

DELRAPPORT

LÄCKANDE BORRHÅL - Hydraulisk gradient och Erosion



 **Forskningsrådet Formas**
Formas främjar framstående forskning för hållbar utveckling

Sven Tyréns Stiftelse

 **Telia** 

BeFo
STIFTELSEN BERGTENSKA FORSKNING
ROCK ENGINEERING RESEARCH FOUNDATION

RAPPORT
VÄLJ DATUM

Delrapportering av pågående forskning

Forskningsrapport

LÄCKANDE BORRHÅL - Hydraulisk gradient och Erosion

Rapport

ÅR-MÅN-DAG

Referensgrupp:

Tommy Ellison

Per Tengborg

Magnus Zetterlund

Håkan Stille

Nicklas Bockgård

Patrik Vidstrand

Hans Hargelius

Thomas Janson

Kent Lundin

Daniel Eklund

SAMMANFATTNING

Ett läckande borrhål uppdagades under en efterinjektering av en media tunnel i Göteborg. Efterinjekteringen gjordes efter då gällande designkunskap för silica sol och cement. Det läckande borrhålet försökte tätas med både silica sol och cement men utan lyckat resultat. Flödet i borrhålet mättes till 0,3 l/min. Ett forskningsprojekt startade för att försöka ta reda på varför det var så svårt att få det tätt. Under forskningsprojektet utfördes hydrauliska tester, sambandstester samt flertalet misslyckade injekteringar. Från testerna kunde projektet visa på att den otätade sprickan hade en stor hydraulisk gradient. En överborrning av tidigare injekteringshål kunde skönja en kanal längs hela borrhålspluggen som ledde fram till en vattenförande spricka.

Hypotesen för läckande borrhål är att 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 bero på att den hydrauliska gradienten var för stor för aktuell injekteringsteknik och bruksval.

Med den nyvunna kunskapen om hydraulisk gradient, läge på spricka, hydraulisk sprickvidd och tolkad skjuvkraft från vattnet kunde en sista injektering utföras med lyckat resultat (tätt borrhål).

Denna delrapport tar upp fältresultaten från det större projektet "läckande borrhål". Rapportens resultat redovisar analyser av den hydrauliska gradient och den slutgiltiga lyckade injekteringen av det läckande borrhålet. Resultaten vittnar om att kunskap om hydraulisk gradient vid efterinjektering är ytterst viktigt och kan ha betydelse vid en förinjektering.

För att utöka förståelsen kring hydraulisk gradient och hur det påverka injekteringen har fortsatta studier i laborationsmiljö med injekteringar i en sprickreplik. Detta ligger dock utanför denna rapportens avgränsning.

Detta delprojekt med ett läckande borrhål i en mediatunnel finansierades främst av SBUF och TeliaSonera. Delprojektet ingår i ett större projekt där hydraulisk gradient och läckande borrhål studeras vidare med både laborationstester och ytterligare fältobservationer. Det samlade forskningsprojektet finansierades av Formas, STS, TeliaSonera, BeFo och SBUF.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

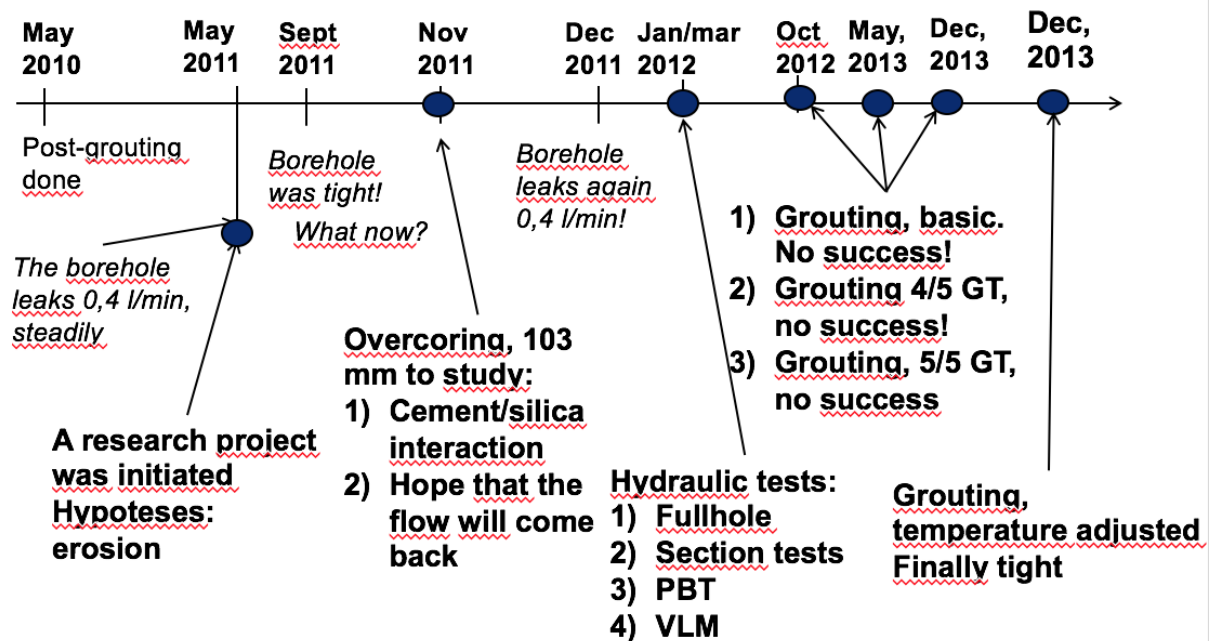
1	INLEDNING.....	5
1.1	PROJEKTET.....	6
1.2	HYPOTES	6
1.2.1	MÅLET MED DEN SLUTGILTIGA INJEKTERINGEN FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.	
1.3	RAPPORTENS STRUKTUR.....	8
1.3.1	ÖVRIGA RAPPORTERINGAR FRÅN PROJEKTET	8
2	TEORI OCH METOD	8
2.1	DESIGN BASERAT PÅ EROSION.....	8
2.1.1	SUMMERING DESIGN	10
2.2	BORRKÄRNA OCH KARTERING.....	11
2.2.1	HYDRAULISK GRADIENT I EN BERGSPRICKA	12
2.3	HYDRAULISKA TESTER.....	14
2.3.1	TIDIGARE INJEKTERINGAR.....	15
3	RESULTAT.....	16
3.1	DEN HYDRAULISKA GRADIENTEN	16
3.1.1	VATTNETS ERODERANDE KRAFT.....	17
3.2	INJEKTERINGSMEDELENS SKJUVHÅLLFASTHET	17
4	DISKUSSION OCH SLUTSATSER.....	18
4.1	SLUTLIGA INJEKTERINGEN..... FEL! BOKMÄRKET ÄR INTE DEFINIERAT.	
4.2	EROSIONSKRAFT FRÅN VATTNET OCH HÅLLFASTHET PÅ SILICA SOLEN20	
4.3	SLUTSATSKRAFT OCH FORTSATTAS STUDIER.....	20
	REFERENSER.....	21

1 INLEDNING

Kraven på täthet i tunnlar är stora idag och i många tunnlar står kvarvarande läckande borrhål för en signifikant del av inläckaget. Problemen har länge varit kända och trots stora insatser är problemen inte åtgärdade. I flera projekt där uppföljning av borrhålen varit möjligt, påvisas att det finns borrhål som läcker trots att de är injekterade. De projekt som åsyftas är efterinjekteringsprojektet i en tunnel i Äspölaboratoriet kallad TASS-tunneln. I en pågående skrivning av slutrapport visas att det är främst ett borrhål som står för det största flödet. Detta har man inte lyckats täta. Ett annat forsknings- och tättningsprojekt utfördes i en av Telias tunnlar i Göteborg (Janson et.al, 2010). Metoden var att använda efterinjektering som en underhållsåtgärd för att minska inläckaget till tunneln. Projektet uppnådde sina mål, däribland att sänka inläckaget från ca 3,8 l/min till 1,25 l/min. Resultaten är rapporterade dels i Janson, et al 2010 samt Funehag et al, 2012. Tre läckande borrhål kvarstår trots det lyckade resultatet. Olika uppsättningar av manschettplacering, bruksegenskaper samt tryck och tid testades utan att uppnå ett tätt borrhål. Borrhålen försattes med manschett och en mindre uppföljning av tryck och flöde har utförts sedan avetableringen av projektet.

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. Upptäckt av läckande borrhål berör därför främst bulthål som borrar i ett senare skede. 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 trafiktunnel 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 delrapport beskriver det som utförts för att förstå och täta det läckande borrhålet i media tunneln som efterinjekterades 2010. En övergripande skiss av olika delmoment som utförts i och runt det läckande borrhålet i tunneln visas i figur 1 nedan.



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

1.1 PROJEKTET

Detta delprojekt med ett läckande borrhål i en media tunnel finansierades av främst av SBUF och TeliaSonera. Delprojektet ingår i ett större projekt där hydraulisk gradient och läckande borrhål studeras vidare med både laborationstester och ytterligare fältobservationer. Det samlade forskningsprojektet finansierades av Formas, STS, TeliaSonera, BeFo och SBUF.

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

1.2 HYPOTES

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 pluggen.
- Tryck och tider är inte lämpliga vilket resulterar i för liten inträngningslängd.
- Borrhålsfyllnaden är inte tillräcklig.
- Manschetten läcker.

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.
- Andra vattenförande kanaler öppnas upp p.g.a. injekteringstrycket.

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 och TASS-tunneln 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 studien kan man då ”gaffla” in grundvattengradienten till en ram med 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 bero på att den hydrauliska gradienten var för stor för aktuell injekteringsteknik och bruksval.

1.2.1 VAL AV EGENSKAPER PÅ INJEKTERINGSMEDEL

De tidigare injekteringarna visar på att silica sol injekteringen inte kunde utföras med en tid längre än halva geltiden i berget (p.g.a. temperaturen). Vid avslut vid halva geltiden uppskattas skjuvhållfastheten till enbart 2 Pa (Axelsson, 2009). Erosion sågs inte som en risk trots att vi injekterade i den tätade zonen. Cementinjekteringen räckte inte heller för att täta borrhålet, 20 min injekteringstid uppskattas enbart till 3-5 Pa i skjuvgräns. Alltså, båda injekteringstyperna ger troligen för låg hållfasthet vid avslut av injekteringen.

Från kärnan kunde en läckande kanal observeras längs hela den injekterade delen i borrhålet fram till den läckande sprickan. Kanalen i cementbruket har en kraftig karbonatisering vilket tyder på att den funnits där ett tag. Karbonatiseringen kan också vara orsaken till att borrhålet blev tätt, ca 1 år efter injekteringen.

De hydrauliska mätningarna bekräftade samma hydrauliska sprickvidd som tidigare (ca 50-60 m). Läget på läckande sprickan detekterat till 2,8 m via hydrauliska mätningar. Det naturliga grundvattentrycket mättes till 3,2 bar via ett tryckuppbyggnadstest.

Den hydrauliska gradienten över den läckande sprickan, mellan det stora borrhålet och det närmaste av de mindre, är uppemot 60 m/m. Detta motsvarar ca 25 Pa i skjuvkraft över den aktuella sprickan, enligt Axelsson (2009).

Den design som testades var således att kunna avsluta injekteringen när skjuvhållfastheten i bruket är större eller lika med skjuvkraften från gradienten.

1.3 RAPPORTENS STRUKTUR

Denna delrapport tar upp fältresultaten av det större projektet ”läckande borrhål”. Rapportens resultat redovisar analyser av den hydrauliska gradient och den slutgiltiga lyckade injekteringen av det läckande borrhålet. Undre tiden mellan att efterinjekteringen gjordes i mediatunneln 2010 till december 2013 har många olika moment utförts med syfte att få reda om det finns en hydraulisk gradient eller inte, och i så fall storleken på gradienten. I Teori och metod delen beskrivs översiktligt vad som har gjorts och hur de mest centrala delarna för förståelsen tagits fram.

Den slutgiltiga lyckade injekteringen är också en del i metodiken att kunna påvisa hydraulisk gradient och erosionskraft.

1.3.1 ÖVRIGA RAPPORTERINGAR FRÅN PROJEKTET

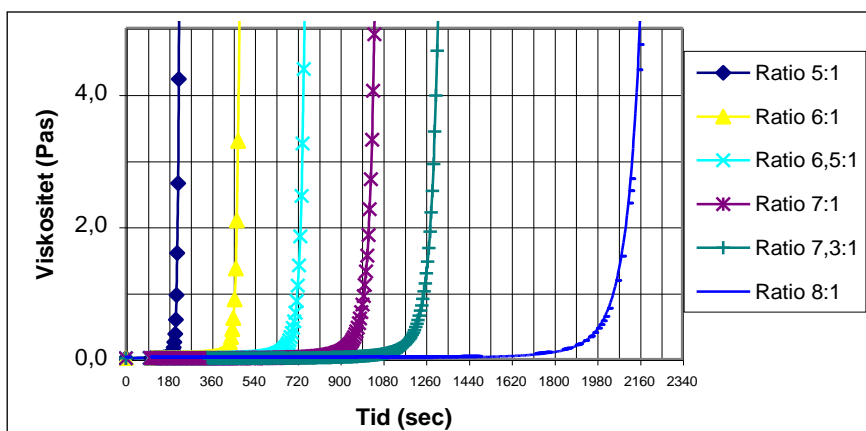
Ett examensarbete har publicerats (Suresh and Tohow, 2013) för detta projekt i mediatunneln. I denna gjordes fältundersökningar och hydrauliska tester av borrhålen för att uppskatta den hydrauliska gradienten i den aktuella sprickan. Vidare gjordes ett försök till tätning av borrhålet men det blev misslyckat. 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.

Vidare har ytterligare ett examensarbete publicerats där studier av hydraulisk gradient och erosion av en annan tunnel utförts (Reynisson, 2014). Exjobbet 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.

2 TEORI OCH METOD

2.1 DESIGN BASERAT PÅ EROSION

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 är inte mätt, utan framräknat. Forskning pågår för att mäta viskositeten vid geltid. Nedanstående diagram visar på olika viskositetstillväxter.



Figur 2. 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.

Figur 2 visar att geltiden som uppskattningsvis sker vid 6000 Pas är inte det samma som för när kurvorna börjar dra iväg snabbt i viskositet. Kopplar man inträngningslängd mot viskositetstillväxt så har den också väldigt liten betydelse på hur långt injekteringsmedlet når. Inträngningen avtar ungefär vid 1/3 av geltiden (innebär att den silica solen är i högsta grad flytande) men får ett mer definitivt slut (kraftigt inbromsande) pga att viskositeten ökar.

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 bakåtlöde (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 .

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

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

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

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,

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

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.

Inträngningslängd och andra krav på design följer den designmetodik beskriven i Funehag (2011) där en viss inträngningslängd skall uppnås i en dimensionerande sprickvidd. Från kravet på inträngningslängd erhållas designparametrarna: tryck, injekteringstid och geltid.

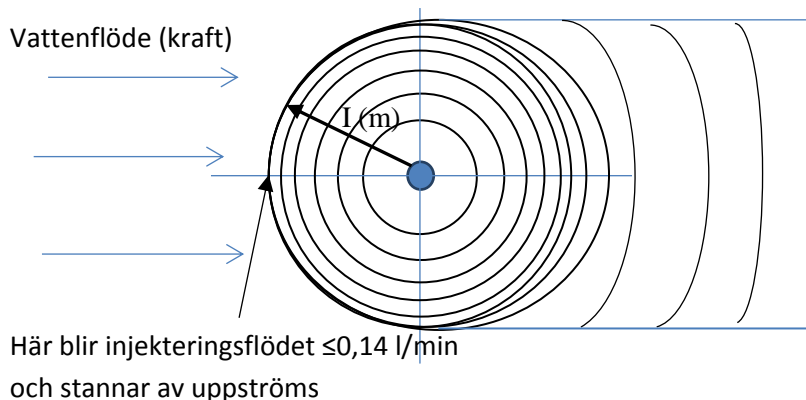
Injekteringsflödet och inträngningslängd

Injekteringsflödet måste vara av en viss storlek vid avslut av injekteringen för att inte påverkas av erosion. Exempelvis var den senaste injekteringen i läckande borrhålet i Telia satt till minimum 0,14 l/min.

$$\frac{12 * \mu_{grout} * q_{grout}}{b^3 * \rho_w * g} > \frac{12 * \mu_w * q_w}{b^3 * \rho_w * g}$$

Med en sprickvidd på ca 50 mikro meter och ett vattenflöde i sprickan på 0,7 l/min ger detta det minsta injekteringsflöde på 0,14 l/min (alltså en femtedel av vattenflödet). Innebörden av detta är att vi måste pumpa med stort flöde tidigt då den initiella viskositeten är låg. Vid avslut av injekteringen är viskositeten förmodligen mycket hög och som konsekvens 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.



Figur 3. Skiss över hur injekteringsflödet påverkas av erosionskraft från vattnet.

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.

För injekteringar där inträngningslängden är en dimensionerande faktor bör inträngningslängden således justeras baserat på hydraulisk gradient.

2.1.1 SUMMERING DESIGN

Summering av design baserat på hydraulisk gradient och erosion visas i tabellen nedan.

Tabell 1. Summering av designparametrar för injekteringen av det läckande borrhålet.

Fråga	Process	Parameter	Åtgärd	Styrs och Kontrolleras hur
Under injektering	Fingering	Injekteringsmedlet drivs framåt	Resolut injektering, kontinuerlig injektering	Förutbestämd förfarande

Avslut av injektering	Erosion	Gradient	Injekteringstiden \geq 4/5 av geltiden	Kontroll gel tid
Acceptabel hållfasthet på bruket	Erosion, gradient	Skjuvhållfasthet	Injekteringstid, injekterings-tryck Temperatur	Förutbestämd förfarande, kyld batch
Tillräcklig inträngning	Injekterings-flöde	Inträngnings-längd, Dimensionerande sprickvidd	Kontroll av 2-D flöde	Via design

Injekteringsflödet är en ny parameter i injekteringssammanhang. Huruvida detta kan utgöra en designparameter är dock oklart ännu. Injektering med kolvpumpar betyder oftast att tryck och flöde blir resolut, trycket hålls konstant högt och flödet succesivt minskar för att balansera pådrivande tryck mot uppbyggda friktionskrafter i injekteringsmedlet och mothållande vattentryck. Detta innebär att låga injekteringsflöden där viskositeten för gelände vätskor ökar inte är ett bekymmer ur erosions synpunkt. För cementbruk med långsam härdning och höga vct kan en för tidigt avslut av injekteringen utgöra en erosionsrisk. Det är dock inte bara förhållandet mellan viskositeten för ett Bingham bruk som utgör gränstillståndet utan en positiv bidragande effekt är tillväxten Binghampluggen. Med ett högt injekteringsflöde förhindrar vi således fingering i initialskedet.

Bakåttflöde uppstår då partiklar från bruket följer med vattenströmmen. Detta kan uppträda då kohesionen mellan bruket och sprickväggarna blir mindre än det pådrivande injekteringsstrycket. För att inte få erosion (piping som första process) måste inträngningslängden vara tillräckligt lång; balansera pådrivande och mothållande kraft.

2.2 BORRKÄRNA OCH KARTERING

Det läckande borrhålet överborrades nov 2011 för att hitta var läckaget finns längs borrhålet samt återfinna de använda injekteringsmedlen (cement och silica sol), se Figur 4 och 5. 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 4. 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 vilket gör att flödet har kunnat mätas. Kanalen har dock kalcitutfällningar och i vissa delar av kärnan i omfattande mängd.

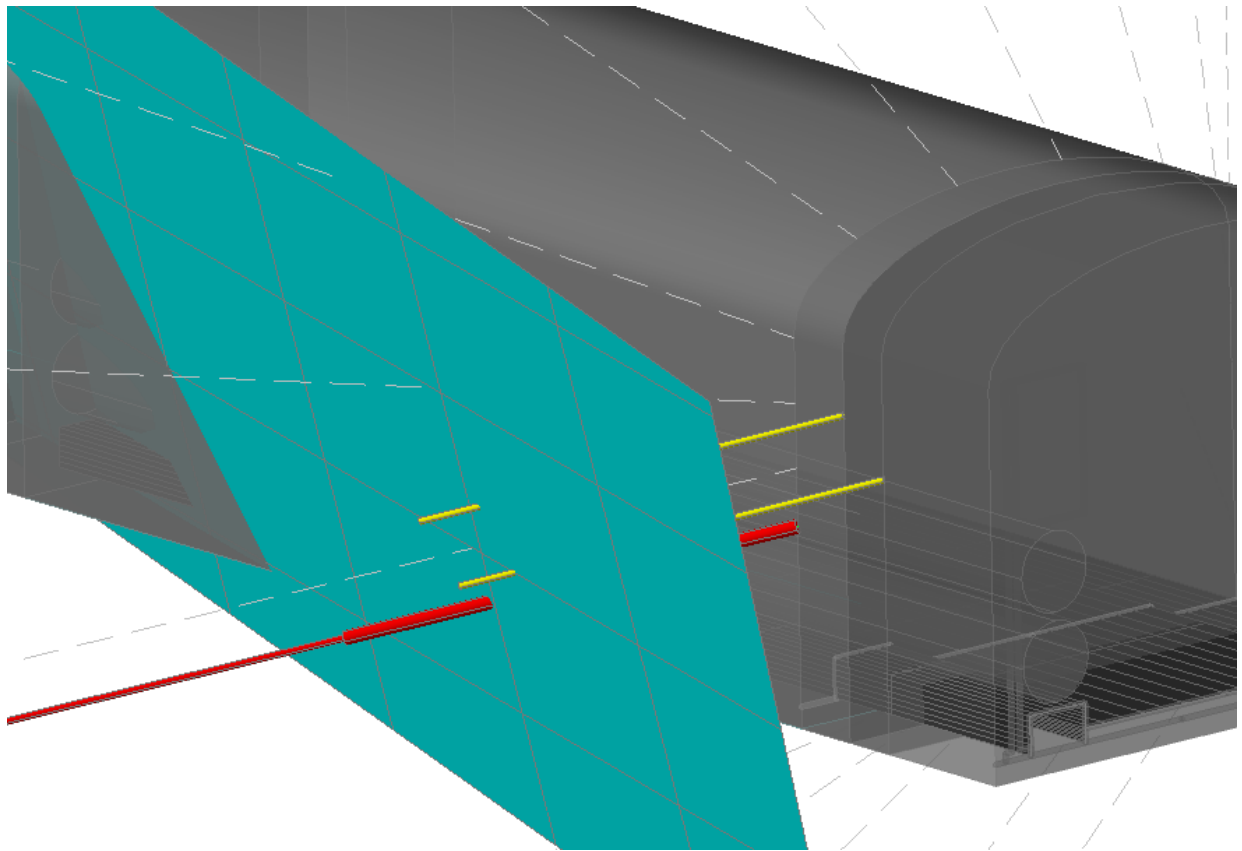


Figur 4. Vänster, injekteringspluggen med kanal som slutar. Höger, ihop pusslad borrhärna som visar sprickan som er upphov till kanalen i injekteringspluggen.

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

2.2.1 HYDRAULISK GRADIENT I EN BERGSPRICKA

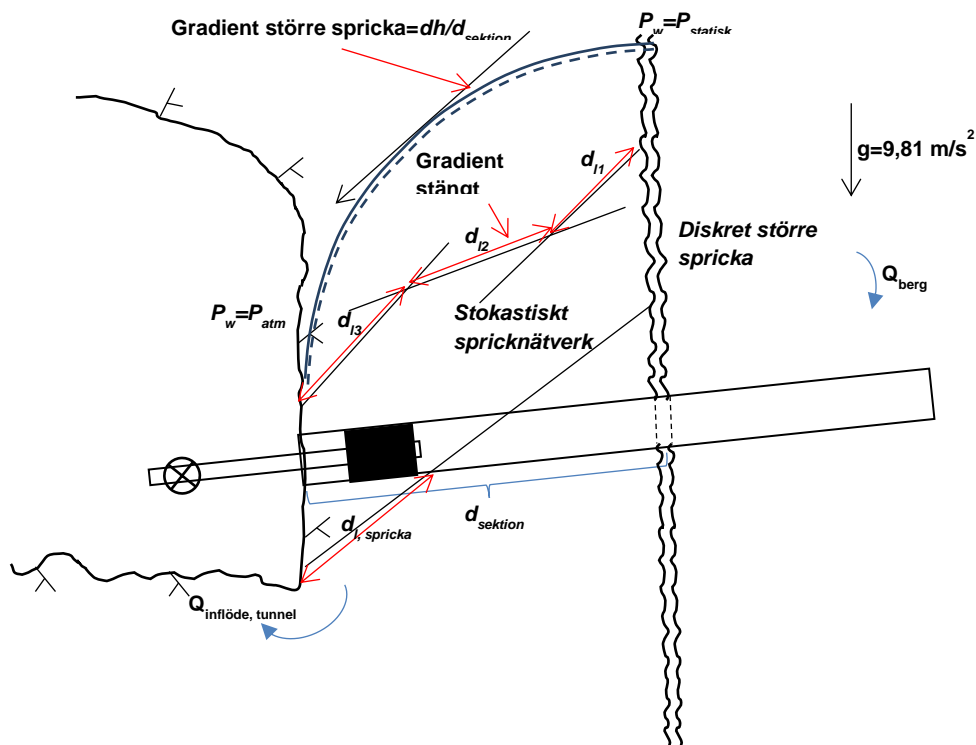
Nedan visas en figur över hur det flödande sprickplanet skär borrhålen och mynnar ut i tunnelvägg (Figur 6). Det längre borrhålet, markerat med röd färg är det tidigare injekterade borrhål från efterinjekteringen 2010 som överborrades. De kortare borrhål är de borrhål som borrades för att få mer kunskap kring hydraulisk gradient och utgör de centrala delarna i denna delrapport.



Figur 6. Ritning över sprickplan, det stora borrhålet (rött) samt de två nyborrade borrhålen (gula) samt sprickplanet (cyan). Sektion tunnel=V3+025

En Konceptuell modell över hydraulisk gradient visas i Figur 7 nedan. Skissen visar att storleken på hydraulisk gradient är både riktningberoende och längdberoende. "Vandrar" vattnet en lång väg mellan två punkter blir gradienten låg relativt en kortare väg. Potentialen, eller drivkraften är dock tryckskillnaden mellan grundvattentrycket 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 ett mått på energiförlusterna över en viss sträcka. Ju större förlust desto större är gradienten.

Som den nyfikne läsaren förstår så kan man inte mäta den hydrauliska gradienten. Det som kan göras är att mäta trycksänkningen över en viss längd. Längden blir dock oviss om inte information kan erhållas om geometrierna.



Figur 7. Konceptuell skiss över hydrauliska gradienten i en spricka i berg som mynnar ut i en tunnel.

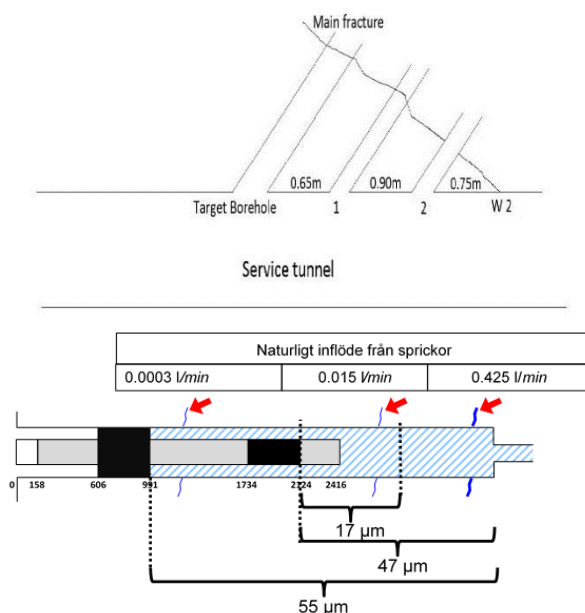
Enligt Darcy's lag så är den hydrauliska gradienten (även här kallad tryckgradient), $-dh/dL$ beroende av flödet, Q och den hydrauliska konduktiviteten, K för ett visst tvärsnitt, A , enligt

$$Q = -KA \frac{dh}{dL}$$

Som synes så är den hydrauliska gradienten dimensionslös (m/m). För generella beräkningar av hydrauliska gradienter till en tunnel hänvisas till Funehag och Emmelin 2011.

2.3 HYDRAULISKA TESTER

En skiss sett som en vy ovanifrån över de borrhål som borrades i väggen genom det förmodade flödande sprickplanet visas i figur 8 nedan.



Figur 8. Övre bild, skiss över borrhålen av särskilt intresse för mätning av den hydrauliska gradienten. Det större överborrade borrhålet (Target borehole) injekterades sedan. Nedre bild, tolkning av spricklågen och flöden från de hydrauliska testerna i det överborrade borrhålet.

Längs hela borrhålet utfördes sektionsvisa mätningar av både vattenförlust och naturligt inflöde. Resultaten åskådliggörs i figur 8, ovan och summeras i tabell nedan.

Tabell 2. Resultat av hydrauliska tester i "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-spricklåge-inflöde. Slutsatsen som kan dras 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.

2.3.1 TIDIGARE INJEKTERINGAR

Nedan redovisas i korthet vilka injekteringar som gjorts i det enskilda läckande borrhålet.

Ordinarie efterinjektering, 2010

- Inflöde innan inj=0,8 l/min,
- VFL= 0,8 l/min vid 3 bar ÖT
- Injektering med silica sol=50 lit/25bar/Geltid=20min/manschett instucken 1,5m. "Noterat: ytläckage men fullt tryck på injekteringspump samt att injekteirngsflödet sakta avtog. Samband med hål 12 och vänster i vägg."
- Kontroll hålet placerat mellan 12 och 13 var "tätt"
- Det injekterade borrhål noterades att läcka

- Borrhålet rensades ur och injekterades med silica sol från botten till 3m, sedan 3 m till 1,5 m med en snabbare geltid.
- Läckage noterat i borrhålet
- Rensning av borrhålet, 1,5-3 m. Injektering med Cement
- Läckage igen,
- Sätter en cementplugg av styvt bruk den yttersta metern samt en manschett för att mäta flöde
- Mätning i manschett; tryck och flöde=4 bar respektive 0,4 l/min.

Injektering läckande borrhål med silica sol, första gången

- Inflöde 0,4 l/min, sprickvidd 55 μm
- Grundläggande injekteringsdesign: Geltid 18 min, pumptid $\frac{3}{4}$ av geltid=14 min, förväntad skjuvhållfasthet 10 Pa, beräknad hydraulisk gradient=10 m/m
- Injekteringsvolym, 50 liter, pumptid och tryck kunde hållas
- Läckage noterat, 0,3 l/min.

Injektering med silica sol, andra gången

- Inflöde 0,3 l/min, sprickvidd 84 μm från helhålmätning
- Injekteringsdesign med hänsyn till högre gradient, Geltid=15 min, injekteringstid 4/5 av geltiden=11 minuter, övertryck 10 bar.
- Injekteringen gick enligt förväntan. Injekterad volym ca 25 liter. Flödet sjönk efter 4-5 minuters injektering. Geltiden i batchen blev 16 minuter. Flera ytläckage kunde noteras vilket tyder på radiellt flöde.
- Efter 72 timmar härdning öppnades manschett
- Läckage mättes till 0,5 l/min.

Injektering med silica sol, tredje gången

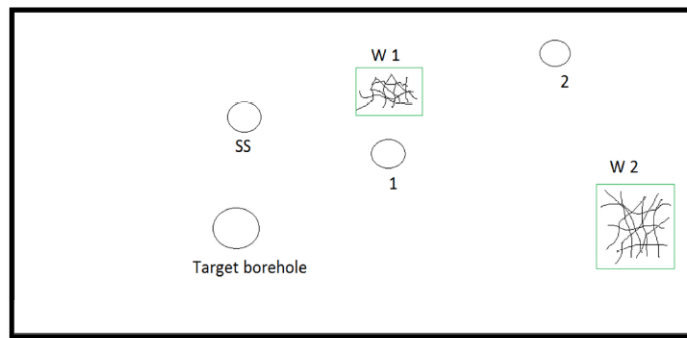
- Inflöde 0,3 l/min, sprickvidd 55 μm som sektionsmätning
- Injekteringsdesign med hänsyn till högre gradient, som tidigare med 10 bars övertryck men med en injekteringstid på 5/5 av geltiden=40 min. Här valdes en lång gel tid som en möjlig förändring från tidigare design.
- Injekteringen gick enligt förväntan.
- Efter 72 timmar härdning öppnades manschett
- Återigen, läckaget mättes till 0,5 l/min.

Samtliga injekteringar har misslyckats med att täta borrhålet. Detta gäller såväl med cement som med silica sol. Injekteringsmedlena som användes hade en rad olika egenskaper; lång inträngningslängd, stabila bruk, styva bruk med hög skjuvgräns, snabba och långa geltider. Trycken har varit under jacking tryck men samtidigt tillräckligt höga för att nå en god inträngningslängd. För silica solen var injekteringstiderna motsvarande mellan halva geltiden till hela geltiden. Inget av injekteringsmedlena eller hur det injekterats var lyckat.

3 RESULTAT

3.1 DEN HYDRAULISKA GRADIENTEN

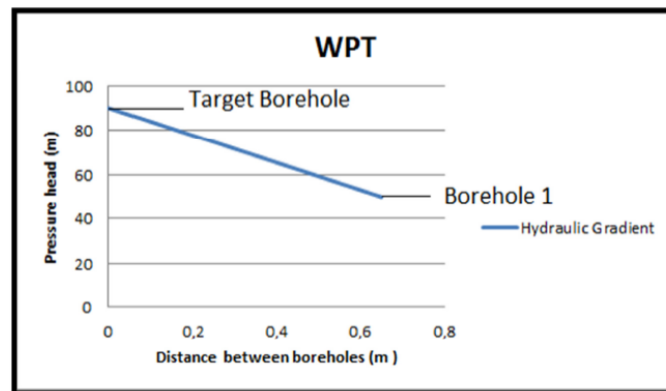
Radiellt flöde kunde konstateras i och med injekteringen som tidigare var utförd. En skiss över de noterade sambanden och ytläckagen visas i figuren nedan.



Figur 9. Skiss över vägg i tunneln. När det borrhålet (target borehole) injekterades observerades det på fyra platser ett samband.

Under injekteringen av borrhålet kunde samband noteras i borrhålen 1 och 2 samt i vägg uppvisade ytläckage. 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.

De *hydrauliska* testerna utfördes som ett konnektionstest. Ett borrhål (target borehole) injicerades med vatten under kontant tryck, 90 m, medan tryckresponsen 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 10 nedan.



Figur 10. Uppmätt tryckfall mellan target borehole och borrhål nr 1.

3.1.1 VATTNETS ERODERANDE KRAFT

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.

3.2 INJEKTERINGSMEDLENS SKJUVHÅLLFASTHET

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 arbete pågår med där de rheologiska egenskaperna samt skjuvhållfasthet kan mätas med en oscillerande uppsättning i rheologi apparaten. De inledande testerna är lovande men fler behöver göras för att säkerställa skjuvhållfastheten.

Från serien med fallkonstester utrönar 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 huruvida tillväxten i hållfasthet är linjär.

4 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

Den 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 en att skjuvkraften från vattnet var ca 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 kommande injekteringen syftade till att säkerställa radiellt flöde samt rätt temperatur på silica solen.

4.1 SLUTLIG INJEKTERING

Den slutliga 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 temperatur halverar är temperaturkänslig (Funehag 2007). Gelnigen kan enkelt beskrivas som en dubblerad gel tiden. Blandningsförhållandet var 100 liter silica sol och 20 liter saltlösning. Temperaturen 8-9 grader.

Designen var en gel tid 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 vakuum och både vatten och luft avlägsnades.

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

Tabell 3. Noteringar under pågående injektering.

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 injekteringstrycket nåddes efter ca 3 minuter. Flödet noterades inte. 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. 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. Efter 122 minuter (ca 2 timmar) har det senast tagna kopprovet gelat och manschetten stängs och pumpningen avslutades. 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.

4.2 EROSIONSKRAFT FRÅN VATTNET KOPPLAT TILL HÅLLFASTHET PÅ SILICA SOLEN

Injekteringarna med silica sol används som ett modellmaterial för att påvisa erosionskraften från vatten. Samtliga injekteringar har gjorts med olika geltider och injekteringstider. Vid avslut av injekteringen så stängs manschett och den kraft som då skall hålla mot vattnets kraft är då skjuvhållfastheten i silica solen. Olika tider innebär olika storlekar på skjuvhållfasthet. Det kompliceras ytterligare i och med att silica solen är temperaturkänslig.

Den första injekteringen i december 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 dubblas 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 21 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 21 Pa inte räckte till att motstå vattnets kraft som var i storleksordningen 15-20 Pa.

Den lyckade injekteringen pågick till gel tid 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.

4.3 SLUTSATS OCH FORTSATTA STUDIER

De två olika sätten att bringa klarhet i hydraulisk gradient och skjuvkraft från vattnet har utförts från två olika håll. Den första genom att mäta trycksänkningen i två hål med hydraulisk kontakt och den andra genom två injekteringar 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.

Sprickor som mynnar i tunnelvägg eller -stuff har sannolikt en större hydraulisk gradient än vad som normalt råder runt en tunnel. Att efterinjektering innebär större hydrauliska gradienter än vid förinjektering in till tunnel är förklarat och beskrivet i Axelsson, 2009. Innebörden är att pga att en tätad zon har erhållits runt tunnel vid förinjekteringen så är det rådande grundvattentrycket högre närmare tunneln. Trycket skall då minska på en kortare sträcka (över den tätade zonen) vilket resulterar i stora hydrauliska gradienter.

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. Kunskap har erhållits om hur gradienten kan bedömas och vilken storleksordning av denna som förväntas.

Att finna skjuvhållfastheten på silica sol vid gel tid är av stor vikt. Detta kan ge en snävare ram kring vilka krafter från vattnet som uppträdde under injekteringen. En första metodbeskrivning finns snart publicerad i ett examensarbete vid Chalmers tekniska högskola (Nilsson och Livieros 2016, in prep).

Krafterna från vattnet påverkar inträngningslängden. Att visa att inträngningslängden går beräkna är av vikt både för cement och silica sol är under arbete. Hur inträngningslängden blir påverkad i ett gradientfält utreds i laborationsmiljö. Vidare görs jobb med att beskriva hur själva erosionen sker och vilken process som initierar erosion.

REFERENSER

Axelsson, M. (2009). Prevention of erosion of fresh grout in hard rock. Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola. Ny serie, 2915. Institutionen för bygg- och miljöteknik. Geologi och geoteknik. Chalmers tekniska högskola.

Funehag, J. Emmelin, A. (2011). Injektering av Tass-tunneln, design genomförande och resultat från förinjekteringen. Bilaga 1 av Gunnar Gustafson. Svensk Kärnbränslehantering AB. R-10-39.

Funehag, 2011.Handledning för injektering med silica sol- för tätning i hårt berg. BeFo rapport nr 118. ISSN 1104 – 1773. Stiftelsen Bergteknisk Forskning, Stockholm, 2012.

Funehag, J, 2007. Grouting of Fractured Rock with Silica Sol Grouting design based on penetration length. Dissertation, Doktorsavhandling. Ny serie 2560. Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola.

Nilsson, R. Livieros, F A. (2016). 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.

Reynisson, R Ö. (2014). Erosion of Silica sol in post-grouted tunnel at great depth. Master of Science Thesis in the Master's Programme Infrastructure and Environmental Engineering. Chalmers tekniska högskola

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