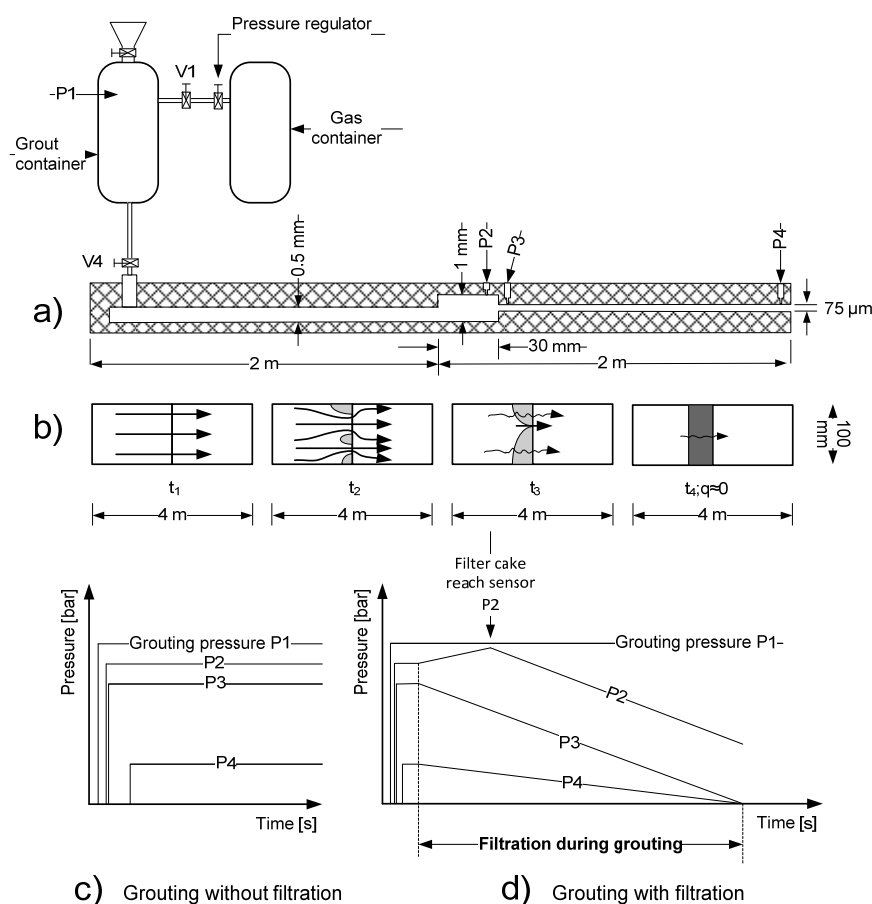
Figur 23: Foton och illustration av mätutrustning kallad kort spalt som har använts för mätning av inträngning och filtrering av cement baserat injektionsbruk. The pictures and a sketch of the measuring equipment called short slot used for measuring of the grout filtration.

Filtreringsprocess med en lång spalt har studerats genom att mäta tryck på vissa bestämda platser i spalten under injekteringen och genom att mäta mängden av det återstående bruket i behållaren ifall flödet stoppas. Figur 24 a) visar en longitudinell sektion av den långa spalten som är 4m lång och 100mm bred. Spalten har 0.5mm spaltvidd längst de första 2 metrarna och sedan ändras spaltvidden till 1mm längst en sträcka av 30 mm. Efter det minskar spaltvidden till 75  $\mu\text{m}$ . Figur 24 a) visar också de fyra karakteristiska platserna längst spalten som har valts för att mäta tryck under

injekteringen . P1 är trycket uppmätt i behållaren av bruket, P2 är trycket uppmätt strax före spaltviddminskningen, P3 är trycket uppmätt strax efter spaltviddminskningen och P4 är trycket uppmätt strax före utloppet från spalten.

Figur 24 b) illustrerar inträngning av bruk och pluggbildning vid spaltviddminskningen under injekteringen. I början av injekteringen flyter bruket utan partikelackumulering vid spaltviddminskningen. Efter en viss tid fastnar vissa partiklar vid spaltviddminskningen vilket initierar pluggbildning. Därefter fortsätter partikelackumuleringen och till slut har en komplett plugg bildats och flödet stannar helt.

Diagrammet i Figur 24 c) illustrerar de fyra karakteristiska trycken i spalten under injektering utan pluggbildning och d) när pluggbildningen sker och bruket filtreras. I fall utan pluggbildning förblir alla de fyra karakteristiska trycken konstanta efter att flödesjämvikt har uppnåtts. I de fall pluggbildning sker ändras trycken P2, P3 och P4 och bruk filtreras tills flödet stannar. Starten av filtreringen detekteras när trycket P2 börjar öka och tryckena P3 samt P4 börjar minska. En växande filterkaka minskar flödesytan vid spaltviddminskningen vilket minskar flödet. P.g.a. det lägre flödet minskar tryckförlusterna i spalten före spaltviddminskningen vilket orsakar en ökning av trycket P2 och en minskning av tryckena P3 och P4.



Figur 24: Illustration av en lång spalt för test av inträngning av bruk. Bild a) visar longitudinal sektion av spalten och med de fyra karakteristiska trycken (P1, P2, P3 och P4). Bild b) illustrerar inträngning av bruk och pluggbildning under injektering. Bilderna c) och d) visar trycken P1, P2, P3 och P4 under injektering i fall utan pluggbildning och i fall med pluggbildning när bruket filtreras. An illustration of a long slot for test of penetrability of a grout. Sketch a) illustrates a longitudinal section of the long slot with four measured pressures. The sketches in b) illustrate penetration of the grout and plug-building at constriction during grouting. The graphs c) and d) illustrate the pressures during grouting in case without plug-building and with plug-building when grout is filtered.

De genomförda testen med kort spalt i steg 1 visas i Tabell 9 - Tabell 14 och de genomförda med lång och kort spalt samt filterpress i steg 2 visas i Tabell 15. Bruket för steg 1 har blandats med labblandare som visas i Figur 6 och i steg 2 har bruket blandats med fältblandare Cemix 103.

Tabell 13 visar genomförda tester med cement-alkohol blandningar. Förhållandet mellan cement och alkohol i dessa blandningar är definierade med ett act tal vilket betyder mängd alkohol i liter delad med mängd cement i kg.

Tabell 9: Genomförda inträngningstester med bruk med varierande cementkurvor. Performed penetration tests by grouts based on cements with different grain-size curves.

Bruk	Spalt geometri ( $b_3$ ) [ $\mu\text{m}$ ]						
	300	200	100	75	50	30	20
ANL, vct=0.5	53	54	-	-	-	-	-
INJ30, vct =0.6	-	-	31	32	33	-	-
INJ30, vct =0.6	-	-	34	35	36	37	
UF16, vct =1.0	-	-	51	50	-	-	-
UF12, vct =1.2	43	42	41	40	39	44	
UF12, vct =1.2	-	-	60	59	-	-	-
UF12, vct =2.5	-	-	-	-	67	-	-

Tabell 10: Genomförda inträngningstester med bruk med varierande vct tal. Performed penetration tests by grouts with different w/c ratio.

cement	Spalt ( $b_3$ ) [ $\mu\text{m}$ ]	vct		
		0.5	1	2
ANL	200	54	55	56
UF16	100	-	51	52

Tabell 11: Genomförda inträngningstester med varierande injekteringstryck. Performed penetration tests with varying grouting pressure. The slot geometry ( $b_3$ ) was  $50\mu\text{m}$ .

Grout	Pressure [bar]		
	15	7	4
INJ30, w/c=0.6	36*	57	58

\*Test från Tabell 9.

Tabell 12: Genomförda inträngningstester med bruk med tillsatsmedel. Performed penetration tests by added grout admixture (3 % of the cement weight).

Bruk	Spalt geometri ( $b_3$ ) [ $\mu\text{m}$ ]				
	200	100	75	50	30
UF12, vct=1.2	45	46	47	48	49
UF12, vct =2.5	-	-	-	68	-

Tabell 13: Genomförda inträngningstester med cement-alkohol blandningar. Performed penetration tests with cement-alcohol mixture.

Cement-alkohol blandningar	Spalt geometri (b3) [ $\mu\text{m}$ ]		
	100	50	30
UF12, act*=1.2	63	62	61
UF12, act*=2.5	-	64	-

\*act= alkohol (liter) / cement (kg)

Tabell 14: Genomförda inträngningstester med bruk med och utan tillsatsmedel och motsvarande cement alkohol blandningar. Performed tests with grouts with and without grout additives and corresponding cement-alcohol suspension.

Cement	vct=2.5	vct =2.5 + 3 % tills.	act =2.5
UF12	67	68	64

Tabell 15: Genomförda inträngningstester med den långa och korta spalten samt med filterpressen i steg 2. Bruk har blandats med fältblandare Cemix 103 från Atlas Copco. Performed tests by the long slot, short slot and the penetrability meter in stage 2. The grouts are mixed by a field mixer Cemix 103 from Atlas Copco.

Bruk	Mätutrustning		
	Lång spalt	Kort spalt	Filterpress
INJ30, vct=0.6	LSF7, LSF13	KSF7	PMF7
UF12, vct =1.2	LSF11, LSF17	KSF16	PMF3*
MF20, vct =0.9	LSF9, LSF14	KSF4	PMF2

\*30 minuter gammalt bruk.

## 2.3. Inträngning uppmätt med kort spalt i steg 1

### 2.3.1 Inträngningstester med bruk baserade på grövre och finare cement

#### Hypotes

Partikelstorlek i ett cementbaserat bruk är en uppenbar faktor som påverkar inträngning av bruk. Malning av cementpartiklar är en metod som används för att förbättra brukets inträngningsegenskaper. Vid en viss partikelstorlek kommer inträngningen av bruket att påverkas negativt med malningen p.g.a. en större hydratisering och flockulering. Finare partiklar har en större specifik yta vilket ökar hydratisering i bruk. En större hydratisering ger en relativt större partikelförstoring hos

finare partiklar vilket försämrar inträngning. Flockulering är den andra processen som försämrar inträngning av dessa bruk. De finaste partiklarna i bruket flockulerar p.g.a. att interaktion mellan dessa partiklar styrs mera med ytfenomen än med volymfenomen (Hertzig et al., 1970; Schwarz, 1997). Flockar kan bli större än spaltvidden vilket orsakar ett omedelbart stopp av flödet.

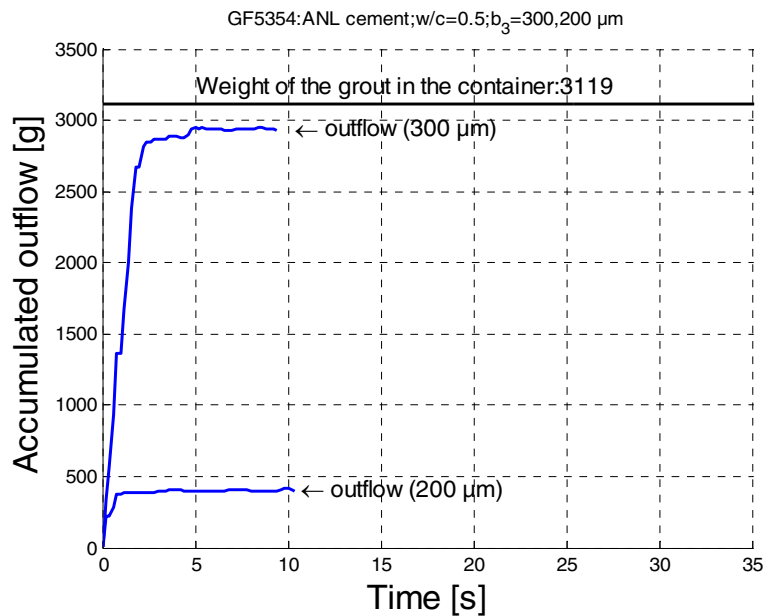
Sammanfattat kan inträngningen av bruket förbättras med malning av cementpartiklar till en given storlek. Efter denna storlek kommer en fortsatt malning att försämma inträngningen p.g.a. en större hydratisering och flockulering.

### **Uppmätta resultat**

Resultat av två inträngningstester med bruk baserade på en grövre cement med ett  $d_{95}$  av  $128\mu\text{m}$  (ANL) visas i Figur 25. Vct talet i bruket var relativt låg (0.5) och mätningen genomfördes med 200 och  $300\mu\text{m}$  spaltvidder. Mätningen med  $200\mu\text{m}$  spaltvidd resulterade i ett nästan omedelbart stopp av flödet och vikten av det passerade bruket var relativt lågt (400 g). I mätningen med spalten med  $300\mu\text{m}$  spaltvidd passerade allt bruk genom spalten under en period av 2 sekunder. Det ackumulerade utflödet var linjärt och visade ingen filtrering.

Enligt dessa mätningar ligger  $b_{\text{kritiskt}}$  för detta bruk mellan 200 och  $300\mu\text{m}$ . För en noggrannare bestämning behövs det flera spalter med spaltvidder mellan 200 och  $300\mu\text{m}$ . Med en antagen  $b_{\text{kritiskt}}$  av  $250\mu\text{m}$  blir relation mellan den kritiska spaltvidden och  $d_{95}$  2 vilket i litteraturen kallas för k.





Figur 25: Inträngningstester med ANL vct=0.5 bruk genomförda med 200 och 300μm spaltvidder. Injekteringsstrycket är 15 bar. Penetrability tests performed with ANL w/c=0.5 grout with slot apertures of 300 and 200μm. Grouting pressure is 15 bars.

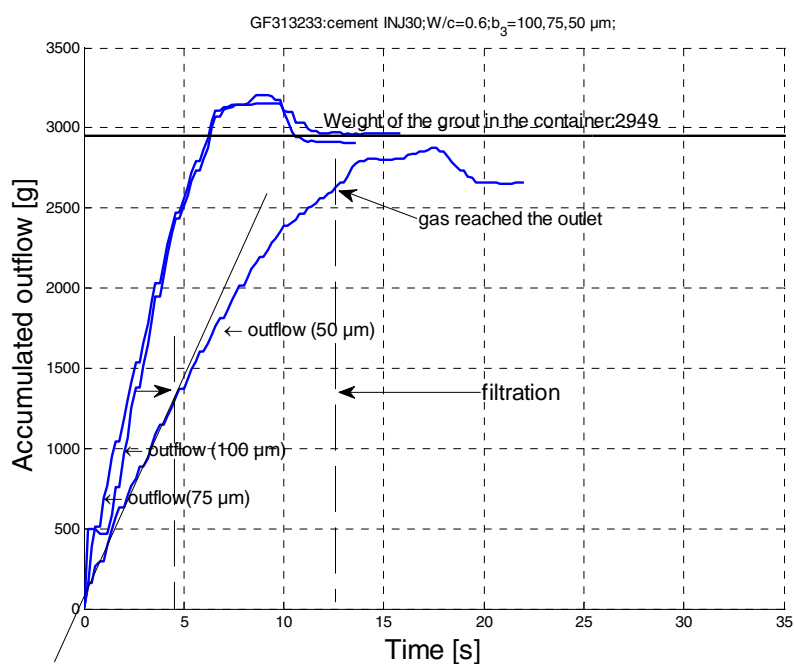
De nästa presenterade mätningarna genomfördes med INJ30 vct=0.6 bruk. Detta bruk har en  $d_{95}$  av 32μm och är en mycket finare cement än ANL. Mätningarna med 50, 75 och 100μm spaltvidder genomfördes två gånger och med 30 μm spaltvidd en gång (Figur 26, Figur 27).

Vid mätningarna med 75 och 100μm spaltvidder visade bruket i princip samma inträngning i båda omgångarna. Bruket passerade genom spalten utan någon filtrering och under en tid mellan 6 till 8 sekunder.

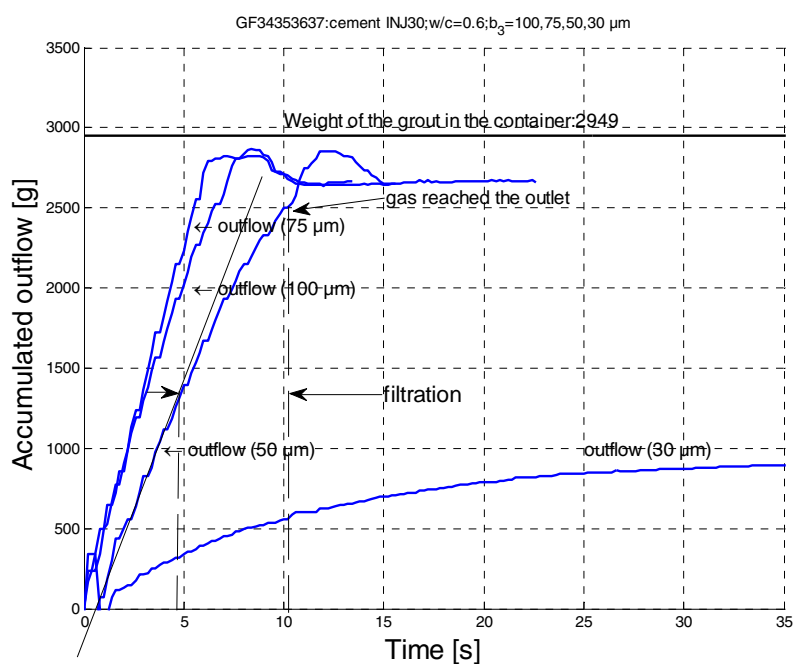
Vid mätningar med en minskad spaltvidd av 50μm filtrerades bruket delvis under en period i båda omgångarna. Filtreringen startade efter cirka 4 sekunder och fortsatte 6 eller 7 sekunder tills gasen nådde utloppet av spalten och startade erosion av den delvis uppbyggda filterkakan.

Vid mätningen med 30μm spaltvidd började filtreringen omedelbart och fortsatte under en period av 35 sekunder tills ett totalt stopp av flödet inträffade. Vikten av det passerade bruket var cirka 900 gram.

Enligt dessa mätningar, ligger  $b_{\text{kritiskt}}$  för detta bruk mellan 50 och 75μm. Det ger en relation mellan den kritiska spaltvidden och  $d_{95}$  (k) av cirka 2.



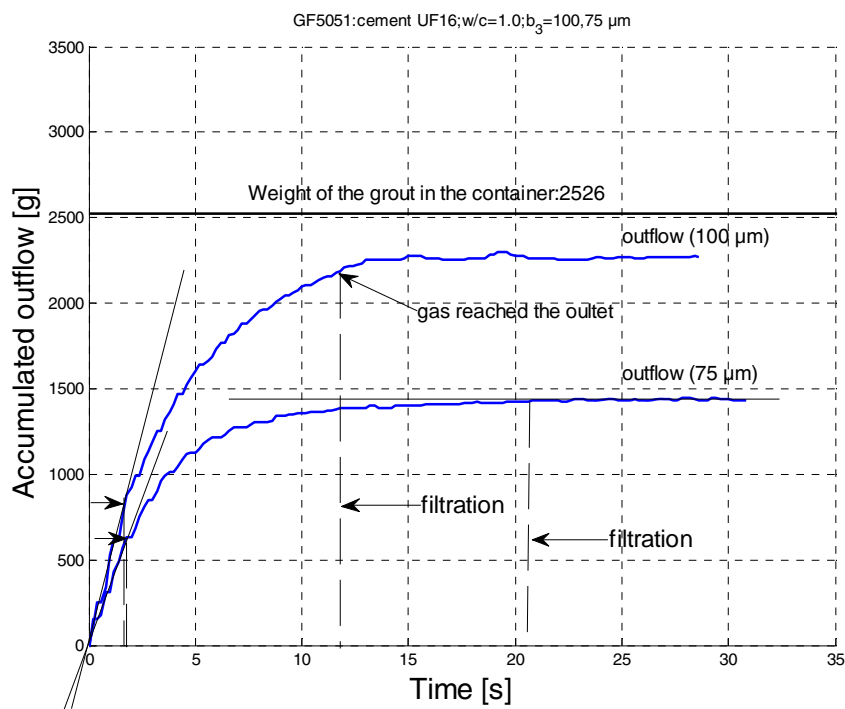
Figur 26: Inträngningstester med INJ30 vct=0.6 bruk genomförda med 100, 75 och 50 μm spaltvidder. Injekteringsstrycket är 15 bar. Penetrability tests performed with INJ30 w/c=0.6 grout with slot apertures of 100, 75 and 50 μm. The grouting pressure is 15 bars.



Figur 27: Inträngningstester med INJ30 vct=0.6 bruk genomförda med 100, 75, 50 och 30 μm spaltvidder. Injekteringsstrycket är 15 bar. Penetrability tests performed with INJ30 w/c=0.6 grout with slot apertures of 100, 75, 50 and 30 μm. The grouting pressure is 15 bars.

Mätningarna presenterade i Figur 28 har genomförts med UF16 vct=1.0 bruk med spalter med 100 och 75 μm spaltvidd. Trots att cementet i detta bruk har en d<sub>95</sub> av

16 $\mu\text{m}$  och är finnare än INJ30, har bruket filtrerats i båda mätningarna. Enligt dessa mätningar blir  $b_{\text{kritiskt}}$  av detta bruk större än 100 $\mu\text{m}$ . Eftersom en relativt stor mängd av bruket har passerat genom spalten med 100 $\mu\text{m}$  spaltvidd, kan  $b_{\text{kritiskt}}$  antas ligga nära 125 $\mu\text{m}$ . I detta fall blir  $k$  lika med 8 vilket är fyra gånger större jämfört med föregående bruk.

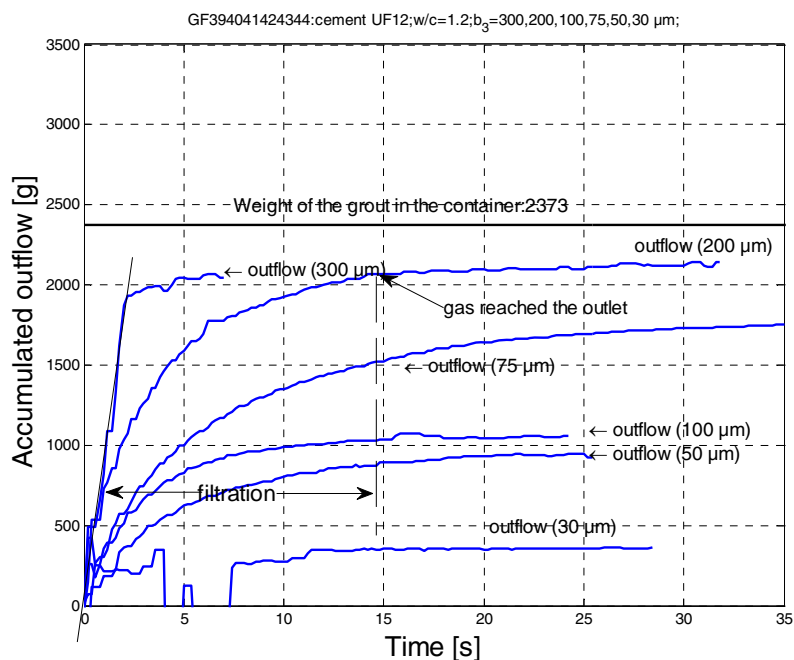


Figur 28: Inträngningstester med UF16 vct=1.0 bruk genomförda med 100 och 75 $\mu\text{m}$  spaltvidder. Injekteringsstrycket är 15 bar. Penetrability tests performed with UF16 w/c=1.0 grout with slot apertures of 100 and 75 $\mu\text{m}$ . The grouting pressure is 15 bar.

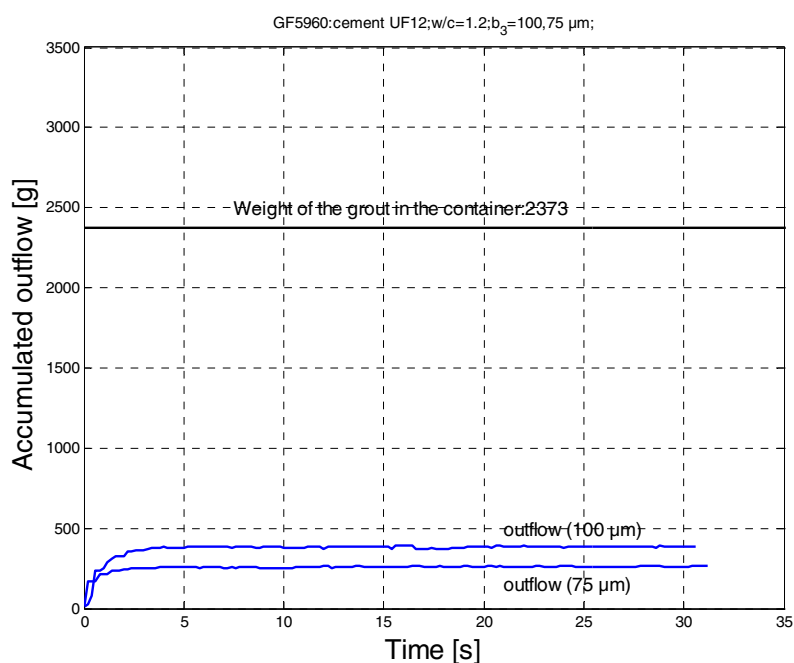
I den sista mätserien med varierande cement testades inträngningsförmåga av UF12 vct=1.2 bruk. Detta bruk är gjort med den finaste cement som har använts i dessa studier med en  $d_{95}$  av 12 $\mu\text{m}$ .

Bruket passerade bara spalten med 300  $\mu\text{m}$  spaltvidd utan filtrering. Allt bruk passerade också genom spalten med 200 $\mu\text{m}$  spaltvidd men med en klar filtrering (Figur 29). Den uppmätta inträngningen med spalten med 75 $\mu\text{m}$  spaltvidd var något bättre än med spalten med 100 $\mu\text{m}$  spaltvidd (Figur 29). Det kan betyda att pluggbildning är en delvis slumpmässig process. Ytterligare två mätningar med dessa två spaltgeometrier har genomförts efter tio dagar med cement från samma cementleverans. Båda mätningarna visade en sämre inträngning, (Figur 30). Den relativt stora skillnaden mellan dessa två serier antyder att bruken inte motsvarade varandra.

Baserade på dessa mätningar, kan  $b_{\text{kritiskt}}$  antas till  $250\mu\text{m}$  vilket ger ett förhållande mellan den kritiska vidden och  $d_{95}$  (k) av cirka 21.



Figur 29: Inträngningstester med UF12 vct=1.2 bruk genomförda med 300, 200, 100, 75, 50 och  $30\mu\text{m}$  spaltvidder. Injekteringsstrycket är 15 bar. Penetrability tests performed with UF12 w/c=1.2 grout with slot apertures of: 300, 200, 100, 75, 50 and  $30\mu\text{m}$ . The grouting pressure is 15 bars.



Figur 30: Inträngningstester med UF12 vct=1.2 bruk genomförda med 100 och  $75\mu\text{m}$  spaltvidder. Injekteringsstrycket är 15 bar. Penetrability tests performed with UF12 w/c=1.2 grout with slot apertures of 100 and  $75\mu\text{m}$ . The grouting pressure is 15 bars.

## Diskussion

Tester genomförda med INJ30 vct= 0.6 bruk visade en god repeterbarhet trots att det förväntade resultat med 100 $\mu$ m spaltvidd var något högre än med 75 $\mu$ m spaltvidd. Resultatet i dessa mätningar var i princip likadana.

Enligt de genomförda mätningarna har INJ30 vct= 0.6 bruk en relation mellan den kritiska spaltvidden och  $d_{95}$  av cirka 2. ANL vct=0.5 bruk har samma relation. Det visar att inträngningsegenskaperna av bruk baserade på INJ30 inte har försämrats med malningen genom en större hydratisering och flockulering.

Mätningarna från litteraturstudien uppmätta med andra metoder visar något varierande resultat. Eklund och Stille (2008) bestämde ett högre k (4) för bruk baserade på samma cement trots en betydande högre vct tal av 1.0. De använde filterpress med spalt geometri. Eriksson et al. (2004) bestämde  $b_{kritiskt}$  för ett liknade bruk till 100-150  $\mu$ m med filterpress med nätgeometri. Deras bruk var baserat på samma cement och hade samma vct tal men hade 1 % tillsatsmedel. Denna  $b_{kritiskt}$  ger ett k mellan 3 och 4 vilket kan betyda att filterpressen kan underskatta inträngning jämfört med denna metod.

Mätningarna genomförda med UF16 vct=1.0 bruk visade sämre inträngning än INJ30 vct= 0.6 bruk. Dessa mätningar ger ett k av 8. Eklund och Stille (2008) fick approximativt samma relation. Orsaken var troligen en stor påverkan av hydratisering och flockulering i den finmalda cementen.

Trots att UF12 är den finaste cementen som har använts i denna studie med ett  $d_{95}$  av 12 $\mu$ m, visade UF12 vct=1.2 bruk den sämsta inträngningsförmågan. Orsaken är troligen flockulering och hydratisering. Det bestämda k för detta bruk var 21 vilket är mycket större än det uppmätta för bruk baserade på UF16 (8). Detta värde är också betydligt högre än 16 som har bestämts med filterpress och spalt geometri av Eklund och Stille (2008), trots att deras bruk var något tjockare med ett vct tal 1.0.

Tabell 16 visar den summerade inträngningen av de fyra bruk som är baserade på grövre och finare cement uttryckt med  $b_{kritiskt}$  och k ( $b_{kritiskt}/d_{95}$ ). Enligt tabellen har INJ30 vct=0.6 bruk den bästa inträngningsförmåga och kan användas för att injektera sprickor ner till 65 $\mu$ m spaltvidd.

Mätningar med kort spalt med bruk baserade på INJ30 visade bättre inträngning än mätningarna från litteraturstudien uppmätta med filterpressen och nätgeometri medan mätningarna med spaltmetoden med bruk baserade på den finaste cementen visade något lägre inträngning jämfört med mätningarna från litteraturstudien genomförda med filterpress där spaltgeometri i stället för nätgeometri har använts.

Tabell 16: Summering av inträngning av bruk baserade på grövre och finare cement uttryckt med  $b_{kritiskt}$  och  $k$  ( $b_{kritiskt}/d_{95}$ ). Summarized  $b_{critical}$  and  $k$  ( $b_{critical}/d_{95}$ ) for the grouts based on coarse and fine-grained cements.

	ANL, vct=0.5	INJ30, vct=0.6	UF16, vct=1.0	UF12, vct=1.2
$b_{kritiskt}$ [ $\mu\text{m}$ ]	250	65	125	250
$k$ ( $b_{kritiskt}/d_{95}$ )	2	2	8	21

### 2.3.2 Inträngningstester med varierande vct tal

#### Hypotes

Risken för valvbildning under bruks inträngning genom spalten med spaltviddminskningen beror inte bara på relation mellan spaltvidd och partiklarnas diameter utan också på partikelkoncentration i bruket, d.v.s. vct talet. Huruvida två eller flera partiklar kommer att stöta emot varandra och initiera valvbildning vid spaltviddminskningen beror på avståndet mellan dem. En högre partikelkoncentration ger en större risk för valvbildning.

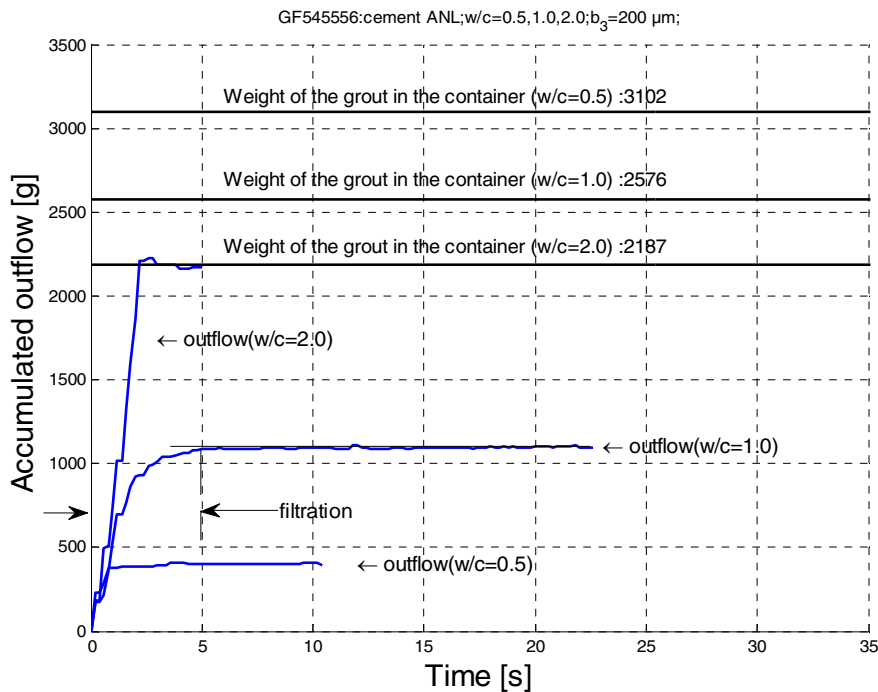
Vct talet påverkar också flockulering vilket är viktigt för finmalda cement. Högre vct ger glesare och mindre flockar som ger en lägre risk för valvbildning.

#### Uppmätta resultat

Två mätningar från föregående kapitel (2.3.1) har valts som referensmätningar vid val av undersökning för att studera vct talets påverkan på inträngningen. Den första valda mätningen är det test som genomfördes med ANL vct=0.5 bruk och 200 $\mu\text{m}$  spalt där flödesstopp inträffade efter bara 1 sekund och endast ca. 400g av bruket passerade genom spalten, se Figur 25. Den andra valda mätningen är det test som genomfördes med UF16 vct=1.0 bruk och 100 $\mu\text{m}$  spalt där bruket också hade filtrerats, se Figur 28. Vct talet av dess bruk har höjts och inträngningen har testats med samma spalter.

Inträngningen av bruk baserade på ANL cement uppmätt med 200 $\mu\text{m}$  spalt visas i Figur 31. Tre olika vct tal har testats. Det är 0.5, 1.0 och 2.0. I mätningen med lägre vct tal (0.5) startade pluggbildningen omgående och pluggen bildades snabbt, d.v.s. efter cirka en sekund. Cirka 400g bruk passerade genom spalten. När vct talet höjdes till 1.0 förlängdes filtreringstiden fem gånger och den passerade bruksmängden var cirka tre gånger större. Det betyder att detta bruk har en bättre inträngning. Vid en ytterligare höjning av vct talet till 2.0 passerade hela mängden av bruket genom spalten på en relativt kort tid utan någon filtrering. Detta kan ses på kurvan i diagrammet (vct=2.0) som kan anses vara linjär.

Dessa mätningar visade att filtrering och pluggbildning är vct-beroende, d.v.s. ett större vct tal ger en bättre inträngning.



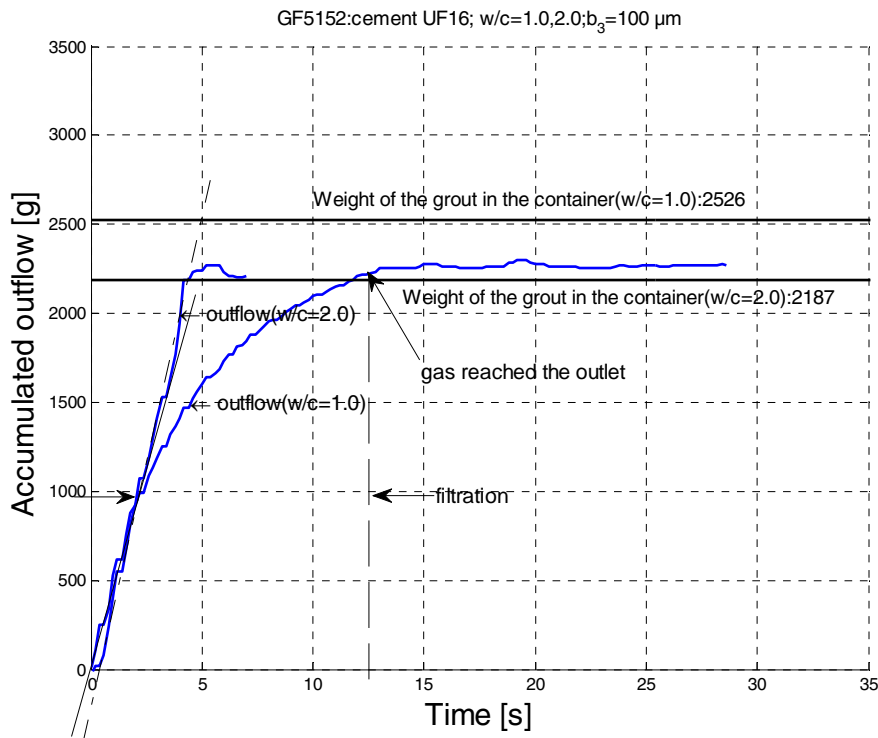
Figur 31: Inträngningstester med varierande vct tal (0.5, 1.0 och 2.0) genomförda med spalt med 200 $\mu$ m spaltvidd. Använd cement är ANL och injekteringstrycket är 15 bar. Penetrability tests with varying w/c ratios (0.5, 1.0 and 2.0) performed with slot aperture of 200 $\mu$ m. Cement used is ANL and grouting pressure is 15 bars.

Uppmätt inträngning av bruket baserat på UF16 cement med en 100 $\mu$ m spalt visas i Figur 32. I mätningen med vct 1.0 passerade hela mängden av bruket genom spalten under en cirka 10 sekunder lång filtrering. En komplett plugg skulle förmodligen uppstå efter en viss tid om brukbehållarens kapacitet hade varit större. Bruket med vct 2.0 passerade spalten mer än två gånger snabbare och utan någon filtrering.

Dessa mätningar bekräftade också att inträngningen är vct-beroende som föregående mätningar.

### Diskussion

Både bruk baserade på grövre och finare cement visade att ett högre vct tal ger en bättre inträngning.



Figur 32: Inträngningstester med varierande vct tal (1.0 och 2.0) genomförda med spalt med 100 $\mu$ m spaltvidd. Använd cement är UF16 och injekteringstrycket är 15 bar. Penetrability tests with varying w/c ratios (1.0 and 2.0) performed with a slot aperture of 100 $\mu$ m. Cement used is UF16 and the grouting pressure is 15 bars.

### 2.3.3 Inträngningstester med varierande injekteringstryck

#### Hypotes

Injekteringstryck kan påverka inträngningen av ett bruk i en spalt med en spaltviddminskning på två olika sätt.

Det första är valvbildning vid spaltviddminskningen. Partiklarna i valvet som motstår ett större tryck måste vara placerade i valvet mera noggrant. Det minskar marginalen av partiklarnas positionering i valvet vilket kan minska risken för valvbildning.

Dessutom kan ett eventuellt valv vid spaltviddminskningen lättare eroderas från sidan med ett högre tryck.

Det andra är erosion av delvis uppbyggda pluggar längst spaltkanterna. Flödet av bruk är lägst vid kontakten med spaltkanterna och därför är det mest troligt att pluggbildningen startar där. Ett högre tryck ger en högre flödes hastighet vilket ökar erosionen av en eventuellt startad pluggbildning längst spaltkanterna och det förbättrar inträngningen. Denna process är möjlig i en spricka men inte med andra mätmetoder som NES, filterpress och filterpump.



### **Uppmätta resultat**

Mätningar med INJ30 vct=0.6 bruk med 50µm spalt (Figur 26, Figur 27) har valts som referens. I dessa mätningar med 15 bars tryck passerade allt bruk genom spalten med en mindre filtrering. Spalten har okulärt kontrollerats efter mätningarna och delvis uppbyggda pluggar längst spaltkanterna har observerats i båda fallen. Se bilderna i Figur 34. Inträngningen av detta bruk har testats med ett lägre injekteringstryck (7 och 4 bar) för att testa om ett lägre injekteringstryck klarar av att hålla spalten öppen för att hela mängden av bruket ska kunna passera. Resultat av dessa mätningar visas i Figur 33.

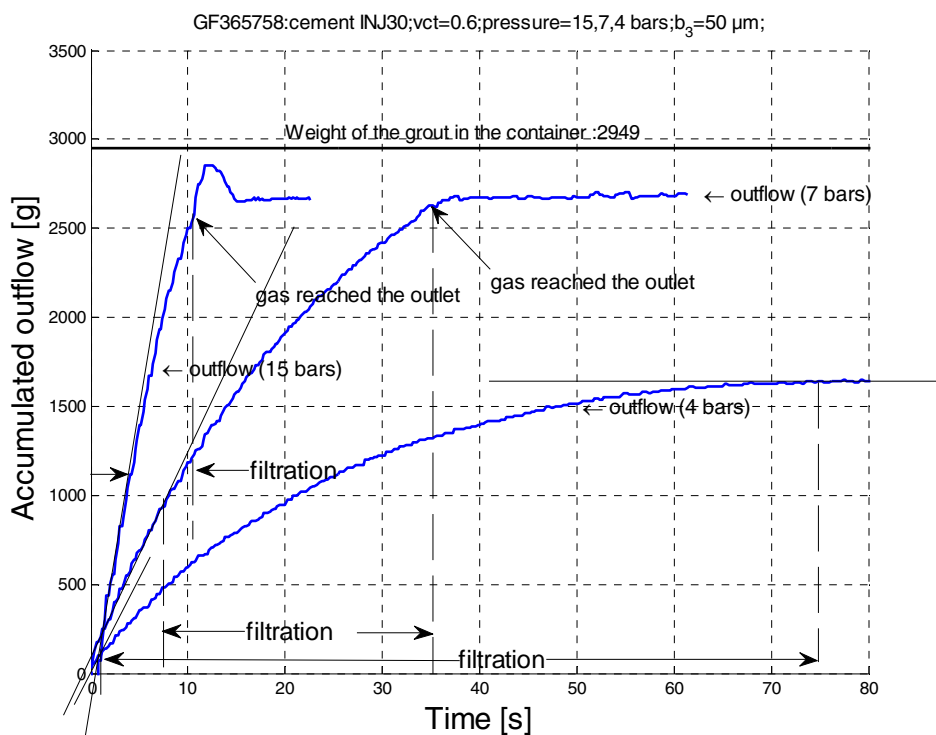
Under injekteringen med 4 bar startade pluggbildning och filtrering omedelbart och var klart efter cirka 75 sekunder. Genom spalten passerade bara 1600 gram bruk.

Injektering med 7 bar tryck gav en bättre inträngning än med 4 bar. Allt bruk passerade genom spalten under en period av 35 sekunder men med ett klart avtagande flöde vilket indikerar filtrering under de sista 27 sekunderna av flödet. Fotot i Figur 35 visar spalten efter mätningen med 7 bar tryck. I mätningen med 15 bar tryck passerade bruket genom spalten tre gånger snabbare än vid mätningen med 7 bar och med en betydligt lägre filtrering.

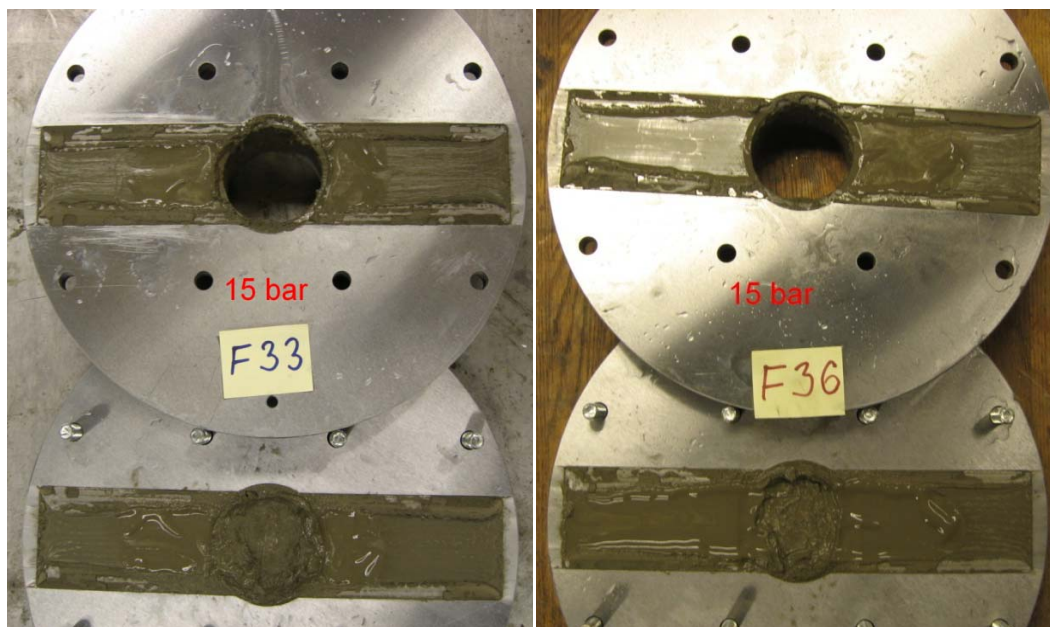
### **Diskussion**

Dessa mätningar visar att ett högre tryck bättre klarar av att hålla spalten öppen under injekteringen genom erosion och att ett högre tryck minskar risken för pluggbildning.

Eftersom ett högre tryck kan förbättra inträngningen borde mätningarna genomföras med ett tryck som ligger så nära det verkliga injekteringstrycket som möjligt.



Figur 33: Inträngningstester med varierande injekteringstryck (15, 7 och 4 bar) genomförda med spalt med  $50\ \mu\text{m}$  spaltvidd. Bruk INJ30 vct=0.6. Penetrability tests with varying grouting pressures (15, 7 and 4 bar) performed with a slot aperture of  $50\ \mu\text{m}$ . Grout used is INJ30 w/c=0.6.



Figur 34: Fotona visar spalten efter två inträngningsmätningar genomförda med 15 bar tryck(F33 och F36). Bruk INJ30 vct=0.6;spalt  $50\ \mu\text{m}$ . The photos show the slot after two penetrability measurements performed with 15 bar pressure (F33 and F36). Grout INJ30, w/c =0.6; aperture  $50\ \mu\text{m}$ .



Figur 35: Fotot visar spalten efter en inträngningsmätning genomförd med 7 bars tryck (F57). Bruk INJ30  $w/c=0.6$ ; spalt  $50\mu\text{m}$ . The photo shows the slot after penetrability measurement performed with 7 bar pressure. Grout INJ30,  $w/c = 0.6$ ; aperture  $50\mu\text{m}$ .

### 2.3.4 Inträngningstester med tillsatsmedel

#### Hypotes

Mätningarna genomförda med bruk baserade på grövre och finare cement visade att hydratisering och flockulering reducerar inträngningen av bruk baserade på mycket finmalda cement. Ett dispergeringsmedel borde kunna förbättra inträngningen av bruk baserade på mycket finmalda cement om orsaken till den dåliga inträngningen är flockulering.

Vid mätningen med UF12 vct=1.2 bruk och 300 $\mu$ m spalt, som har presenterats i Figur 29, passerade allt bruk genom spalten utan filtrering, medan i testet med 200 $\mu$ m spalt har bruket filtrerats betydligt. Filtreringen pågick i 13 sekunder innan gas nådde utloppet. Samma bruk har testats med tillsatsmedel för dispergering av cementpartiklar. Tillsatsmedlet som har använts är Cementas HPM. Mängden av tillsatsmedlet i försöket var 3 % av cementvikten.

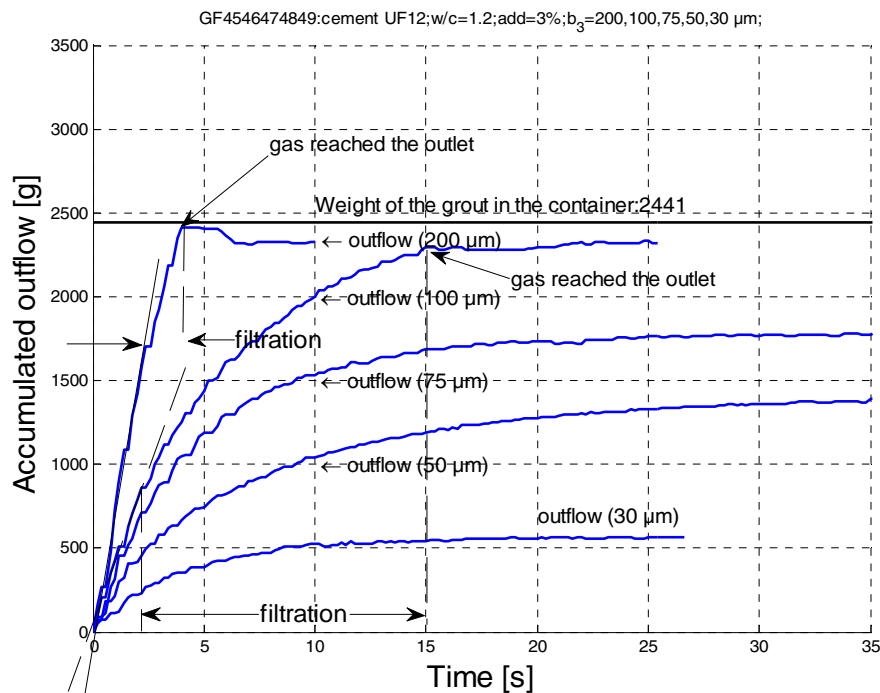
#### Uppmätta resultat

Resultat av mätningarna genomförda med bruk med tillsatsmedel visas i Figur 36. Bruket passerade genom spalten med 200 $\mu$ m spaltvidd med en kort filtrering på slutet av injekteringen. Filtreringen var betydligt lägre än i motsvarande mätning utan tillsatsmedel (Figur 29). I mätningen med spalten med 100 $\mu$ m spaltvidd passerade också hela mängden av bruket genom spalten, men bruket har filtrerats under en period av cirka 13 sekunder. Detta är en betydande förbättring även om relationen mellan en injekteringsbar spalt och  $d_{95}$  fortfarande är hög. Den är cirka 16, vilket betyder att bruket inte är totalt dispergerat.

Vid mätningar med 75, 50 och 30  $\mu$ m spalter var den passerade mängden bruk ungefär lika som i mätningarna utan tillsatsmedel.

#### Slutsats

Tillsatsmedel har en positiv effekt på inträngningen av bruk baserade på mycket fina cement, men de är fortfarande betydligt flockulerade med ett k på cirka 16.



Figur 36: Inträngningstester med UF12 vct=1.2 bruk med 3 % tillsatsmedel. Testerna har genomförts med spalter med 200, 100, 75, 50 och 30 μm spaltvidder. Penetrability tests with UF12 w/c=1.2 grout with additives (3% of the cement weight) performed with slot apertures of 200, 100, 75, 50 and 30 μm.

### 2.3.5 Inträngningstester med cement-alkohol blandningar

#### Hypotes

Mätningarna med tillsatsmedel visade att bruk baserade på mycket fina cement fortfarande är flockulerade med ett  $k$  av cirka 16. Det är mycket högre jämfört med den uppmätta  $k$  för INJ30 vct=0.6 bruk som hade ett  $k$  lika med 2 (Tabell 16).

Cementpartiklarna i en cement-alkohol blandning är inte förstörade med hydratisering och borde därför ha en bättre inträngning än motsvarande bruk.

Yang et al. (1997) studerade flockulering i en cement-alkohol blandning och drog slutsatsen att cement-alkohol blandningar inte är flockulerade. Det måste noteras att det använda cementet var ANL- liknande vilket är mycket grövre än UF12. Det är därför rimligt att anta att alkohol i en cement-alkohol blandning baserad på UF12 också har en reducerande effekt på flockulering.

Baserade på de två observationerna kan det antas att en cement-alkohol blandning inte är påverkad med hydratisering och mindre påverkad med flockulering än motsvarande bruk och därför skulle ha en bättre inträngning.

### **Uppmätta resultat**

Resultaten av de genomförda inträngningstesterna med UF12 act=1.2 cement-alkohol blandning med 100, 50 och 30 $\mu$ m spalter visas i Figur 37. Den uppmätta inträngningen av cement-alkohol blandningen var något lägre än den uppmätta inträngningen av bruk med tillsatsmedel. Figur 38 visar filterkakan från mätningen med 100 $\mu$ m spalt där den passerade mängden bara var 1600 gram, trots att hydratiseringen har eliminerats. Denna spalt är 9 gånger större än  $d_{95}$ .

### **Diskussion**

Detta indikerar att en icke vattenrelaterad flockulering fortfarande kan påverka partiklarna och orsaka pluggbildning. För att testa det genomfördes ytterligare en mätning med ett större act tal av 2.5 och resultatet av detta test visas i Figur 39. I denna mätning passerade hela blandningen genom spalten utan filtrering vilket kan betyda att blandningar med en lägre partikelkoncentration kan vara mindre flockulerade.

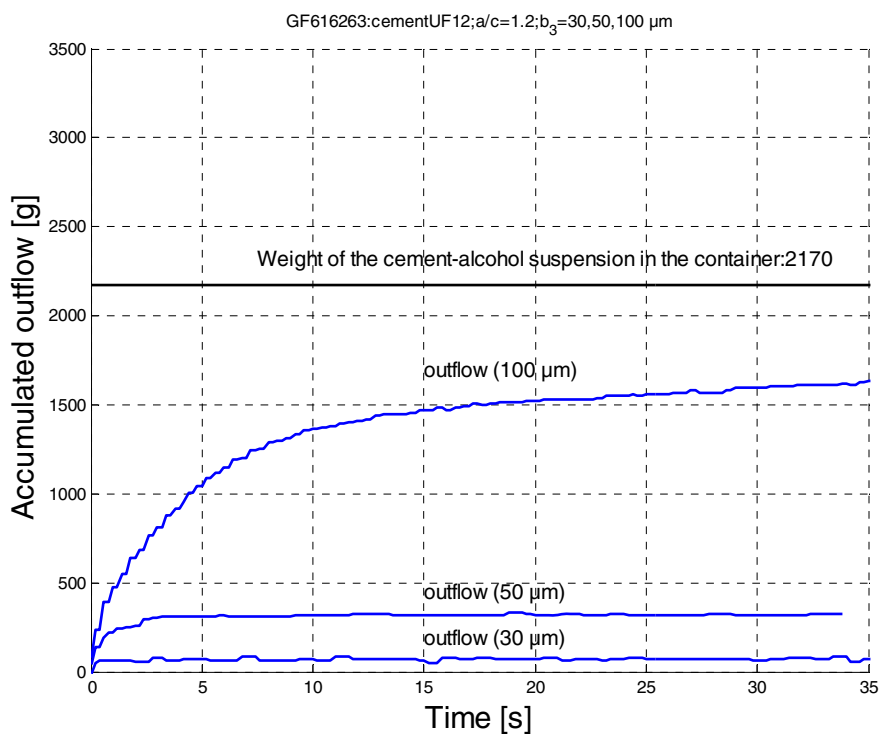
Att testa om bruks inträngning fortfarande är påverkad av hydratisering och flockulering även i ett system med en relativt låg partikelkoncentration har ytterligare två mätningar med vct=2.5 med och utan tillsatsmedel genomförts. Resultatet, som har presenterats i Figur 40, visade att ett bruk har mycket lägre inträngning än motsvarande cement-alkohol blandning. Detta styrker att hydratisering och flockulering påverkar inträngningen betydligt även i ett bruk med en låg partikelkoncentration.

### **Slutsats**

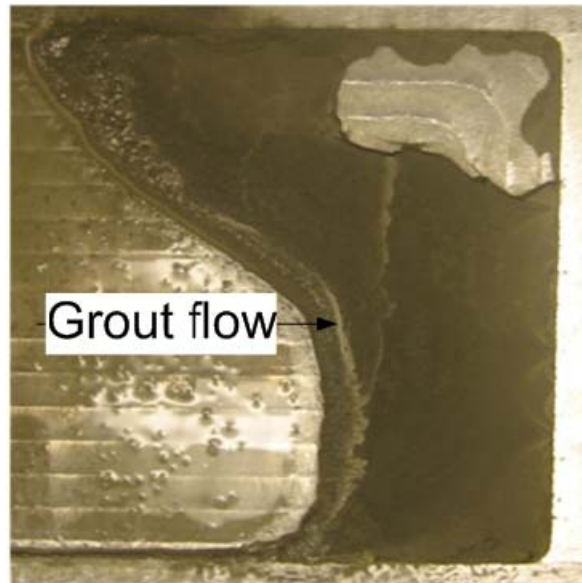
Summerade resultat av inträngningstester genomförda med UF12 vct=1.2 bruk med och utan flytmedel och motsvarande cement-alkohol blandningar visas i Tabell 17. Ett stort k visar att flockulering och hydratisering påverkar inträngningen betydligt hos bruk som är baserade på mycket finmalna cement. Tillsatsmedel kan förbättra inträngningen till en viss del. Tester med alkohol visade att cement-alkohol blandningar också kan vara flockulerade.

Tabell 17: Summerat  $b_{kritiskt}$  och  $k$  för UF12 vct=1.2 bruk med och utan tillsatsmedel och motsvarande cement-alkohol blandningar. Summarized  $b_{critical}$  and  $k$  for UF12 w/c =1.2 grouts with and without additives and corresponding cement-alkohol suspensions.

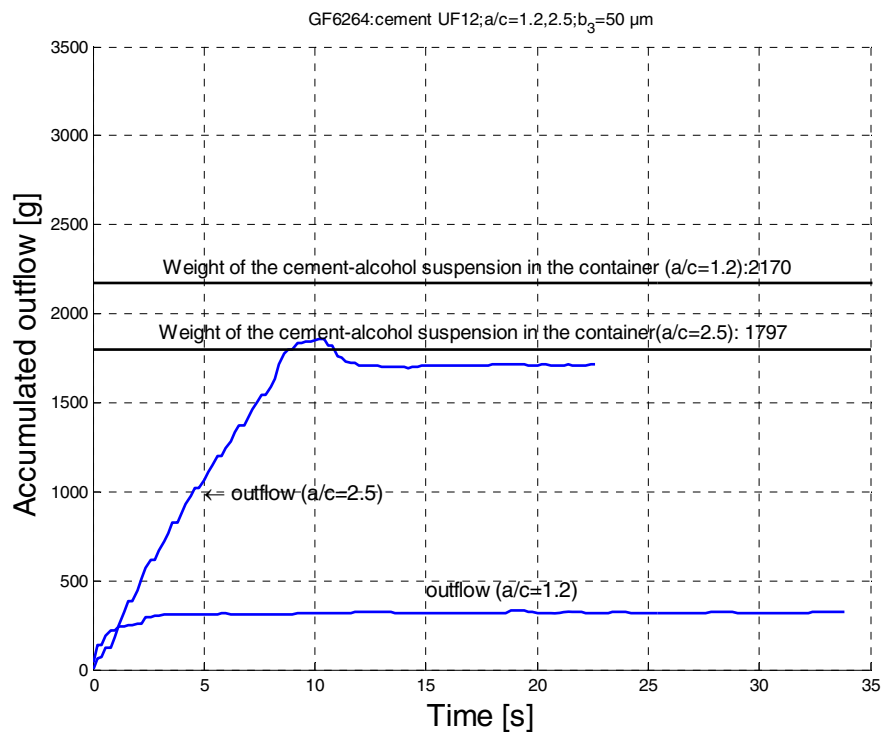
	UF12 vct=1.2 bruk utan tillsatsmedel	UF12 vct=1.2 bruk med tillsatsmedel	UF12-alkohol blandningar	
			act=1.2	act=2.5
$b_{kritiskt}$ [ $\mu\text{m}$ ]	250	200	200	50
$k$ ( $b_{kritiskt}/d_{95}$ )	21	16	16	4



Figur 37: Inträngningstester med UF12 act=1.2 cement-alkohol blandningar genomförda med 100, 50 och 30 $\mu\text{m}$  spalter. Injekteringstrycket är 15 bar. Penetrability tests with UF12 a/c = 1.2 cement-alkohol suspension performed with slot apertures of 100, 50 and 30 $\mu\text{m}$ . The pressure is 15 bars.

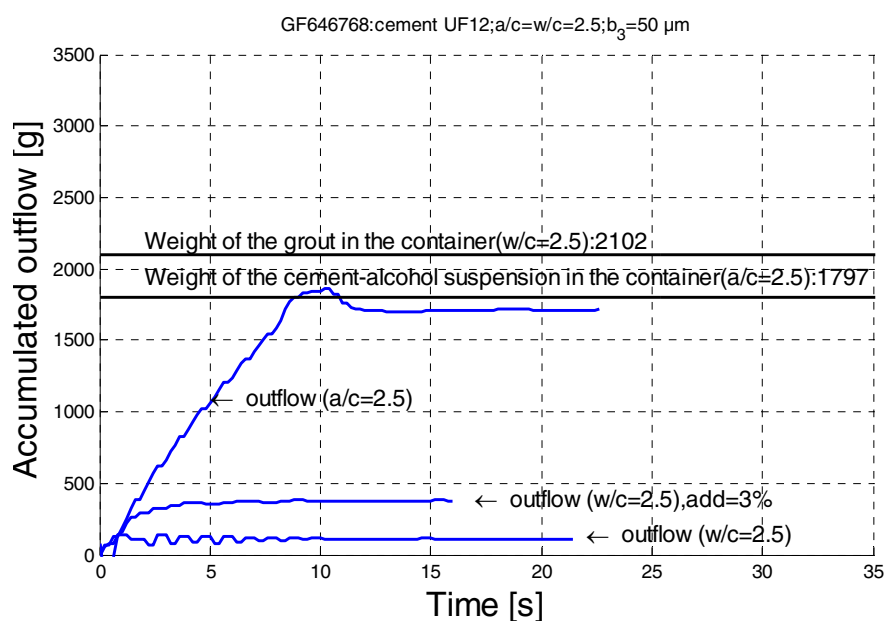


Figur 38: Filterkaka från inträngningstest med UF12  $a/c=1.2$  cement-alkohol blandning genomförda med  $100\mu\text{m}$  spalt som har presenterats i Figur 37. Filter cake from the penetrability test with a U12  $a/c=1.2$  cement-alcohol suspension performed with a slot aperture of  $100\mu\text{m}$  presented in Figur 37.



Figur 39: Inträngningstester med varierande  $a/c$  tal (2.5 och 1.2) genomförda med  $50\mu\text{m}$  spalt. Använd cement i blandningen är UF12. Injekteringstrycket är 15 bar. Penetrability tests with varying  $a/c$  ratio (2.5, 1.2) performed with slot apertures of  $50\mu\text{m}$ . Used cement in the suspension is UF12. The pressure is 15 bars.





Figur 40: Inträngningstester med bruk med och utan tillsatsmedel och motsvarande cement-alkohol blandningar genomförda med 50μm spalt. Testad penetrabilitet av grouterna med och utan tillsatsmedel och motsvarande cement-alkohol suspension genomförda med en spaltöppning av 50μm.

### 2.3.6 Diskussion av testresultat uppmätta med kort spalt i steg 1

Beroende på cementets kornkurva varierar inträngningen av bruk betydligt. Den bästa inträngningen visade INJ30 vct=0.6 bruk med en  $b_{\text{kritiskt}}$  av cirka 65μm. Trots att UF12 vct=1.2 bruk är baserat på en mycket finare cement visade detta bruk en betydligt lägre inträngning. Bruket hade samma inträngning som ANL vct=0.5 bruk med en uppmätt  $b_{\text{kritiskt}}$  av cirka 250μm.

Relationen mellan  $b_{\text{kritiskt}}$  och  $d_{95}$  (k) kan också vara ett mått på hydratisering och flockulering av bruk och enligt dessa mätningar är UF12 vct=1.2 bruk, med ett k av 21, det mest flockulerade bruket.

Mätningarna med cement-alkohol blandningar bekräftade också att hydratisering och flockulering har en negativ påverkan på inträngning av bruk baserade på mycket finmalda cement.

En högre partikelkoncentration ger en sämre inträngning vilket bekräftades både vid mätningar med varierande vct tal och vid mätningar med cement-alkohol blandningar.

Ett högre tryck reducerar risken för valvbildning och erosion av en delvis uppbyggd plugg vid spaltviddminskningen och längst spaltkanten.

Tillsatsmedel har en positiv effekt på inträngning av bruk som är baserade på mycket finmalda cement.

## 2.4. Inträngning uppmätt med lång och kort spalt och filterpress i steg 2

### 2.4.1 Inträngningstester med INJ30 vct=0.6 bruk

Resultat av ett inträngningstest med lång spalt genomförd med INJ30 vct=0.6 bruk visas i Figur 41. De fyra kurvorna i diagrammet presenterar trycken P1, P2, P3 och P4 under injekteringen. Före injekteringsstart sattes trycket i bruksbehållaren till injekteringstrycket  $P1=15$  bar. Injekteringen startade med att öppna ventil V4 (Figur 24). I detta moment ökar trycket P2 till cirka 13.5 bar, P3 till ca 13 bar och P4 till ca 4 bar. Injekteringen pågick i cirka 80 sekunder till tiden  $t=105$  s då gasen från bruksbehållaren nådde utloppet av spalten. På diagrammet indikeras detta med ett plötslig hopp av P4. Mätningen avslutas genom att stänga ventil V4 och trycket P4 faller då till noll.

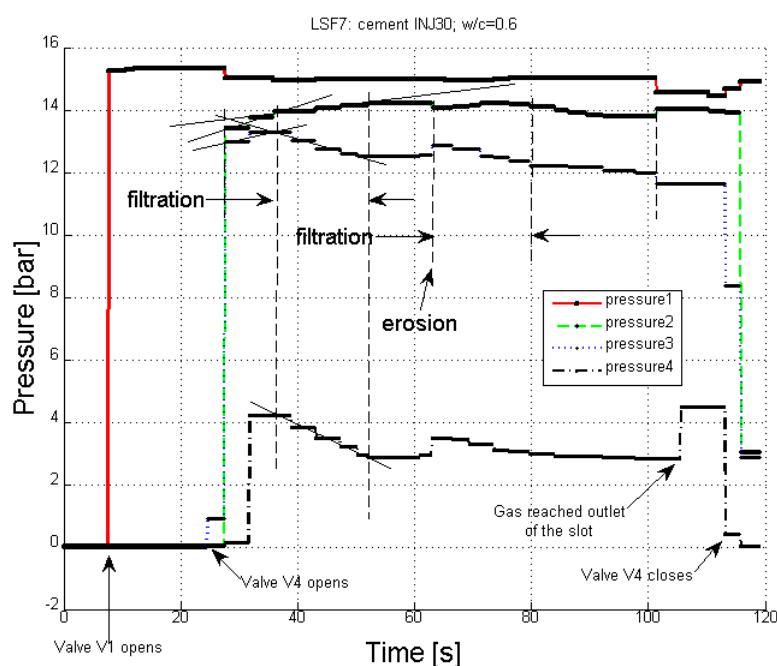
Tryck P2 och P3 borde öka sakta i början av injekteringen tills bruket når slutet av spalten som ett resultat av den ökade inträngningslängden, se Figur 42. En sådan period när P2 och P3 sakta ökar kan observeras i Figur 41. Efter det fortsätter P2 långsamt att öka medan P3 och P4 börjar minska under en period av cirka 18 s tills tiden  $t$  ligger omkring 52 s i diagrammet. Detta indikerar filtrering av bruket vid spaltviddsminskningen.

Efter denna period, under en ny period av ca 10 s, förblir trycken P2, P3 och P4 konstanta. Detta indikerar att den startade filtreringen tillfälligt har stannat och flödet under denna period förblir konstant.

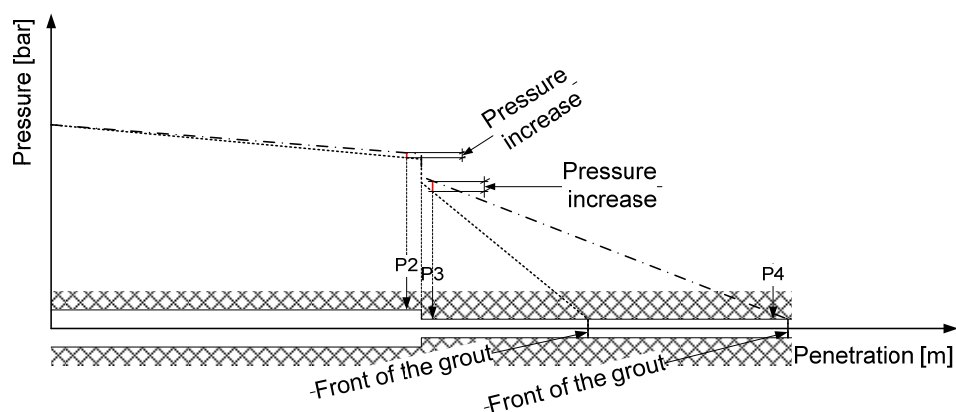
Senare, då tiden  $t$  är lika med 64 s, sker ett litet tryckfall av P2 och en liten tryckökning av P3 och P4. Detta kan vara ett resultat av en plötslig erodering av en delvis uppbyggd plugg.

Detta följs med en ny period av filtrering vilket fortsätter tills tiden  $t$  är lika med 80 s vilket också indikeras med en långsam ökning av P2 och långsam minskning av P3 och P4.

Efter tiden  $t$  lika med 80 s har alla tryck i princip varit konstanta, vilket kan betyda att flödet var stabilt utan någon fortsatt filtrering tills gasen nådde slutet av spalten. En delvis uppbyggd filterkaka från detta test visas i foto 1 i Figur 44.



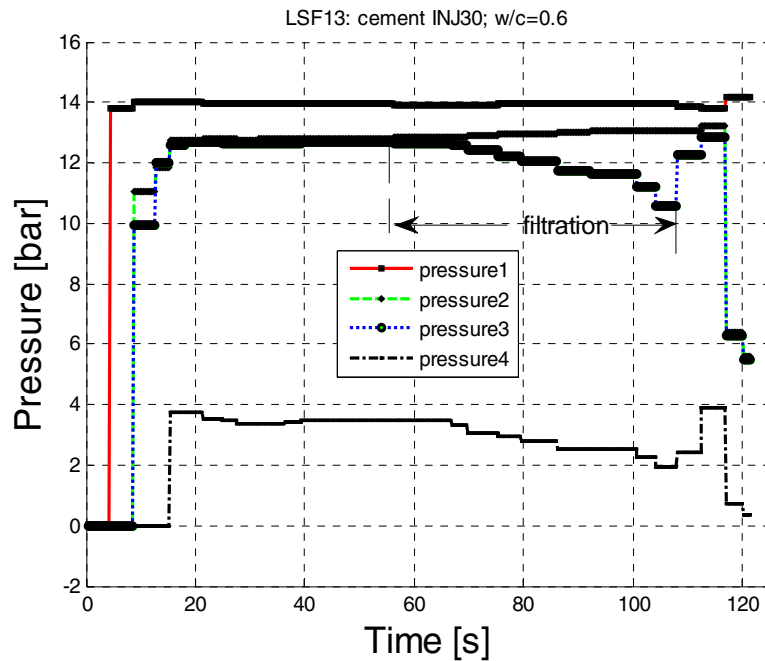
Figur 41: Inträngningstest LSF7 genomförd med lång spalt med INJ30 vct=0.6 bruk. Penetrability test LSF7 performed with the long slot with INJ30 w/c=0.6 grout.



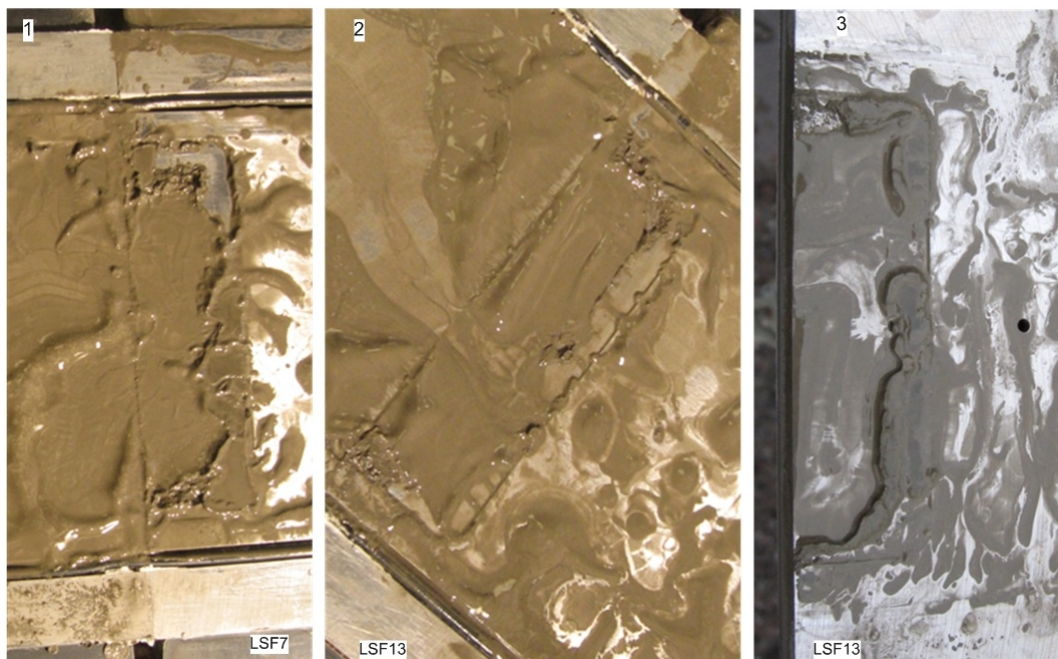
Figur 42: Tryckändring längs spalten till fronten av bruket när utloppet. The pressure changes along the slot until front of the grout reach the outlet.

Resultat av ett upprepat test med samma bruk, d.v.s. bruk med samma recept, visas i Figur 43. Hela mängden bruk passerade genom spalten som i det föregående testet. I detta test startade inte filtreringen så tidigt som i det föregående testet utan snarare cirka 45 sekunder efter starten av injekteringen. Detta indikeras med en långsam ökning av P2 och en långsam minskning av P3 och P4 vilket har markerats som filtrering i diagrammet. Plötsligt hopp av trycken P3 och P4 på slutet av filtreringen kan vara en erosion men trycket P2 borde också minska. En delvis uppbyggd plugg från detta test visas i foto 2 (nedre platta) och foto 3 (övre platta) i Figur 44. Även om filtreringen i denna mätning startade något senare, visade de två mätningarna på

liknande resultat. Resultaten visade också att filtreringsprocessen kan indikeras med mätningen av dessa fyra karakteristiska tryck.



Figur 43: Inträngningstest LSF13 genomförd med lång spalt med INJ30 vct=0.6 bruk. Penetrability test LSF13 performed with the long slot with INJ30 w/c=0.6 grout.



Figur 44: En delvis uppbyggd filterkaka i LSF7 och LSF13. Foto 1 visar den nedre plattan vid spaltviddminskningen i LSF7 testet och fotona 2 och 3 visar den nedre och övre plattan i LSF13 testet på samma plats. A partially build filter cake in the LSF7 and LSF13 tests. Picture 1 shows the lower plate at the constriction in the LSF7 test and pictures 2 and 3 show the lower and upper plate in the LSF13 test at the same location.

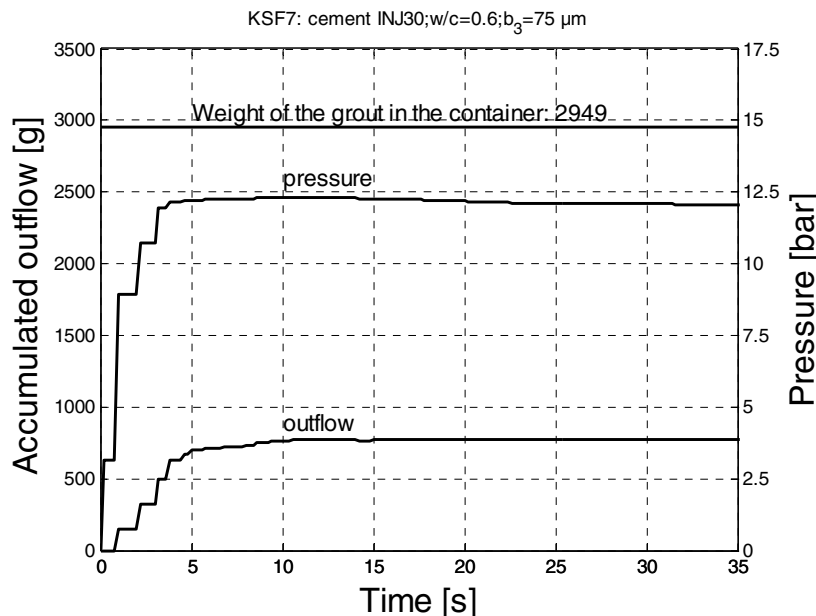
Inträngningen av samma bruk har också testats med den korta spalten med  $75\mu\text{m}$  spaltvidd och resultatet visas i Figur 45. Bara 800 gram bruk passerade genom spalten. Inträngningen var lägre än i de motsvarande mätningarna i steg 1( Figur 26, Figur 27) där hela mängden bruk passerade genom spalten. Detta kan också betyda att valet av blandare kan påverka inträngningen.

Inträngningen av detta bruk har även testats med filterpressen. Denna mätning visade också på en relativt låg inträngning. De bestämda  $b_{\text{min}}$  och  $b_{\text{kritiskt}}$  var  $68$  respektive  $172\mu\text{m}$  och vid mätningen med  $75\mu\text{m}$  filter passerade bara 60 ml bruk.

### Diskussion

Mätningarna genomförda av Eriksson et. al (2004) med filterpress, där bruket har blandats med labblandare och kolloidal fältblandare, visade också på en stor variation. I ett liknade bruk ( $v_{\text{ct}}=0.8$ ) blandad med labblandare varierade  $b_{\text{kritiskt}}$  mellan 100 och  $150\mu\text{m}$  och i bruket blandad med fältblandare mellan 100 och  $210\mu\text{m}$ .

Detta kan betyda, trots en stor variation av inträngning, att bruket blandad med fältblandare har något lägre inträngning jämfört med bruk blandade med labblandare.



Figur 45: Inträngningstest KSF7 genomförd med kort spalt med  $75\mu\text{m}$  spaltvidd och med INJ30  $v_{\text{ct}}=0.6$  bruk. Penetrability test KSF7 performed with the short slot with an aperture of  $75\mu\text{m}$  and with INJ30  $w/c=0.6$  grout.

## Slutsatser

Mätningarna med den långa spalten visade att filtreringsprocessen kan indikeras med de fyra uppmätta karakteristiska trycken. Mätningarna indikerade att erosion av delvis uppbyggda pluggar också kan observeras.

Under inträngningsmätningar med den långa spalten passerade hela mängden av bruket genom spalten med en delvis filtrering, medan vid mätningen med den korta spalten passerade bara 30 % av bruket. Detta antyder att bruket tränger in enklare genom den långa spalten, vilket kan betyda att en längre spalt efter spaltviddsminskning inte påverkar inträngningen negativt.

Inträngningen uppmätt med den korta spalten i detta steg var lägre än inträngningen uppmätt med den korta spalten i steg 1. Detta antyder att fältblandare av kolloidal typ blandar bruk baserade på detta cement något sämre än labblandare. En vidare och mer fokuserad forskning på blandning borde därför genomföras.

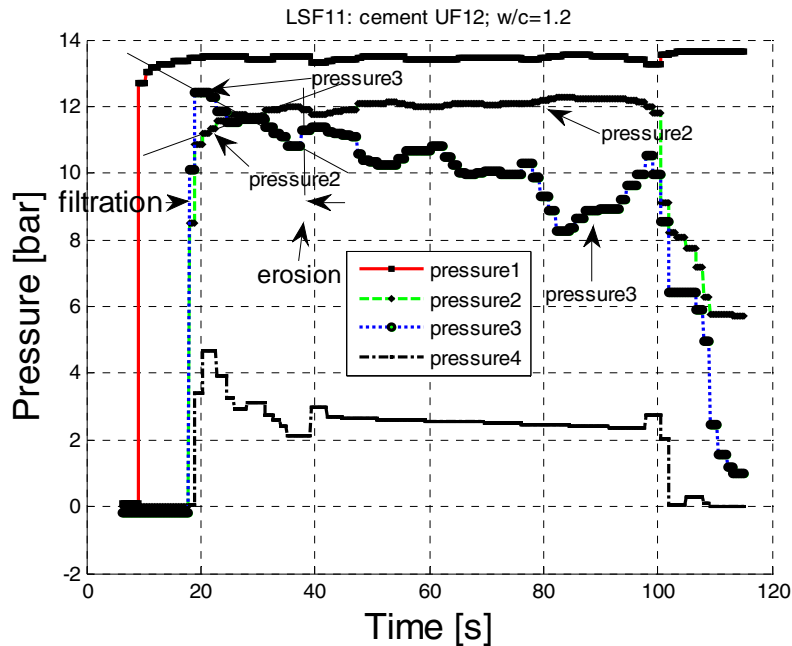
### 2.4.2 Inträngningstester med UF12 vct=1.2 bruk

Nästa mätningsserie med lång spalt, kort spalt och inträngningsmeter har genomförts med UF12 vct=1.2 bruk. Detta bruk visade en lägre inträngning i steg 1 än INJ30 vct=0.6 bruk. Mätningarna med alkohol och tillsatsmedel visade att orsaken kan vara hydratisering, flockulering och hög partikelkoncentration. Hjertström och Petersson (2006) visade att blandning av bruk baserade på denna fina cement är viktigt och att en betydligt bättre inträngning kan åstadkommas med blandare av kolloidal typ vid höga varvtal. I dessa mätningar har en blandare av kolloidal typ använts.

Uppmätta resultat med den långa spalten visas i Figur 46 och Figur 47. I den första mätningen passerar hela mängden av bruket genom spalten under en period av cirka 80 sekunder. Pluggbildning startar omedelbart vilket indikeras med en ökning av P2 och en minskning av P3 och P4 under tiden mellan 18 och 38 sekunder. I slutet av denna period inträffar en plötslig erosion.

Efter denna period fortsätter trycket P2 i princip att vara konstant medan P3 fortsätter att minska resten av tiden med en stor variation. Den stora variationen av P3 har orsakats av en frekvent växling mellan pluggbildning och erosion av den delvis uppbyggda pluggen. Denna slutsats baseras på det observerade pulserande utflödet från utloppet vilket också har filmats.

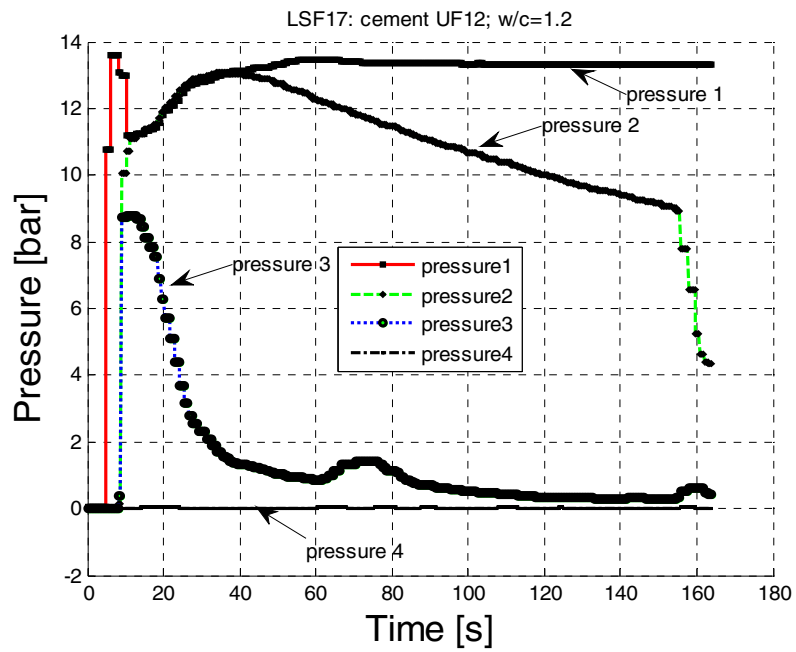
Det borde noteras att P2 borde vara något högre än P3 i början av injekteringen medan mätningarna visade motsatsen. Detta kan betyda att någon av tryckgivarna P2 eller P3 visar ett högre eller ett lägre värde men det viktigaste är den uppmätta trenden som visar filtrering.



Figur 46: Inträngningstest LSF11 genomförd med lång spalt med UF12 vct=1.2 bruk. Penetrability test LSF11 performed with the long slot with UF12 w/c=1.2 grout.

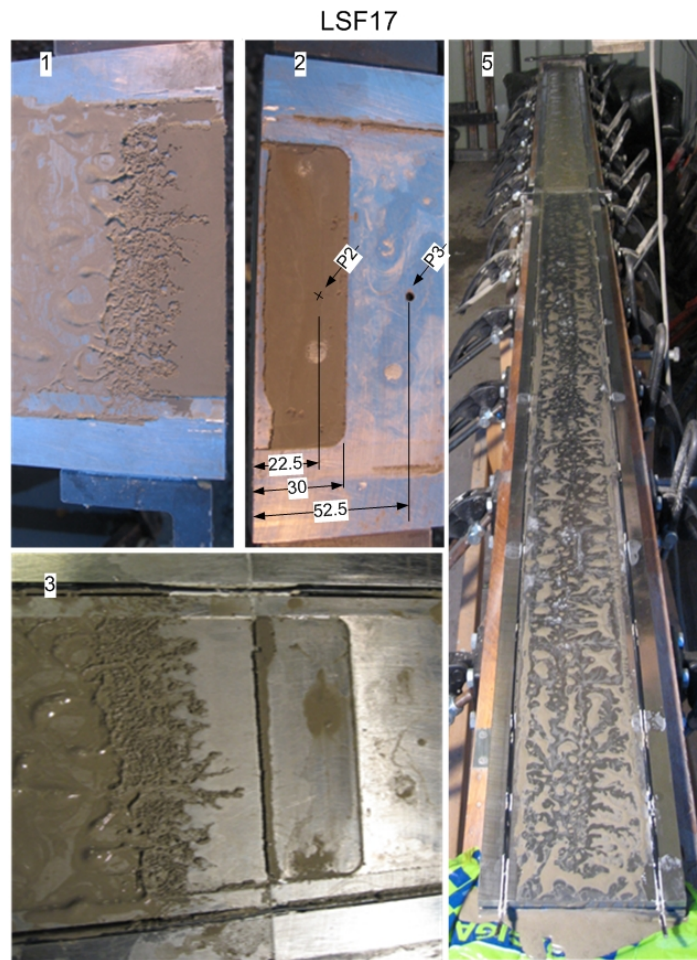
Resultat av det upprepade testet med samma bruk visas i Figur 47. I denna mätning startar pluggbildningen också omedelbart som i den föregående mätningen. Skillnaden är att i detta test sker ingen erosion av pluggen, istället växer pluggen under hela injekteringen. Ett visst utflöde från utloppet har observerats under hela testet. Enligt det uppmätta trycket P2, når pluggen tryckgivaren P2 vid tiden  $t$  lika med 35 sekunder och efter detta tillfälle börjar P2 minska p.g.a. att filterkakan täcker tryckgivaren. Filterkakan fortsätter därefter att växa. Vid tiden  $t$  lika med 155 sekunder stoppades mätningen även om flödet inte hade stannat totalt. Cirka 25 % av bruket hade då passerat genom spalten.

Filterkakan från detta test visas i Figur 48. Foto 1 och 2 visar filterkakan i övre plattan och foto 3 visar en del av filterkakan på den nedre plattan. Foto 2 visar också platserna där trycken P2 och P3 har mätts. Foton visar att filterkakan har passerat tryckgivaren P2 med cirka 50 mm vilket styrker föregående förklaring att trycket P2 börjar minska när filterkakan når tryckgivaren P2. Foto 5 visar de nedre plattorna från detta test. Man kan se att spalten efter spaltviddminskningen kan bli injekterad även om bruket filtreras under hela injekteringen.



Figur 47: Inträngningstest LSF17 genomförd med lång spalt med UF12 vct=1.2 bruk. Penetrability test LSF17 performed with the long slot with a UF12 w/c=1.2 grout.



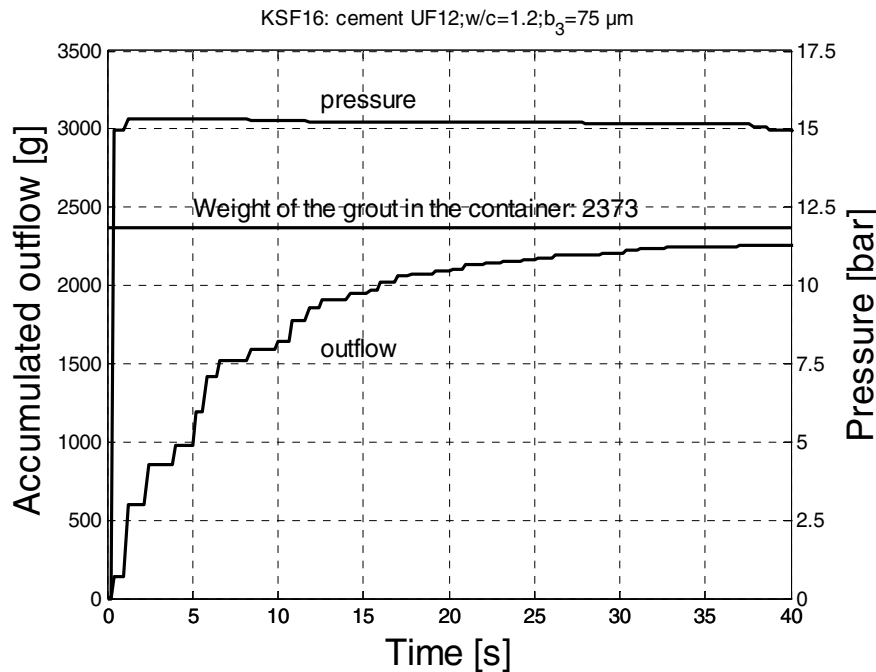


Figur 48: Foton på den långa spalten efter det genomförda testet som har presenterats i Figur 47. Foto 1 och 2 visar filterkakan i övre plattan och foto 3 visar en del av filterkakan på den nedre plattan. Foto 5 visar de nedre plattorna från denna test. The long slot after the performed test presented in Figur 47. Pictures 1 and 2 show the filter cake at the upper plate and picture 3 shows the part of the filter cake at the lower plate. Picture 2 also shows the distances in mm where pressures P2 and P3 are measured.

Resultatet av ett inträngningstest med samma bruk som med den korta spalten visas i Figur 49. Under cirka 35 sekunder passerade cirka 2250 gram av bruket genom spalten med ett avtagande flöde under hela injekteringen. Det finns likheter mellan detta försök och försök med den långa spalten där bruket också var filtrerat från början av injekteringen.

Mängden av bruket som passerade genom spalten i detta test var något högre (2250 g) än i steg 1 (1600 och 250 g, Figur 29, Figur 30) där bruket har blandats med labblandare. Det antyder att fältblandare är mera lämplig för att blanda bruk baserade på detta finmalda cement men flera mätningar borde genomföras.

Vid mätningen med filterpress med 75 $\mu$ m filter var den passerade mängden bruk låg (78ml) och ungefär lika stor som vid mätningen med INJ30 vct=0.6 bruk. Det bestämda  $b_{\min}$  var 49 $\mu$ m och  $b_{\text{kritiskt}}$  var 419 $\mu$ m.



Figur 49: Inträngningstest KSF16 genomförd med kort spalt med 75 $\mu$ m spaltvidd och med UF12 vct=1.2 bruk. Penetrability test KSF16 performed with the short slot with an aperture of 75 $\mu$ m and with UF12 w/c=1.2 grout.

### Slutsats

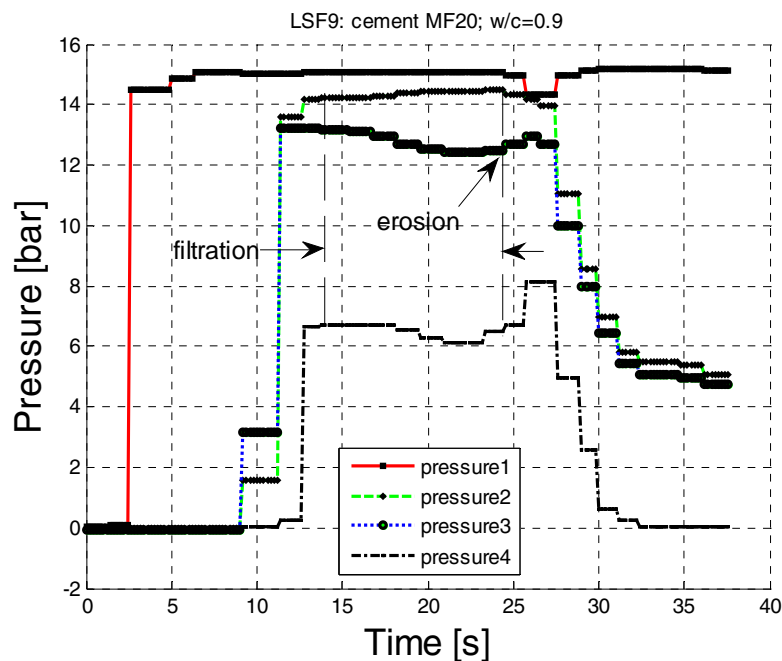
Mätningarna med den långa spalten med UF12 vct=1.2 bruk bekräftade att filtrerings- och erosionsprocessen kan indikeras med mätningen av de karakteristiska trycken.

I en mätning med den långa spalten passerade bruket genom spalten men med en klar filtrering och erosion under hela injekteringen, medan ett principiellt stopp av flödet har uppnåtts i den andra mätningen. Den passerade mängden bruk uppmätt med kort spalt var också relativt hög men en plugg har ändå byggts upp. Dessa mätningar med lång och kort spalt visar att 75 $\mu$ m spaltvidd är nära den kritiska spaltvidden för detta bruk.

Den passerade mängden bruk uppmätt med kort spalt i steg 1 var lägre än i detta steg vilket antyder att fältblandare är mera lämpligt för blandning av bruk baserade på UF12 cement.

### 2.4.3 Inträngningstester med MF20 vct=0.9 bruk

Den sista mätningsserien i detta steg har genomförts med bruk baserad på MF20 cement med vct tal 0.9. Resultatet av den första mätningen med den långa spalten visas i Figur 50. Hela mängden av bruket passerar genom spalten under cirka 18 sekunder och under större delen av denna tid har bruket till viss del filtrerats. Filtreringen startar tidigt men trycket orkar hålla spalten öppet för flödet. En erosion inträffar nära slutet av injekteringen och kort efter det når gasen utloppet och mätningen stoppas.



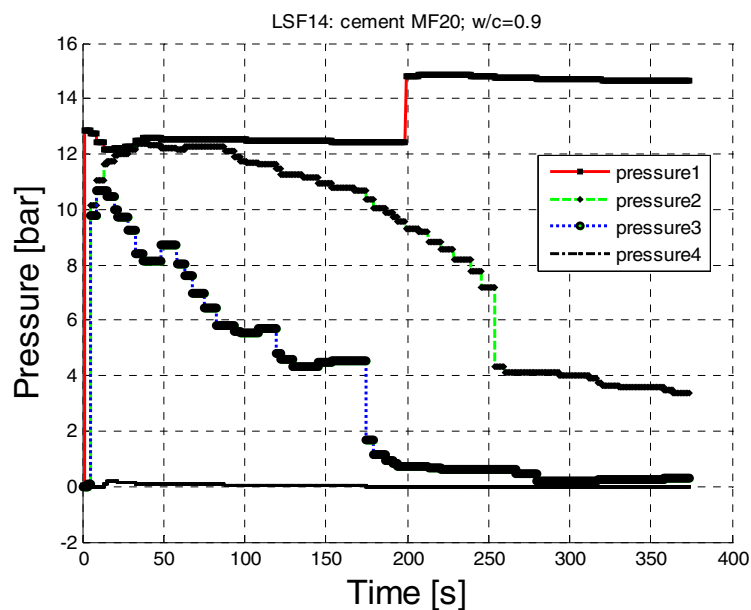
Figur 50: Inträngningstest LSF9 genomförd med lång spalt med MF20 vct=0.9 bruk. Penetrability test LSF9 performed with the long slot with MF20 w/c=0.9 grout.

Resultatet från den andra mätningen med samma bruk visas i Figur 51. Filtreringen av bruket startar omedelbart vilket orsakar en ökning av trycket P2 och minskning av trycket P3. Detta kan ses bättre i Figur 52 vilket är en förstoring av de första 35 sekunderna av diagrammet från Figur 51. I denna mätning skedde ingen erosion under injekteringen som i den föregående mätningen.

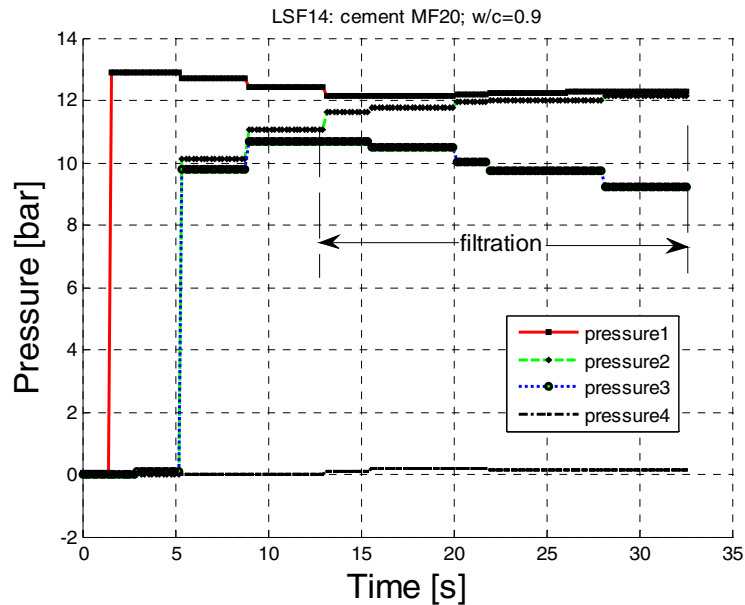
Genom spalten passerade cirka 0.5 l bruk vilket är cirka 30 % av den totala mängden som finns i behållaren. Fotot till höger i Figur 53 visar en del av detta bruk. Det syns att det passerade bruket är relativt tjockt trots att filtreringen skedde under hela injekteringen. Fotot till vänster visar den nedre plattan vid spaltviddminskningarna efter det genomförda testet. Det kan ses att filterkakan var cirka 100mm lång. En annan intressant observation som kan ses i fotot är en kanal i mitten av filterkakan. Det verkar som att en plugg har byggts på båda sidorna av kanalen och att flödet skedde

genom denna kanal under större delen av injekteringstiden. Det är anledningen till varför flödet var mycket lägre än flödet i det föregående testet och varför bruket på utloppet var relativt tjock. Till slut, efter cirka 6 minuter, har denna kanal pluggats igen och flödet stoppats.

Under detta test observerades det att injekteringstrycket P1 var 3 bar lägre än det vanliga injekteringstrycket på 15 bar. Detta kan vara en orsak av en något lägre inträngning. Ändå justerades trycket till 15 bar vid tiden t lika med 200 s men detta påverkade förmodligen inte inträngningen efter justeringen. En annan observation som syns i diagrammet och som är svår att förklara är ett plötsligt tryckfall av P2 och P3 under injektering. Ett elektriskt problem med mätutrustningen kan inte exkluderas.



Figur 51: Inträngningstest LSF14 genomförd med lång spalt med MF20 vct=0.9 bruk. Penetrability test LSF14 performed with the long slot with MF20 w/c=0.9 grout.



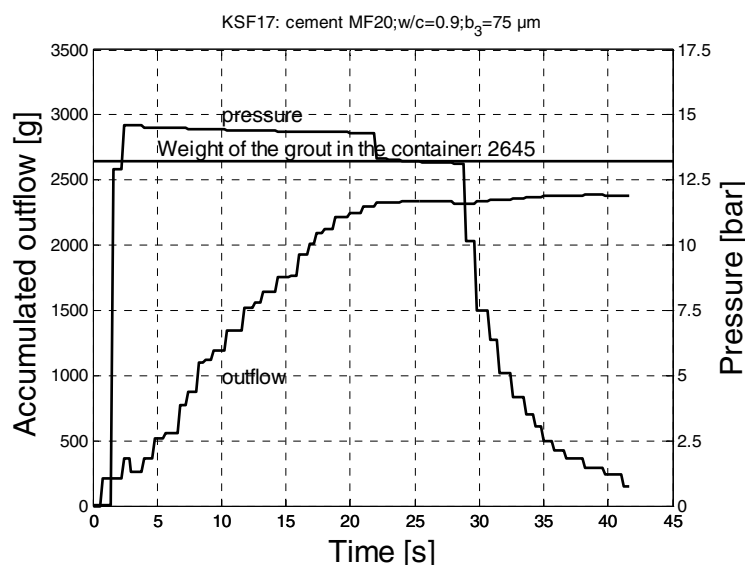
Figur 52: De första 35 sekunderna från test LSF14 som har presenterats i Figur 51. The first 35 seconds of test LSF14 showed in Figur 51.



Figur 53: Fotot till vänster visar den nedre plattan vid spaltvidsminskning efter det genomförda testet. Det kan synas att filterkakan var cirka 100mm lång. En annan intressant observation som syns i fotot är en kanal i mitten av filterkakan. Fotot till höger visar bruket vid utloppet som har passerat vid slutet av test LSF14. The left picture shows the slot at the constriction after the test. It could be seen that the filter cake was approximately 100mm long and a channel existed in the middle of the filter cake. The right picture shows the passed grout at the outlet taken at the end of the LSF14 test.

MF20 vct=0.9 bruk visade en god inträngning vid mätningen med kort spalt. Bruket passerade spalten under 22 sekunder som kan ses i Figur 54. Detta är det enda bruket i steg 2 där hela mängden bruk passerade genom den korta spalten.

Mätningen med filterpress visade också att detta bruk har den bästa inträngningsförmågan av dessa tre bruk. Vid mätningen med 75 $\mu$ m filter passerade 530ml bruk, vilket är nästan nio gånger mera än den uppmätta mängden hos INJ30 vct=0.6 eller UF12 vct=1.2 bruk. Det bestämda  $b_{\min}$  och  $b_{\text{kritiskt}}$  var 47 respektive 105 $\mu$ m.



Figur 54: Inträngningstest KSF17 genomförd med kort spalt med 75 $\mu$ m spaltvidd och med MF20 vct=0.9 bruk. Penetration test KSF17 performed with the short slot with an aperture of 75 $\mu$ m and with MF20, w/c=0.9 grout.

### Slutsatser

Mätningarna med den långa spalten med MF20 vct=0.9 bruk bekräftade också att filtreringen kan detekteras med mätningarna av de fyra karakteristiska trycken.

I den första mätningen med den långa spalten med MF20 vct=0.9 bruk passerade hela mängden av bruket genom spalten men inte den andra mätningen. Det betyder att denna spaltvidd kan vara nära den kritiska spaltvidden för detta bruk vilket indikerar att MF20 vct=0.9 och UF12 vct=1.2 har en liknande inträngningsförmåga. Däremot visade mätningarna med kort spalt och filterpress att MF20 vct=0.9 bruk har en bättre inträngningsförmåga än UF12 vct=1.2 bruk.

#### 2.4.4 Diskussion av testresultat uppmätta med lång och kort spalt och penetrationmeter i steg 2

I Tabell 18 sammanfattas resultaten av de genomförda testerna med den långa spalten, korta spalten med 75 $\mu$ m spaltvidd och filterpressen som har utförts i steg 2. Jämförelser av dessa resultat uppmätta med de tre olika metoderna är komplext p.g.a. att olika flödesgeometrier och olika initiala mängder av bruk användes.

När hela mängden av bruket passerar en given spalt eller motsvarande nät utan filtrering kan resultatet tolkas som liknande. När bruket filtreras blir jämförelsen svårare. Jämförelser mellan resultat uppmätta med den långa och den korta spalten är enklare p.g.a. att en liknande geometri använts, till skillnad mot jämförelser med resultat uppmätta med filterpress. Ett sätt att jämföra dessa resultat är att redovisa

den passerade mängden bruk per flödesyta ( $\text{ml}/\text{mm}^2$ ). Utloppsyta i den långa spalten är  $7.5\text{mm}^2$  och  $9\text{mm}^2$  i den korta spalten. Filterpress har en mycket större utloppsyta med en diameter av 24mm. Diameter av trådar som används för tillverkning av  $75\mu\text{m}$  filters är  $50\mu\text{m}$ . Det ger en effektiv flödesyta av utloppet på  $166\text{mm}^2$  för  $75\mu\text{m}$  filter. Effektiv flödesyta betyder att ytan som täcks av trådar inte är inkluderad.

Resultaten har också presenterats i % och i fall vid 100 % inträngning skulle passerad mängd av bruket bli större om volymen av bruksbehållaren hade varit större.

Mätningarna med INJ30 vct=2 bruk genomförda med den långa spalten visade mycket bättre inträngning än mätningarna genomförda med den korta spalten. Jämförelsen mellan de uppmätta resultaten med den långa och den korta spalten för MF20 vct=0.9 och UF12 vct=1.2 bruk är något mera komplicerat p.g.a. de varierande uppmätta resultaten med den långa spalten. Hur som helst är medelvärdet av dessa mätningar approximativt samma som resultaten uppmätta med den korta spalten.

Resultaten uppmätta med filterpress ger en mycket sämre inträngning jämfört med spaltmetoderna. Det kan betyda att filterpress betydligt underskattar inträngningsförmågan hos cementbaserade injekteringsbruk.

I nästan alla tester genomförda med den långa och den korta spalten var bruken filtrerade under en längre period. Trots denna filtrering har en betydande mängd av bruket passerat genom spalten i nästan alla dessa tester. Denna filtrering visar att en spaltvidd av  $75\mu\text{m}$  är nära den kritiska spaltvidden för dessa bruk. Det kan vara en förklaring till varför testerna med den långa spalten med MF20 vct=0.9 och UF12 vct=1.2 visade varierande resultat.

Mätningarna med den långa spalten i steg 2 (Figur 41, Figur 46, Figur 50) indikerar erosion med en plötslig tryckminskning framför spaltviddsminskningen och en plötslig tryckökning efter spaltviddsminskningen. Erosionen kan också ske i den korta spalten vilket har visats med mätningar med varierande injekteringstryck samt illustrerats med foto i Figur 34 och Figur 35. Dessa observationer antyder att erosion också kan vara en process som sker under inträngning av bruk genom sprickor och att ett högre tryck kan öka erosionen.

Det har förväntats att tryckförlusten i den långa spalten efter spaltviddsminskningen kunde reducera inträngningen av bruket. Denna reducering var inte experimentellt påvisad genom jämförelsen av resultat uppmätta med den långa och den korta spalten.

Tabell 18: Passerat mängd bruk i steg 2 uppmätt med lång spalt, kort spalt med spaltvidd av 75 $\mu$ m och filterpress. Bruket har blandats med fältblandare. 100 % i den långa och korta spalten motsvarar 1.7 liter medan i filterpress motsvarar det 1 liter bruk. Resultat presenteras i procent och med passerad volym delat med arean av utloppet [ml/mm<sup>2</sup>]. Passed amount of the grout measured with the long and short slot with a 75 $\mu$ m aperture and the penetrability meter from stage 2 mixed with a field mixer. 100% in the long and the short slot corresponds to 1.7 liters while in the penetrability meter it corresponds to 1 liter. Results are presented in percent and with passed volume of the grout divided by the area of the outlet [ml/mm<sup>2</sup>].

Bruk	Lång spalt [ml/mm <sup>2</sup> ; %]	Kort spalt [ml/mm <sup>2</sup> ; %]	Filterpress Passerat bruk vid 75 $\mu$ m filter [ml%], $b_{\min}$ - $b_{\text{kritiskt}}$ [ $\mu$ m- $\mu$ m]	Filterpress [ml/mm <sup>2</sup> ]
INJ30, vct=0.6	226 (100 %)	51 (25 %)	60ml (6 %)	0.36
	226 (100 %)		68-172	
MF20, vct=0.9	226 (100 %)	171 (100 %)	530ml (53 %)	3.19
	66 (30 %)		47-105	
UF12, vct=1.2	226 (100 %)	173 (95 %)	78ml (8 %)	0.47
	56 (25 %)		49-419	

Den långa spalten är inte lämplig för vardagsmätningar för att bestämma inträngningsförmåga hos ett bruk, men mätningarna med denna metod är förmodligen närmast till sanningen jämfört med mätningarna med den korta spalten och filterpressen. Med detta antagande är det möjligt att utvärdera de uppmätta resultaten med den korta spalten och filterpressen.

Variationen av de uppmätta resultaten med den långa spalten och relativt få antal tester gör utvärderingen svår och osäker. Ett större antal mätningar med alla tre metoderna bör utföras för att göra en bättre prediktion. Ändå kan slutsatsen dras att filterpress underskattar inträngningen hos ett bruk betydligt och den korta spalten ger ett något konservativt resultat jämfört med den långa spalten.

## 2.5. Slutsatser

Inträngning och filtrering av cementbaserat injekteringsbruk är komplexa problem som är påverkade av många faktorer. Cementets kornkurva, vct, injekteringstryck, hydratisering och flockulering och blandning är några av dem.

Påverkan av många faktorer och en förenklad representering av sprickor vid mätningarna gör det svårt att tolka det uppmätta resultatet. Hur som helst visade mätningarna med kort spalt i laboratorium att metoden var kapabel att fånga påverkan av ett flertal olika faktorer, vilket indikerar att det finns en möjlighet att den använda geometrin i kort spalt simulerar filtreringsprocessen i sprickor på ett korrekt sätt.



Mätningar med den långa spalten visade rimliga resultat och är troligtvis närmast verkligheten jämfört med den korta spalten och penetrationsmetoden. Den korta spalten kan underskatta inträngningsförmåga hos bruk. Filterpressen underskattar inträngningsförmågan hos bruk.

Flera mätningar med lång spalt behövs för att få ett referensvärde och för att kunna föra en djupare diskussion om resultaten uppmätta med kort spalt och filterpress.

Injekteringstryck är en viktig faktor som kan påverka inträngning hos bruk. Ett högre tryck kan erodera en delvis uppbyggd plugg längst sprickkanterna och hålla sprickan öppen en längre tid vilket förlänger injekteringen.

Vct är också en viktig faktor som påverkar inträngningen. Ett högre vct ger en bättre inträngningsförmåga både hos bruk baserade på grövre och finare cement.

Kornstorlek är en annan faktor som påverkar inträngningsförmågan. Bruk baserade på INJ30 visade bäst inträngningsförmåga jämfört med ANL, UF16 och UF12, med ett förhållande mellan sprickvidd och maximal kornstorlek av 2. Bruk baserade på finare cement har en lägre inträngningsförmåga p.g.a. en högre hydratisering och flockulering.

Blandning av bruk är också en faktor som kan påverka inträngningen. Bruk baserade på mycket fina cement visade något bättre inträngning när de är blandade med fältblandare, medan bruk baserade på INJ30 visade något bättre inträngning när de är blandade med labblandare. Detta bör undersökas mera med högre fokus på blandning.



### 3. Tillämpning på praktisk injektering

Dagens injekteringsarbeten utförs utgående från krav som ställs i den tekniska beskrivningen. Vanligtvis föreskrivs att separationen skall mätas enligt den standard som har beskrivits i rapporten och att separationen skall vara mindre än ett visst värde normalt 5 % efter 1 timme. Den redovisade forskningen har klart visat att denna mätmetod inte ger en relevant bild i förhållande till vad som uppkommer i bergets sprickor. Det finns därför ingen anledning med hänsyn till risken för separation att använda sig av låga vct-tal. Ett högre vct har både bättre inträngningsförmåga och bättre reologiska egenskaper, d.v.s. både tätare och ger en snabbare inträngning.

Vid design av injekteringsarbeten används en lägsta gräns på 100 $\mu$ m för att använda sig av cementbruk. Denna gräns kommer från tester med filterpressen. För det första är den gränsen den så kallade kritiska gränsen, d.v.s. den gräns för vilket allt bruk passerar och inte den minsta gränsen. Vidare så visar vår forskning att denna mätmetod är konservativ. Den praktiska gränsen för vilket cementbruk kan användas ligger därför betydligt lägre och runt ca två gånger största kornstorleken, vilket för INJ30, (vår vanligast använda cementsort) ligger på ca 60 $\mu$ m. Vidare visar forskningen att högre tryck ger en bättre inträngning. Det ger också ett snabbare injekteringsförlopp. Kan man exempelvis kontrollera risken för hydraulisk lyftning genom att följa tryck och flödeskurvan med hjälp av "Real Time Grouting Control Method" så kan både säkrare, snabbare och tillförlitligare injekteringar utföras.



## Referenser

Axelsson, M., Gustafson, G., & Fransson, Å. (2009). Stop mechanism for cementitious grouts at different water-to-cement ratios. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24 (4), 390-397.

*Betonghandbok, Material.* (1994). Stockholm: Svensk Byggtjänst AB.

Draganovic, A. (2009). Bleeding and Filtration of Cement-Based Grout. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Division of Soil and Rock Mechanics, Stockholm.

Eklund, D., & Stille, H. (2008). Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23 (4), 389-398.

Eriksson, M., & Stille, H. (2003). A Method for Measuring and Evaluating the Penetrability of Grouts. *ASCE*, (pp. 1326-1337).

Eriksson, M., Dalmalm, T., M, B., & H, S. (1999). *Separations- och filtreringsstabilitet hos cementbaserade injekteringsmedel.* Division of Soil and Rock Mechanics. Stockholm: Royal Institute of Technology.

Eriksson, M., Friedrich, M., & Vorschulze, C. (2004). Variation in the Rheology and Penetrability of Cement-based Grouts - An Experimental Study. *Cement and Concrete Research*, 34 (7), 1111-1119.

Hansson, P. (1995). Filtration Stability of Cement Grouts for Injection of Concrete Structures. *IABSE Symposium*, (pp. 1199-1204). San Francisco.

Herzig, J., Leclerc, D., & Goff, P. (1970). Flow of Suspensions through Porous Media-Application to Deep Filtration. *Industrial and Engineering Chemistry*, 62 (5), 8-35.

Hjertström, S. (2001). Microcement- Penetration versus particle size and time control. *4th Nordic rock grouting symposium* (pp. 61-71). Stockholm: SveBeFo Rapport 55.

Hjertström, S., & Petersson, S. (2006). *Fortsatta undersökningar om dispergering av mickrocement.* Stockholm: SveBeFo.

Juenger, M., Monteiro, P., Gartner, E. M., & Denbeaux, G. P. (2005). A Soft X-ray Microscope Investigation into the Effects of Calcium Chloride on Tricalcium Silicate Hydration. *Cement and Concrete Research*, 35 (1), 19-25.

Nobuto, J., Nishigaki, M., Mikake, S., Kobayashi, S., & Sato, T. (2008). Study on filtration property of grouting materials; High-pressure filtration test. *Doboku Gakkai Ronbunshuu C*, 813-832.

Powers, T. (1939). *The Bleeding of Portland Cement Paste, Mortar and Concrete Treated as a Special Case of Sedimentation*. Portland Cement Association, Bulletin No 2, Chicago.

Rosquoet, F., Alexis, A., Khelidij, A., & Phelipot, A. (2003). Experimental Study of Cement Grout: Rheological Behaviour and Sedimentation. *Cement and Concrete Research*, 33 (5), 713-722.

Sandberg, P. (1997). NES-metod för mätning av injekteringsbruks inträngningsförmåga. *Svensk Bergs- & Brukstidning*.

Schwarz, L. G. (1997). *Roles of Rheology and Chemical Filtration on Injectability of Microfine Cement Grouts*. Doctoral Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois.

Steinour, H. (1945). *Further Studies of The Bleeding of Portland Cement Paste*. Portland Cement Association, Bulletin No 4, Chicago.

Tan, T. S., Loh, C. K., Yong, K. Y., & Wee, T. H. (1997). Modelling of bleeding of cement paste and mortar. *Advances in Cement Research*, 9 (34), 75-91.

Tan, T., Wee, T., Tan, S., Tam, C., & Lee, S. (1987). A consolidation model for bleeding of cement paste. *Advances in Cement Research*, 1 (1), 18-26.

Widmann, R. (1996). International Society for Rock Mechanics Commission on Rock Grouting. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 33 (8), 803-847.

Yang, M., Neubauer, C., & Jennings, H. (1997). Interparticle Potential and Sedimentation Behaviour of Cement Suspensions - Review and Results from Paste. *Advanced Cement Based Materials*, 5 (1), 1-7.



Box 5501  
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org · www.befoonline.org  
Besöksadress: Storgatan 19



ISSN 1104-1773