



BORRHÅL – HYDRAULISK GRADIENT OCH EROSION

Johan Funehag

Omslagsfigur:

Överborrning av ett injekterat borrhål där en vattenförande kanal kan skönjas.

STIFTELSEN BERGTEKNISK FORSKNING
ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION

BORRHÅL - HYDRAULISK GRADIENT OCH EROSION

Leaking boreholes- Hydraulic gradient and Erosion

Johan Funehag, Tyréns och Luleå tekniska universitet
(tidigare Chalmers)

BeFo Rapport 172
Stockholm 2017
ISSN 1104-1773
ISRN BEFO-R—172—SE

Förord

Injekteringsforskning har varit del av BeFos program under 30 år och utgör en viktig del av skandinaviskt bergbyggande. Injektering är ett billigare alternativ än inklädnad med tät lining. Ökade krav på små inläckage har medfört att kostnader för injektering ökar och blir svårare att beräkna. Den helt övervägande injekteringsinsatsen utförs i samband med berguttag. Injekteringsinsatsen har en livslängd som påverkas av bergets grundvatten, eventuella spänningsrörelser och av material och utförande som använts. Samtliga faktorer kan påverkas och det finns krav på ökad förutsägbarhet och bättre ekonomi för injekteringsinsatser. Problem som att injekteringsmedlet inte härdar eller att det rinner tillbaka kan innebära erosion av medlet och kvalitetsförsämring av arbetet.

Projektet visar på hur erosion kan uppträda i injekteringsmedlen samt föreslår hur en injekteringsdesign kan utföras om det finns risk för höga hydrauliska gradienter. Genom att använda en specialbyggd modell i plexiglas för att åskådliggöra flödesmönster har det visats och förklarats varför borrhålet inte blivit tätt trots flera injekteringsinsatser. Att nå ett väldigt tätt berg kan med injektering vara resurs- och tidskrävande och en av förklaringarna kan vara att injekteringsmedel eroderar. Det är vår förhoppning att denna forskning leder till en ökad förståelse för injekteringsmetodiken som successivt utvecklats under en 30-årsperiod.

Detta projekt är ett samarbetsprojekt mellan Chalmers, Avd för geologi och geoteknik, Tyréns och AB Besab. Projektet är i huvudsak finansierat av Formas. Chalmers insats är finansierad av BeFo, Chalmers och Tyréns utökade arbeten finansierades av Sven Tyréns stiftelse och Besabs utökade kostnader finansierades av SBUF och av TeliaSonera. Forskningsinsatsen är i huvudsak utförd av Johan Funehag vid Chalmers och Tyréns AB.

Vidare har en referensgrupp medverkat i projektet, bestående av Tommy Ellison (Besab), Magnus Zetterlund (Norconsult), Håkan Stille (KTH/Geokonsult Stille), Nicklas Bockgård (Golder Ass.), Patrik Vidstrand (SKB), Hans Hargelius (Trafikverket), Thomas Janson (Tyréns), Kent Lundin (Telia) och Daniel Eklund (SKB) och Per Tengborg (BeFo).

Stockholm i juni 2018

Per Tengborg

Sammanfattning

Stora forskningsinsatser på injektering har utförts inom Sverige de senaste 30 åren. Forskningen har i huvudsak varit inriktad på nyproduktion av bergtunnlar/bergrum och främst som förinjektering, dvs injektering av berget före bergguttaget. Trots framsteg gällande design och utförande av injektering blir alla borrhål inte alltid täta. Detta projekt ämnar finna möjliga förklaringar till varför borrhål kan läcka trots att de injekterats. Tonvikten i förklaringsmodellen ligger främst på erosion av injekteringsmedel. Modellen baseras på den hydrauliska tryckgradienten som verkar i sprickor med flödande vatten.

Omfattande fältarbeten i form av att täta ett tidigare läckande borrhål har utförts. Med ordinarie försök samt de två tester inom ramen för detta projekt, gjordes totalt fem tätningsinsatser i ett och samma borrhål. Två av dessa var av typen ”kontrollerade misslyckanden” där tolkningen av den förväntade skjuvkraften från vatten jämfördes med känd skjuvhållfasthet på injekteringsmedlet (här både cementbruk och silica sol).

Laboratorieförsök i sprickmodell utfördes med syftet att påvisa redan kända teorier kring ”bakåtflöde” och erosion av cementbruk. Filmupptagningarna av testerna visar på hur ett kanalflöde sker i en injekteringsplym samt vart den initieras. Förståelsen kring hur ett material eroderar har förbättrats och från detta har även förslag på injekteringsdesign för att undvika erosion av injekteringsmedel vidareutvecklats.

Att ytterligare förstå materialmodeller för injekteringsmedel behöver utvecklas för att riktigt kunna säga hur erosion sker och vilka faktiska krafter som verkar. I projektet har skjuvkraft använts genomgående trots att det fundamentalt förhåller sig att vatten inte kan utgöra en kraft, ty en newtonvätska saknar skjuvspänning.

Summary

Great research efforts have been spent on grouting in Sweden the last 30 years. The research main focus has been on new tunnels and caverns and mainly on pre-grouting. Pre-grouting is a process that is done before excavation. With the progress related to design and execution of grouting still not every borehole gets sealed. This project aims to find possible explanations to why borehole leak even if they are grouted. The emphasis in the explanation lies mainly on erosion of grout. The conceptual model is based on hydraulic gradient that acts in fractures with flowing water.

Extensive field work has been put on sealing a former leaking borehole. With former trials on grouting the borehole and the two tests conducted within the frame of this research project, a total of five grouting rounds of the same borehole has been carried out. Two of the trials was in the shape of “controlled failures” where the interpretation of the expected shear force from water was compared with known shear strength of the grout (here both cement grout and silica sol).

Laboratory studies in a fracture model was conducted to show already known theories for “backflow” and erosion of cement grout. The captured movies of the tests reveal how a channel flow is developed in the grouting plyme as well where it is initiated. The understanding on how a flowing material erodes has been improved and from this suggestions on how grouting design can be conducted in order to avoid erosion has been further developed.

To further understand how material models of grout needs to be further understood to clarify the initiating of the erosion and what actual forces take part of the process. Throughout the project the shear force has been used even though that fundamentally water cannot exhibit a shear force since it behaves like a Newtonian liquid.

Nomenklatur

Beskrivning	Beteckning	Enhet
Inträngningslängd	I	m
Inträngningslängd max	I_{max}	m
Radiell inträngningslängd	I_{2D}	-
Inträngningslängd, baserad på erosion	$I_{ero, 2D}$	m
Inträngningslängd, hänsyn till gradient	$I_{grad, 2D}$	m
Skattad konduktivitet, oinjekterat	K	m/s
Skattad konduktivitet, injekterat	K_{inj}	m/s
Sektionslängd	L	m
Flöde	Q	m ³ /s
Transmissivitet, oinjekterad	T	m ² /s
Transmissivitet, för största spricka	T_{max}	m ² /s
Transmissivitet, injekterad	T_{inj}	m ² /s
Transmissivitet, sektionsvis	T_n	m ² /s
Sprickvidd	b	m
Sprickvidd dimensionerande	b_{dim}	m
Hydraulisk sprickvidd	b_{hyd}	m
Bergtäckning, djup	d	m
Jordacceleration	g	m/s ²
Inflöde till tunnel	q	m ³ /s, m
Tunnelradie	r_t	m
Borrhålsradie	r_w	m
Tid, dimensionslös	t_D	-
Tid, relativ injekteringstid	t_0	s

Gelinduktionstid	t_G	s
Tjocklek på injekterad zon	t	m
Hydraulisk gradient, tryckgradient	$dh/dr, \Delta h/L$	-
Densitet berg	ρ_b	kg/m ³
Densitet vatten	ρ_w	kg/m ³
Injekteringsövertryck	Δp	Pa el bar
Grundvattentryck	Δh	Pa el m
Flytgräns injekteringsmedel	τ_0	Pa
Inträngningsanalys parameter	θ	-
Skinfaktor	ξ	-
Viskositet, vatten	μ	Pas
Initiell viskositet silica sol	μ_0	Pas

Innehållsförteckning

Förord.....	i
Sammanfattning.....	iii
Summary	v
Nomenklatur	vii
Innehållsförteckning	ix
1 Allmänt	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Syfte och mål	2
1.3 Övriga rapporteringar från projektet	4
1.4 Organisation och finansiering	4
2 Teori och metod.....	5
2.1 Hydraulisk gradient.....	5
2.2 Injekteringsdesign baserat på erosion	7
2.2.1 Skjuvkraft från vatten.....	8
2.3 Fälttest, injektering av ett läckande borrhål	9
2.4 Metodik för injekteringen i fälttestet.....	11
A) Kartering borrhärens	12
B) Hydrauliska tester, vattenförlust	14
B.1) Hydrauliska tester, konnektionstester.....	15
B.2) Hydrauliska tester, skjuvspänning från vatten	16
C) Skjuvhållfasthet för silica sol.....	16
2.5 Summerande faktorer från fälttest.....	18
2.6 Injekteringar i sprickmodellen	18
2.6.1 Verifierande inträngningslängd.....	18
2.6.2 Injektering för påvisande av erosion.....	20
3 Resultat	25

3.1	Fälttest av läckande injekteringshål	25
3.1.1	<i>Utförda injekteringar</i>	25
3.2	Laborationstester	28
3.2.1	<i>Inträngningslängd av cementbruk</i>	28
3.2.2	<i>Inträngningslängd påverkad av gradient</i>	29
3.2.3	<i>Erosion av cementbruk</i>	31
4	Analys och Diskussion	33
4.1	Bestämning av hydraulisk gradient	42
4.2	Verifikation av Fälttestet	43
5	Slutsatser	49
	Referenser	51

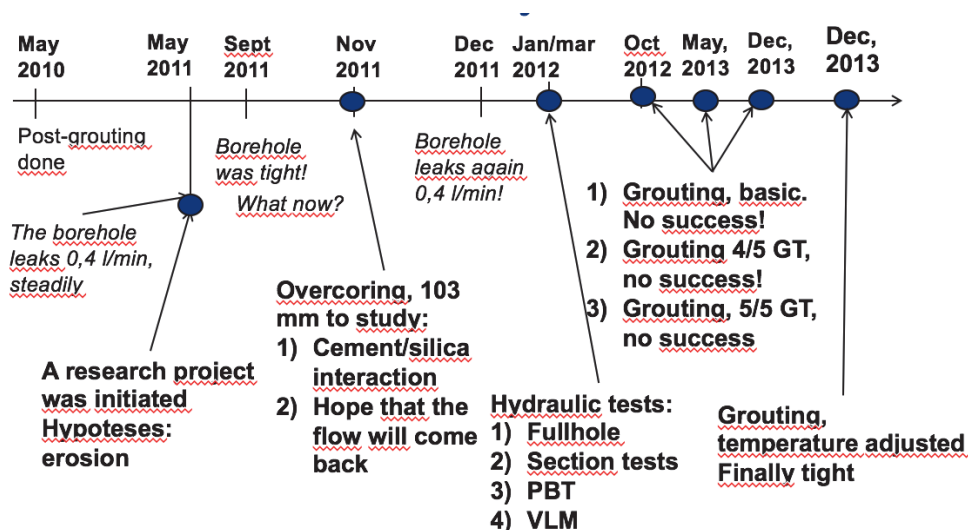
1 ALLMÄNT

1.1 BAKGRUND

Stora forskningsinsatser på injektering har utförts inom Sverige de senaste 30 åren. Forskningen har i huvudsak varit inriktad på nyproduktion av bergtunnlar/bergtrum och främst som förinjektering, dvs injektering av berget före berguttaget.

Trots framsteg gällande design och utförande av injektering blir inte alltid alla borrhål täta. En del borrhål blir inte helt fyllda med bruk under injektering ibland uppstår ytläckage eller större injekteringsvolymen än förutspått vilket leder till att man avslutar på injekterad volym. Om detta är orsaker till problem gällande tätheten för tunneln vet man ännu inte. I flera forskningsprojekt där uppföljning av de injekterade borrhålen har möjliggjorts har borrhål upptäckts läcka trots att de är injekterade. Att borrhål kan läcka efter det att de injekterats är inte helt känt i branschen. Dels beror det på att framdriften i tunnelprojekt är snabb, vilket gör att berguttaget kommer strax efter man injekterat färdigt och möjligheten för uppföljning av de injekterade borrhålen är liten eller obefintlig. Erfarenheten kring läckande borrhål härrörs därmed främst bulthål. Trots att bulthålen ibland är korta och teoretiskt ligger innanför den förmodade tätade zonen, läcker de. Det förekommer borrhål som injekterats flera gånger utan att de blivit täta. I projekt som har haft tonvikt på injektering (främst forskning och demonstrationsprojekt) har vi dock kunnat lokalisera flera läckande borrhål; både efterinjekteringshål och förinjekteringshål. I en trafikunnel i norra Bohuslän bejakade Trafikverket och projektören det då kända fenomenet med läckande borrhål. Tillsammans formade de ett nytt angreppssätt på hur man kan få injekteringspluggen tät. Projektet beskrev däremot enbart knapphändigt orsakerna till varför en injekteringsplugg kan läcka. Projektet tar avstamp från nuvarande kunskapsläge för att förstå varför borrhål läcker samt finna åtgärder för läckande borrhål.

Denna rapport beskriver det som utförts för att förstå och täta det läckande borrhålet i media tunneln som efterinjekterades 2010 (Janson et.al 2010). Projektet initierades i och med att detta borrhål inte blev tätt trots att det injekterats med både cement och silica sol i flera omgångar. En övergripande skiss av olika delmoment som utförts i och runt det läckande borrhålet i tunneln visas i Figur 1-1 nedan.



Figur 1-1 Skiss över olika händelser kring det läckande borrhålet från tidpunkten att efterinjekteringen var klar 2010 till den sista lyckade injekteringen i december 2013.

Figure 1-1 Sketch over different actions regarding the leaking the borehole from the time when the tunnel was post-grouted in 2010 to the final successful grouting in December 2013.

Att borrhålet blev tätt kunde vid den tiden ej förklaras. Överboringens syfte var att dels se om det var tätt i borrhålet eller att sprickan också blivit tätad samt att om det inte var tätt kunna erhålla flöde återigen i borrhålet/sprickan.

Senare påvisade kärnkarteringen at det relativt stora mängd kalcit som bildats i kanalen längs cementpluggen tätade flödet.

1.2 SYFTE OCH MÅL

Syftet med projektet är att undersöka orsaken till läckande borrhål, främst injekteringshål och varför vissa borrhål inte kan bli täta med normalt injekteringsförfarande. Den främsta fokusen för detta arbete ligger på hydraulisk gradient och hur den påverkar injekteringen. Möjliga förklaringar till varför läckande borrhål uppträder trots att borrhålen blivit injekterade och fyllda listas nedan. Detta är kanske inte alla möjliga orsaker men är åtminstone rimliga.

Injekteringstekniken

- Icke lämpligt bruk, kanaler bildas i injekteringspluggen.
- Designtryck och tider är inte lämpliga vilket resulterar i för liten inträngningslängd.

- Borrhålsfyllnaden är inte tillräcklig.
- Manschetten läcker.
- Andra vattenförande kanaler öppnas upp p.g.a. injekteringstrycket.

Bruksvalet

- Sprickorna längs borrhålet är för små, varför bruket inte kan tränga in.
- För lågt injekteringstryck i förhållande till skjuvhållfastheten på bruket.
- Bruket har för låg initiell skjuvhållfasthet när injekteringstrycket stängs av.
- Manschetten tas bort för tidigt i förhållande till skjuvhållfastheten.

Berget

- Vattenföringen i berget ger en för hög eroderande skjuvkraft.
- Sprickgeometrierna gör så att man får ytläckage.
- Sprickor som läcker i bulthålen har inte nåtts av injekteringshålen.

Av den ovanstående listan av möjliga orsaker till läckande borrhål kommer detta projekt främst studera vattenföringen i berget och dess potentiella eroderande kraft på bruket. Eroderande kraft från vatten och skjuvhållfasthet på bruket hör starkt samman. Detta är tidigare rapporterat i Axelsson, 2009. Primärt innebär arbetet att finna läckande borrhål där borrhålsfyllnaden är fullgod, tryck och tid har uppnåtts samt att bruksvalet är lämpligt. För de borrhål där detta är uppfyllt återstår enbart ett par möjliga orsaker till läckagen och kan då begränsas till bergets egenskaper. Att göra studier i extremfall möjliggör förståelse i mer grundläggande aspekter. De två efterinjekteringsprojekten i Telia tunneln (Janson, et al 2010) och TASS-tunneln (Funehag, 2016) som utförts, har båda sannolikt en hög grundvattengradient där den eroderande kraften kan vara påtaglig. I TASS-tunneln återfinns säkerligen den största gradienten medan Telia tunneln borde uppvisa ”acceptabla” gradienter. Med denna studie kan man då ”gaffla” in grundvattengradienten till en ram innehållande acceptabla grundvattengradienter för att använda ”normal” injekteringsdesign. När den är högre måste åtgärder vidtas eller så måste man helt enkelt acceptera att dagens teknik inte kan täta vid dessa gradienter.

Summering av hypotes. Ett borrhål kan inte bli tätt såvida inte de vattenförande sprickorna som korsar borrhålet blir tätade. Att sprickan i sin tur inte blir tätad kan bland annat bero på att den hydrauliska och/eller tryck- gradienten var för stor för aktuell injekteringsteknik och bruksval.

1.3 ÖVRIGA RAPPORTERINGAR FRÅN PROJEKTET

Ett examensarbete har publicerats (Suresh and Tohow, 2013) för detta projekt i mediatunneln. I denna gjordes fältundersökningar och hydrauliska tester av borrhålen för att uppskatta den hydrauliska gradienten i den aktuella sprickan. Vidare gjordes ett försök till tätning av borrhålet men det blev misslyckat. Ett av de viktigare resultaten som framkom var att den hydrauliska gradienten kunde uppskattas till hela 60 m/m, Injekteringen som gjordes kunde påvisa ett radiellt flöde via observation av samband i närliggande borrhål och ytläckage i vägg.

Ytterligare ett examensarbete har publicerats där studier av hydraulisk gradient och erosion av en annan tunnel utförts (Reynisson, 2014). Examensarbetet studerade läckande borrhål i en efterinjektering på 450 m djup. Där kunde det fastställas att flera borrhål läckte och en trolig orsak var den höga hydrauliska gradienten.

En artikel är submittad till Tunneling and underground space technology (TUST), ”Radial penetration length of cementitious grout- laboratory verification of grout spread in fracture model”. Artikeln visar att teorierna för Bingham flöde stämmer väl överens med uppmätt radiell inträngningslängd i en sprickmodell för I_{2D} upp till nästan 40% av I_{max} , alltså nästan för all normal förinjektering.

1.4 ORGANISATION OCH FINANSIERING

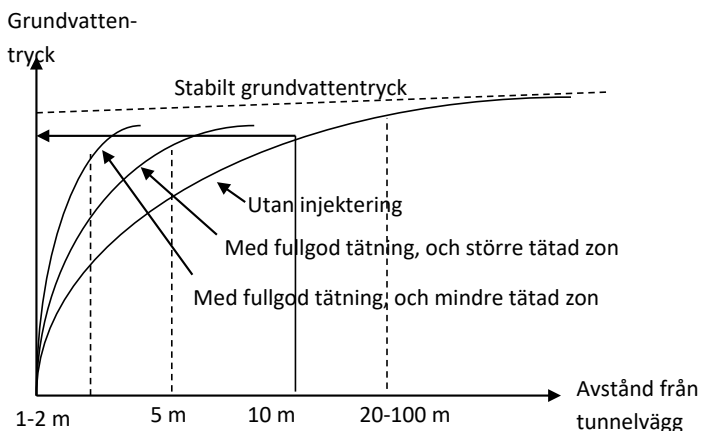
Detta projekt är ett samarbetsprojekt mellan Chalmers, Avd för geologi och geoteknik, Tyréns och AB Besab. Projektet är i huvudsak finansierat av Formas. Chalmers insats är finansierad av BeFo, Chalmers och Tyréns utökade arbeten finansierades av Sven Tyréns stiftelse och Besabs utökade kostnader finansierades av SBUF och av TeliaSonera. Forskningsinsatsen är i huvudsak utförd av Johan Funehag vid Chalmers och Tyréns AB.

Aktörer som deltagit är Tyréns AB, Besab AB, Trafikverket, Chalmers och SKB samt fem examensarbetare.

2 TEORI OCH METOD

2.1 HYDRAULISK GRADIENT

Vid en tätning sker tryckförändringar runt en tunnel. Ju tätare en förinjektering görs desto större blir den hydrauliska gradienten i den tätade zonen. Nedanstående principiella figur visar på hur trycket kan förändras vid en tätning (Figur 2-1).



Figur 2-1 Principiell figur över tänkt tryckförändring till följd av en injektering.
Figure 2-1 Sketch of the change in pressure due to grouting.

Från Figur 2-1 ses att beroende på hur lyckad tätningen blir erhålls olika tryckprofiler. De angivna avstånden är enbart antagna för att åskådliggöra tryckförändringen beroende på hur stor den tätade zonen är. Detta kan jämföras med förinjekteringsskärmar utanför tunnelkontur ("större gradient") och innanför tunnelkontur ("mindre gradient"). Självfallet finns en gradient även om inte tunneln tätas alls och påverkansområdet blir större. Det kan tolkas som en tät zon väldigt nära tunneln som ger en stor gradient i denna närliggande zon. Vidare ses också att gradienten sjunker allt eftersom avståndet från tunneln växer.

Enligt Darcy's lag så är den hydrauliska gradienten (även här kallad tryckgradient), $-dh/dL$ beroende av flödet, Q och den hydrauliska konduktiviteten, K för ett visst tvärsnitt, A , enligt

$$Q = -KA \frac{dh}{dL} \quad (2-1)$$

Som synes så är den hydrauliska gradienten dimensionslös (m/m).

En injekterad tunnel, med en tätad zon, har flera olika gradienter; en gradient precis vid bergväggen i den tätade zonen och en utanför zonen. En ytterligare gradient är precis i gränsskiktet mellan tätad zon och oinjekterad bergmassa.

Bedömningen av hur stor gradienten är vid de olika fallen finns beskriven Gustafson (2009). Utgångsläget är att man antar bergmassan som ett konduktivt medium utan sprickor, vilket kan användas för en rimlighetsbedömning av storleken på gradienten.

Direkt innanför tunnelvägg, r_i i den tätade zonen kan gradienten, dh/dr , uppskattas till:

$$-\frac{dh}{dr}(r_i) = \frac{\Delta h}{r_i} \cdot \frac{T}{T_{inj}} \cdot \frac{1}{\ln(2\Delta h / r_i) + (T / T_{inj} - 1) \cdot \ln(1 + t / r_i) + \xi} \quad (2-2)$$

Direkt utanför den tätade zonen kan gradienten beräknas till:

$$-\frac{dh}{dr}(r_i + t) = \frac{\Delta h}{r_i + t} \cdot \frac{1}{\ln(2\Delta h / r_i) + (T / T_{inj} - 1) \cdot \ln(1 + t / r_i) + \xi} \quad (2-3)$$

Där t är tjockleken på den tätade zonen.

Förhållandet i tätningseffekt mellan oinjekterat och injekterat berg bör vara att det injekterade berget är en faktor 100 gånger tätare än det oinjekterade berget ($K_{inj}/K=0,01$). Detta innebär att en god tätningseffekt ger en avsevärd större gradient i den tätade zonen.

För att klargöra vad erosion är så har detta projekt valt att göra distinktion mellan flera olika processer som samtliga kan underordnas under mekanisk erosion. Med mekanisk erosion menas att det finns en yttre kraft/spänning som verkar på bruket. Det finns i litteraturen annan erosion exempelvis kemisk erosion eller diffusion. Nedan förklaras några processer och beskrivningar av erosion som har betydelse vid en injektering.

Inre erosion

Detta är erosion som uppstår i bruket efter det att kanaler har bildats i brukets injekteringsplym. En inre erosion kan således inte bildas innan ”piping” har uppstått. Det är denna process som projektet har kallat initierande erosion.

Fingering är en process som förknippas med den inre erosionen. Fingering uppstår då gradienten från bruket är lägre än gradienten från vattnet. Storleken/omfattningen av fingering bestäms av viskositetsskillnader och gradienten. En enkel betraktelse är att vattnet tränger in i bruksfronten som små kanaler, likt fingrar. Detta kan ses som om bruksfronten späds ut.

Yttre erosion

Yttre erosion är den process där material eroderat i spridningsfronten. Detta beror på att vattenflödet ändrar riktning och ”drar” med sig material. Detta sker alltid i bruksfronten men beroende på storleken på motströmmen blir erosionen olika stor.

Bakåtföde

Bakåtföde sker när en kanal bildats och trycker materialet i samma riktning som den hydrauliska gradienten. Brottet som sker är ett skjuvbrott i bruket.

En annan term starkt förknippat till ett skjuvbrott är *piping*. Det är ett fenomen som skapar kanaler genom hela materialet och beror på den hydrauliska gradienten.

Turbulens

Turbulens bror på hastigheten av antingen vattnet som flödar i sprickan eller injekteringsflödet i sprickan. Lokal turbulens kan ske i öppningar/större hålrum i sprickan. Turbulens kan ge utspädning av bruksfronten vilket sänker hållfastheten lokalt.

Det är således bakåtfödet som är den intierande processen för att erosion kan fortsätta och tillslut spola bort hela injekteringen om den hydrauliska gradienten är för hög. För att kunna motstå erosion skall den uppbyggda skjuvkraften i bruket motstå vattnets skjuvkraft

2.2 INJEKTERINGSDESIGN BASERAT PÅ EROSION

Principerna för erosion av injekteringsmedel är beskriven i Axelsson, 2009. För att förhindra erosion (1) genom att vattnet ”äter” på injekteringsmedlet måste skjuvhållfastheten på bruket när injekteringen av ett hål avslutas vara stor nog att motstå vattnets eroderande kraft, en skjuvkraft. För att förhindra bakåtföde (2) ska inträngningen vara så pass lång att mot sprickytan mobiliserade friktionskrafter kan balanseras av den pådrivande kraften från vattentrycket. Fingering (3) motverkas så länge det är injekteringsmedlet som trycker undan vattnet och inte tvärtom. Vidare motverkas risken för fingering då viskositeten på medlet, μ_g är högre än vattnets viskositet, μ_w . Detta kommer senare i rapporten diskuteras vidare.

Erosion i vid bemärkelse är här definierat som mekanisk degradering som orsakas av flera processer; fingering, piping eller bakåtföde samt yttre erosion.

Vid avslut av injektering skall injekteringsmaterialet ha en högre skjuvhållfasthet än vattnets pådrivande skjuvkraft, enligt:

$$\tau_{grout} > \tau_{water}$$

(2-4)

I all sin enkelhet innebär detta att kan båda parametrarna bestämmas och sedan en injektering utföras så att vid avslut (stänger manschett) uppfylls villkoret skall borrhålet bli tätt.

Bestämning av vattnets skjuvkraft baseras på hydraulisk gradient samt tolkning av gradient till skjuvkraft. Detta görs enligt Axelsson, 2009. Momenten som ingår är hydrauliska tester med beräkning av hydraulisk sprickvidd och mätning av grundvattentryck. Detta kopplas via jämviktsekvation,

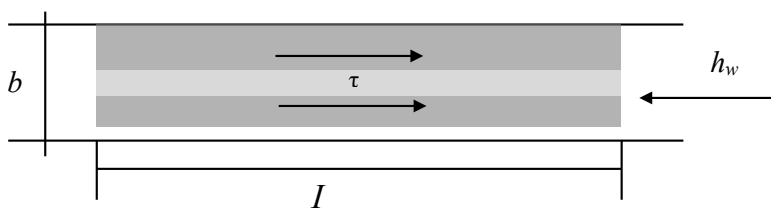
$$\frac{dh}{dx} = \frac{2 \times \tau}{b \times \rho_{water} \times g} \quad (2-5)$$

Där τ är skjuvhållfasthet och b är sprickvidd.

Bestämning av skjuvhållfasthet på injekteringsmaterialet baseras på tidigare mätningar och beräkningar funna i Axelsson, 2009. Baserat på resultat från fallkonstester på gelad silica sol är tolkningen att skjuvhållfastheten på silica sol 50 Pa vid 80% (4/5) av geltiden. Tolkningen baserar på extrapolation från uppmätta hållfastheter efter gel tid och tydligare studier behövs av hållfastheten.

2.2.1 SKJUJKRAFT FRÅN VATTEN

För bruk i en spricka används en enkel jämviktsekvation där inträngningslängden och den uppbyggda skjuvspänningen i bruket skall motstå vattnets hydrauliska gradient. En principiell figur visas nedan (Figur 2-2).



Figur 2-2 Principiell figur över hur vattenkraften balanseras av brukets inträngningslängd och skjuvspänning.

Figure 2-2 Sketch of how the shear stress from water is balanced by the penetration length and the shear force of the grout.

Jämviktsekvationen mellan slutlig inträngningslängd och vattenkraften kan skrivas enligt (Smits, 2000):

$$\tau \geq \frac{\rho_w \times g \times b}{2} \times \frac{h_w}{l} \quad (2-6)$$

Där τ är brukets mothållande skjuvspänning, ρ_w är vattnets densitet, g är jordaccelerationen, b är sprickvidden, h_w är vattentrycket, l är inträngningslängden och τ är brukets skjuvspänning.

Skjuvspänningen som verkar på bruket i ett borrhål är den samma som för sprickan men där sprickvidden är utbytt mot borrhålsradien r_b och inträngningslängden är borrhålslängden enligt Axelsson, (2007):

$$\tau \geq \frac{\rho_w \times g \times r_b}{2} \times \frac{h_w}{l} \quad (2-7)$$

2.3 FÄLTTEST, INJEKTERING AV ETT LÄCKANDE BORRHÅL

I projektet utfördes ett fälttest som totalt tog mer än två år utföra. Fälttestet startade efter ett projekt där en mediatunnel efterinjekterades 2010 (Janson et.al 2010). Under efterinjekteringen upptäcktes ett flertal läckande injekteringshål. Ett injekteringshål hade ett större läckage än övriga och det var detta hål som fångade uppmärksamheten. I efterinjekteringsprojektet utfördes försök att tätta borrhålet, med cement, silica sol med olika geltider och tryck utan att lyckas. En övergripande skiss av olika delmoment som utförts i och runt det läckande borrhålet i tunneln visas i figur (1-1).

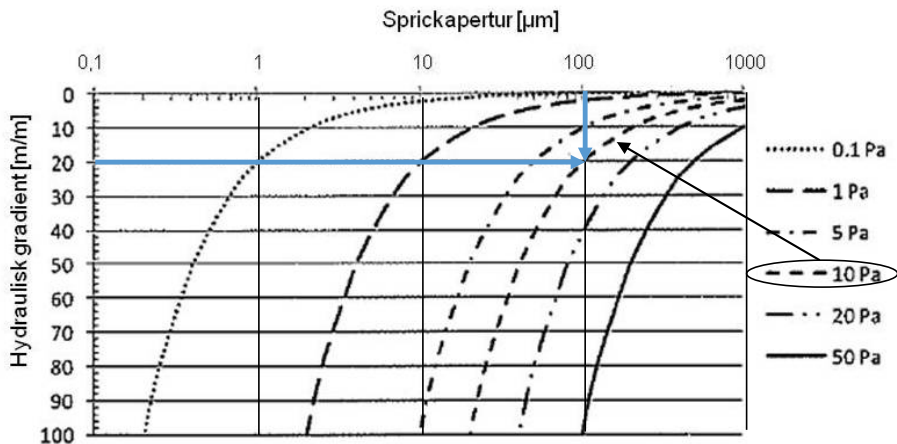
Efter ett år hade det tidigare injekterade läckande borrhålet blivit tätt. För att förstå varför och förhoppningsvis få tillbaka flödet överborrades borrhålet med en kärndiameter på 103 mm till ett djup ca 4 m. Efter överborring mättes flödet återigen till 0,4 l/min. Kärnan karterades och den tidigare injekterade pluggen studerades. I borrhålet utfördes hydrauliska tester;

- sektionvisa tester,
- tryckuppbyggnadstester och
- konnektionstester med närliggande borrhål.

Borrhålet injekterades med olika utföranden ("kontrollerade misslyckanden") för att gradvis skapa en förståelse kring varför inte borrhålet blev tätt. Slutliga injekteringen gjordes med stor tonvikt på kontroll, utförande och uppföljning för att slutligen lyckas få borrhålet tätt.

Uppskattning av den hydrauliska gradienten i ett tidigt skede i ett tunnelprojekt, görs med ekvation 2-1, och 2-2. Resultatet blir att ju djupare tunneln är förlagd alternativt tidigare injekterats erhålls en större förmodad hydraulisk gradient.

Kombineras uppskattningen med ytterligare kunskap om berget, såsom hydrauliska sprickvidder och använt injekteringsmaterial med en viss skjuvgräns kan koppling göras till erosion av bruk till sprickvidd och hydraulisk gradient enligt ekvation 2-4. I Figur 2-3 visas hur skjuvspänningen från vattnet beror av sprickvidden och hydrauliska gradienten.



Figur 2-3 Erforderlig flytgräns för att undvika erosion av bruket som funktion av sprickvidd och hydraulisk gradient (Axelsson 2009).

Figure 2-3 Required yield stress to avoid erosion of the grout, as a function of fracture aperture and hydraulic gradient (Axelsson, 2009)

Figuren ovan visar att exempelvis i en sprickvidd på 100 µm och en gradient på 20 m/m måste flytgränsen på injekteringsmedlet vara högre än 10 Pa för att minimera risken för erosion.

Sammantaget kan sägas att flytgränsen kan bestämmas för att minimera risken för erosion om gradienten är känd. Detta gäller under förutsättning att modellen för skjuvning längs ett plan gäller enligt Figur 2-2.

En faktor kallat "bakåtflöde" är beskriven i Axelsson, 2009. Huruvida detta fysikaliskt fungerar är svårt att både påvisa och förklara. Innebörden är att hela injekteringsmedlet måste stanna kvar i sprickan utan att ett "bakåtflöde" fås. Detta erhålls med en enkel

jämviktsekvation mellan pådrivande vattentryck och mothållande mobiliserade skjuvspänningar. Ur ekvationen kan den minsta nödvändiga inträngningslängden beräknas. Det uttryck som ingår i villkoret är inte den faktiska inträngningslängden som uttrycks i meter, utan den så kallade dimensionslösa inträngningen $I_{D, 2-D}$. Den dimensionslösa inträngningslängden ska vara större än kvoten mellan grundvattentrycket och injekteringsövertrycket.

$$I_{D, 2-D} > \Delta h / \Delta p \quad (2-8)$$

Den hållfasthet som erfordras på injekteringsmedlet när injekteringstrycket släpps dimensionerar pumptiden. Vattnet ger upphov till en eroderande kraft beroende på gradienten. Erosionsprocessen kallas bakåtflyde och innebär att vattnet bryter upp injekteringsmedlet, vilket kan beskrivas som att det späds ut genom att fingrar av vatten bryter in genom fronten. Till slut kommer medlet att spolans in mot tunneln och kan observeras som ytläckage större än "normalt".

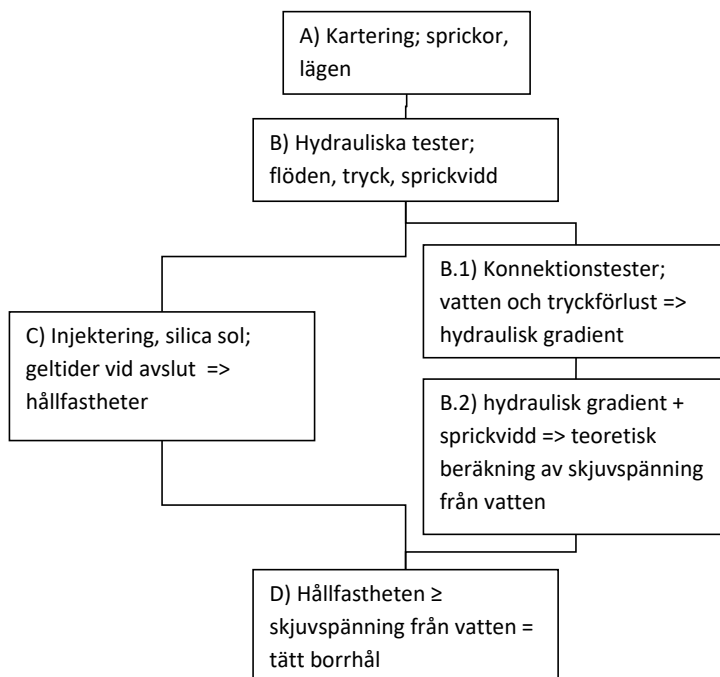
Genom att göra en jämviktsbetraktelse av pådrivande grundvattentryck vilket återspeglas i gradienten mot den uppbyggda inneboende spänningen i injekteringsmedlet kan nödvändig skjuvgräns i injekteringsmedlet beräknas enligt ekvation (2-6).

2.4 METODIK FÖR INJEKTERINGEN I FÄLTTESTET

Detta projekt startade med att försöka tätas det läckande borrhålet som uppstod efter att efterinjekteringen, 2010 var utförd. En mindre insats planerades. Resultatet var att borrhålet inte blev tätt och projektet tog en paus med att försöka förstå varför det inte lyckades.

Nedan följer en sammanfattande beskrivning av vad som gjorts i fälttestet. Tolkningen av hydraulisk gradient och skjuvspänningen kan göras från två håll, se Figur (2-4):

- 1) genom hydrauliska tester och beräkning av hydraulisk gradient och motsvarande skjuvspänning från vattnet, och/eller
- 2) använda känd hållfasthet på silica solen vid olika geltider och de injekteringarna som misslyckades att tätas borrhålet.



Figur 2-4 Metodik och tolkning av fälttestet för att påvisa hydraulisk gradient och erosion.

Figure 2-4 Methodology and interpretation of the field test to show hydraulic gradient and erosion of grout.

A) KARTERING BORRKÄRNA

Det läckande borrhålet överborrades november, 2011 för att hitta var läckaget finns längs borrhålet samt återfinna de använda injekteringsmedlen (cement och silica sol), se Figur 2-5 och 2-6. Två ytterligare mindre borrhål borrades till höger om hålet med för att erhålla en hydraulisk kontakt med det stora borrhålet och i förlängningen kunna uppskatta den hydrauliska gradienten.



Figur 2-5 Vänster: Bild tagen på kärnan vid 3,3 m djup från överborrningen. Höger: bild vid 2,3 m längd. Både cement och silica sol ihop blandat återfinns. Kanalen som syns i cementet (ungefär vid klockan 9 i vänstra bilden och klockan 3 i högra) är den som transporterar vatten fram till öppningen på borrhålet. Kanalen har dock kalcitutfällningar och i vissa delar av kärnan i omfattande mängd..

Figure 2-5 Left: Picture of the rock core at a depth of 3,3 m from the start of the over coring. Right: Picture at 2,3 m length. Both cement and silica sol is apparent. The channel that is evident in the cement (at 9 o'clock in the left picture and at 3 o'clock in the right picture) is the channel that transports the water to the start of the borehole. The channel has a large amount of precipitated calcite.



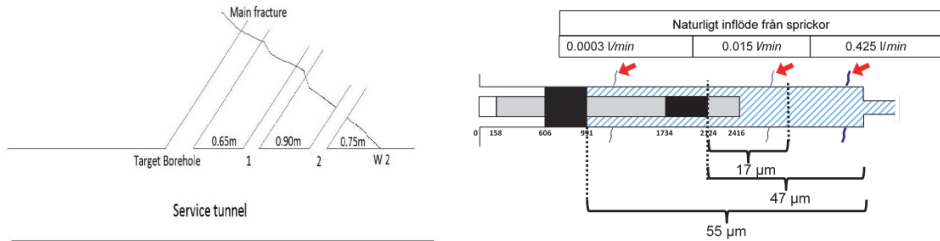
Figur 2-6 Vänster: injekteringspluggen med kanal som slutar. Höger, ihop pusslad borrkärna som visar sprickan som er upphov till kanalen i injekteringspluggen.

Figure 2-6 Left: The grouting plug with the end of the channel. Right: the core is puzzled together showing the fracture that transmits the water in the channel.

Kanalen i injekteringspluggen kunde följas ändå till sprickläget i kärnan. Längden från start på kärna till spricka var 3,2 m.

B) HYDRAULISKA TESTER, VATTENFÖRLUST

En skiss sett som en vy ovanifrån över de borrhål som borrades i väggen genom det förmodade flödande sprickplanet visas i Figur 2-7 nedan.



Figur 2-7 Vänster: skiss över borrhålen för mätning av den hydrauliska gradienten. Det större överborrade borrhålet (Target borehole) injekterades sedan. Höger: tolkning av spricklågen och flöden från de hydrauliska testerna i det överborrade borrhålet.

Figure 2-7 Left: sketch of the boreholes that used for measuring the hydraulic gradient. The larger over cored borehole (target borehole) used for the grouting. Right: interpretation of the fracture intersections and flows from the hydraulic tests.

Längs hela borrhålet utfördes sektionsvisa mätningar av både vattenförlust och naturligt inflöde. Resultaten summeras i Tabell 2-1.

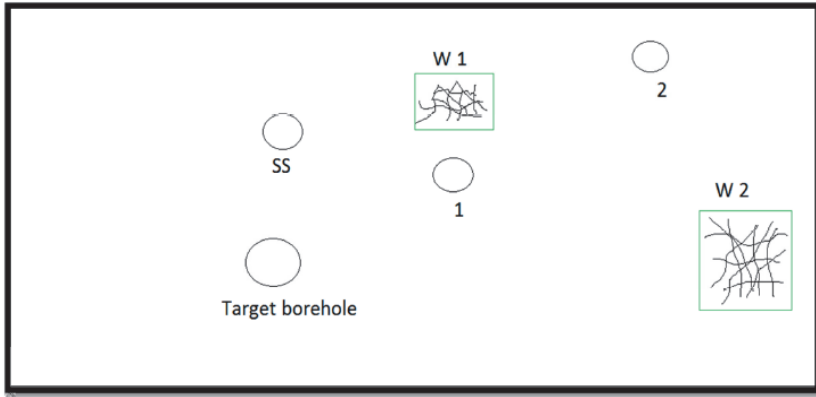
Tabell 2-1 Resultat av hydrauliska tester i "Target borehole".
Table 2-1 Results of the hydraulic tests in "Target borehole".

Läge längs borrhål Sektioner	Naturligt inflöde	Tolkad sprickvidd via "cubic law"	Tolkat läge på spricka
1,0-2,1 m	0,0003 l/min	~1 µm	1,1 m
2,1-2,6 m	0,015 l/min	17 µm	2,5 m
2,5-3,5 m	0,425 l/min	50 µm	3,2 m

Från kärnkarteringen och de hydrauliska mätningarna kunde tydligt samband observeras mellan kanalens slut, spricklåget i kärnan och det uppmätta inflödet. Slutsatsen är att det läckande borrhålet är p.g.a. av att flödet i sprickan inte lyckats tätas vilket ger upphov till kanalen längs det injekterade borrhålet.

B.1) HYDRAULISKA TESTER, KONNEKTIONSTESTER

Radiellt flöde kunde konstateras i och med injekteringen som tidigare var utförd. En skiss över de noterade sambanden och ytläckagen visas i Figur 2-8. "Target borehole" är det överborrade borrhål som skulle injekteras. "SS" betyder närliggande borrhål där samband kunde noteras, "W1" och "W2" är ytläckage på väggen, "1" och "2" var de nya borrhålen för detta test.

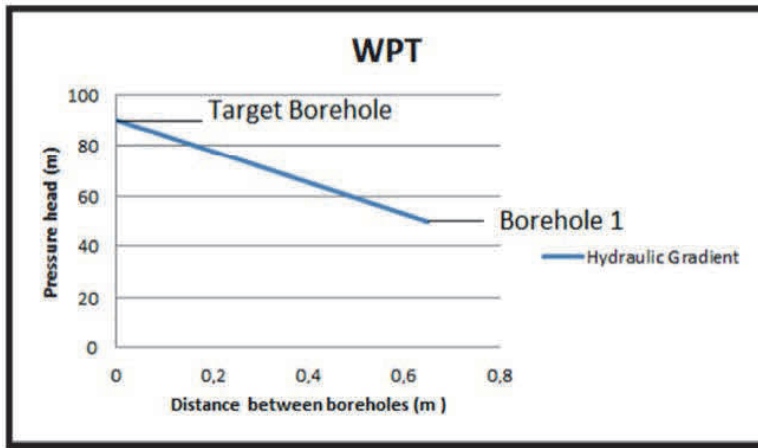


Figur 2-8 Skiss över väggen i tunneln. När det borrhålet (target borehole) injekterades observerades det på fyra platser ett samband; W1, W2, och i 1 och 2.

Figure 2-8 Sketch of the tunnel wall and the four connections observed when the target borehole was grouted.

Under injekteringen av borrhålet kunde samband noteras i borrhålen 1 och 2 samt i vägg uppvisade ytläckage (W1 och W2). Tiderna då de noterades varierade från 8-16 min från start av injekteringen (Suresh and Tohow, 2013). Volymen som injekterades var 24 liter och design tryck uppnåddes. Sammanfattningsvis kan sägas att flödet av injekteringsmedel var radiellt, 2D.

De hydrauliska testerna utfördes som ett konnektionstest. Borrhålet (target borehole) injicerades med vatten under kontant tryck, 90 m, medan tryckresponser noterades i det närliggande borrhålet (nr 1). Trycket som kunde uppmätas efter att flödet stabiliserats i borrhål nr 1 var 50 m. Tryckfallet mellan borrhålen var således 40 m. Det vertikala avståndet mellan borrhålen var ca 0,6 m vilket ger en hydraulisk gradient på ca 60 m/m. Resultatet visas i Figur 2-9 nedan.



Figur 2-9 Uppmätt tryckfall mellan det överborrade borrhålet och borrhål nr 1.

Figure 2-9 Measured pressure drop between the target borehole and borehole no 1.

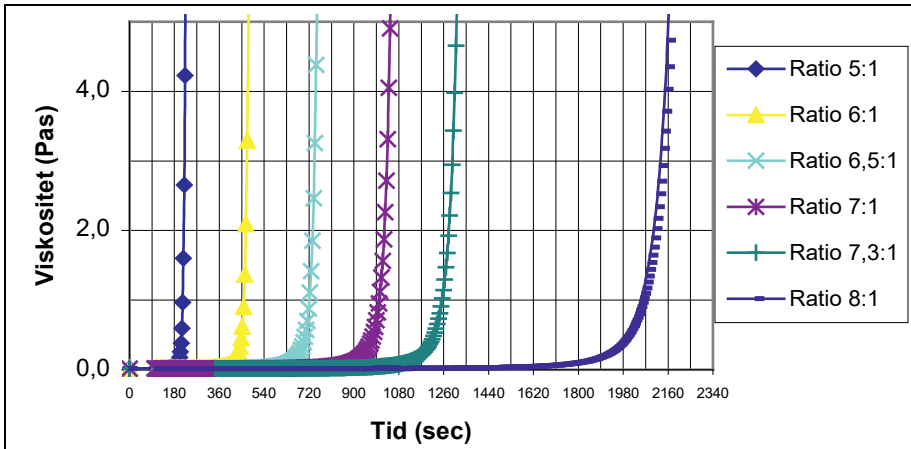
B.2) HYDRAULISKA TESTER, SKJUVSPÄNNING FRÅN VATTEN

Den hydrauliska gradienten är minst 60 m/m i den aktuella sprickan. Sprickvidden är ca 50-60 μm . Detta ger att vattnets eroderande kraft är i storleksordningen 15-20 Pa.

C) SKJUVHÅLLFASTHET FÖR SILICA SOL.

Bestämning av skjuvhållfastheten på flödande material är svårt. Silica sol beter sig som ett flytande material i början som sedan går över till ett mer duktilt material och slutligen åt ett mer sprött beteende. Fallkontester har utförts på silica sol (Meyco MP320, och med accelerator 10% NaCl, gel tid=20 min). Fördelen med fallkontester är att de är enkla att och går fort att göra. Axelsson, 2009 visade en provserie där fallkonsvärden presenteras från en timme efter gelning till flera dagar efter gelning. Innan gelning är det inte möjligt att mäta med fallkon då silica sol är ett flödande material. Ett första test av att mäta skjuvhållfastheten på silica sol vid geltid gjordes i ett examensarbete (Frixos and Nilsson, 2017). De rheologiska egenskaperna samt skjuvhållfasthet mättes med en oscillerande uppsättning i rheologi apparaten.

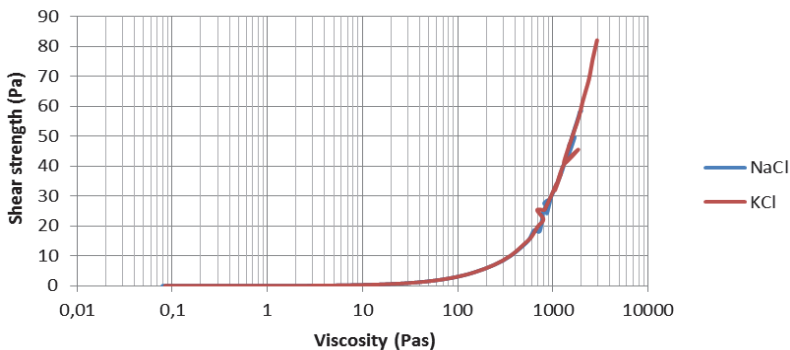
Från serien med fallkonstester uttrönar Axelsson 2009, att skjuvhållfastheten är 2 Pa vid halva geltiden och 60 Pa vid 4/5 av geltiden. Detta är baserat på en bakåt linjär regression vilket självklart kan vara diskutabelt. Silica sol har en snabb och kontrollerbar viskositetstillväxt. När viskositeten ökar så ökar även skjuvhållfastheten på injekteringsmedlet. Vid geltid för silica sol är viskositeten ca 6000 Pas men detta är inte mätt, utan framräknat (enligt Funehag, 2005). Nedanstående diagram visar på olika viskositetstillväxter (Figur 2-10).



Figur 2-10 Viskositetstillväxten för silica sol beroende på blandningsförhållandet. Notera skalan för viskositeten, vid gelning är viskositeten 6000 Pas jämfört med största värdet på axeln på 5 Pas.

Figure 2-10 Viscosity development of silica sol depending on mixing ratio.

Den uppmätta skjuvhållfastheten med rheologi mätningar och uppsättningen ”kona och platta” på silica sol vid geltid för en blandning med 22 minuters geltid är ca 60 Pa vid 20°C. Geltiden inträffade vid en viskositet på ca 2000 Pas vilket är lägre än den tidigare framräknade. Vi ser dock att viskositeten och skjuvhållfastheten växer exponentiellt (Figur 2-11). Den uppmätta skjuvhållfastheten vid geltid stämmer väl överens med den linjära regressionen enligt Axelsson, (2009).



Figur 2-2 Skjuvhållfasthet och viskositetstillväxten för silica sol med en geltid på 22 minuter för NaCl och 19 minuter med KCl vid 20 grader celcius.

Figure 2-11 Shear stress and viscosity development of silica sol for silica sol with a gel time of 22 minutes with NaCl and 19 minutes with KCl.

2.5 SUMMERANDE FAKTORER FRÅN FÄLTEST

I tabellerna nedan visas en summering av de uppmätta och beräknade parametrar för sprickans tolkade hydrauliska egenskaper (Tabell 2-2) och tolkad skjuvhållfasthet för silica solen (Tabell 2-3).

Tabell 2-2 *Hydrauliska egenskaper och beräknad skjuvkraft för sprickan och vattenflödet.*

Table 2-2 *Hydraulic properties and computed shear stress for the fracture and the water flow.*

Sprickans läge	Hydraulisk apertur	Hydraulisk gradient	Beräknad skjuvkraft
3,2 m från borrhållsvägg	55 ± 5 µm	60 m/m	15-20 Pa

Tabell 2-3 *Tolkad skjuvhållfasthet för silica sol vid geltid.*

Table 2-3 *Interpreted shear strength of silic sol at gel time.*

Skjuvhållfasthet,	Linjär regression, fallkon	Rheologitest
Silica sol,	60 Pa, vid 4/5 av gel tid	60 Pa vid geltid

Att notera gällande skjuvhållfasthet från rheologitestet är att kopptestet vid gelning motsvarande ca 2000 Pas. Detta är lägre viskositet vid gelning än de förmodade 6000 Pas. Detta innebär att hållfastheten vid gelning kan vara ännu högre men fler tester av detta slag krävs.

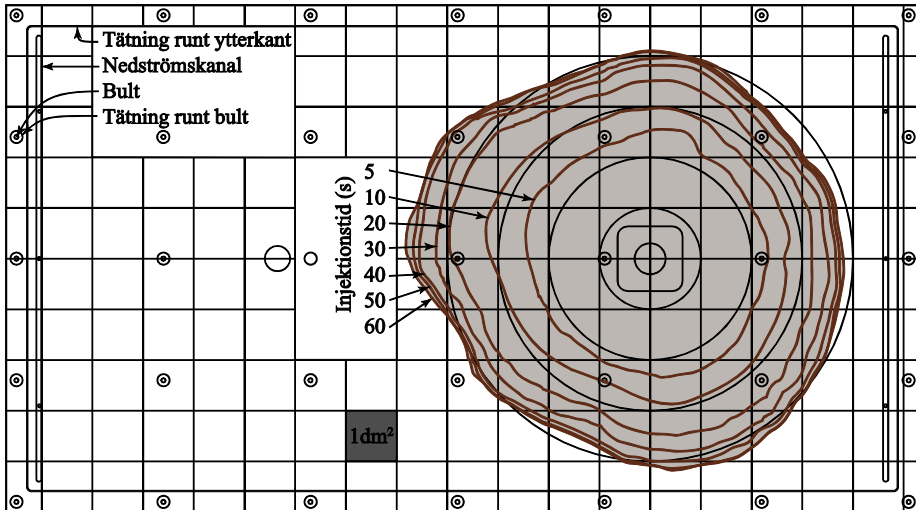
2.6 INJEKTERINGAR I SPRICKMODELLEN

Syftet med injekteringarna i sprickmodellen var att påvisa hur en erosion av injekteringsmedel startar, visa om erosion kan undvikas baserat på inträngningslängd och tid med hänsyn tagen till den hydrauliska gradienten samt påvisa hur ett läckande borrhål kan uppträda. För att inträngningslängden skall kunna användas som ett mått att visa om erosion uppstår eller inte visas först att inträngningslängden kan beräknas med hjälp av de teorier som finns för ett Binghamflöde (Gustafson och Stille, 2005).

2.6.1 VERIFIERANDE INTRÄNGNINGSLÄNGD

Verifieringen av inträngningslängd utan en pålagd hydraulisk gradient gjordes genom att mäta den radiella inträngningslängden i en sprickmodell. Sprickmodellen är gjord av plexiglasskivor som är monterade med schimsbrickor i mellan. Storleken på modellen är 1,5x1,0 m. Med injekteringshålet placerat centralt i modellen kan radiella inträngningslängder upp till ca 0,3 m från injekteringshålet följas och mätas. Sprickvidden ändras genom att montera olika storlekar på schimsbrickorna (från 0,025-0,3 mm) är möjligt. Givet dessa sprickvidder samt möjliga inträngningslängder blir de användbara injekteringsstrycken mellan 0,1 till 2,5 bars övertryck beroende på valda

egenskaper på bruket, ju styvare bruk (hög viskositet och hög skjuvgräns) kan högre tryck användas och tvärt om. En figur över sprickmodellen samt en tolkad inträngningslängd för en av testerna visas i Figur 2-12.



Figur 2-12 Brukets spridning vid 5, 10, 20, 30, 40, 50 och 60s efter injekteringen påbörjades från /Funehag och Thörn, 2014/.

Figure 2-12 The grout spread at 5, 10, 20, 30, 40, 50 and 60 s after that grouting started, figure from /Funehag and Thörn, 2014/.

Inträngningslängden har verifierats med hjälp av ett cementbruk, Cementas injektering 30, med ett $v_{ct}=0,72$ (tolkat som ganska styvt bruk). Egenskaperna för varje recept är mätta i en rheometer. Som kontroll av egenskaperna för varje enskild blandning under laborationen användes mudbalance, marchkon och yield stick. Egenskaperna på bruket som använts i de två testerna i två olika hydrauliska sprickvidder visas i Tabell 2-4.

Inför varje test i sprickmodellen görs ett hydrauliskt test. Vatten injekteras med konstant tryck genom injekteringshålet. Vattnet fångas upp i kollektorn längs den ena kortsidan på sprickmodellen. Flödet genom injekteringshålet räknas som volymen som samlas upp under en viss given tid. Den hydrauliska sprickvidden räknas via den ”kubiska lagen”.

Tabell 2-4 Egenskaper på bruk för de två körningarna i sprickvidderna. Efter Funehag and Thörn (2017).

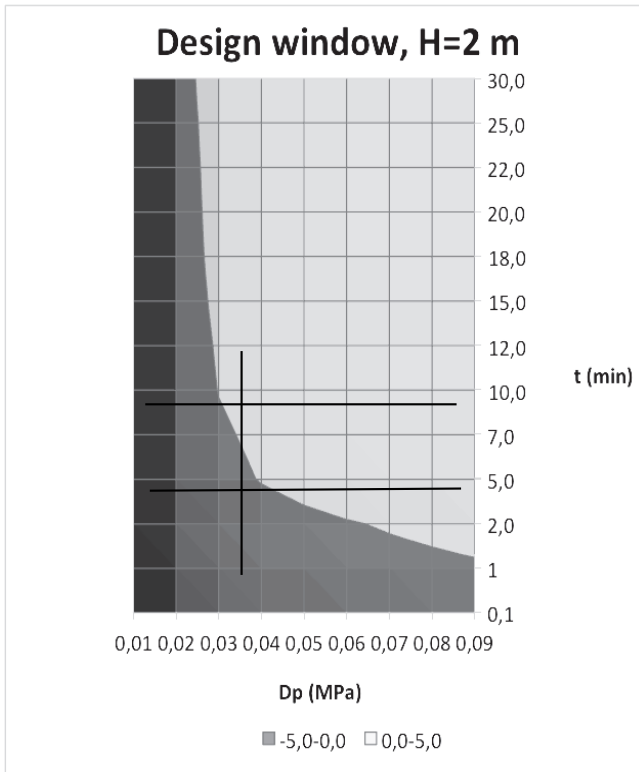
Table 2-4 Properties of the grout used in the two runs in the two different apertures. After Funehag and Thörn (2017).

	Hydraulic aperture	WCR	Density	Yield stress	Marsh cone	Filter pump
Run 1	200 μm	0.72	1.63 g/cm	4 Pa	41 sec	320 ml
Run 2	125 μm	0.72	1.63 g/cm	5 Pa	41 sec	330 ml

2.6.2 INJEKTERING FÖR PÅVISANDE AV EROSION

Enligt Axelsson, (2007) måste den dimensionerande inträngningslängden vara större än förhållandet mellan injekteringsöverttrycket och grundvattentrycket annars uppstår ”backflow” eller piping. I projektet har detta kunnat identifieras via de filmer som har gjorts. I filmen ser man en kanalbildning längs strömningsriktningen.

Erosion kan således kontrolleras genom inträngningslängden. En tillräcklig lång inträngningslängd skall inte ge bakåtlöde. Detta påstående har visats i de tester som gjorts i sprickmodellen. En hydraulisk gradient över hela sprickplanet beräknades så att bakåtlöde skulle ske om inträngningslängden blev aningen kortare än det teorin anger. När väl bakåtlöde kunnat konstateras spolades sprickmodellen ren (ca 2 minuter) och med samma bruk och injekteringstryck läts injekteringen fortgå längre (längre inträngningslängd). Således kunde i samma test både stabil och eroderande injektering observeras. De använda bruksegenskaperna och design för injekteringen visas i Figur 2-13.



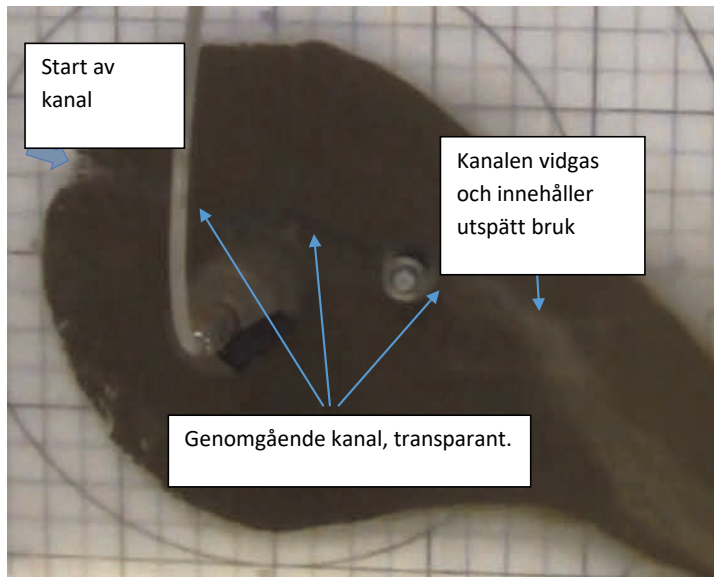
Figur 2-13 Designfönster för erosion för cementbruk. Efter Axelsson, 2007.

Figure 2-13 Design window for erosion applied for cement grout. After Axelsson, 2007

Följande parametrar och värden användes i testet:

- Hydraulisk sprickvidd = 190 μm .
- Grundvattentrycket uppströms = 0,2 bar.
- Injekteringsövertryck = 0,4 bar.
- Brukets egenskaper; viskositet = 20 mPas och skjuvgräns = 4 Pa. Densiteten = 1,63 kg/dm^3 och Marchkontiden = 41 sek. Egenskaperna erhöles med ett VCT=0,72.

Testet filmades och under injektering observerades erosion eller inte genom att identifiera genomgående kanaler i bruksplymen. Svårigheten med observationerna är att bruksfronten alltid är påverkad av nån form av utspädning där ”fingering” kan skönjas. Erosion bedöms om en genomgående kanal kan ses, antingen som ljusare kanaler eller helt genomspolade, transparenta kanaler (se Figur 2-14).



Figur 2-14 Bild över kanalflöde genom en injekteringsplyme

Figure 2-14 Picture of channel flow through a grouting plyme.

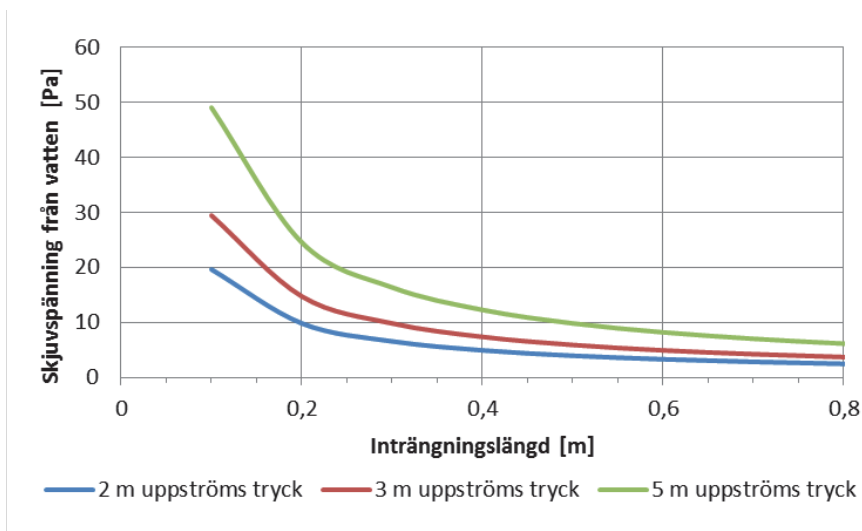
Den hydrauliska gradienten verkar över hela sprickan. Motsvarande skjuvkraft beräknas enligt ovan. Vid ett läckage till borrhålet blir längden varvid trycket verkar över kortare och därmed hydrauliska gradienten högre. Tabell 2-5 visar storleken på de hydrauliska gradienterna samt motsvarande skjuvkrafter.

Tabell 2-5 Hydrauliska gradienter över sprickplanet i sprickmodellen för körningarna för att påvisa erosion av bruk.

Table 2-5 Hydraulic gradients along the fracture plane for the runs to show erosion of grout

Upströms tryck	Längd spicka	Beräknad hydraulisk gradient	Beräknad skjuvkraft	Gradient till borrhål
0,1 bar	1,2 m	0,8 m/m	0,8 Pa	2,5 m/m
0,2 bar	1,2 m	1,7 m/m	1,6 Pa	5 m/m
0,3 bar	1,2 m	2,5 m/m	2,5 Pa	7,5 m/m

Skjuvspänning från vattnet som verkar på bruket är beroende av inträngningslängden, sprickvidden och trycket uppströms. Ju kortare inträngningslängden är desto större blir den påverkande skjuvspänningen, enligt Figur 2-15.



Figur 2-15 Påverkande skjuvspänning från vattnet beroende på inträngningslängd och trycket uppströms.

Figure 2-15 Affecting shear stress from water depending on penetration length and the pressure upstream.

Designfönstret i Figur 2-13 visar på inträngningslängden måste bli tillräckligt lång för att motstå backflow enligt kriteriet beskriven i Axelsson, 2007. Det är denna med inträngningslängd kopplat till mottryck som metodiken med injektering i en hydraulisk gradient skall visa.

3 RESULTAT

3.1 FÄLTTEST AV LÄCKANDE INJEKTERINGSHÅL

3.1.1 UTFÖRDA INJEKTERINGAR

Den första injektering som utfördes i juni, 2013 följde en design baserat på den nya kunskapen om läge på spricka och hydraulisk gradient. Målet var uppnå en tillräcklig hållfasthet på silica solen för motstå vattenkraften i sprickan vid avslut av injekteringen. Beräkningar visade på att skjuvkraften från vattnet var ca 15-20 Pa i sprickan. Vid avslut av injekteringen skulle då skjuvhållfastheten vara mer än 20 Pa och troddes uppnås vid ca 4/5 av geltiden. Injekteringen gjordes med en gel tid på 15 minuter, ett övertryck på 10 bar, en injekteringstid på 11 minuter. Silica solen höll en temperatur på ca 12 grader vilket skall jämföras med temperaturen i berget på 8 grader. Manschetten plockades bort efter 3 dygn och resultatet var att borrhålet läckte.

Två möjliga orsaker identifierades till att vi inte kunde säga att erosion var uteslutande orsaken till att borrhålet är så svårt att täta.

1. temperaturskillnaden mellan silica sol och berg var för stor vilket gav en för låg hållfasthet på silica sol i sprickan vid avslut av injekteringen.
2. Vi kunde inte påvisa radiellt flöde (2-D) utan enbart att spridning skedde nedströms i och med ytläckage och samband med borrhål observerades. Injekteringsflödet bör flöda uppströms för att säkerställa ett gott tätningsresultat.

Den andra *slutliga injekteringen* syftade till att säkerställa radiellt flöde samt rätt temperatur på silica solen. Injekteringen (efter tidigare 4 misslyckade försök) utfördes i december 2013. Då tidigare injekteringen hade en högre temperatur än bergets temperatur valdes att denna gång kyla blandningen. Tidigare vet vi att silica solen gelningsförlopp är temperaturkänslig. Gelningens påverkan av temperatur kan enkelt beskrivas som en dubblerad temperatur halverar gel tiden (Funehag 2007). För testet var blandningsförhållandet, 100 liter silica sol och 20 liter saltlösning. Temperaturen 8-9 grader.

Designen var en geltid på minst 1,5 timmar, injektering pågår tills gelning, injekteringstrycket valdes till 13 bar (samma som tidigare) i totaltryck. Manschetten monterades som tidigare på 1,2 m in i borrhålet. Borrhålet försattes under vakuüm och både vatten och luft avlägsnades.

Det uppmätta flödet och trycken under pågående injekteringen visas i Tabell 3-1.

Tabell 3-1 Noteringar under pågående injektering.**Table 3-1** Notes taken during the grouting

Tidpunkt från start [min]	Flöde [lit/min]	Tot Volym [lit]	Tryck [bar]	Kommentar
0	0	0	17 efter 15 sek	Injekteringen startar
2:45	0	0	0	Slang ditsatt
3:10	0	0	16,5	Tryck uppnått
6:40		6	17	Bh J2 droppar konstant Fundering varför bh fyllnaden är så liten, sannolikt pga dåligt rensad
11:50	0,41	9		Ett kolvslag (0,75 l) på 1 min och 50 sek.
28		14	18	
38		17	17,9	
45	0,26			Ett kolvslag på 2 min 50 sek
52		21	18	
60		21		
65	0,18	24		Ett kolvslag på 4 min 14 sek
78		24		Nästan kolvstopp 1cm>10 in
80		25		Börjar gela, blandaren sätts på. J2 droppar fortfarande
96		25		Kolven bedöms stå still
114		26	19,4	Ett kolvslag på 20 min
122		26		Senaste kopprovet gelat*. Injekteringen avslutas

* Det kopprov taget vid start på injekteringen gelade vid ungefär 70 min. denna höll då ca 20 grader Celsius. Valde att kontinuerligt ta nya "fräscha" kopprov. Från geltiden, i ett ny-taget kopprov bedöms när injekteringen skall avslutas=vid geltid.

Sammanfattningsvis av injekteringsförloppet var att:

1. Injekteringstrycket nåddes efter ca 3 minuter. Flödet noterades inte.
2. Efter ca 12 minuters pumpning var den totala volymen 9 liter och flödet noterat till 0,41 l/min, mätt som antal kolvslag per minut. Den lilla mängd pumpad berodde på att borrhålet var dåligt rensat från början.
3. Flödet sjunker sakteliga under hela pumpningen och efter 65 minuter är flödet nere i 0,18 l/min och total volym uppgick till 24 liter.
4. Efter 122 minuter (ca 2 timmar) har det senast tagna kopprovet gelat och manschetten stängs och pumpningen avslutades.
5. Total injekterad volym uppgick till 26 liter och trycket sannade vid 19 bar.

Två dagar senare öppnades manschett och inget flöde noterades varken direkt vid injekteringsplugg och inte heller framför plugg. Borrhålet bedömdes som tätt.

3.2 LABORATIONSTESTER

3.2.1 INTRÄNGNINGSLÄNGD AV CEMENTBRUK

Resultaten är presenterade i sin helhet i Funehag och Thörn (2017) och nedan följer ett sammandrag, bland annat av resultaten sammanfattande i Tabell 3-2. De beräknade inträngningslängderna följer Gustafson och Stille, 2005. Den radiella inträngningslängden, I_{2D} utgörs av en andel, I_D av den maximala möjliga inträngningslängden, I_{max} om man tar hänsyn till injekteringstiden.

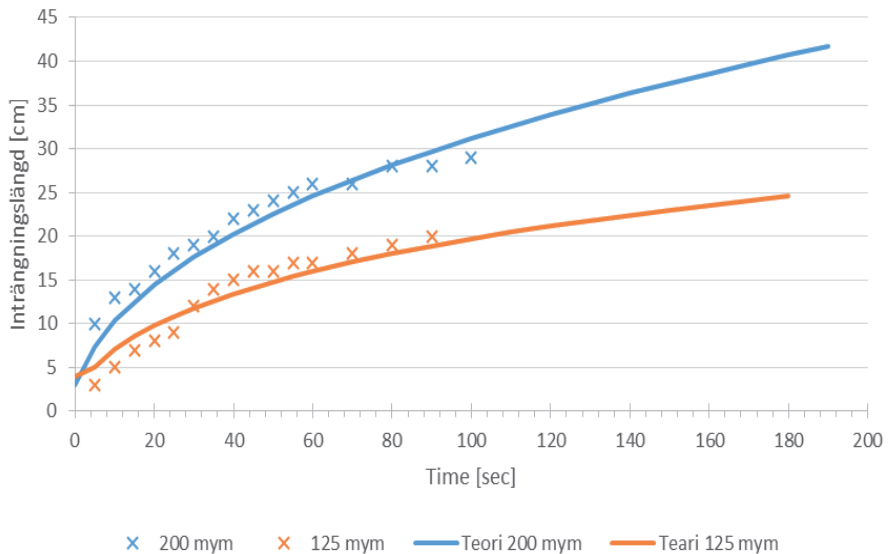
$$I_{2D} = I_D \times I_{max} \quad (3-1)$$

Tabell 3-2. Uppmätta och beräknade inträngningslängder i två sprickvidder ($b_{hyd}=200 \mu m$ och $125 \mu m$) för bruken i tabellen 2-4 i teorikapitlet.

Table 3-2 Measured and calculated penetration lengths in the two fracture apertures ($b_{hyd}=200 \mu m$ and $125 \mu m$) for the grouts presented in table 2-4 in the theory chapter

	Run 1, $b_{hyd} = 200 \mu m$		Run 2, $b_{hyd} = 125 \mu m$	
	$\Delta p = 0.3 \text{ bar}$		$\Delta p = 0.3 \text{ bar}$	
Time (sec)	l_{meas} (m)	l_{calc} (m)	l_{meas} (m)	l_{calc} (m)
5	0.10	0.07	0.03	0.05
10	0.13	0.10	0.05	0.07
20	0.16	0.15	0.08	0.10
30	0.19	0.18	0.12	0.12
40	0.22	0.20	0.15	0.13
50	0.24	0.23	0.16	0.15
60	0.26	0.25	0.17	0.16
70	0.26	0.26	0.18	0.17
80	0.28	0.28	0.19	0.18
90	0.28	0.30	0.20	0.19
100	0.29	0.31	0.20	0.20

Uppmätta inträngningslängder med de teoretiskt beräknade är plottade i diagrammet nedan (Figur 3-1).



Figur 3-1 Diagram visande uppmätta och beräknade inträngningslängder för cementbruk i två sprickvidder.

Figure 3-1 Diagram of the measured and calculated penetration lengths in the two fracture apertures.

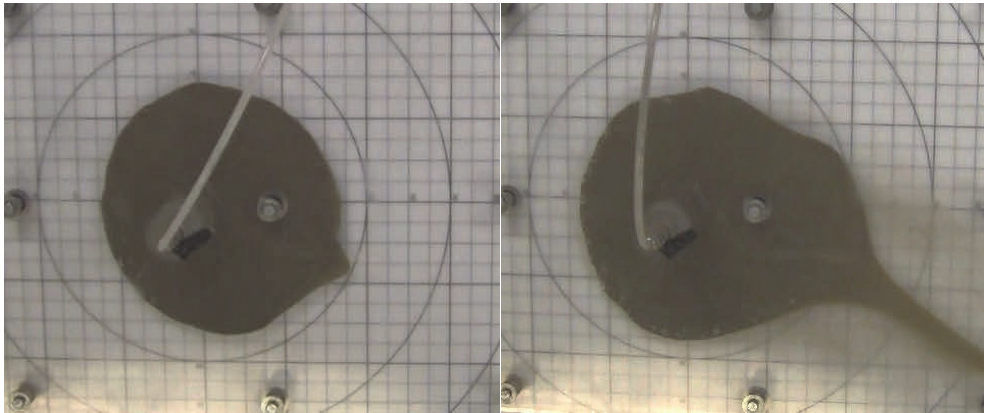
Figur 3-1 visar på en mycket god överensstämmelse mellan uppmätt och beräknad inträngningslängd. Trycken är låga jämfört med de som normalt används vid injektering i tunnlar. De maximalt möjliga inträngningslängderna givet laborationens uppsättning av parametrar är 0.75 m i sprickvidden 200 μm och 0.48 m i sprickvidden 125 μm . De uppmätta utgör således ca 40% av den maximala inträngningslängden vilket i denna skala anses som långa. Vidare kan rändernas (stängda gränser) påverkan på inträngningslängden urskiljas. I numeriska analyser sätts gränserna till ca 1/3 längre än den det aktuella beräkningsområdet. Samma antagande har gjorts i denna laboration. Det observerade området utgör ca 2/3 av sprickmodellens tillgängliga bredd (0,5 m åt var sida), alltså ca 0,3 m.

3.2.2 INTRÄNGNINGSLÄNGD PÅVERKAD AV GRADIENT

Ett test förberedes genom att vattenmätta sprickan och utföra ett hydraulisk tests. Hydrauliska gradienten över sprickan ställdes in genom att sätta uppströms trycket till ett visst tryck och mothållande tryck till et lägre tryck. Den hydrauliska gradienten blir

således tryckskillnaden mellan uppströms och nedströmstrycket dividerat med sprickans längd.

Bruket blandades och egenskaperna kontrollerades. Borrhålet fylldes med via injekteringsslangen med ett lågt tryck och borrhålet lät fyllas genom att den övre ventilen öppnades. Manschetten stängdes och rätt injekteringsstryck ställdes in. Manschetten öppnades samtidigt som ventilen på borrhålet stängdes. På detta sätt kunde utspädning av bruket minimeras för att få en stabil injekteringsfront.



Figur 3-2 Bild visande en injektering i en hydraulisk gradient. Uppströms är vänster i bilden. Övre bild: hydraulisk gradient 0,1 m/m vid 2 minuters injektering. Höger bild: hydraulisk gradient 0,2 m/m vid 1 minut och 10 sekunders injektering...

Figure 3-2 Picture showing a grouting in a hydraulic gradient. Upstream is in the left of the picture.

Figur (3-2) visar att injekteringsplymen blir påverkad av gradienten, kortare inträngningslängd uppströms och längre nedströms. I bilden har de runda ringarna ett inbördes avstånd på 10 cm. Vattenflödet som orsakar den hydrauliska gradienten verkar från vänster till höger i bilden. Resultaten av de två körningarna mot hydraulisk gradient summeras i Tabell 3-3, nedan.

Tabell 3-3 *Två injekteringar och dess uppmätta upp- och nedströms inträngningslängd i två olika hydrauliska gradienter*

Table 3-3 *Two groutings and the measured penetration length in up- and downstream gradient.*

Injektering i gradient	Hydraulisk sprickvidd	Inj-tid	Hydraulisk Gradient	Uppströms inträngningslängd	Nedströms inträngningslängd
Test 1; $\Delta p=4$ m $\tau=3$ Pa, marchkon=40 sec, $\rho=1,63$	186 μm	120 sek	0,8	0,12 m	0,17 m
Test 2, $\Delta p=4$ m $\tau=4$ Pa, marchkon=40 sec, $\rho=1,63$	188 μm	70 sek	1,7	0,13 m	0,20 m

Egenskaperna på bruket för dessa två körningar var nästan identiska. De använda övertrycken var de samma, 4 m. Den beräknade hydrauliska gradienten är uppströms vattentrycket dividerat med sprickans längd, 1,2 m. För injekteringen nr 1 var uppströmstrycket satt till 0,1 bar och för nr 2 till 0,2 bar.

Tyvär kunde inte samma tester användas för att illustrera inträngningslängden opåverkad av gradient. Dock bör den opåverkade inträngningslängden vara mellan uppströms- och nedströms inträngningslängden. Trycket som verkar uppströms är injekteringstrycket minus hydrauliska gradienten. Nedströms vice versa.

3.2.3 EROSION AV CEMENTBRUK

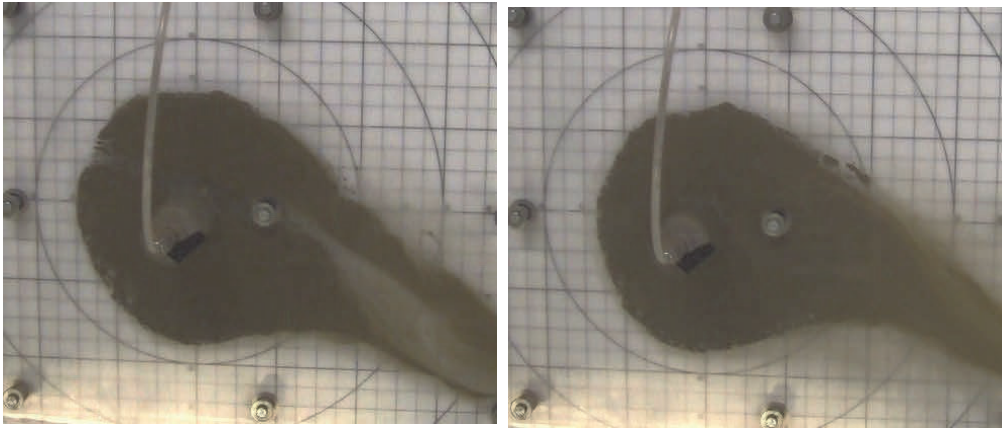
Testerna förbereddes genom att räkna ut I_{max} för de två olika valda trycken samt beräknad inträngningslängd för de valda tiderna (Tabell 3-4).

Tabell 3-4 *En injektering mot hydraulisk gradient där manschetten stängdes efter två respektive sju minuter för att observera erosion.*

Table 3-4 *One grouting against a hydraulic gradient where the packers were closed after two and 7 minutes to observe erosion.*

I vid tidpunkt	Injekteringslängd	Förväntat resultat	Åtgärd
I_{max}	0,94 m		
I_{2D} , 2 min	0,36 m	Erosion ”bakåtflode”	Manschett stängs+ observation
I_{2D} , 7 min	0,52 m	Stabilt	Ny injektering, manchett stängs+observation

Observationerna under injekteringen visas i figuren nedan (Figur 3-3).



Figur 3-3 Vänster bild. Injekteringsplymen efter 2 minuters injektering. Ljusa kanaler genom hela bruket kan skönjas. Höger: Injekteringsplymen efter 7 minuters injektering. Inga kanaler kan observeras.

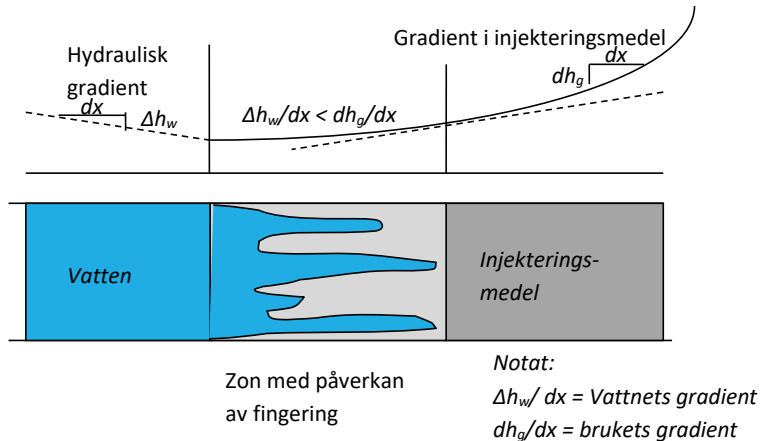
Figure 3-3 Left picture: The grouting plyme after 2minutus of grouting. Light channels are observed. Right picture: The grouting plyme after 7 minutes of grouting. No channels are observed.

Enligt teorin kring bakåtlöde, baserat på inträngningslängd, överensstämmer observationerna under detta test; efter 2 minuters injektering syns kanalflöde medan efter 7 minuter syns inga kanaler. Detta beror på en längre inträngningslängd. Dock kan inte för dessa två tester kan någon nämnvärd skillnad i inträngningslängd observeras. Orsaken kan vara att bruket har härdat ytterligare en stund vilket ger en något styvare bruk med kortare inträngningslängd som följd. Dock kan en yttre erosion ses och den ”svans” som syns är resultatet att injekteringen gjorts mot hydraulisk gradient och nedströms blir inträngningen oändlig.

4 ANALYS OCH DISKUSSION

Ett förslag på en summerande design baserat på hydraulisk gradient och erosion visas i Tabell 4-1. Det är framförallt två processer som ger upphov till erosion av injekteringsmedel i en spricka:

Fingering. Här beror storleken/omfattningen av fingering av viskositetskillnader och gradienten. Fingering kan ske så länge det finns ett flöde. Det finns andra processer som ger en utspädning såsom dispersion och osmos. Dessa är koncentrationsstyrda och sker alltid men bedöms här som att verkan av dessa är i mindre omfattning än fingering. Då flödet är noll är det skjuvspänningen som verkar. Fingering uppstår då gradienten från bruket är lägre än gradienten från vattnet (Figur 4-1). Detta kan uppträda i en del av bruksfronten där gradienten är lägre än den motstående hydrauliska gradienten. Under pågående injektering finns alltid ett flöde och således kommer fingering alltid att ske. Vid låga hydrauliska gradienter blir också fingeringeffekten liten (kanske obetydlig).



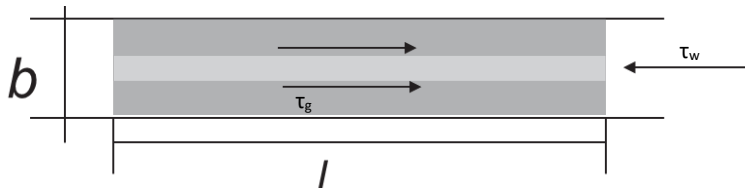
Figur 4-1 Skiss över hur fingering uppträder samt påverkar området av bruksfronten där gradienten för bruket är lägre än för vattnet.

Figure 4-1 Sketch of how fingering appears and is affecting the area of the grout front where the gradient of the grout is lower than for water.

Erosion. Detta är en process som är helt styrd av skjuvspänningarna (skjuvkrafter och skjuvhållfasthet). Om skjuvkraften från vattnet är högre än skjuvhållfastheten i

injekteringsmaterialet fås erosion. Detta sker i både ytterkanter runt injekteringsbruket liksom gropbildningar i fronten som kan ge upphov till en öppen kanal.

Det finns två sätt att beskriva detta som är principiellt helt olika. Den ena är *piping* och här tolkas som om det är en kanal som bildas direkt då skjuvkraften från vattnet är högre än skjuvhållfastheten i injekteringsmaterialet. Här bildas det ett skjuvplan i materialet vilket ger ett brott. Detta är den mekanism som är beskriven i Smits (2000) och vidarearbetad av Axelsson (2009). Se principiell figur nedan (Figur 4-2).



Figur 4-2 Skiss över hur kanalflöde/piping i bruket då skjuvkraften från vattnet är större än brukets mothållande skjuvgräns.

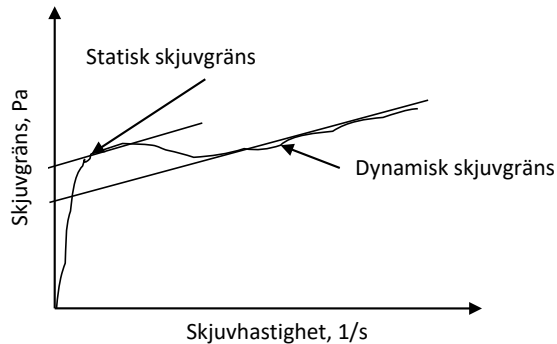
Figure 4-2 Sketch of how channeling/piping occurs when the shear force from water is larger than the yield stress of the grout.

Här är det en jämviktsekvation som balanseras av skjuvhållfastheten i bruket, τ_g och skjuvkraften från vattnet, τ_w . Ju längre längden är av bruket som kan skjuvas desto lägre kan skjuvhållfastheten vara i bruket för att balansera krafterna.

Den andra principiella beskrivningen är att skjuvkrafterna som håller partiklarna ihop är kohesionen. Om kraften från vattnet är större än kohesionen börjar partiklar att erodera (bortforslas). Här kan vi inte säga vart partiklarna tar vägen utan om det börjar erodera en kanal så kan partiklarna transporteras tillbaka upp genom kanalen pga vattenflödet. Det som verkar stämma är hastigheten på vattnet lokalt är som störst (dubbelt så stor som det globala vattenhastigheten) precis i riktning med vattenflödet. Detta skulle tyda på att om sprickan är helt planparallell sker den eroderande kanalen i bruket alltid där rät vinkel mellan bruksfront och flödesriktning på vattnet bildas.

Materialmodellen för färskt cementbruk behöver dock utvecklas ytterligare för att lyckas koppla bruket rheologiska skjuvgräns med kohesion mellan partiklar och styrketillväxten pga härdning (CSH-gel). Att cementpartiklarna har en kohesion samt en gelbildning kan tolkas i skillnaden mellan statiskt och dynamisk viskositet. Den statiska viskositeten är högre än den dynamiska. Vid rheologiska mätningar av färskt

injekteringsbruk mäts oftast den dynamiska viskositeten och samtidigt utvärderas även den (dynamiska) skjuvgränsen (Figur 4-3) vilken också är utförligt beskriven i Håkansson, (1993).



Figur 4-3 Illustration av statisk och dynamisk skjuvgräns
Figure 4-3 Illustration of static and dynamic shear stress

Den statiska skjuvgränsen är den kraft som behövs för att skjuva materialet från stillastående till rörelse medan dynamisk är den kraft som behövs för att hålla materialet i rörelse. Den statiska skjuvgränsen bör innehålla två fysikaliska komponenter; kohesion och härdningskrafter.

Innebörden av erosion pga piping eller kohesion blir den samma, att skjuvspänningen från vattnet är större än materialets skjuvhållfasthet.

Vid injektering finns det tre lägen som är extra viktiga, se också Tabell 4-1.

- 1) vid påbörjan av injektering. Om vattnet är strömmande måste ett resolut tryck appliceras. Detta möjliggör uppströms inträngning. Detta har visats tidigare av bland annat /Andersson, 1998/ och /Axelsson, 2009/.
- 2) Under injektering. När bruksflödet börjar avta och närma sig slutet på injekteringen. Den främre delen av bruksfronten har en låg tryckgradient. Om denna är lägre än den motstående hydrauliska gradienten får vi en bruksfront med fingering. Den delen som har utsatts för fingering tolkas som en utspädd del av bruksplymen vilken inte kan ta upp någon skjuvspänning, alltså inte motstå erosionskrafter från vattnet. Den del som inte är påverkad skall då motstå vattnets skjuvkraft för att förhindra erosion (piping och/eller kohesion).
- 3) Vid avslut av injekteringen skall längden av den icke påverkade injekteringsplymen vara tillräckligt stor för att motstå vattnets skjuvkraft. Det samma gäller för borrhålet där manschett kan tas bort först när bruket över borrhålslängden nått en viss skjuvhållfasthet.

Tabell 4-1 Summering av designparametrar för injekteringen med hänsyn till hydrauliks gradient och erosion.

Table 4-1 Summary of design parameters for grouting with respect to hydraulic gradient and erosion.

Läge/fråga	Process	Parameter	Åtgärd	Styrs och Kontrolleras hur
Under injektering	Fingering, uppströms inträngning	A) Hydraulisk gradient vs brukets gradient	Resolut injektering,	Förutbestämd förfarande, Kontroll av högt injekteringsflöde
Nära avslut av injektering	Utspädd front/fingering. Erosion	B) Gradient	Injekteringstiden Design med hänsyn tagen till kortare inträngningslängd	Kontroll injekteringstid och flöde.
Direkt efter injektering	Erosion, gradient	C) Acceptabelt Skjuvhållfasthet	Injekteringstid, injekterings-tryck Temperatur	Förutbestämd förfarande,

- A) Fingering. Inträngningen påverkas av den hydrauliska gradienten på sådant sätt att nedströms blir det pådrivande trycket = övertrycket plus gradienten, nedströms = övertrycket minus gradienten. Alltså kortare inträngning uppströms än nedströms.

Innebörden är att inträngningen stannar då injekteringsplymens gradient är lika eller mindre än den hydrauliska gradienten uppströms. Detta inträffar då injekteringsflödet blir för lågt, enligt ekvationen

$$\frac{12 * \mu_{grout} * q_{grout}}{b^3 * \rho_{grout} * g} > \frac{12 * \mu_w * q_w}{b^3 * \rho_w * g} \quad (4-1)$$

Injekteringsplymen får en utspädd front motsvarande den del som har lägre gradient än det motstående vattnets hydrauliska gradient.

- B) Nära avslut av injekteringen. Att förhindra erosion skall injekteringsplymens längd motstå vattnets skjuvkraft enligt:

$$\tau \geq \frac{\rho_w g b}{2} \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (4-2)$$

Där L är diametern av den opåverkade injekteringsplymen för radiellt flöde eller längden uppströms och nedströms för kanalflöde. Att beräkna den opåverkade delen av injekteringsplymen kan göras via flödesekvationen där inträngningen beräknas utifrån flödet.

Den radiella inträngningen uppströms, I_{2D} bör kompenseras för kortare inträngningslängd och leder till uttrycket $I_{grad,2D}$.

Från laborationstesterna bildas den eventuella eroderande kanal genom hela bruksplymen. Den del som inte är påverkad av utspädning och fingering kan mobilisera skjuvspänningar vilket innebär att hela den opåverkade bruksplymens längd skall beaktas, $2 \times I_{grad,2D}$.

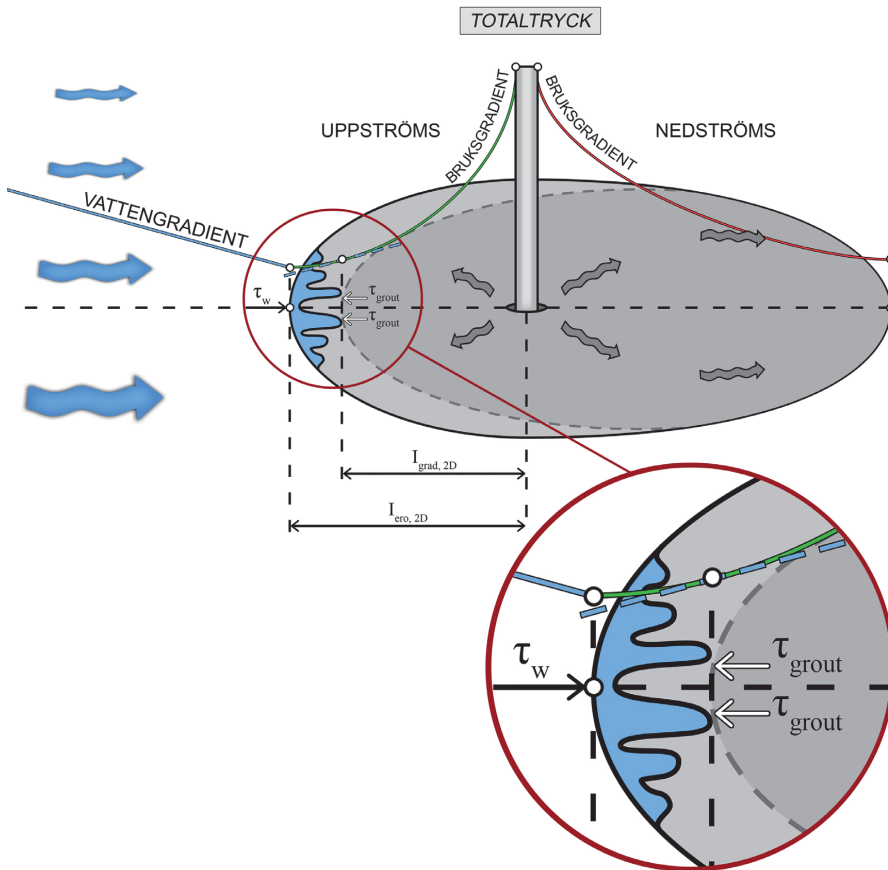
Slutligen blir den radiella inträngningslängden, $I_{ero,2D}$ som skall motstå vattnets erosionskraft,

$$I_{ero, 2D} = 2 \times I_{grad,2D} - L_{fingering}. \quad (4-3)$$

Desto större hydrauliska gradient desto större del av injekteringsplymen blir påverkad av fingering.

Resonemanget kring om samtliga sprickor in till borrhålet inte blir tätade, eller om manschetten läcker betyder det att det finns ett flöde in mot borrhålet. Innebörden av detta är att den hydrauliska gradienten blir dubbelt så stor jämfört med ett "tätt" borrhål och för att motstå erosion måste inträngningslängden blir längre. Om sprickor med liten sprickvidd inte blir tätade finns det således ett flöde mot borrhålet. En dimensioneringsprincip blir således att den största sprickvidden som inte blir tätad utgör den största kvarvarande kraft som verkar på injekteringsmedlet. Det blir således denna kraft som dimensionerar när injekteringsstryck kan släppas och manschett tas bort, alltså läget "efter injektering"

Inträngningslängden blir dels kortare pga att vi injekterar uppströms samtidigt som att gradienten gör att fronten blir utspädd via fingering. Den inträngning som då skall hålla emot piping/"bakåtlöde" är således kortare än enbart den del som är påverkad av gradient. Den radiella inträngningslängden uppströms, $I_{grad,2D}$ blir kortare ty hydrauliska gradienten vilket skall beaktas. En konceptuell figur som försöker beskriva detta visas i Figur (4-4).



Figur 4-4. Konceptuell bild över hur fingering påverkar inträngningslängd.

Figure 4-4 Figure showing the concepts of fingering affects the penetration length

C) Efter injektering och erosionsstabilitet under längre tid.
 Brukets skjuvhållfasthet, τ_{grout} , skall vara större än vattnets skjuvkrafter, enligt

$$\tau_{grout} \geq \frac{\rho_w g b}{2} \times \frac{\Delta h}{L} \quad (4-4)$$

Där Δh tryckskillnaden över den injekterade längden, L , dvs längden från borrhållsvägg till ostörd bruksfront, i sprickvidden, b .

Av detta uttryck och med den principiella förståelsen att skjuvkrafter ger upphov till skjuvspänningar i materialet. Om skjuvspänningarna överstiger materialets hållfasthet sker erosion, antingen via ett skjuvbrott genom hela materialet eller via en kanal som är beskriven ovan.

Som ett typexempel kan ett borrhål och injekterad spricka användas som exempel. Borrhålet injekteras och efter en viss tid plockas manschetterna bort. Vid detta läge skall hela den injekterade längden från borrhålsvägg till ostörd bruksfront samt borrhålets längd där sprickan korsar borrhålet balansera vattenkraften. Vattentrycket i sprickan är konstant och det enda som minskar kraften från vattnet är den injekterade längden (ty $\Delta h/L$ minskar). Vid samma vattentryck och injekterad längd samt att borrhålet rensas ur så minskar den injekterade längden och vattenkraften på bruket i sprickan ökar.

Dimensionerande kraft blir den minsta sprickvidden som inte blir tätad vid aktuell hydraulisk gradient. Låt oss säga att vi har en efterinjekteringssituation där den hydrauliska gradienten är bedömd till 20. Vi använder ett cementbruk där den minsta hydrauliska sprickvidden som bruket kan tränga in i är 90 μm . Den dimensionerande skjuvkraften blir då knappt 9 Pa. Hållfastheten på bruket vid precis efter avslut av injekteringen skall då upprätthålla en skjuvkraft på minst 9 Pa när injekteringstrycket upphör.

Kan inträngningslängd och brukets hållfasthet dimensioneras så att vattenkraften balanseras av den injekterade längden i sprickan betyder det att borrhålpluggen inte fyller någon tätande förmåga av borrhålet. Ett exempel på storlekar på skjuvkrafter från vattnet för olika grundvattentryck och inträngningslängder visas i Tabell 4-2

Tabell 4-2 Skjuvspänningen från vattnet som verkar på injekteringsplymen beroende av inträngningslängd och grundvattentrycket för en sprickvidd på 110 μm .

Table 4-2 Shear stress from water acting on the grouting plyme depending on the penetration length and the groundwater pressure for a fracture aperture of 110 μm

<i>I</i>	<i>h_w</i>			
	<i>20 m</i>	<i>50 m</i>	<i>100 m</i>	<i>200 m</i>
2 m	0,5 Pa	1,3 Pa	0,3 Pa	5 Pa
5 m	0,2 Pa	0,5 Pa	0,1 Pa	2 Pa
10 m	0,1 Pa	0,3 Pa	0,5 Pa	1 Pa

Tabellen visar att en inträngningslängd på exempelvis 5 m i en sprickvidd på 110 μm med ett grundvattentryck på 50 m verkar vattnet med en skjuvkraft på 0,5 Pa på injekteringsmaterialet. Detta innebär att bruket skall ha en skjuvhållfasthet högre än 0,5 Pa vis avslut av injekteringen. Nedanstående tabell visar viken skjuvspänning bruket måste ha för att stanna kvar i borrhålet vid olika grundvattentryck (Tabell 4-3).

Tabell 4-3 Skjuvkraften från vattnet som verkar på borrhålspluggen beroende av längd på borrhål med en borrhålsradie på 0,028 mm och grundvattentrycket.

Table 4-3 Shear stress from water that acts on the borehole plug depending on the length of the borehole and the groundwater pressure.

<i>L</i>	<i>h_w</i>			
	<i>20 m</i>	<i>50 m</i>	<i>100 m</i>	<i>200 m</i>
5 m	500 Pa	1400 Pa	2700 Pa	5500 Pa
10 m	300 Pa	700 Pa	1400 Pa	2700 Pa
20 m	100 Pa	300 Pa	700 Pa	1400 Pa

För ett normal långt borrhål på 20 m, en borrhålsradie på 0,028 m och ett grundvattentryck på 50 m måste skjuvhållfastheten i bruket uppnått 300 Pa för att inte tryckas ut. Krafterna som verkar är större på borrhålen ty arean som kraften verkar på är större. Detta gäller då grundvattentrycket verkar direkt på borrhålet, alltså ingen inträngning har erhållits.

Speciell hänsyn till "täta" borrhål

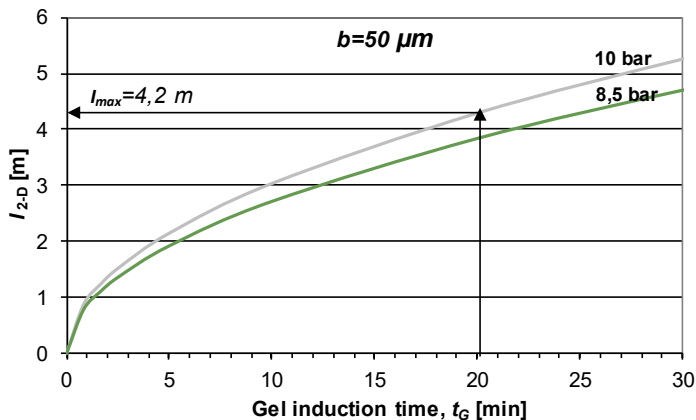
I borrhål som är täta, naturliga inflödet till borrhålet är litet, bildas en luftkudde när injektering utförs i uppåt lutande borrhål. Om den flödande sprickan finns i början av borrhålet stängs luftkudden in och trycket i borrhålet kommer sakta att klinga av. Luftkuddens volym är direkt proportionell mot borrhålsvolymen och injekteringstrycket. Om exempelvis injekteringstrycket är 10 bar så komprimeras luftkudden 10 ggr jämfört med sin ursprungliga volym. Ett helt tätt borrhål på 25 m längd får luftkudden en längd på 2,5 m längst in i borrhålet med ett tryck motsvarande injekteringstrycket.

Fältobservation av borrhålspluggning och injektering

I juni 2017 borrades två långa kärnborrhål (76 mm i diameter), ca 66 m vardera, i en tunnel i Göteborg. Borrningen gjordes från tunneln till ytan i en svag lutning. Inflödesmätning under borrning och efter borrning samt kärnkartering visade på ett största flöde på ca 0,08 l/min på avståndet 13-16 m från borrhålsstart. Det fanns mindre flöden längs kärnan men var under mätgräns. Grundvattentrycket antogs vara 15 m vilket ger med "cubic law" en hydraulisk sprickvidd på ca 50 µm.

En injekteringsdesign gjordes: Silica sol med en geltid på 1 timme samt ett injekteringsövertryck på 10 bar och en injekteringstid vid fullt tryck på 1 timme (tills geltid). Borrhålen uppvisade samband vid borrning och borrhålen skulle injekteras samtidigt. Sektionslängderna som injekterades var totalt ca 75 m (fokus var över den sektion som läckte 0,08 l/min i kärnborrhål nr 2) vilket ger en borrhålsvolym på ca 330 liter. Injekteringen följde design och gav en total injekterad volym på 354 liter. Med en

slangvolym och manschettvolym på ca 10 liter ger detta en volym på ca 10-15 liter i sprickorna. Med beräkningen av inträngningslängd enligt Funehag, (2012) ger detta en radiell inträngningslängd i 50 μm sprickan på ca 4,2 m (gelinduktionstiden satt till 20 min) (Figur 4-5).



Figur 4-5 Inträngningslängden 4,2 m i sprickvidden 50 μm . Injekteringsövertrycket var 10 bar och gelinduktionstiden 20 min för en timmes geltid på silica solen.

Figure 4-5 Penetration length 4,2 m in the hydraulic fracture aperture of 50 μm . The grouting over pressure was 10 bar with gelinduction time of 20 min of the silica sol.

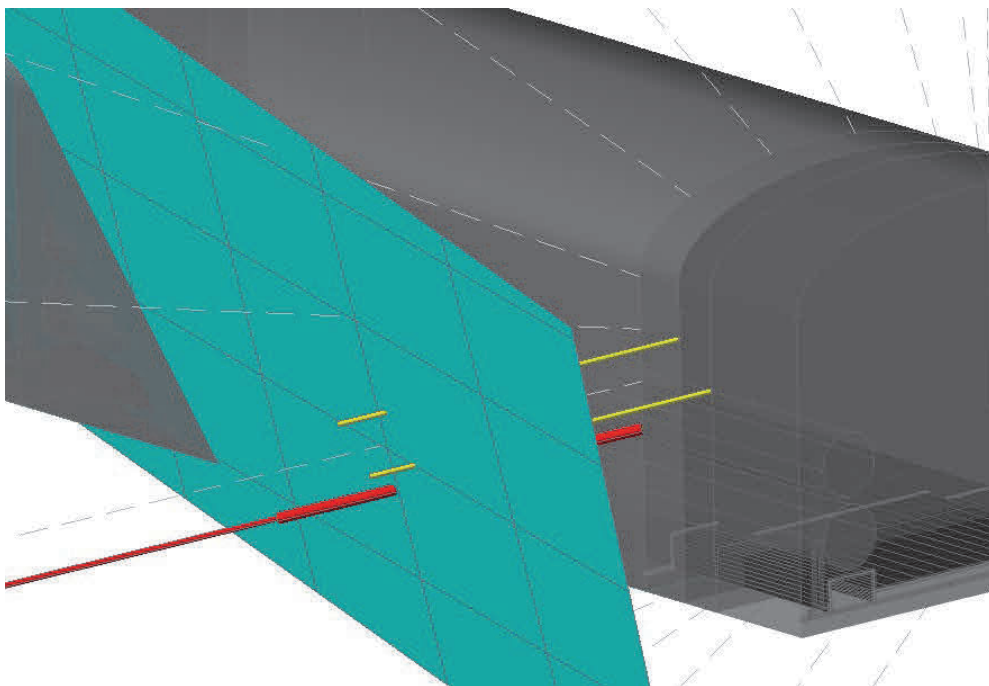
Manchetten togs bort 3 timmar efter injektering. Inget synligt läckage kunde noteras samt en fullt utbildad injekteringsplugg. En stor del av borrhålet rensades med hjälp av högtryckstvätt och ”iller”. Efter en dag noterades fortfarande att borrhålet var torrt, maximalt 1 droppe per minut. 5 m av borrhålet från borrhålsstart injekterades ej.

Med ett grundvattentryck på 15 m och en inträngningslängd på 4,2 m verkar tryckgradienten, $15/4,2=3,5$ m/m över sprickans injekterade längd. Beräknad skjuvkraft från vattnet blir då 0,09 kPa enligt ovan. I den beräknade inträngningslängden ovan är den beräknad utan uppströms tryckgradient. Enligt Axelsson, (2009) kan injekteringstrycket reduceras med gradienten, dh/dx gånger tungheten för vattnet, $\rho_w g$ över längden, här 4,2 m. Det pådrivande trycket för att beräkna uppströms inträngning, $I_{grad, 2D}$ blir då 8,5 bar (0,85 MPa). Detta ger $I_{grad, 2D}=3,8$ m. Detta skulle innebära att den del som är påverkad av fingering är en front på enbart ca 0,4 m (4,2 m-3,8 m).

Borrhålet var tätt och skjuvhållfastheten i silica solen i sprickan måste då vara större än 0,09 kPa vilket härletts tidigare avsnitt gällande skjuvhållfastheten vid geltid.

4.1 BESTÄMNING AV HYDRAULISK GRADIENT

Nedan visas en figur över hur det tolkade flödande sprickplanet skär borrhålen i det fälttest som utfördes i projektet. Sprickplanet mynnar ut i tunnelvägg (Figur 4-6). Det längre borrhålet, markerat med röd färg är det tidigare injekterade borrhål från efterinjekteringen 2010 som överborrades. De kortare borrhål är de borrhål som borrades för att få mer kunskap kring hydraulisk gradient och utgör en central del i hur hydrauliska gradienten kan bestämmas denna rapport.



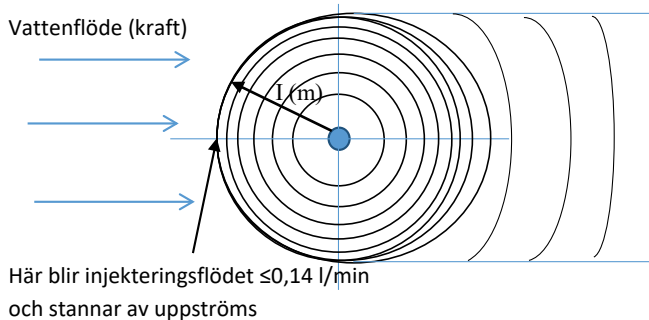
Figur 4-6 Ritning över sprickplan, det stora borrhålet (rött) samt de två borrhålen (gula) och sprickplanet (cyan).

Figure 4-6 Drawing of the fracture plane, the large grouting hole (red) and the two drilled boreholes (yellow) penetrating the fracture plane (cyan).

En konceptuell modell över hydraulisk gradient visas i Figur 4-4. Skissen visar att storleken på hydraulisk gradient är både riktighetsberoende och längdberoende. ”Vandrar” vattnet en lång väg mellan två punkter blir gradienten låg relativt en kortare väg. Potentialen, eller drivkraften är dock tryckskillnaden mellan grundvattenstrycket och atmosfärstrycket inne i tunneln. Längs med sprickan så utsätts vattnet för ett motstånd (inre friktionsmotstånd p.g.a. viskositeten samt friktion längs väggarna). Detta innebär att vattnets energi blir mindre och således kan den hydrauliska gradienten vara

0,005 Pas (alltså en femtedel av vattenflödet). Innebörden av detta är att vi måste pumpa med stort flöde tidigt då den initiala viskositeten är låg. Vid avslut av injekteringen är viskositeten för silica sol förmodligen högre än i början och som konsekvens av inträngningslängden samt förhöjd viskositet är flödet lågt och utgör inte ett bekymmer för injekteringen. Frågan är bara om inträngningslängden är tillräckligt lång för att förhindra back flow.

Flödet från injekteringen måste vara större än flödet (som en funktion av apertur och tryck) från vattnet. Detta uppnås säkerligen under tidigt skede av injekteringen men injekteringsflödet går mot noll. Detta innebär att inträngningen upphör när injekteringsflödet blir mindre än 0,14 l/min. På detta sätt är inträngningslängden i ett gradientfält kopplad till injekteringsdesignen. En förklarande bild visas i Figur 4-8.



Figur 4-8 Skiss över hur injekteringsflödet påverkas av erosionskraft från vattnet.
Figure 4-8 Sketch of how the grouting flow is affected by the erosion force from water

Som figuren visar så påverkas inträngningslängden av vattenflödet. Ju större kraft från vattnet desto kortare blir inträngningslängden uppströms. Uppströms blir inträngningslängden kortare genom att det pådrivande injekteringsstrycket minskar med tryckfallet över inträngningslängden.

B) Gradient

En bedömning av möjliga teoretiska gradienter i fält kan göras. Att beakta är att teorin antar ett isotropt material. För att ge ett spann vad gradienten kan förväntas bli så används följande värden: Grundvattentryck, $H = 50$ m, tunnelradie, $r_t = 2,5$ m. Den injekterade zonen för fälttestet identifieras till 10 m (Janson, et.al 2010). Resultaten visas i tabellen Tabell 4-4. Värdena på gradienterna visar på storleksordningen och den

visar att en injektering vid tunnelvägg, det vill säga ytligt placerad manschett, ger höga gradienter med stor risk för erosion. Utanför injekterade zonen blir gradienten avsevärt mindre.

Tabell 4-4 Uppskattning av gradienten direkt innanför tunnelvägg och direkt utanför tunnelvägg.

Table 4-4 Estimation of the hydraulic gradient directly inside the tunnel wall and directly outside the tunnel wall

Placering	dh [m]	r _t [m]	t [m]	K _{inj} /K [-]	dh/dr [-]
Direkt innanför tunnelvägg (ekvation 2-1)	50	2,5	--	--	12
Direkt utanför injekterad zon (ekvation 2-2)	50		10	0,01	0,02

Fältestet visade på att den hydrauliska gradienten i den aktuella sprickan kunde vara så hög som 60 m/m. Detta är högre än de redovisade värdena i tabellen ovan. Således måste sprickgeometrier och hur flödet sker in till borrhålet/tunneln beaktas. Det är visat i denna rapport hur en mer korrekt bedömning av hydrauliska gradienter kan göras utifrån kartering och hydrauliska tester.

För en projektering av en efterinjektering där det finns risk för höga hydrauliska gradienter är den använda metodiken fullt möjlig att utföra. Axelsson, (2009) föreslår att den dimensionslösa inträngningslängden för cementbruk ska vara större än kvoten mellan grundvattentrycket och injekteringsövertycket.

$$I_{D, 2-D} > \Delta h / \Delta p \quad (4-6)$$

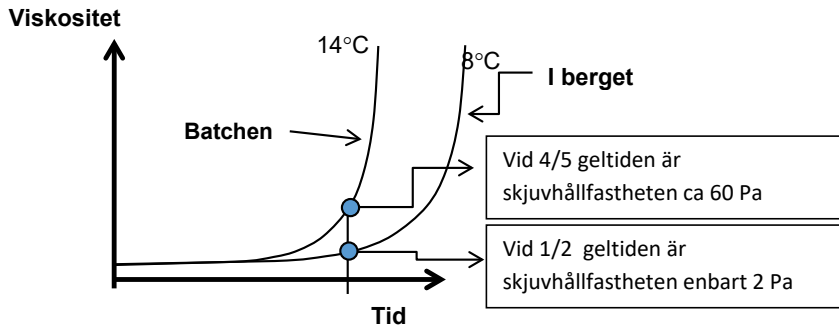
Den hållfasthet som erfordras på injekteringsmedlet när injekteringstrycket släpps dimensionerar pumptiden. Detta är visat i resultaten från injekteringen i sprickrmodellen. Vidare visar att inträngningslängderna påverkad av gradient blir mindre uppströms. Den nödvändiga längre inträngningslängden för att motstå erosion är således beaktad i ekvation (4-6), vilket skulle visas.

För *silica sol* som är beskriven som en gelande vätska och saknar skjuvgräns måste således inträngningslängden på samma sätt som för cement kompenseras för den hydrauliska gradienten. För injekteringar där inträngningslängden är en dimensionerande faktor bör inträngningslängden således justeras baserat på den verkande hydrauliska gradienten. Detta kan göras genom att öka injekteringstrycket i samma proportion som den hydrauliska gradienten.

$$\Delta P_{\text{erforderlig}} = \Delta P + dh/dx * \rho_w * g \quad (4-7)$$

Baserat på fälttestet kan följande konkluderas:

- **Den första injekteringen** är hållfastheten i batchen vid avslut av injekteringen, ca 60 Pa (vid 4/5 av geltiden). Temperaturen är i batchen ca 14 grader. I berget är den 8 grader. Som en tumregel används att vid halverad temperatur så dubbleras geltiden. Detta innebär att geltiden i berget är 8/14 längre än den i batchen (ca 1,6 gånger batchens geltid). Vid injekteringen användes en geltid på 18 min, mätt i batchen. I berget ger detta en geltid på 29 min. 18 min av 29 min är ca 0,6 av geltiden, alltså nära halva geltiden. Med den antagna tillväxten på hållfasthet för silica sol innan geltid innebär detta att hållfastheten är ungefär 20 Pa vid 0,6 av geltiden. Observationen efter injekteringen (72 timmar) var att borrhålet läckte. Här kan vi då sluta oss till att den uppnådda hållfastheten på ca 20 Pa inte räckte till att motstå vattnets kraft som var i storleksordningen 15-20 Pa, enligt tidigare avsnitt.
- **Den lyckade injekteringen** pågick till geltid samt med mer kontroll på temperatur. Trots att injekteringen gick till full geltid kunde utrustningen enkelt rengöras genom att öka trycket på pumpen och använda vatten i omröraren. Temperaturen uppgick till ca 10 grader i batchen vid avslut (två timmar) och den tolkade skjuvhållfastheten på silica solen var mer än 60 Pa. Denna injektering gav också ett tätt borrhål, varken vid öppnandet av ventil till manschett eller vid mätning 30 cm framför borrhålspluggen uppvisade några läckage.
- **Med de två injekteringar** som gjorts, en misslyckad och en lyckad kan slutsatsen att den skjuvkraft som verkade från vattnet var i storleksordningen mellan 21 till 60 Pa. Med det hydrauliska test som syftade till att mäta gradienten över sprickan indikerade en skjuvkraft från vattnet på 21 Pa. En förklaringsmodell beskrivs i Figur 4-5.



Figur 4-9 Diagram över hur temperaturen och viskositeten påverkas för silica sol. En förändring i viskositetsutveckling innebär också förändrad hållfasthet.

Figure 4-9 Diagram showing how the temperature affects the viscosity development of silica sol. A change in viscosity development means also a change of the shear strength.

5 SLUTSATSER

Det genomförda projektet har uppnått syftena och målet med att påvisa hur hydraulisk gradient kan orsaka läckande borrhål. Detta har gjorts genom ett omfattande fältarbete samt uppföljningar i laboratoriet genom injekteringar i en sprickmodell.

Projektet har vidareutvecklat en designmetodik för injektering där hydraulisk gradient är närvarande samt föreslagit åtgärder för att hur injekteringstrycket/inträngningslängd kan justeras.

Vidare har beräkningsmodellen för inträngningslängd av ett Bingham material av typen cement verifierats i sprickmodellen. Detta var en förutsättning för att kunna påvisa att inträngningslängden har betydelse för att motstå erosion.

I laborationer har den radiella inträngningslängden visats hur den blir påverkad av ett gradientfält; uppströms blir den kortare och nedströms längre. utreds i laborationsmiljö.

I detta projekt har teorierna kring erosion beskrivet i Axelsson, 2009 bekräftats ytterligare genom laborationstester och fälttester. I sprickmodellen har de olika erosionsprocesser åskådliggjorts där kanalflöde är den initierande processen för fortsatt erosion.

En fortsatt utveckling kring materialmodellen för injekteringsmaterial är nödvändigt för att förstå hur de mekaniska materialegenskaperna, såsom kohesion och statisk skjuvkraft återspeglas i de egenskaperna kopplat till flödande material.

Två olika sätt för att bringa klarhet i hydraulisk gradient och skjuvkraft från vattnet har utförts. Den första genom att mäta trycksänkningen i två hål med hydraulisk kontakt och den andra genom två injektering som avslutades vid olika tidpunkter på geltiden. Tillsammans indikerar de att skjuvkraften från vattnet i just denna spricka är mellan 20-60 Pa. Den injektering som tätade borrhålet tillslut avslutades med en hållfasthet på silica solen större än 60 Pa.

Att förstå och åtgärda läckande borrhål innebär att försöka hitta orsaken till varför inte borrhålet blir tätt. Om det tekniskt utförts rätt och injekteringsmaterialet är lämpligt kan erosion vara orsaken. Att kunna kontrollera borrhålspluggen är av stor vikt vid injekteringar i höga grundvattengradienter. Att efterinjektering innebär större hydrauliska gradienter än vid förinjektering in till tunnel är visat. Att borra kontrollhål eller kompletterande efterinjekteringshål i en efterinjekterad tunnel utgör då en ännu större risk för höga hydrauliska gradienter. Detta kan göras men än större hänsyn bör tas till förhöjda gradienter vid dimensionering.

Att kunna bestämma den hydrauliska gradienten har varit av stor vikt i detta projekt. I laborationerna har det enkelt kunna göras genom vetskap om tryck och längd. Att erhålla samma noggranna information i fält är dock svårt. I fälttestet borrades det konnekterande borrhål där tryckresponsen under en vattenförslutning kunde mätas. På detta sätt kunde den hydrauliska gradienten beräknas för just den läckande sprickan.

Det som kan slutas till efter under detta projekts genomförande är följande:

- Det är tryckgradienten över det injekterade området som utgör en skjuvkraft på injekteringsmedlet.
- Det finns ingen hydraulisk gradient såvida det inte finns ett flöde.
- Fronten på injekteringsmedlet blir påverkad av fingering beroende på olika gradienter från motstående vatten och brukets tryckgradient i fronten. Detta trots att viskositeten på injekteringsmedlen är oftast högre än vattnet.
- För injekteringsdesign bör skedet ”under injektering” beaktas att det är hela den fullgoda injekteringsplymens längd (2 ggr inträngningslängden) som skall motstå erosionskraften från vatten.
- Skedet ”efter injektering”, precis när injekteringstrycket upphör kan de kvarvarande icke tätade sprickorna utgöra den dimensionerande kraft som bruket och injekteringsprocessen skall ta hänsyn till för att inte få ett läckande borrhål.
- Vid ett läckande borrhål ökar den hydrauliska gradienten och således även vattnets eroderande kraft. Detta innebär att det är för ett läckande borrhål så är det radien av fullgoda injekteringsplymen som skall motstå vattnets eroderande kraft

Referenser

Andersson, H. 1998. Chemical rock grouting- An experimental study on polyurethane foams. Doctoral thesis, Department of Geotechnical Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Axelsson, M. 2009. Prevention of Erosion of Fresh Grout in Hard Rock. Doktorsavhandling. Ny serie. 2915. Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Funehag, J. 2005. Grouting of Hard Rock with Gelling Liquids, Field and Laboratory Studies of Silica sol. Lic 2005:1, Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden.

Funehag, J. 2007. Grouting of Fractured Rock with Silica Sol Grouting design based on penetration length. Dissertation, Doktorsavhandling. Ny serie 2560. Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden

Funehag, J. Thörn, J. (2017). Radial penetration of cementitious grout – Laboratory verification of grout spread in a fracture model. Submitted to Tunneling and underground space technology. Ref TUST_2017_57.

Funehag, J. Thörn, J. (2014). Grundläggande egenskaper för injektering och inträngnings av bruk. Bergmekanikdagen, 2014. Stiftelsen Bergteknisk Forskning, BeFo. Stockholm.

Funehag, J. (2016). Efterinjekteringen av TASS-tunneln. Design, genomförande och resultat från efterinjektering. SKB-rapport SKB R-11-09. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gustafson, G. Stille, H. 2005. Stop criteria for cement grouting. Felsbau rock and soil engineering, no 3, pp 62-68.

Gustafson, G. 2009. Hydrogeologi för bergbyggare. T2:2009. Forskningsrådet Formas.

Håkansson, U. 1993. Rheology of fresh cement-based grouts. Doctoral thesis, Royal institute of technology, Stockholm.

Livieros, F A., Nilsson, R. (2017). Shear strength and erosion susceptibility of silica sol Laboratory studies of a grouting material using mechanical tests, rheological tests and a fracture replica. Master of Science Thesis in the Master's Programme Infrastructure and Environmental Engineering. Chalmers tekniska högskola.

Janson, T., Funehag, J., Granberg, N., Jonsson, H., (2010). Underhållstätning av mediatunnel i Göteborg- design och utförande av efterinjektering. BeFo-rapport nr 105. Stiftelsen Bergteknisk Forskning, BeFo. Stockholm.

Suresh, K. Tohow, M. (2013). Grouting of a difficult borehole. Master of Science Thesis in the Master's Programme Infrastructure and Environmental Engineering. Chalmers tekniska högskola

BeFo



Box 55545
SE-102 04 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Sturegatan 11

ISSN 1104-1773