

CHALMERS



Design och uppföljning av injektering i berg

En fältstudie av dropptätning i två större järnvägstunnlar

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

PETER EDRUD & HENRIK SVENSSON

Institutionen för bygg och miljöteknik
GEO - Avdelningen för Geologi och geoteknik
Forskargruppen Geologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2007
Examensarbete 2007:4

EXAMENSARBETE 2007:4

Design och uppföljning av injektering i berg

En fältstudie av dropptätning i två större järnvägstunnlar

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

PETER EDRUD & HENRIK SVENSSON

Institutionen för bygg och miljöteknik
GEO - Avdelningen för Geologi och geoteknik
Forskargruppen Geologi
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2007

Design och uppföljning av injektering i berg
En fältstudie av dropptätning i två större järnvägstunnlar

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

PETER EDRUD & HENRIK SVENSSON

© PETER EDRUD & HENRIK SVENSSON, 2007

Examensarbete 2007:4
Institutionen för bygg och miljöteknik
GEO - Avdelningen för Geologi och geoteknik
Forskargruppen Geologi
Chalmers tekniska högskola
412 96 Göteborg
Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Bilden till vänster: vattenförlustförsök i Öxneredstunneln våren 2006. Bilder till höger: bergvägg vid räddningstunneln Paradisets mynning (övre) samt tunnelvägg i räddningstunneln Paradiset (undre).

Chalmers Reproservice
Göteborg 2007

Förord av handledarna

Detta examensarbete är en del av två projekt utförda vid Chalmers tekniska högskola, forskargrupp geologi hösten 2006. De två projekten är uppdelade i två examensarbeten där de tillsammans skall besvara på frågor rörande injektering med silica sol. Projekten initierades av att Tommy Ellison, BESAB fick uppdrag av Banverket att efterinjektera stora delar av Öxneredstunneln. Examensarbetet blev lyckat tack vare ett samarbete mellan Joakim Karlsson på Sweco, BESAB samt Chalmers. Detta examensarbete syftar till att utifrån teorier om inträngningslängder för injekteringsbruk förbättra injekteringsdesign samt ge förslag på hur man kan verifiera tätningseffekten av injekteringen. Silica sol har effektivt använts vid förinjektering men har inte tidigare varit till förmån för detaljstudie vid efterinjektering där silica sol varit det enda använda injekteringsmedlet. Examensarbetet ger praktiska råd på hur en injekteringsdesign kan utföras samt hur nödvändigt det är med kvalitativ data för att göra analys av resultatet.

I examensarbetet redovisas två studieobjekt, Öxneredstunneln och Nygårdstunneln. Båda studeras med avseende på injekteringsdesign. I examensarbetet ingår en litteraturstudie, en modell för injekteringsdesign och en mindre laboratoriestudie av cement. Examensarbetet avslutas med en analys av tätningsresultatet. Analysen visar både hur man kan tolka ett tätningsresultat utifrån befintliga data men poängterar även vikten av ett väl genomfört uppföljningsprogram. Att gå in i projekt där höga krav ställs på produktion är svårt vilket inte alltid är förenligt med det planerade arbetet. Ändå visar Henrik och Peter att de har hunnit med det som skulle göras samt hittat andra spår för att visa att syftet med arbetet är uppföljt. Mycket bra jobbat!

Göteborg, februari 2007



Gunnar Gustafson

Professor



Johan Funehag

Handledare

Förord av författarna

Detta examensarbete har genomförts vid Institutionen för Bygg- och Miljöteknik, avdelningen för geologi och geoteknik vid Chalmers tekniska högskola, Göteborg. Arbetet har genomförts på Chalmers i samarbete med Banverket, BESAB och LEMCON OY.

Vi vill tacka följande personer för bra samarbete och vägledning under arbetets gång.

Johan Funehag (handledare), Chalmers tekniska högskola.

Gunnar Gustafson (examinator), Chalmers tekniska högskola.

Michael Hellström (ex-jobbar kollega), Chalmers tekniska högskola.

Joakim Karlsson, SWECO/Banverket.

Tommy Ellison, Daniel Carlsson och Jörgen Gustafsson, BESAB.

Lasse Thompsson (med son) och Bosse Bergman, BorrBoLaget entreprenad väst AB.

Personal på LEMCON OY

Göteborg, februari 2007



Peter Edrud



Henrik Svensson

Design and evaluation of hard rock grouting
A field study of sealing drips in two major railway tunnels

Master's Thesis in Civil and Environmental Engineering

PETER EDRUD & HENRIK SVENSSON

Department of Civil and Environmental Engineering

Division of GeoEngineering

Geology

Chalmers University of Technology

ABSTRACT

At present there is a large need for sealing hard rock tunnels efficiently, especially in urban areas where the demands on leakage has increased during the last years. Simultaneously the functionality demands have increased for maintenance free and safer tunnels. Problems with remaining seepage after pre-grouting are usually solved by mounting geomembrane. This is a time consuming and expensive method. By grouting with a finer agent more narrow fractures can be sealed, which will reduce costs and time loss. One alternative is silica sol which is studied in this project.

Theories and models for cement (Bingham fluid) and silica sol (Newton fluid) are studied in pre-grouting as well as post-grouting situations. These theories create a base for penetration calculations and grouting designs. Two tunnels are used as study objects. One between Öxnered – Trollhättan (the Öxnered tunnel) with a post-grouting situation and one between Torbacken – Hede (the Nygård tunnel) with a pre-grouting situation. Both tunnels are a part of the expansion of the railway between Göteborg and Trollhättan. The geological and hydraulic characteristics are evaluated after which grouting are designed for smaller sections in each tunnel.

Studies of cements and silica sols rheological behaviour has been done, which creates a base for the calculation of the penetration length. A field study have been carried out in the Öxnered tunnel to verify the penetration length and to study the grouting parameters of silica sol. Analyses and tests show that the two dimensional calculation model under estimate and the one dimensional calculation model over estimate the penetration length.

An evaluation of the post-grouting with silica sol in the Öxnered tunnel shows that a large proportion of the grouting holes haven't even been filled. However, calculations and analyses show that only a small grouted volume over borehole volume can seal a large amount of fractures.

A pre-grouting in the Nygård tunnel with silica sol in the roof and cement in the walls and floor will be carried out in January 2007. The purpose is to seal the tunnel roof against drips. A suggested grouting design has been calculated and is presented in the paper.

Key words: grouting, hard rock, silica sol, cement, fractures, design, hydraulic tests, field test

Design och uppföljning av injektering i berg
En fältstudie av dropp tätning i två större järnvägstunnlar

Examensarbete inom civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad

PETER EDRUD & HENRIK SVENSSON

Institutionen för bygg- och miljöteknik

GEO - Avdelningen för Geologi och geoteknik

Forskargruppen Geologi

Chalmers Tekniska Högskola

SAMMANFATTNING

Det finns idag ett stort behov av att effektivt kunna täta bergtunnlar i framförallt urbana områden där inläckagekraven ökat kraftigt de senaste åren. Samtidigt ökar funktionskraven mot allt mer underhållsfria och säkra tunnlar. Problem med kvarstående inläckage efter förinjektering och utsprängning löses i allmänhet genom montering av dränmattor, detta är emellertid en tidskrävande och dyr åtgärd. Genom att injektera med ett fintättningsmedel kan finare och fler sprickor tätas vilket kan reducera kostnader och tidsförluster. Ett av flera alternativ är silica sol som studerats i detta projekt.

Teorier och modeller för cement (Binghamvätska) och silica sol (Newtonvätska) studeras vid både för- och efterinjekteringsituationer. Dessa teorier ligger till grund för inträngningsberäkningar och injekteringsdesigner. Två tunnelprojekt, ett mellan Öxnered – Trollhättan (Öxneredstunneln) med efterinjektering och ett mellan Torbacken – Hede (Nygårdstunneln) med förinjektering, nyttjas som studieobjekt. Bägge är delar av utbyggnaden av järnvägen mellan Göteborg och Trollhättan till dubbelspår. Områdenas geologi och bergens hydrauliska egenskaper utvärderas varefter injekteringsdesigner utformas för mindre sektioner i respektive tunnel.

Vidare studier har utförts av cements och silica sols reologiska egenskaper vilka ligger till grund för inträngningsberäkningsparametrar. Ett fälttest har genomförts i Öxneredstunneln för att verifiera inträngningslängden och studera injekteringsparametrar av silica sol. Analyser och tester visade att den tvådimensionella beräkningsmodellen underskattar och den endimensionella beräkningsmodellen överskattar inträngningslängden.

En utvärdering av efterinjektering med silica sol i Öxneredstunneln visar att vid ett stort antal av injekteringshålerna har inte mer än hålfyllnad uppnåtts. Beräkningar och analyser visar emellertid att endast en liten mängd injekterad volym över borrhålsvolym kan täta en stor mängd sprickor.

En förinjektering i Nygårdstunneln med silica sol i taket och cement i vägg och sula ska genomföras i januari 2007. Syftet är att täta tunneltaket mot dropp. En föreslagen injekteringsdesign har kontrollberäknats och presenteras.

Nyckelord: injektering, berg, silica sol, silika sol, cement, sprickor, design, hydrauliska tester, fälttest

Innehållsförteckning

FÖRORD AV HANDLEDARNA	I
FÖRORD AV FÖRFATTARNA	II
ABSTRACT	III
SAMMANFATTNING	IV
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	V
BILAGEFÖRTECKNING	VI
BETECKNINGAR	VII
1 INTRODUCTION	1
1.1 Syfte	1
1.2 Metod	2
1.3 Avgränsningar	2
2 TEORI	3
2.1 Injektering	3
2.1.1 Förinjektering	4
2.1.2 Efterinjektering	5
2.2 Injekteringsmedel	5
2.2.1 Cement	6
2.2.2 Silica sol	8
2.3 Utvärdering och visualisering av vattenförlusttester	9
2.3.1 Visualisering	10
2.4 Grundläggande reologi	11
2.4.1 Newton- & Binghamvätskor	11
2.4.2 Fingering och mobilitetsfaktor	12
2.5 Inträngningsmodell med Binghamvätska	13
2.6 Inträngningsmodell med gelände Newtonvätska	14
2.6.1 Reologiska egenskaper	15
2.6.2 Konceptuellmodell	16
2.6.3 Beräkning av inträngningslängd	17
2.6.4 Tumregler	18
2.6.5 Känslighetsanalys	19
3 STUDERADE OBJEKT	21
3.1 Förinjektering i Nygårdstunneln	21
3.1.1 Geologisk beskrivning	21
3.1.2 Hydrauliska undersökningar	23
3.1.3 Reologiska tester	24
3.1.4 Injekteringsdesign	27

3.2	Efterinjektering i Öxneredstunneln	30
3.2.1	Geologisk beskrivning	31
3.2.2	Geologiska egenskaper i Paradiset	32
3.2.3	Fälttest, injektering med silica sol	33
3.2.4	Injekteringsdesign	35
4	UTVÄRDERING AV INJEKTERING I ÖXNEREDSTUNNELN	39
4.1	Injekteringsförlopp	39
4.1.1	Resultat	39
4.1.2	Analys	41
4.2	Före/efter analys	43
4.2.1	Droppkartering	43
4.2.2	Grundvattentryck	46
4.2.3	Inläckage	47
5	SLUTSATS & DISKUSSION	48
	REFERENSER	49

Bilageförteckning

- Bilaga A. Reologiska tester på cement
- Bilaga B. Droppkartering
- Bilaga C. Sprickkartering och dess inverkan på injekteringsdesignen
- Bilaga D. Fälttest, injektering med silica sol
- Bilaga E. Förslag till design av efterinjektering med silica sol i servicetunnel Paradiset, av Tommy Ellison, BESAB.
- Bilaga F. Kontrollprogram

Beteckningar

Latinska versaler

I	[m]	inträngningslängd
I_G	[m]	skalfaktor för inträngning
I_D	[-]	dimensionslös inträngning
I_{1-D}	[m]	endimensionell inträngning
I_{2-D}	[m]	tvådimensionell inträngning
I_{max}	[m]	maximal inträngningslängd
K	[m/s]	hydraulisk konduktivitet
L	[m]	hålspetsavstånd, avstånd mellan borrhålspetsar
M	[-]	mobilitets faktor
Q	[m ³ /s]	flöde
R	[R]	exposition, gamma- och röntgenstrålnings förmåga att jonisera luft. OBS äldre enhet, 1Röntgen = 0,258 mC/kg (C = Coulomb) (Statens strålskyddsinstitut, 2006)
T	[m ² /s]	transmissivitet

Latinska gemena

b	[m]	sprickvidd
b_{cr}	[m]	kritisk sprickvidd (en som bruksparameter för cement och andra som bergkaraktäristisk parameter för silica sol vilken innebär erforderlig injekterad sprickvidd för att uppnå önskat resultat)
b_{min}	[m]	minsta penetrerbara sprickvidd, bruksparameter för cemet
c/c	[m]	hålavstånd, avstånd mellan borrhål i tunnel
g	[m/s ²]	normalacceleration, 9,81
k	[-]	lutning, pareto k
p	[-]	sannolikhet
q	[m ² /s]	flöde per meter sprickvidd
r_D	[-]	dimensionslös borrhålsradie/brunnradie
r_w	[m]	borrhålsradie/brunnradie
t	[s]	tid
t_D	[-]	dimensionslös tid
t_G	[s]	gelinduktionstid, dvs. tid till dubblering av initialviskositet
t_I	[s]	injekteringstid
v	[m/s]	hastighet
\bar{v}	[m/s]	medelhastighet

Grekiska tecken

α	[-]	konstant som beskriver viskositetsförändringen
γ	[s ⁻¹]	skjuvhastighet
$\dot{\gamma}$	[s ⁻¹]	skjuvgradient
Δp	[N/m ² , Pa]	injekteringsövertryck = injekteringstryck – grundvattentryck
λ	[m ⁴ /N]	mobilitet
μ	[N s/m ² , Pas]	viskositet

μ_0	[N s/m ² , Pas]	initialviskositet
μ_g	[N s/m ² , Pas]	injekteringsmedlets viskositet (g = grout)
μ_w	[N s/m ² , Pas]	vattens viskositet (w = water)
ρ	[kg/m ³]	densitet
τ	[N/m ² , Pa]	skjuvspänning
τ_0	[N/m ² , Pa]	flytgräns

1 Introduktion

Inläckagekraven till bergtunnlar har under senare år ökat kraftigt, framförallt under urbana men även övriga områden. I urbana områden har kraven de senaste 10 åren ökat från 2-8 liter/minut och 100 meter tunnel till 1-4 liter/minut och 100 meter tunnel (Stille, 2001). Kraven i urbana områden styrs av risken för sättningar som kan drabba känsliga byggnader. Framförallt byggnader grundlagda på lera löper stora risker för kraftiga sättningar om grundvattensänkningen är bestående. I övriga områden där bebyggelsen är sparsam styrs inläckagekraven av ev. lokala dricksvatten eller energibrunnar samt känsliga biotoper. De tunnlar som studeras i den här rapporten ligger utanför känsliga urbana områden med följd att inläckagekraven inte är särskilt högt ställda.

Ett inläckageproblem som drabbar alla utsprängda tunnlar mer eller mindre är dropp från tak som vintertid leder till isbildning. Isbildningar på spår och installationer kan leda till att tunneln under vintertid kräver kostsamt och tidskrävande underhåll innan trafikering är möjlig. Alternativ lösning vid kvarstående dropp är installation av dränmattor vilket emellertid också är en kostsam lösning. För att undvika detta eftersträvas ett så tätt tunneltak som möjligt. En reducering av inläckaget kan uppnås genom att injektera med ett fintättningsmedel som kan penetrera fler och finare sprickor.

Efter stora miljöproblemen med s.k. kemiska injekteringsmedel, speciellt organiska polymerer eftersom de har visat sig vara toxiska, är icke cement baserade injekteringsmedel svåra att få godkända för injektering i Sverige (Funehag, 2005). Silica sol är ett injekteringsmedel som uppfyller miljökraven och klarar av att penetrera små sprickvidder. Med cement kan sprickvidder ner till 100 μm injekteras (Hansson, 1994). För att täta ett tunneltvärsnitt mot dropp krävs dock att finare sprickor injekteras. Med silica sol som injekteringsmedel kan sprickor ner till 14 μm injekteras (Funehag & Gustafson, 2005).

I denna rapport har två pågående tunnelprojekt studerats, Öxnereds- och Nygårdstunneln. Båda har för avsikt att minska takdropp i tunneln och därmed reducera underhållskostnaderna.

1.1 Syfte

Syftet med rapporten är att:

- utvärdera efterinjekteringen i Öxneredstunneln.
- verifiera inträngningslängden av silica sol. Jämföra teoretisk inträngning med verklig.
- utifrån fastställd borrhålsgeometri föreslå små justeringar av t.ex. injekteringsövertryck och geltid, för att uppdatera injekteringsdesign för nästkommande skärm.
- föreslå en uppföljning av injekteringsdesigner med hjälp av kontrollprogram och utvärderingar av injekteringsförlopp.

- upprätta injekteringsdesigner för tunnel utifrån tillgänglig data.
- ge praktiska råd för injektering med silica sol i framtida projekt.

1.2 Metod

För att studera injekteringsförfarandet, injekteringsdesign och utvärdera resultat av injektering nyttjas två tunnlar som studieobjekt. Tunnelarna byggs i samband med utbyggnaden av Norge/Vänerbanan till dubbelspår. Järnvägen sträcker sig från Göteborg via Trollhättan till strax söder om Mellerud där den delar sig i två separata spår, ett mot Kil och ett mot Kornsjö i Norge. Utbyggnaden genomförs för att öka transportkapaciteten och tillgängligheten regionalt, nationellt och mellan starka områden i Norden och på kontinenten. De två studerade objekten Öxnereds- och Nygårdstunneln ersätter bitar av Norge/Vänerbanan som idag utgör flaskhalsar. Tunnelarna innebär förutom dubbelspår vilket ger en ökad transportkapacitet också genare och rakare spår vilket leder till tidsbesparing pga. ökad hastighet och minskad transportsträcka.

De två tunnelarna är i dagsläget i skilda stadier i byggprocessen. Nygårdstunneln är under utsprängning och Öxneredstunneln öppnades för trafik under november 2006. Injekteringsförfarandet som studeras i de olika projekten skiljer sig åt, i Nygårdstunneln genomförs en förinjektering och i Öxneredstunneln en efterinjektering.

Genom att utarbeta en injekteringsdesign för respektive tunnel utifrån de modeller och teorier som finns och efteråt analysera data från injekteringsförlopp, droppkartering, mätvallar och vattenförlustmätningar i kontrollhål fås en indikation på modellernas och injekteringsdesignens tillförlitlighet.

Grundkonceptet vilket tillämpas i de presenterade teoretiska modellerna i denna rapport ser till enskilda sprickors egenskaper, kallat DFN (discrete fracture network). Detta istället för som traditionellt beakta generaliserade egenskaper för en hel bergsmassa, kallt kontinuum modeller.

1.3 Avgränsningar

Teorier och modeller begränsas till att behandla cement som Binghamvätska och silica sol som Newtonvätska. Detta eftersom cement är det vanligaste injekteringsmedlet i dagsläget vid alla typer av injekteringsarbeten och silica sol ett relativt nytt fininjekteringsmedel med kraftigt utökad användning under senare år. Dessa injekteringsmedel är också de som används vid de studerade tunnelprojekten.

De teorier beträffande inträngningsberäkningar som beskrivs avgränsas till att behandla en för Binghamvätskor, presenterad av Gustafson & Stille (2005) och en för Newtonvätskor presenterad av Funehag & Gustafson (2006). Flera teorier finns men detta arbete baseras på och koncentreras till dessa. Teorierna tar inte heller hänsyn till eventuella 3-D effekter, som t.ex. samband mellan sprickor, utan ser enbart till enskilda sprickors egenskaper.

2 Teori

Följande avsnitt baseras på litteraturstudier och syftar till att skapa en grund för fortsatta fältstudier och analyser. Inledningsvis presenteras de två vanligaste injekteringssituationerna, för- och efterinjektering, samt de injekteringsmedel som används vid fälttesten och vid de studerade tunnelprojekten. Vidare beskrivs verktyg för att visualisera och utvärdera vattenförlustmätningar innan och under injektering. Avslutningsvis behandlas teorier och modeller som beskriver en Binghamvätskas och en gelände Newtonvätskas flödesegenskaper och inträngningsförmågor.

2.1 Injektering

En injektering genomförs av två anledningar, tätning mot vattenläckage och i vissa fall också förstärkning om tunneln drivs i mjukare bergarter (Lindblom, 2001). Tätning av tunnlar är viktigt för att grundvattenbalansen inte ska störas då det kan leda till sättningar och skador på byggnader i urbana områden. Särskilt angeläget är det om bebyggelsen är grundlagd på lera, där en grundvattensänkning bl.a. kan ge rötskador på träpålar.

Vid injektering gäller i allmänhet att stora vattenförande sprickor som resulterar i mycket inläckage relativt enkelt kan tätas med ett fåtal glesa injekteringshål. Omvänt gäller för små vattenförande sprickor där ett stort antal injekteringshål med kort c/c-avstånd krävs för reduktion av inläckage (Warner, 2004). Kostnaden för injektering är inte proportionell mot inläckage reduktionen. Antal borrhål och omfattning på injekteringsarbete för att tätta de sista 10 % av inläckaget kan lätt överstiga ansträngningar och kostnader för tätning av de första 50 %. En övervägning måste göras mellan kostnader och nytta av inläckage reduktion (Warner, 2004).

Täthetskraven i samband med byggande under mark har blivit allt högre, detta pga. ett ökat miljömedvetande kombinerat med kunskap från sättningar av känsliga byggnader. Erfarenheter visar att täthetskraven för tunnelanläggningar ligger på nivån 1 – 10 liter/minut och 100 meter tunnel (Svensk Kärnbränslehantering AB, 2001). Det innebär en reduktion av den hydrauliska konduktiviteten i berget med över 90 % och i vissa fall närmare 100 %. Samtidigt innebär det att sprickvidder ner till 0,05 mm eller mindre behöver tätas. Det kan jämföras med de 0,1 mm som cementbaserade injekteringsmedel i allmänhet kan penetrera. Dessa krav innebär att det i stort sett inte finns något synligt dropp eller rinnande läckage i tunneln. Kravet på injekteringsskärmarnas tekniska livslängd är 120 år för järnvägstunnlar (Bodén m.fl., 2001).

Vid injekteringsdimensionering är kunskap om sprickorientering, sprickfrekvens och sprickvidd av största intresse (Fransson, 2001, Warner, 2004, m.fl.). Sprickorienteringen och -frekvens är framförallt viktig att känna till vid dimensionering av injekteringsskärmens geometriska parametrar. Sprickvidden är styrande vid val av injekteringsmedel, dimensionering av injekteringstryck och blandningsförhållande.

Syftet med injektering är att skapa en tät skärm runt tunneln. Detta genom att välja injekteringsmedel och injekteringstryck vilka resulterar i en inträngning I som fyller

avståndet L mellan borrhålen, se Figur 2.1. Detta lyckas dock inte alltid, huvudsakligen beroende på följande tre orsaker (Gustafson m.fl., 2004):

- Sprickvidden är för liten för att bruket ska kunna tränga in.
- Brukets inträngning är inte tillräcklig för att överlappning mellan borrhålen ska uppnås.
- Vägen genom sprickorna är mycket slingrigare än den raka vägen vilket gör att nödvändig inträngningslängd underskattas.

För att undvika ovanstående dimensioneras injekterings-skärmar med 50 % överlapp, dvs. den dimensionerade inträngningslängden är 75 % av spetsavståndet, L (se Figur 2.1).

Injekteringsövertrycket ska vara så högt som möjligt för att uppnå en stor inträngning vilket möjliggör stort c/c -avstånd som är önskvärt med avseende på ekonomiska aspekter. Trycket ska emellertid inte spräcka berget, orsaka onödig påverkan på berg långt bort eller påverka ytan med uppträngande injekteringsmedel (Kutzner, 1996).

Under injekteringen bör inte injekteringsmedlet börja härda för tidigt eller blöda i för stor omfattning. Injekteringsmedlet måste också kunna trycka bort befintligt vatten i sprickor utan att det späds ut eller att dess egenskaper förändras (Kutzner, 1996).

2.1.1 Förinjektering

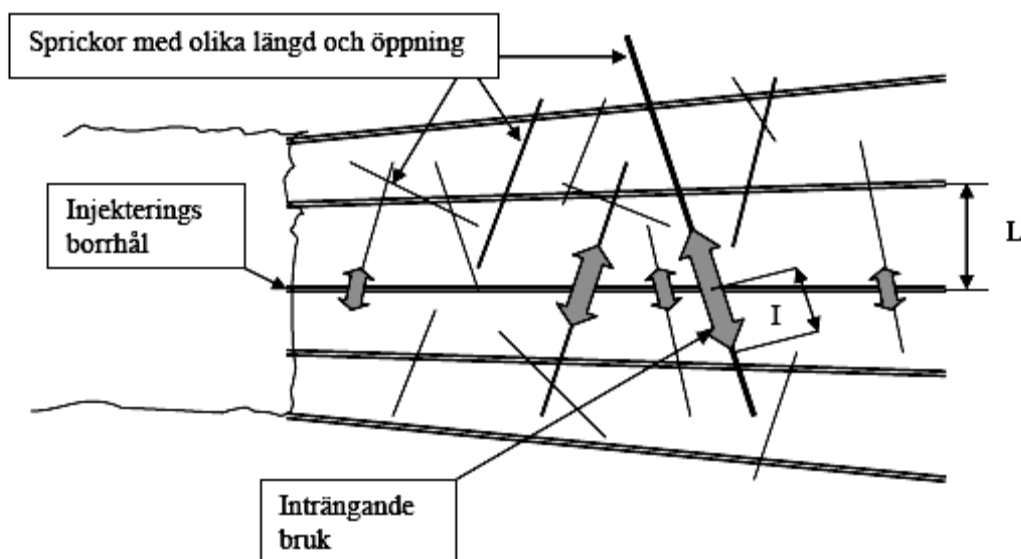
Förinjekteringen syftar till att täta berget innan utsprängning vilket resulterar i mindre inläckage även under byggskedet, lägre pumpkostnader och torrare arbetsmiljö. En fördel med förinjektering kontra efterinjektering är att ett högre injekteringsövertryck kan brukas när ett mothållande tryck från omgivande bergsmassa fortfarande kvarstår.

Ett exempel på en injekterings-skärm ses i Figur 2.1. Principiellt kan den beskrivas som en trumpetformig design med svagt sluttande borrhål med borrhållängder i regel mellan 10-25 m beroende på bergkvalitet och utsprängningstakt. Lutningen på borrhålen ska dimensioneras med syfte att träffa mesta möjliga antal sprickor så vinkelrät som möjligt.

När injekteringshålen har borrats ut spolas de rena från borrhålen, vilket om det finns kvar kan försämra injekteringsresultatet. Därefter monteras manschetter som sluter tätt runt borrhålen och kopplas till injekteringsutrustningen. Ibland görs en vattenförlustmätning och med ledning av mätvärdet kan en lämplig injekteringsdesign väljas. Injekteringstrycket väljs högre än det aktuella grundvattentrycket och pumpning fortsätter tills ett förutbestämt designtryck alternativt en stopptid eller ett volymkriterium har uppnåtts. Därefter stängs manschetterna och bruket får härda.

Efter injektering i samtliga borrhål i en injekterings-skärm och efter det att bruket fått härda, borras ibland kontrollhål i vilka vattenförlustmätningar utförs för att kontrollera om tillräcklig tätning har uppnåtts. Om inte, injekteras kontrollhålen varefter ytterliggare en omgång kontrollhål utförs osv. När tillfredsställande transmissivitetssänkning med hänsyn till inläckage har uppnåtts avslutas injekterings-skärmen genom injektering av kontrollhålen. Viktigt att beakta vid den

efterföljande utsprängningen är att laddmängden avpassas så att den omgivande injekterade bergsmassan inte spricker (Lindblom, 2001).



Figur 2.1, injekteringskärm vid förinjektering (Funehag, 2005)

2.1.2 Efterinjektering

Restläckage kommer alltid att förkomma efter förinjekteringen. Avgörande för om en efterinjektering ska utföras är dock om miljödome eller funktionskrav har uppfyllts eller ej. Om inläckaget till tunneln är för stort utförs en efterinjektering genom att nya hål borrar som träffar den läckande sprickan en bit in i berget. Detta är en kostsam injektering och kan inte utföras med lika högt tryck som förinjekteringen eftersom injekteringsmedlet då kan tränga ut ur tunnelväggarna (Lindblom, 2001).

Skärmdesignen vid en efterinjektering är mer flexibel än vid förinjektering. Kortare borrhål med större vinkel mot tunneln kan användas vilket kan vara gynnsamt för bästa resultat. Avgörande för designen är sprickmönstret, strävan är liksom vid förinjektering att träffa mesta möjliga antal sprickor så vinkelrät som möjligt.

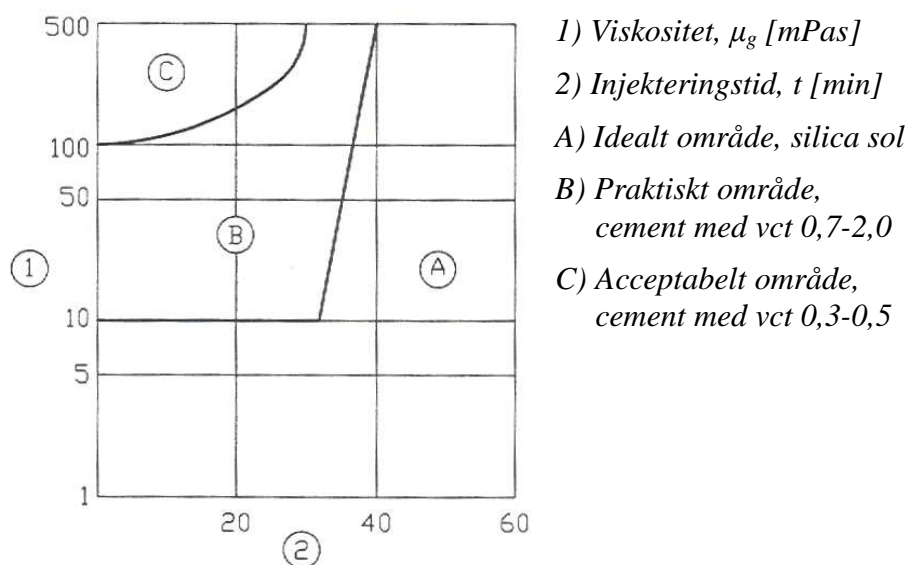
2.2 Injekteringsmedel

Injekteringsmedel kan delas upp i två huvudgrupper, cementbaserade och kemiska. De kemiska kan i sin tur delas upp i silikater, polymerer och polyuretaner (Vägverket, 2000). Många kemiska injekteringsmedel är både miljöfarliga och toxiska vilket innebär att de inte klarar dagens krav.

I detta avsnitt presenteras en kort beskrivning av cementbaserade och kemiska injekteringsmedel. En avgränsning görs av sistnämnda till att enbart behandla silica sol, en gelande vätska som varken är miljö- eller hälsofarlig och som klarar att täta mindre sprickvidder än cementbaserade injekteringsmedel.

Enligt Kutzner (1996) kan injekteringsmedel delas in i tre olika områden för att beskriva arbetbarheten enligt Figur 2.2. Det ideala området avser injekteringsmedel med en låg initial viskositet, maximalt 10 mPas. Om den låga viskositeten bibehålls under minst 30 minuter, garanteras tillräckligt med injekteringstid för en lyckad

inträngning. Efter denna tid bör viskositeten öka för att medlet inte ska spridas okontrollerat utanför injekteringszonen. Silica sol är ett exempel på injekteringsmedel som uppvisar dessa egenskaper. Cementbruk med högt vct (vatten/cement-tal) har en initial viskositet mellan 10-100 mPas. Dessa hamnar inom det praktiska området enligt Figur 2.2. Cementbruk med lågt vct hamnar inom det acceptabla området, pga. den höga viskositeten, 100-500 mPas, är det emellertid svårt att uppnå erforderlig inträngningslängd i sprickorna. Injektering med cement har enligt tidigare praxis inletts med ett högt vct varefter cementinblandningen ökas. Idag försöker man emellertid använda bruk med samma vct så långt det går.



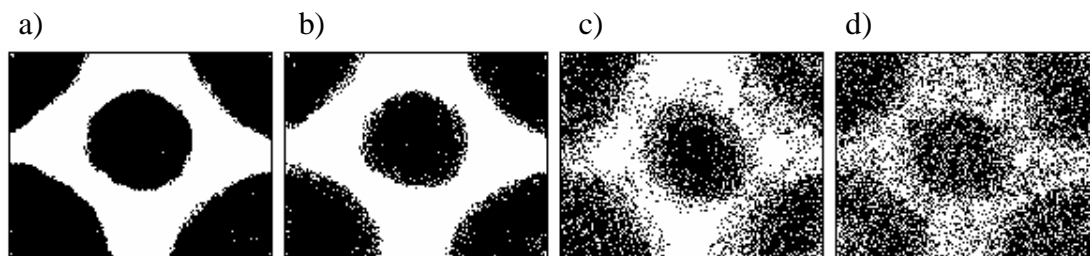
Figur 2.2, injekteringsmedels viskositetsförändring över tiden, med generella arbetbarhetsområden (Kutzner, 1996)

2.2.1 Cement

Injektering med cement har pågått ända sedan början av 1800-talet. Idag är cement det huvudsakliga injekteringsbruket vid tätning av berg och den vanligaste typen av cement är portlandcement. Denna består av kalksten och lera som mals och bränns under hög temperatur (1450°C), för att åstadkomma cementklinker. Cement erhålls genom att mala cementklinker tillsammans med gips (cirka 5 %). Detta görs för att reglera cementets bindning, vilken annars skulle bli för snabb (Burström, 2001). En annan typ av cement som används för injektering är slaggcement, bestående av portlandcement och masugnsslagg. En tredje typ är aluminatcement för vilken hållfasthetsutvecklingen är mycket snabb och det mesta av hållfastheten uppnås redan efter ett dygn (jämfört med portlandcement där samma hållfasthet uppnås efter cirka 28 dygn). Detta kan vara önskvärt i vissa injekteringssituationer men ger en större risk, eftersom det hårdnande cementet är svårare att kontrollera, vilket kan ge skador på injekteringsutrustningen (Axelsson, 2006).

Cementets reaktion med vatten kallas hydratation, denna process sker under väldigt lång tid. Cementkornen reagerar med vattnet och bildar en finporös cementgel, som omger cementkornen. En schematisk bild av strukturförändringen när fem cementkorn reagerar med vatten framgår av Figur 2.3. När reaktionen mellan cement och vatten fortgår fylls porutrymmet mellan cementkornen med cementgel, vilket bidrar till att cementpastan blir tätare och starkare (Burström, 2001). För att uppnå en fullständig

hydratisering av cementet krävs ett vct runt 0,4. Detta innebär att porutrymmet mellan cementkornen är fyllda med cementgel. Vid ett vct < 0,4 finns inte tillräckligt med vatten för en fullständig hydratisering. Om vct > 0,4 kommer inte cementgelen fylla ut porvolymen varför kapillärporer bildas, vilket bidrar till en ökad permeabilitet och minskad hållfasthet (Kutzner, 1996).



Figur 2.3, schematisk bild över strukturförändringen hos cementpasta.
a) direkt efter blandning. b) efter några minuter. c) vid bindning.
d) efter några månader.

Injektering med cement

Det vanligaste bruket som används vid injektering kallas Injektering 30 (Inj 30), vilket är ett portlandcement med d_{95} runt 30 μm . En gammal tumregel säger att sprickor finare än 3 gånger cementets maximala kornstorlek inte går att injektera (Hansson, 1994). Detta innebär att bruket kan injekteras i sprickvidder ner till 100 μm . Anledningen till varför finare sprickor inte kan injekteras beror dels av att runt 5 % av cementpartiklarna är större än 30 μm , samt att cementpastan har en tendens till flockulation. Ultrafin cement med d_{95} runt 16 μm används för att täta finare sprickor ner till 50 μm . Enligt Axelsson (2006) bör det emellertid ifrågasättas om en finkornigare cement ger bättre tätningsresultat. Eftersom den specifika ytan ökar ju mindre partiklarna blir, ökar också risken för flockulation om bruket inte blandats tillräckligt väl.

Injekteringsbruk bestående av enbart cement och vatten är sällsynt. Ofta används tillsatsmedel för att bruket ska få speciella egenskaper som t.ex. en kortare härdningstid eller förbättrade flödesegenskaper. De vanligaste tillsatsmedlen är superplasticerande, accelererande, retarderande och puzzolaner.

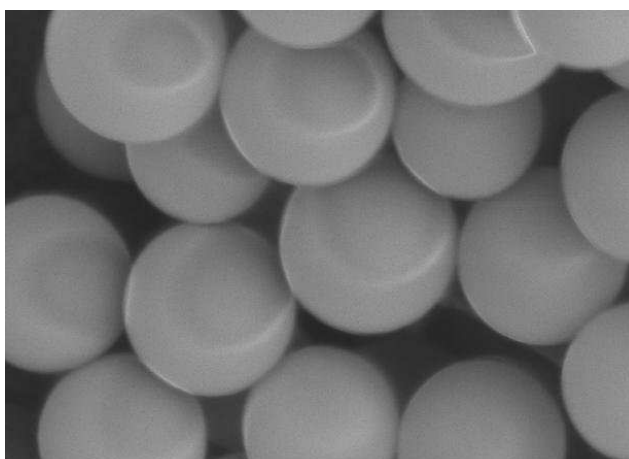
Mekaniska egenskaper

Enligt Kutzner (1996) beror initialviskositeten hos bruket av vct och mängden tillsatsmedel. Viskositeten är relativt konstant under 2-3 timmar, därefter ökar viskositeten vilket medför att bruket blir svårhanterligt och inträngningen i sprickorna upphör. Den initiella skjuvkraften för bruket är låg (mellan 1-10 Pa) under de första 2-3 timmarna då även viskositeten är låg. Hållfasthetstillväxten efter de första timmarna kan förenklat delas upp i två faser, en gelande och en hårdnande (Hansson, 1994). Under den gelande fasen binds cementpartiklarna svagt till varandra, vilket ger bruket en skjuvkraft av ett par kPa. Den gelande fasen tar cirka 10 timmar. I den hårdnande fasen sker den egentliga härdningsprocessen, vilket innebär att borrhning, sprängning och andra aktiviteter kan förekomma mer riskfritt än under den gelande fasen. Härdningsprocessen sker under en nästan oändligt lång tid. Efter 28 dygn mäts skjuvkraften på bruket i tiotals MPa.

På grund av den låga skjuvkraften under de första timmarna kan problem uppstå om manschetter tas bort för tidigt ur injekteringshålet, vilket kan resultera i ett bakflöde av injekteringsmedlet. Erosion kan även förekomma i sprickorna genom att vattnet strömmar genom eller förbi cementpastan, varvid kalciumhydroxiden i cementpastan bryts ned. För att undvika erosion måste cementpastan vara tät dvs. att vattnet inte separerar från cementet, detta kan åstadkommas genom att tillsätta olika typer av puzzolaner. Forskning inom området pågår på Chalmers, se Axelsson (2006).

2.2.2 Silica sol

Silica sol används inom industrin för t.ex. ytbehandling av papper, klarning av vin och som tillsats i golvlack. Silica sol är en kolloid blandning med ytterst fina silikatpartiklar av kiseldioxid, SiO_2 , suspenderade i vatten (Figur 2.4). Dessa partiklar befinner sig mellan en äkta lösning (homogen blandning där det inte går att urskilja beståndsdelarna) och en blandning (sammansättning av två eller flera substanser som inte är bundna till varandra) (Wikipedia). En kolloid är därmed: icke lösbara partiklar större än molekyler men samtidigt tillräckligt små för att vara suspenderade i en vätska, utan sedimentation. Ordet sol syftar just till en kolloid, bestående av fasta partiklar i en vätska.



Figur 2.4, silikatpartiklar suspenderade i en vätska.

Injektering med silica sol

Injektering med silica sol används utomlands främst vid jordförstärkning, där metoden är väl beprövad och ger tillförlitliga resultat. I Sverige är det ett relativt nytt injekteringsmedel som har använts för injektering i berg sedan år 2002. Den silica sol som används för injekteringsarbeten har en partikelstorlek mellan 3 och 100 nanometer, jämfört med cementkorn är de bara en tusendel så stora.

För att motverka en okontrollerad gelning stabiliseras silikatpartiklarna med negativa laddningar, vilket skapar repulsiva krafter mellan partiklarna. Detta kan åstadkommas genom att höja pH-värdet, vilket är anledningen till att silica sol har ett pH-värde runt 9-10 (Axelsson, 2006).

För att få injekteringsmedlet att gela och till sist härda, används en accelerator i form av saltlösning t.ex. NaCl eller CaCl_2 . Genom att tillsätta en saltlösning börjar de positivt laddade natriumjonerna att attraherar de negativt laddade silikatpartiklarna, vilket får silikatpartiklarna att kollidera och forma kedjor. Saltet deltar inte i

reaktionen utan påbörjar endast kollisionerna av silikatpartiklarna, enligt tester kommer alla kloridjonerna och nästan lika mycket av natriumjonerna att ha lakats ur efter ett par veckor (Funehag, 2005).

I Öxneredstunneln används en silica sol som går under namnet Meyco® MP320. Silikatkoncentrationen ligger runt 40 viktprocent vilket ger en viskositet som ligger relativt nära vattnets viskositet (silica sol: 5 mPas, vatten: 1 mPas). Den låga viskositeten tillsammans med partikelstorleken, ger silica sol goda egenskaper för injektering av sprickvidder ner till 14 µm.

Mekaniska egenskaper

Tester utförda av Axelsson (2004) visar att silica sol är krympningsbenägen, så länge som silica sol inte är i kontakt med vatten. Tester visar att prover av silica sol som lagrats under en relativfuktighet (RF) på 95 % vid 8°C kommer att krympa med 12-18 %. De prover som lagrats vid 75 % RF vid 8°C krymper cirka 25 %. För att silica sol ska ge fullgoda och bestående tätningsresultat, måste injekteringsfronten vara i kontakt med vatten. Närmast tunnelväggen kommer injekteringsmedlet att krympa eftersom luftfuktigheten är lägre. Dock påverkar det inte tätningsresultatet i helhet, så länge som det finns tillgång till vatten i injekteringsfronten.

En gelad silica sol som lagrats i vatten har en skjuvhållfasthet runt 1 kPa. Jämfört med en härdad cementinjektering är det lågt, men fortfarande tillräckligt högt för att motstå vattenerosion. Skjuvhållfastheten ökar då den relativa fuktigheten sänks, vilket dock medför att injekteringsmedlet krymper.

2.3 Utvärdering och visualisering av vattenförlusttester

Utvärderingar av undersökningar utförda i ett tidigt skede innan utsprängning av tunnel i kärnborrhål eller under konstruktion i förinjekteringshål eller sonderingshål syftar till att ta fram indata för framdrivning, inläckage beräkning och injekteringsdesign. Undersökningar utförda före, under och efter injektering, vilka behandlas utförligt senare i avsnitt 3 *Studerade objekt* och 4 *Utvärdering av injektering i Öxneredstunneln*, syftar till att skapa underlag för en utvärdering av injekteringen.

Vattenförlusttester används i de allra flesta fall för att bestämma bergsmassans transmissivitet, vilken är avgörande vid dimensionering av injektering. Frågan om vattenförlusttester kan utvärdera om en injektering behövs eller ej diskuteras i Kutzner (1996), då med cement som injekteringsmedel. Där det största argumentet mot vattenförlust som utvärderingsmetod vid injekteringsdesign är de stora reologiska skillnaderna mellan cement och vatten. Något klart samband mellan injekteringsmedel- och vattenabsorption av bergsmassan kan inte heller ses (Kutzner, 1996). Det kan konstateras att de reologiska skillnaderna initialt är mycket mindre mellan silica sol och vatten varför vattenförlust som utvärderingsmetod bör vara mer representativ för injektering med denna.

Utvärderingarna av vattenförlusterna begränsas till att behandla Paretofördelningar och fördelningsdiagram för utvärdering innan respektive efter injektering. Med en Paretofördelning kan den kritiska sprickvidden beräknas vilken behöver tätas för att önskad permeabilitetssänkning ska uppnås. Ett fördelningsdiagram ger en

lättöverskådlig bild av vattenförluster innan och efter injektering, och visar på om en injekteringsskärm är lyckad eller ej.

2.3.1 Visualisering

Paretofördelning

En Paretofördelning kan användas som ett verktyg för att beskriva sprickors transmissiviteter. Sprickor kan enligt Gustafson m.fl. (2004) jämföras med exempelvis inkomstfördelningen hos individer, det finns många små och ett fåtal jämförelsevis stora värden.

Tester visar att spricktransmissiviteter kan beskrivas med Paretofördelningen varefter sprickaperturen kan beräknas med ”kubiska lagen” (Ekv 2.18). Utifrån dessa kan prognoser göras för vilken transmissivitet som behöver uppnås för att reducera inläckaget i tunneln till önskad nivå samt hur många sprickor och vilken sprickvidd som injekteringsbruket behöver kunna penetrera.

För att kunna skapa en Paretofördelning för aktuell bergsmassa krävs ett kärnborrhål med karterad sprickfrekvens per sektion samt mätning av naturligtinflöde eller vattenförlust per sektion. För beräkning av en Paretofördelning hänvisas läsaren till Gustafson m.fl. (2004). En bra utvärdering med hjälp av Paretofördelning ger framförallt bra ingångsdata för inträngningsberäkningar. I första hand den kritiska sprickvidden som är direkt kopplad till möjlig inträngningslängd.

Fördelningsdiagram

Utvärdering av vattenförluster i samband med injektering kan ske genom plottning av förlusterna innan och efter injektering mot en sannolikhets fördelning. I följande avsnitt beskrivs kort hur ett fördelningsdiagram är konstruerad.

Värden från vattenförlustmätningar antas vara lognormalfördelade, detta innebär att naturliga logaritmen för x , $\ln(x)$, är normalfördelad och karakteriseras av parametrarna medelvärde och standardavvikelse. Medelvärdet representerar ett genomsnitt för ett antal värden och definieras enligt Devore & Farnum (1999) som

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i . \quad \text{Ekv 2.1}$$

Variansen beskriver spridningen av värdena inom mängden som

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 . \quad \text{Ekv 2.2}$$

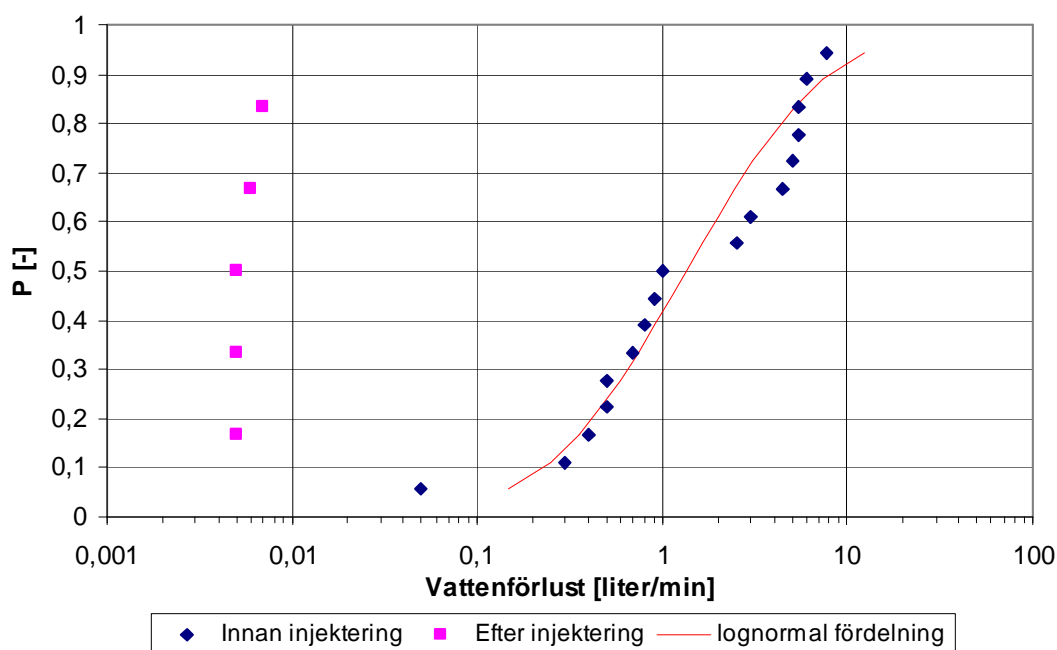
Standardavvikelsen är ett mått på hur mycket de olika värdena i en population avviker från medelvärdet. Den definieras som kvadratroten ur variansen för fördelningen som

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} . \quad \text{Ekv 2.3}$$

Logaritmerade värden från vattenförlust mätningarna plottas med Weibulls formel,

$$p = \frac{n}{(N+1)}, \quad \text{Ekv 2.4}$$

där p är sannolikheten att ett storleks sorterat värde n av totalt N värden underskrids. Med hjälp av ett spreadsheet (i t.ex. Microsoft Excel) kan loginvers funktionen till vattenförlustmätningarna skapas och plottas med ovanstående fördelning, se Figur 2.5.



Figur 2.5, exempel på utvärdering av vattenförlust.

Genom att studera förändringen av median och max värden kan en indikation på mer vattenförande sprickor eller zoner fås under pågående injektering. Varefter en ev. justering av injekteringsdesignen kan utföras till en design anpassad till de nya förhållandena.

2.4 Grundläggande reologi

För att matematiskt beskriva ett komplext fenomen som en vätskas flöde i en spricka krävs förenklade och generaliserade modeller av verkligheten. När en vätska börjar flöda kommer en mothållande kraft bildas, denna reaktion ger upphov till en skjuvkraft (intern friktion) motsatt flödesriktningen kallad viskositet. Viskositet definieras som en vätskas motstånd till att flöda, alla vätskor har en intern friktion men lågviskösa vätskor har mycket lägre friktion och flyter därmed lättare. Vätskor som är suspensioner, t.ex. cement, har högre viskositet och flödet är mer komplext att beskriva (Axelsson & Nilsson, 2002).

2.4.1 Newton- & Binghamvätskor

För cementblandningar är det svårt att dra en skarp gräns för om de ska definieras som en Newton- eller Binghamvätska. I Kutzner (1996) definieras cement med ett

vct-tal högre än två (viktbaserat) som ett mellanting mellan en Newton- och Binghamvätska och de blandningar med lägre vct-tal som Binghamvätskor. Cementblandningar beskrivs dock i de allra flesta fall som Binghamvätskor och silica sol som en Newtonvätska (Axelsson & Nilsson, 2002).

Flöde och härdningsbeteendet för alla injekteringsmedel är definierad av viskositeten (μ) och för Binghamvätskor styrs beteendet även av flytgränsen (τ_0). I inledningsskedet av injekteringen beter sig alla vanliga material som Newton- eller Binghamvätskor (Kutzner, 1996).

Newtonvätskors beteende beskrivs som en linjär funktion av skjuvhastighet ($\dot{\gamma}$) och skjuvspänningen (τ),

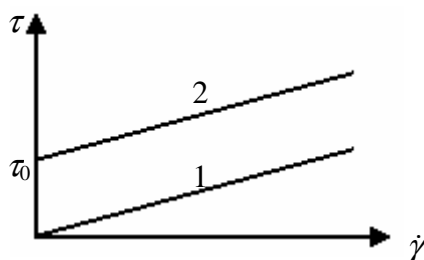
$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}. \quad \text{Ekv 2.5}$$

Exempel på Newtonvätskor är vatten och låg viskösa injekteringsmaterial, t.ex. silica sol initialt (Kutzner, 1996). Newtonvätskor med olika viskositet som påverkas av samma tryckgradient kan lika lätt penetrera en spricka, med skillnaden att en högre viskositet ger en lägre hastighet och således krävs en längre injekteringstid för att uppnå samma inträngning vid givet tryck (Axelsson & Nilsson, 2002).

Skillnaden mellan en Newton- och en Binghamvätska är att den senare också beskrivs med en flytgräns (τ_0). Detta innebär att en initial skjuvkraft måste påverka vätskan för att ett flöde ska uppstå. När flytgränsen överstigs beter sig Binghamvätskan i teorin på samma sätt som Newtonvätskan och beskrivs enligt följande,

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}. \quad \text{Ekv 2.6}$$

Figur 2.6 visar på en schematisk skiss över förhållandet mellan skjuvkraften och flödehastigheten samt skillnaden mellan en Newton- och en Binghamvätska, givet att vätskorna har samma viskositet.



Figur 2.6, schematisk skiss över förhållandet mellan skjuvkraft och skjuvhastighet, Linje 1) Newtonvätska och Linje 2) Binghamvätska.

2.4.2 Fingering och mobilitetsfaktor

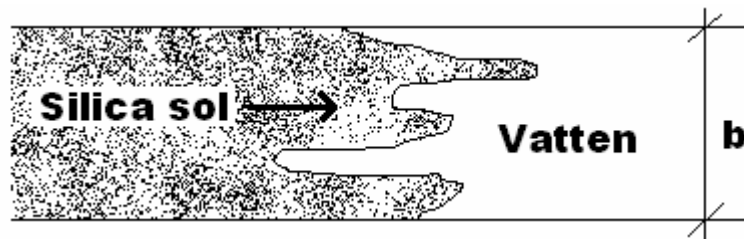
Fördelaktigt vid injektering är att injekteringsfronten är stabil, dvs. att ingen blandning mellan vattnet och injekteringsmedlet sker. Fingering som schematiskt beskrivs nedan i Figur 2.7 kan uppträda vid injekteringsfronten och leder till en blandning av injekteringsmedlet. Om mobilitetsfaktorn, M , överstiger ett, se Ekv 2.7 och Ekv 2.8 nedan, ökar omfattningen av "fingrarna" vid injekteringsfronten vilka penetrerar in i vattnet i ett oregelbundet mönster. Med en mobilitets faktor lägre än eller lika med ett förblir injekteringsfronten stabilare (Stalkup, 1992).

Mobilitetsfaktorn, M , definieras som kvoten mellan den undanträngande vätskans mobilitet (injekteringsmedlet), λ_1 , och den undanträngda vätskans mobilitet (vattnet), λ_2 , dvs.,

$$M = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \quad \text{Ekv 2.7}$$

Där en vätskas mobilitet fås genom att dividera bergsmassans konduktivitet, k , med vätskans viskositet, μ ,

$$\lambda_i = \frac{k_i}{\mu_i}. \quad \text{Ekv 2.8}$$



Figur 2.7, fingering

2.5 Inträngningsmodell med Binghamvätska

Inträngningen i en plan-parallell spricka beror på Δp , b och τ_0 . Med kännedom om flytgränsen τ_0 och den effektiva sprickaperturen b kan den maximala inträngningslängden I_{max} beräknas som (Gustafson & Stille, 2005)

$$I_{max} = \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot b. \quad \text{Ekv 2.9}$$

Ekvation förutsätter att cementblandningen är en Binghamvätska och fås genom en kraftbalans mellan injekteringsmedlet och sprickväggarna. Den gäller dessutom för både en- och tvådimensionell (1-D och 2-D) inträngning. I_{max} är oberoende av tiden men förutsätter att μ och τ_0 är konstanta över tiden.

En dimensionslös skalfaktor införs för beräkning av inträngningslängden. Den relativa inträngningen är enligt Gustafson & Claesson (2005) konstant i alla sprickor korsade av ett borrhål och kan därmed beskrivas som $I_D = I/I_{max}$.

En viktig injekteringsparameter är pumptiden, det tar i princip oändligt lång tid att nå maximal inträngningslängd. Enligt Gustafson & Stille (2005) är endast 80 % av I_{max} möjlig att uppnå under den karakteristiska injekteringstiden t_0 ,

$$t_0 = \frac{6\Delta p \cdot \mu_s}{\tau_0^2}, \quad \text{Ekv 2.10}$$

vilken också ger tidsskalan. Detta pga. att trycket vid injekteringsfronten avtar snabbt efter 80 %. Från denna fås den relativa injekteringstiden genom $t_D = t/t_0$. Maximal inträngning gäller som nämnts tidigare för både 1-D och 2-D inträngning. Skillnaden är att det tar längre tid att uppnå samma inträngning 2-D som 1-D. Detta beror helt

enkelt på att det går åt mer injekteringsmedel för att fylla ett sprickplan när arean ökar proportionellt mot radien i kvadrat än för en kanal med konstant sprickvidd.

Den endimensionella inträngningen kan beräknas med följande ekvation (Gustafson & Claesson, 2003),

$$t_D = \frac{I_D}{3(1-I_D)} + \frac{2}{9} \cdot \ln \left[\frac{2(1-I_D)}{2+I_D} \right]. \quad \text{Ekv 2.11}$$

Problemet är att I_D inte kan lösas exakt. Genom serietveckling av ln-funktionen och omskrivningar fås en approximativ ekv.,

$$I_D \approx \sqrt{\frac{t_D^2}{4(1+t_D)} + \frac{2t_D}{1+t_D}} - \frac{t_D}{2(1+t_D)}. \quad \text{Ekv 2.12}$$

Med införande av

$$\theta \approx \frac{t_D}{2(1+t_D)}, \quad \text{Ekv 2.13}$$

fås det förenklade uttrycket

$$I_D \approx \sqrt{\theta^2 + 4\theta} - \theta. \quad \text{Ekv 2.14}$$

Problemet med approximationen är att serietvecklingen har dålig korrelation om t_D är liten. Bättre tillförlitlighet fås genom en optimering av relationen mellan relativ inträngning och relativ tid vid de förutsättningar som är vanligen förekommande vid injekteringssituationer. Optimering ger följande två ekvationer för ett 1-D och ett 2-D fall,

$$\theta_{1-D} \approx \frac{t_D}{2(0,6+t_D)} \quad \text{Ekv 2.15}$$

och

$$\theta_{2-D} \approx \frac{t_D}{2(3+t_D)}. \quad \text{Ekv 2.16}$$

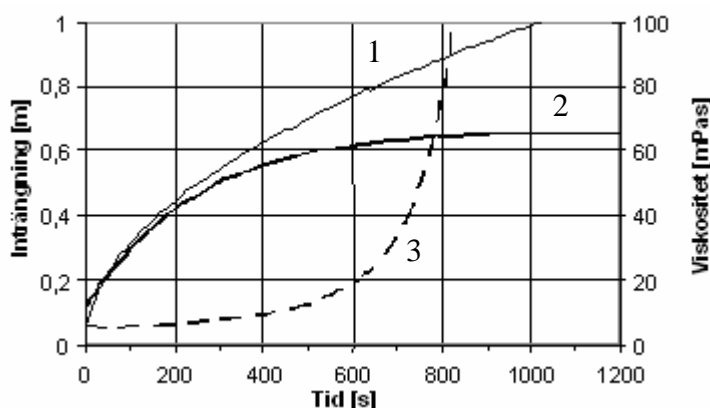
2.6 Inträngningsmodell med gelände Newtonvätska

I följande avsnitt beskrivs hur inträngningen i en spricka definierad som en spalt kan beräknas när sprickaperturen är känd. Alla teorier som inte refereras till i texten är hämtade från Funehag & Gustafson (2006).

Silica sol beter sig initialt som en Newtonvätska fast med ökande viskositet över tiden. Genom att variera andelen saltlösning i injekteringsblandningen kan geltiden optimeras för de förhållande som råder i aktuellt injekteringsområde. En ökad andel saltlösning i blandningen resulterar i en minskad geltid.

Inträngningslängden är starkt beroende av vätskans viskositet. En låg initialviskositet innebär att sprickor med mindre apertur kan injekteras. I kombination med längre gel-

och injekteringstid kan injekteringsmedlet transporteras längre i en spricka. Fördelen med silica sol jämfört med cement beträffande inträngningslängd är uppenbar, partikel storleken för en silica sol är cirka 1000 gånger mindre än för en cement. Cement beskrivs som en Binghamvätska vilken har en initiell skjuvhållfasthet i motsats till silica sol vilken kan beskrivas som en Newtonvätska som saknar en initiell skjuvhållfasthet.



Figur 2.8, *principiell graf av inträngningslängd och viskositetsförändring över injekteringstid. Linje 1) beräknad inträngningslängd utan gelning. Linje 2) uppmätt inträngning i en sandkolonn med ett injekteringstryck av 100 kPa. Linje 3) viskositetsförändringen för silica sol. (Funehag & Gustafson, 2006).*

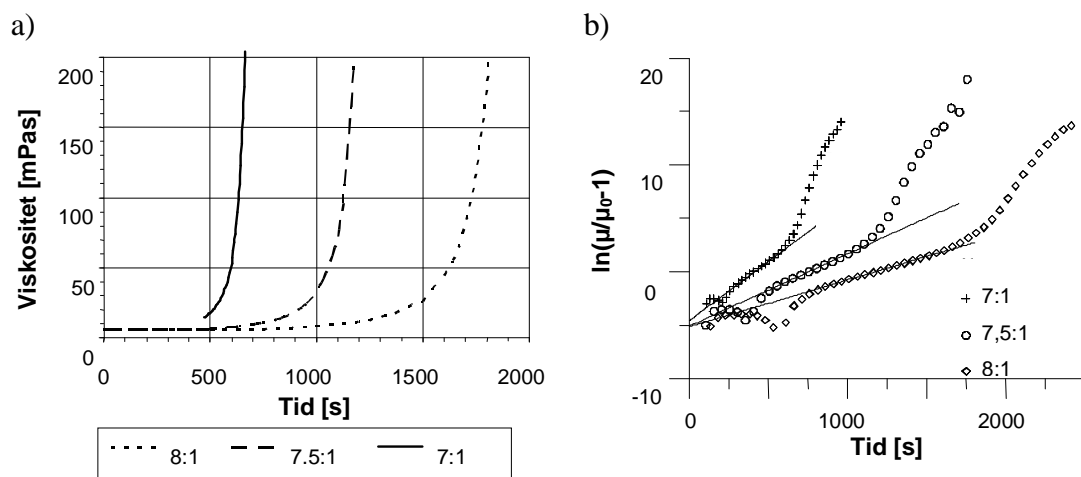
Försök visar att när en dubbling av silica solens initiella viskositet har uppnåtts avtar inträngningen markant alternativt upphör helt. Silica sols huvudsakliga viskositetsökning sker (som kan ses i Figur 2.8) först efter en viss tid vilket ger silica sol goda förutsättningar för inträngning.

I nedanstående avsnitt definieras ekvationer som beskriver en vätskas inträngning i en spricka kopplat till sprickans transmissivitet och således till dess apertur.

2.6.1 Reologiska egenskaper

Figur 2.9a visar viskositetsförändringen för tre olika blandningsförhållanden över tiden. En klar överensstämmelse i deras beteende kan ses, samtliga har nästintill oförändrad viskositet i inledningsfasen varefter en snabb viskositetstillväxt sker. Vad som skiljer dem åt är lutningen dvs. gelningshastigheten, vilken minskar med ökat blandningsförhållande (Figur 2.9b).

α används vid beskrivning av viskositetsförändringen (se Ekv 2.17). Det är en konstant som erhålls genom reologiska tester och analys av kurvor beskrivande viskositetsförändringen av olika blandningsförhållande, visar sig vara konstant oavsett blandningsförhållande. I Figur 2.9b visas viskositetsförändringen av olika blandningsförhållanden och trendlinjer för dess inledningsfas, med tiden på x-axeln och $\ln(\mu/\mu_0 - 1)$ på y-axeln. α motsvarar y-värdet för den punkt där trendlinjerna skär y-axeln.



Figur 2.9, a) viskositetsförändringen över tiden för tre olika blandningsförhållanden. b) normaliserad viskositet i en logaritmisk skala över tiden, en trendlinje är plottad för den första delen av viskositetsförändringen. (Funehag & Gustafson, 2006).

Viskositetsförändringen över tiden för silica sol kan beskrivas med hjälp av följande ekvation,

$$\mu_g = \mu_0 [1 + \exp(\alpha(t/t_G - 1))] = \mu_0 \cdot \mu_D. \quad \text{Ekv 2.17}$$

Möjlig inträngningslängd är som nämnt tidigare gynnad av en låg viskositet, dock är viskositetsskillanden mellan vatten och injekteringsmedlet en förutsättning för injektering. En vätska med högre viskositet trycker bort en vätska med lägre viskositet vilket gör att injekteringsmedlet kan härda utan att utspädning sker (Scheidegger & Johnson, 1969 i Kutzner, 1996). Under själva injekteringen när en tryckskillnad mellan injekteringsmedlet och vattnet finns är emellertid detta inte ett problem. Viskositetsskillnaden mellan vatten och silica sol är initialt cirka $5-1 = 4$ mPas. En viss utspädning av en suspension som silica sol i kontakt med vatten är dock omöjlig att undvika när skillnaden i viskositet är liten (Kutzner, 1996).

2.6.2 Konceptuellmodell

För beräkning av inträngningslängd behöver uttryck definieras som beskriver sprickors transmissivitet och sprickvidd samt en vätskas flöde och hastighet i en spricka. Ett flertal antaganden och förenklingar görs för att uttrycken inte ska bli alltför komplexa, bl.a. att sprickorna är oändligt långa samt att tryckfall och sprickapertur är konstanta.

En sprickas transmissivitet kan beskrivas med den "kubiska lagen" (de Marsily, 1986, m.fl.),

$$T = \frac{\rho_w g b^3}{12\mu_w}. \quad \text{Ekv 2.18}$$

Flödet för en vätska i en spricka kan beskrivas med,

$$q = -\frac{dp}{dx} \cdot \frac{b^3}{12\mu_g} . \quad \text{Ekv 2.19}$$

Genomsnittlig hastighet för en vätska i en spricka beskrivs som q/b , dvs.

$$\bar{v} = -\frac{dp}{dx} \cdot \frac{b^2}{12\mu_g} . \quad \text{Ekv 2.20}$$

2.6.3 Beräkning av inträngningslängd

Ekv 2.19 och Ekv 2.20 beaktar ett endimensionellt flöde i en spricka under förutsättningarna att flödet är fullt utvecklat, laminärt, konstant, icke komprimerbart och utan hastighet längs med sprickväggarna. Teorier för beräkning av inträngningslängd med silica sol är hämtade från Funehag & Gustafson (2006).

Inträngning utan gelning fås genom en omskrivning av $-dp/dx$ till $\Delta p/I$. Med vetskapen att viskositeten är konstant för en Newtonvätska och att därefter utföra en integration fås

$$I = b \sqrt{\frac{\Delta p t}{6\mu_0}} . \quad \text{Ekv 2.21}$$

Inträngning med en gelande vätska fås genom kombination av Ekv 2.21 ovan och Ekv 2.17 vilken beskriver en vätskas viskositetsförändring över tiden till följande

$$dt \cdot \frac{\Delta p b^2}{12\mu_0 \cdot [1 + \exp(\alpha(t/t_G - 1))]} = I \cdot dI . \quad \text{Ekv 2.22}$$

Ekv 2.22 kan inte integreras lika lätt som för fallet utan gelning, definition av andra parametrar är därför nödvändiga. Antag att

$$I_G = b \sqrt{\frac{\Delta p t_G}{6\mu_0}} , \quad \text{Ekv 2.23}$$

I_G är här en skalfaktor för inträngning som är identisk med Ekv 2.21, med undantag för att inträngningen med hänsyn till gelning definieras som I_G och att gelinduktionstiden t_G införs. t_G definieras som den tid det tar för en gelande silica sol att dubblera sin initiala viskositet. Viskositeten är tidsberoende och ekvationen kan lösas genom införande av dimensionslösa parametrar (markerade med nedsänkt D): $I = I_D \cdot I_G$, $dI = dI_D \cdot I_G$ och $t = t_D \cdot t_G$, $dt = dt_D \cdot t_G$. Både inträngningslängd och tid är nu dimensionslös. Efter införandet av dimensionslösa parametrar i Ekv 2.22 och integration fås följande ekv för 1-D inträngning av en gelande silica sol,

$$I_D = \sqrt{t_D - \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{e^\alpha + e^{\alpha_D}}{e^\alpha + 1} \right)} . \quad \text{Ekv 2.24}$$

För ett tvådimensionellt flöde kan sprickan ses som en cirkulär platta och inträngningen sker då radiellt. Flödet kan beskrivas med "Kubiska lagen" (Ekv 2.18) insatt i Thiems brunnsekvation, (Carlsson & Gustafson, 1991),

$$T = \frac{Q}{2\pi \cdot s_w} \ln \frac{R}{r_w}. \quad \text{Ekv 2.25}$$

Med en massbalans ses att flödet ska vara i jämvikt med fyllningen av sprickan, vilket ger att

$$Q = \frac{2\pi \Delta p \cdot b^3}{12\mu_g \cdot \ln(I/r_w)} = 2\pi d \cdot b \cdot \frac{dI}{dt}. \quad \text{Ekv 2.26}$$

Dimensionslösa parametrar introduceras, brunnsradien definieras som $r_D = r_w/I_G$ samt I_D och t_D som för det 1-D fallet. Efter integration fås flödet som

$$t_D - \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{e^\alpha + e^{\alpha_D}}{e^\alpha + 1} \right) = I_D^2 [\ln(I_D/r_D) + 1/2] - r_D^2/2. \quad \text{Ekv 2.27}$$

Formeln ovan kan dock inte lösas explicit. Följande iterativa algoritm konvergerar dock snabbt och förenklar en utvärdering,

$$I_{D,n+1} = \sqrt{\frac{t_D - \frac{1}{\alpha} \ln \left(\frac{e^\alpha + e^{\alpha_D}}{e^\alpha + 1} \right) + r_D^2/2}{[\ln(I_{D,n}/r_D) + 1/2]}}. \quad \text{Ekv 2.28}$$

2.6.4 Tumregler

Tumreglerna nedan ger en bra uppfattning om möjlig inträngningslängd när b (bergparameter) och Δp (injekteringsparameter) är kända. Samt μ_0 och t_G (materialparametrar) är utvärderade.

Injekteringstid

Tidigare har konstaterats att inträngningen avtar markant efter en dubbling av initialviskositeten, kallat gelinduktionstid (t_G). Efter ytterligare $0,5t_G$ har inträngningen helt upphört, vilket innebär att injekteringstiden t_I definieras som $(1+0,5) \cdot t_G$. Som en tumregel kan antagandet göras att t_G är en tredjedel av geltiden (Funehag & Gustafson, 2006) vilket ger möjlighet att bestämma t_G i fält. Geltiden definieras som den tid det tar innan en bögare med blandad silica sol kan vändas 90° utan att solen flödar (Kutzner, 1996). Alltså, injekteringstid t_I kan beräknas genom,

$$t_I = \frac{\text{Geltid}}{2}. \quad \text{Ekv 2.29}$$

Den 1-D inträngningslängden kan approximativt beräknas som inträngning utan gelning (Ekv 2.21) med insättning av gelinduktionstiden, vilket ger att

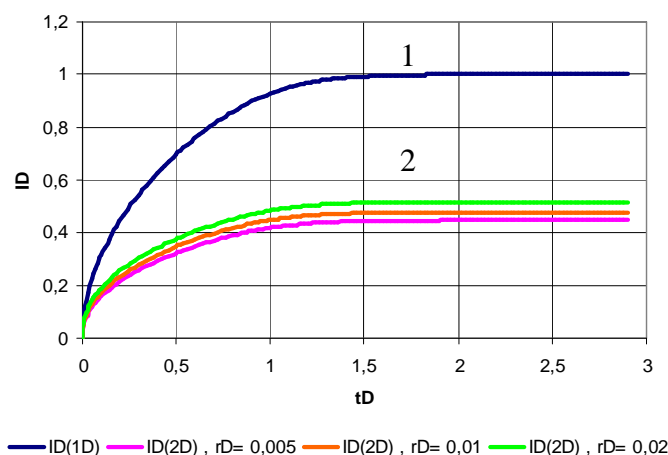
$$I_{1-D} = b \sqrt{\frac{\Delta p t_G}{6\mu_0}} \quad \text{Ekv 2.30}$$

eller

$$I_{1-D} = b \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{6}} \cdot \sqrt{\frac{t_G}{\mu_0}} \quad \text{Ekv 2.31}$$

När Ekv 2.30 delas upp i Ekv 2.31 ses att alla parametrar utom b är material- och injekteringsparametrar, av vilka material parametrarna relativt lätt kan bestämmas genom reologiska tester. Om hydrauliska tester utförs på bergsmassan kan en kritisksprickvidd genom exempelvis analys av paretofördelningar bestämmas. Denna beskriver minsta sprickapertur som behöver injekteras för att funktions- och inläckagekrav ska uppfyllas. Injekteringsövertrycket kan om inga begränsningar finns sättas till en nivå där en inträngning uppnås vilken ger en ekonomiskt rimlig injekteringsdesign.

När de dimensionslösa inträngningslängderna för det 1-D och 2-D fallet visas i en graf över tiden, ses att den 1-D inträngningen inte överstiger 1 och att den 2-D inträngningen stabiliserar sig runt cirka 0,45, se Figur 2.10.



Figur 2.10, dimensionslös inträngning. 1) dimensionslös 1-D inträngning
2) dimensionslös 2-D inträngning. (Funehag & Gustafson, 2006).

Detta innebär att den 2-D inträngningen kan beräknas som

$$I_{2-D} = 0,45 \cdot b \sqrt{\frac{\Delta p t_G}{6 \mu_0}} \quad \text{Ekv 2.32}$$

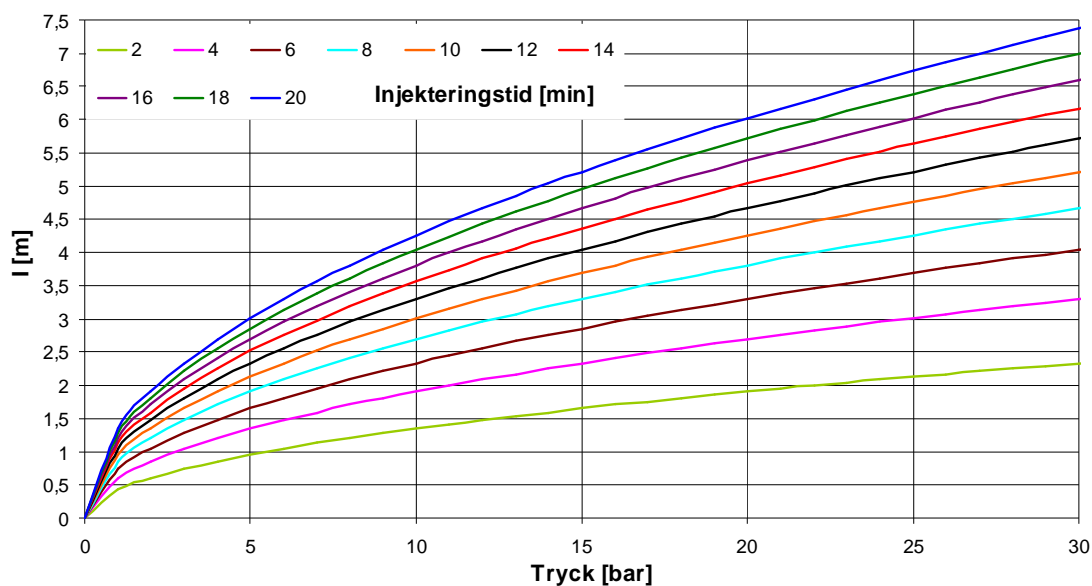
eller förenklat

$$I_{2-D} = 0,45 \cdot I_{1-D} \quad \text{Ekv 2.33}$$

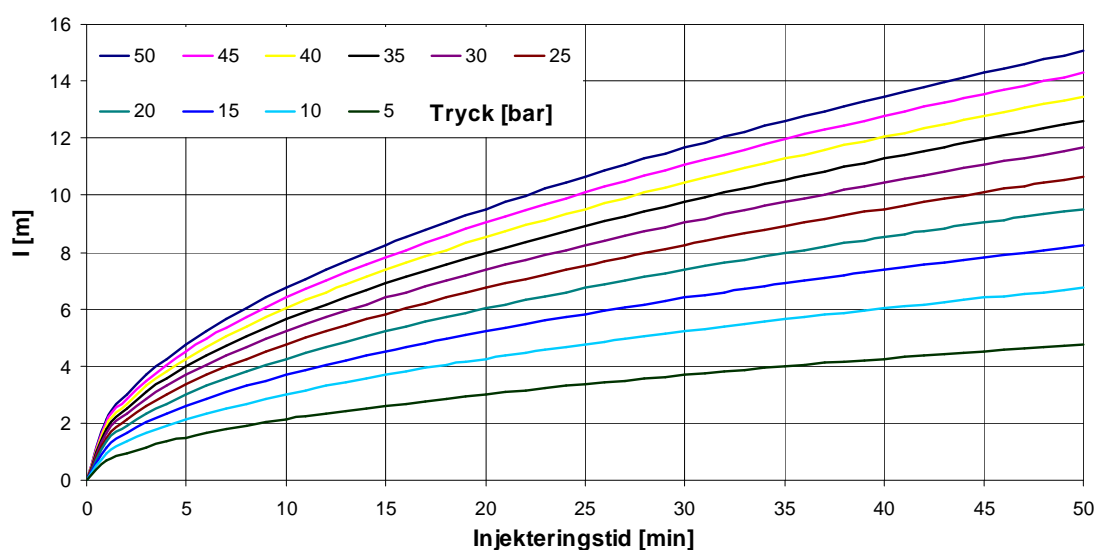
2.6.5 Känslighetsanalys

Stora avvikelser i inträngningslängd kan ses om parametrar som injekteringsövertryck eller injekteringstid förändras. I Figur 2.11 och Figur 2.12 visas den 2-D inträngningslängden, I , för silica sol i en 50 μm bred spricka, beräknad med tumregler beskrivna tidigare. Maximal injekteringstid är i Figur 2.11 satt till 20 min vilket är

halva geltiden och injekteringsövertrycket begränsas till 30 bar. Figur 2.12 är mer generell och tar ingen hänsyn till geltiden utan styrs enbart av sprickvidden.



Figur 2.11, beräknad inträngningslängd för en Newtonvätska med en geltid på 40 min i en 50 µm bred spricka vid olika injekteringstider.



Figur 2.12 beräknad inträngningslängd för en Newtonvätska i en 50 µm bred spricka vid olika injekteringsövertryck.

Injekteringsövertrycket och -tiden har lika stor betydelse för inträngningslängden. Det är emellertid tydligt att dess inverkan avtar med tiden och med ökat tryck, vilket kan ses genom minskade lutningar och avstånd mellan linjerna.

Känsligaste parametern som har störst inverkan på beräknad inträngningslängd är sprickaperturen, b . Vilken är direkt proportionell mot inträngningslängden, se Ekv 2.32. Avgörande för om korrekta inträngningsberäkningar ska kunna utföras är att b_{cr} nogga bestäms varför stor vikt bör läggas på detta. b_{cr} är den sprickvidd som behöver tätas för att önskad permeabilitetssänkning ska uppnås och kan utvärderas med exempelvis Paretofördelning, se Gustafson m.fl. (2004).

3 Studerade objekt

I följande avsnitt ges en introduktion till objekten som studeras i fälttesten, en beskrivning av deras geologiska förutsättningar och den design som gäller för injektering.

3.1 Förinjektering i Nygårdstunneln

Förinjekteringen i Nygårdstunneln utförs idag med cement (Inj 30) som injekteringsmedel på alla fronter. Försöket med silica sol som injekteringsmedel utförs i huvudtunneln söderifrån. En 100 m lång provsträcka ska utföras med injektering av silica sol kombinerat med cement. Tunneltaket injekteras med silica sol, vägg och sula med cement. Huvudsyftet är att täta tunneltak mot dropp, dock är ett reducerat inläckage i hela tunnelvärsnittet önskvärt. Försöket kommer att genomföras under våren 2007.

För att skapa underlag till injekteringsdesignen ges en geologisk beskrivning av området närmast tunnelsträckningen, en utvärdering av hydrauliska undersökningar samt en analys av reologiska tester på injekteringsbruket.

3.1.1 Geologisk beskrivning

Den cirka 3 km långa tunneln har sin högsta punkt vid norra påslaget, +27,6 möh (rök), och lutar med 2,56 promille mot söder där nivån är +20,5 möh (rök). Bergtäckningen, dvs. avståndet mellan tunneltak och ovanpåliggande bergets överyta varierar generellt mellan 15-60 m. Dock förekommer lägre bergtäckning i ett område mellan 437/300-437/500 där den varierar mellan 6-10 m och är som lägst 6-7 m i avsnitt 437/380-437/395. Högst bergtäckning förekommer vid 435/885 där mäktigheten är cirka 64 m (Bergsäker konsult AB, 1999).

Bergarter och dess strukturer

Berggrunden i området för tunneldrivningen kan delas in i två gnejstyper. En grå gnejs med granodioritisk-tonalitik sammansättning samt en gråröd gnejs med granitisk sammansättning. Den gråröda gnejsen dominerar i söder (436/690-) och den grå gnejsen i norr (-436/690), dock med ett undantag. Ett avsnitt mellan 434/995 och 435/260 är enligt Tyréns (2005) karterad som gråröd gnejs.

Inlagring av andra bergarter förekommer i båda gnejstyperna. Huvudsakligen bestående av metabasiter i form av linser, skivor och gångar men också skivor och linser av pegmatit och aplit i mindre omfattning. Metabasiterna domineras av mineral som amfiboler, plagioklas och biotit vilka samtliga är relativt lättvittrade, vilket innebär att vittringsprodukter som klorit och lera förekommer. En större förekomst av metabasiter har detekterats väster om tunneln mellan 436/750 och 436/980, de förekommer på olika nivåer och vanligtvis tillsammans med den röda gnejsen.

Båda gnejstyperna är till största delen tydligt förskiffrade. Innehållsmässigt skiljer dem sig emellan genom att den grå gnejsen utgörs av en lägre andel kalifältspat och en högre andel plagioklas och biotit. Den röda gnejsen har en förhöjd radioaktivitet (>30 μR) (SGU, 1981), vilket innebär att bergmaterialet ej bör användas vid betong-

tillverkning eller husgrundläggning. Detta problem finns inte för den grå gnejsen, dock förekommer ådergnejsomvandling i mindre omfattning.

Den dominerande förskiffringsriktningen stryker i N195-210° (NNÖ) och stupar mellan 15-50°. Ett antal sprickriktningar dominerar och de mest frekvent förekommande är (strykning (väderstreck) / stupning):

1. N70° (VNV) / 65-90°
2. N30° (NNV) / 80-90°
3. N210° (SSÖ) / 80-90°
4. N70-85° (ÖNÖ) / 65-90°
5. N200° (SSÖ) / 10-50°

Andra förekommande sprickriktningar är branta sprickor längs förskiffringen och i nord-sydlig riktning samt horisontella sprickor.

Svaghetszoner

Ett flertal svaghetszoner förekommer inom tunneldrivningsområdet. Huvudsakligen längs med förskiffringsriktningen, N0-20° (NNÖ), med flacka och medelbranta stupningar mot väster. Sprickzonerna är oftast smala (<5 m) och utgörs i regel av skivigt berg med inslag av uppkrossade partier.

Även ett mindre antal brantstående svaghetszoner i N250° (VSV) riktning och Ö-V riktning förekommer. Dessa med största delen blockigt berg, endast i enstaka fall bredare än 10 m, med måttlig-stor vattenföring och måttlig förekomst av leromvandling.

Utöver dessa förekommer svaghetszoner i NV strykning med medelbrant stupning mot SV med egenskaper liknande de ovan beskrivna brantstående zonerna.

Geohydrologi

Beräkningar visar att inläckaget till tunneln utan åtgärder skulle uppgå till cirka 5-6,7 l/min och 100 m tunnel. Tre olika områden med högre känslighet för grundvattenavsänkning har lokaliserats:

1. Vid tunnelpåslagen, 434/550 och 437/590.
2. Området med liten betäckning, 437/300-437/500.
3. Ett område vid Granhagen med fastigheter grundlagda på lera, 436/620-436/750.

Stigningsmätningar har utförts i de fyra kbh, en transmissivitet har beräknats utifrån dessa och redovisas i Tabell 1 nedan.

Tabell 1, transmissivitet i kbh utifrån stigningsmätningar.

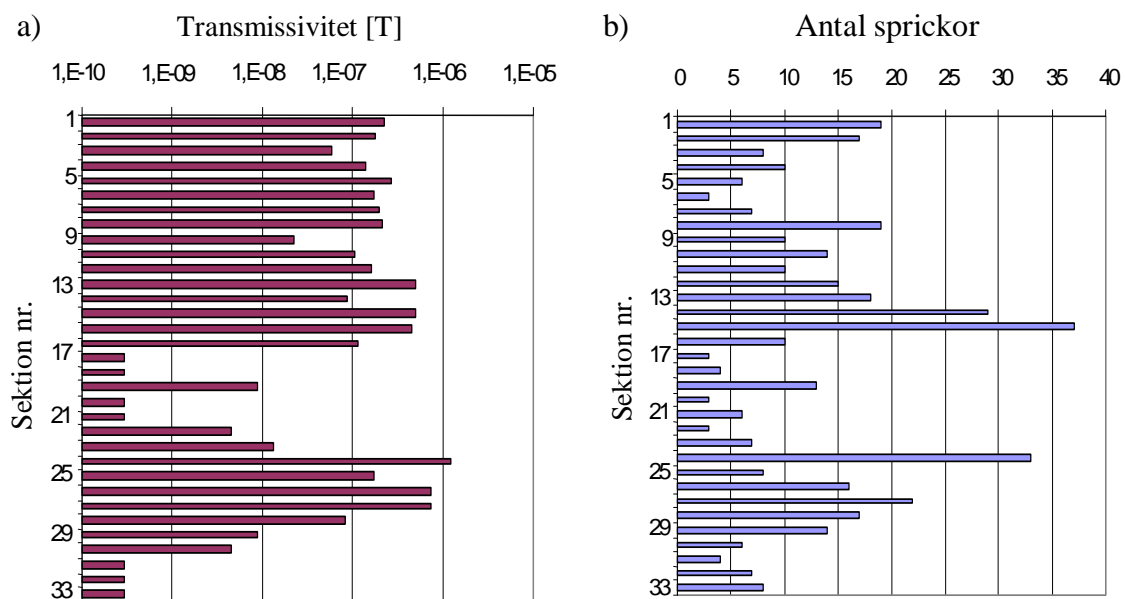
KBH	Transmissivitet [m^2/s]
1	$1 \cdot 10^{-5}$
2	$9 \cdot 10^{-6}$
3	$3 \cdot 10^{-6}$
4	$3 \cdot 10^{-6}$

Analys av brunnldata från området visar att mediankapaciteten är cirka 420 l/tim som motsvarar en transmissivitet på cirka $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, vilket stämmer väl överens med utvärderingarna av stigningsmätningarna.

3.1.2 Hydrauliska undersökningar

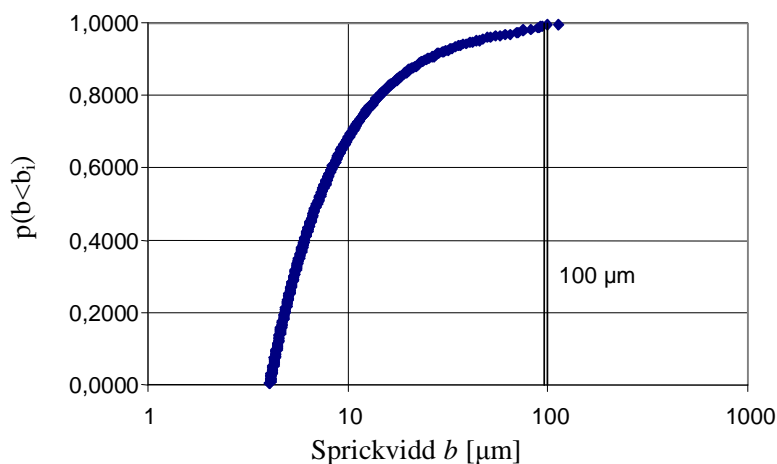
För bestämning av hydrauliska parametrar till injekteringsberäkningar utnyttjas 4st kbh utförda under förundersökningen. Samtliga med syfte att undersöka bergpartier med förmodad sämre bergkvalité. Sprickartering och manschettmätningar i tre meters sektioner är utförda för samtliga borrhål. Alla borrhål visar på att ett avsnitt nära markytan är mycket genomsläppligt, detta har dock bortsetts från i fortsatta analyser då det inte har ansetts representativt för bergmassan på tunnelnivå. En sammanslagning av resterande sektioner i samtliga borrhål genomförs vilket anses ge en representativ beskrivning av bergets hydrauliska egenskaper. Detta resulterar i 33 sektioner med känd sprickfrekvens och vattenförlust.

De hydrauliska mätningarna utvärderades med Moyes formel (Moye, 1967) och de öppna sprickorna vilka kan knytas till manschettmätningarna har lagts in i en databas. I Figur 3.1 kan uppmätta intervall transmissiviteter och sprickor per sektion ses. En viss likhet kan ses dem emellan, men korrelationen är inte fullständig. Sprickfrekvensen i medel är drygt 4 öppna sprickor per meter.



Figur 3.1, a) transmissivitet per 3 m sektion. b) sprickor per 3 m sektion (Gustafson & Butron, 2006).

För att kunna applicera dessa borrhålsdata på injekteringsberäkningar behöver en spricktransmissivitetsfördelning skapas. Närmre beskrivning av analysmetoden beskrivs i Gustafson m.fl. (2004). En sprickviddsfördelning (Figur 3.2) kan med denna metod skapas utifrån vattenförlustmätningar och dess samband med sprickvidder genom den kubiska lagen.



Figur 3.2, sprickviddsfördelning i Nygårdstunneln (Gustafson & Butron, 2006).

I Figur 3.2 ses också gränsen för vad som anses vara möjligt att penetrera med cement, $b_{min} = 0,1$ mm. Som kan ses är 99 % av sprickorna mindre än 0,1 mm vilket innebär att de inte kan injekteras med cement. Den procenten av sprickorna som är större än 0,1 mm står dock för nästan 60 % av inläckaget (Gustafson & Butron, 2006) vilket innebär att en stor reduktion av permeabiliteten kan uppnås med en cementinjektering. De kvarstående sprickorna strax under 0,1 mm är emellertid tillräckligt stora för att generera dropp i tunneln. Detta innebär att ett fintättningsmedel behövs för att säkra tunneln mot dropp.

3.1.3 Reologiska tester

För att dimensionera inträngning med en cementinjektering behövs information om brukets flytgräns, τ_0 , och viskositet, μ . Vidare är det viktigt att känna till andra egenskaper hos bruket som indirekt påverkar injekteringsdesignen men som är avgörande för ett lyckat injekteringsresultat. Exempel på dessa egenskaper är brukets blandning, blödning, flödes- och penetrationsförmåga. Syftet med undersökningarna är att uppdatera och/eller verifiera befintlig cementinjekteringsdesign för Nygårdstunneln samt notera arbetbarheten för bruket. Cementet som studeras är injektering 30 (Inj 30) med tillsatsmedlet SetControl 1 tillverkade av Cementa AB.

Metod

För att utvärdera brukets egenskaper genomförs fem olika tester som kan utföras i fält samt reometertest med Bohlin CVO200 vid Chalmers (se Bilaga A). De fem testerna för fält är mud-balance, filter-pump, marsh-cone, yield stick och separation test vilka alla utförs parallellt med reometertesterna på samma blandning. Dessa fem tester nyttjas även för en kontroll av bruket på plats vid tunneln i Nygård och vid labbtester för att avgöra vilka blandningar som ska testas med reometern.

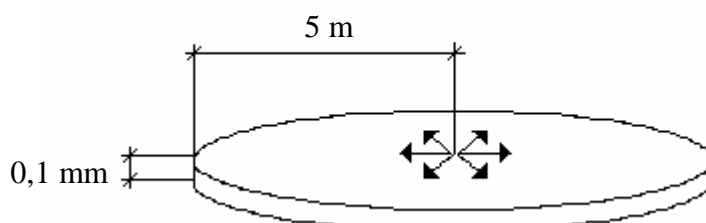
Resultat och analys

De första två laborietesterna med vct 1,0, en med 2,2 % SetControl och en utan, visade på en högre densitet jämfört med mätningen i Nygård. Detta märktes även då marsh-cone tiderna var något högre än förväntat. Därför höjdes vct till 1,15 för den tredje blandningen och tillsatsmedlet doserades på samma sätt som i Nygård, genom volymprocent av cementvikten. Detta gav samma densitet och marsh-cone tider som blandningen vid Nygård. Därmed bör det ifrågasättas hur väl kalibrerad vågen är som används vid uppvägning av cement och vatten i Nygård.

Alla utförda blandningar med vct 1,15 och 1,0 visade på en mycket hög blödning hos bruket (12-14 % efter 2 timmar) jämfört med blandningen från fälttestet (4,5 % efter 2 timmar). Anledningen till den höga separationen beror sannolikt till stor del på blandningsförfarandet. Kolloidblandaren vid Nygård ger en mer effektiv blandning och därmed mindre separation.

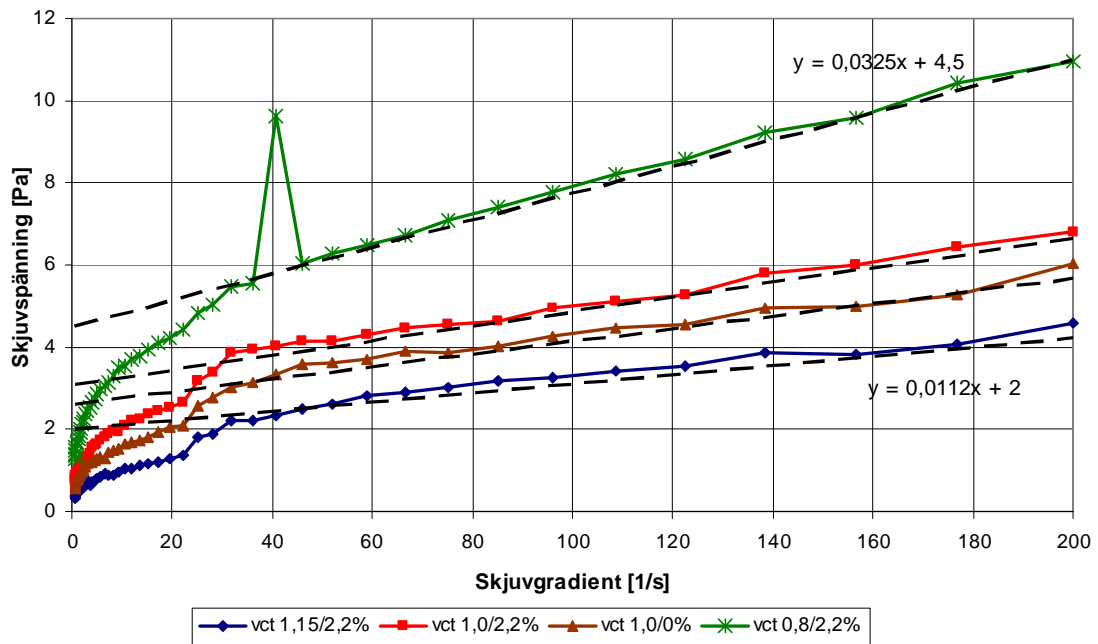
Att kolloidblandaren var effektiv märktes även då tester utförda med filterpumpen gjordes. Filterpumpen visade mycket goda penetrationsegenskaper för bruket blandat vid Nygård. När filterpumpen skulle användas till blandningarna gjorda på Chalmers, fastnade bruket i filtret, vilket gjorde det omöjligt att dra bruk genom pumpen. Den aktuella filtervidden byttes från 75 till 125 μm , dock utan några förbättrade penetrationsegenskaper.

Resultaten från de reologiska testerna med reometer efter 10 resp. 30 minuter redovisas i Figur 3.4 och Figur 3.5 nedan. Skjuvspänningen registreras för skjuvgradienter mellan 0,5 och 200 s^{-1} . Beräkningar visar att skjuvgradienten för ett relativt normalt injekteringsflöde, mellan 0,1-30 l/min i ett rör med diametern 2 cm, varierar mellan 0,5-160 s^{-1} . Liknande kan ses för skjuvgradienter i sprickor, t.ex. om en 0,1 mm bred spricka fylls radiellt till 5 m (se Figur 3.3) under 30 min erhålls skjuvgradienter mellan 1000 s^{-1} inledningsvis och avtagande med tiden ner till 10 s^{-1} (Barnes, Hutton & Walters, 1989). Även Houlsby (1990) menar att skjuvgradienten ligger i ett intervall mellan 0-200 s^{-1} vilket är i samma storleksordning som tidigare beräkningar visar på. Detta med innebörden att viskositeten också bör utvärderas inom detta intervall.

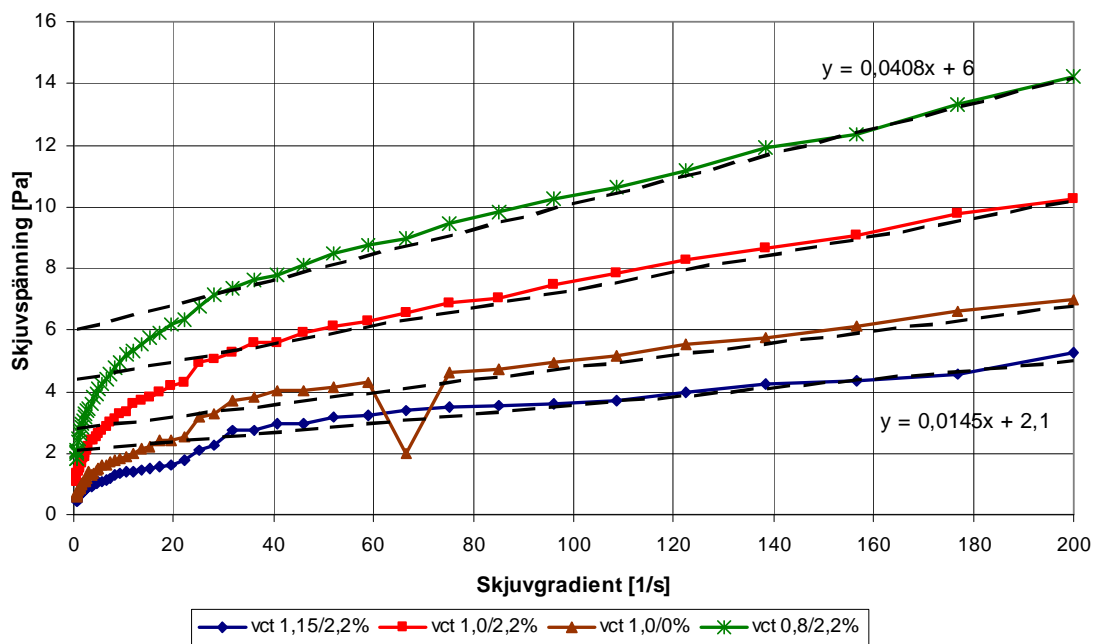


Figur 3.3, radielltflöde i en planparallell spricka

Till varje kurva har en trendlinje anpassats för den övre delen av intervallet (35-200 s^{-1}), detta eftersom injekteringen, som tidigare konstaterats, till största delen sker inom detta intervall. Flytgränsen utvärderas där trendlinjen skär y-axeln och lutningen på linjerna beskriver blandningarnas viskositet.



Figur 3.4, reometertest efter 10 minuter för de fyra olika blandningarna.



Figur 3.5, reometertest efter 30 minuter för de fyra olika blandningarna.

Alla flytgränser från de reologiska testerna finns redovisade i Tabell 2.

Tabell 2, resultat från laborietester utförda parallellt med reometertester. Tester utförda med filterpumpen redovisas inte, eftersom bruket inte passerade filtret. Blandning utfördes med Hobart blandare.

Blandning vct/ tillsatsmedel	Mud- balance [kg/m ³]	Marsh- cone [s]		Blödning [%]		Flytgräns från Yield stick [Pa]		Flytgräns från Reometer [Pa]	
	Direkt	10 min	30 min	1 h	2 h	10 min	30 min	10 min	30 min
1,15/2,2 %	1460	32	32	6	18	~0	0,01	2,0	2,1
1,0/2,2 %	1510	32	36	5	14	0,01-1	0,01-1	3,1	4,4
1,0/0 %	1510	33	33	7	13	0,01-1	0,01-1	2,6	2,8
0,8/2,2 %	1600	40	41	2	2,5	1,5	2	4,5	6,0

Efter 30 minuter har flytgränsen ökat förutom för blandningen med vct 1,15 och 1,0 utan tillsatsmedel, där flytgränsen är oförändrad. Flytgränsutvecklingen påverkas kraftigt av tillsatsmedlet. Blandningen med vct 1,0 och tillsatsmedel har ökat från 3,1 till 4,4 Pa efter 30 minuter, samtidigt som blandningen utan tillsatsmedel endast visar på en marginell förändring från 2,6 till 2,8 Pa.

Viskositeten efter 10 minuter är som lägst 11 mPas för blandningen med vct 1,15 och 33 mPas för blandningen med vct 0,8. Efter 30 minuter har viskositeten ökat till 15 mPas för vct 1,15 och 41 mPas för vct 0,8.

Flytgränsen skiljer avsevärt mellan yield stick och reometer, ett försök att kalibrera värdena från yield stick med reometern gick inte att utföra. Det finns flera skäl till varför yield stick visar felaktiga värden. Eftersom dessa pinnar är gjorda i trä, kommer de absorbera bruket när de sänks ned i blandningen. Detta medför att pinnarna blir tyngre, vilket ger felaktiga resultat vid nästa mätning. Efter upprepade mätningar blev en av pinnarna skev vilket också kan leda till felaktiga avläsningar. Tvärsnittsåren ökar hos pinnarna när de absorberar bruket, vilket leder till en lägre flytgräns jämfört med mätningarna från reometern. Pinnarna kan dock fortfarande användas i fält. Även om de registrerar en flytgräns runt 0,01 Pa, kan antagandet göras att den verkliga flytgränsen ligger runt 2-4 Pa.

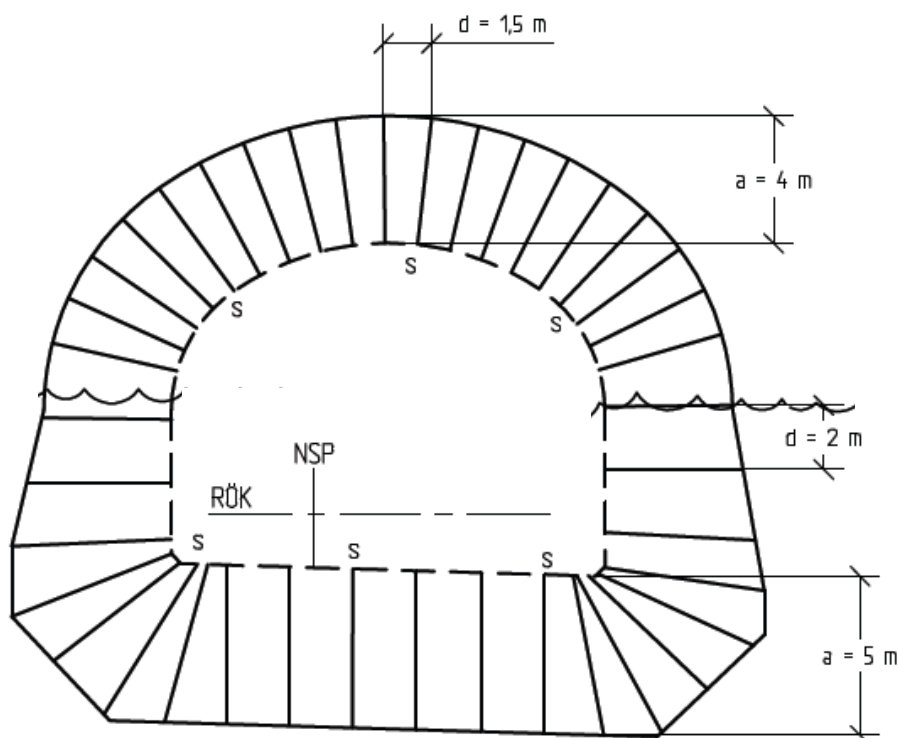
3.1.4 Injekteringsdesign

Designen baseras på en injekteringsdesign av Gunnar Gustafson, Chalmers tekniska högskola.

Skärmutformning

Injekteringshålen borrar enligt Figur 3.6, vilken är identisk med den injekteringsdesign som förinjekteringen utförts enligt i resterande tunnel. Borrhållängden var inledningsvis 18 m men har i dagsläget ökat till 24 m av LEMCON OY, detta för att effektivisera framdrivningen. Injekteringshålens överlapp

mellan två injekteringsskärmar ska motsvara minst en borrhäls diameter dvs. 6 m (Tyréns 2005).



Figur 3.6, injekteringsskärm (Tyréns, 2005).

Inträngningsberäkningar med cement

Kritisksprickvidd har för dimensionering av cementinjekteringen satts till 100 μm . Beräkningarna baseras på ett stabilt bruk med plasticerare baserat på IC 30, följande injekteringsparametrar gäller:

- Brukets flytgräns $\tau_0 = 1,4 \text{ Pa}$
- Binghamviskositet $\mu_g = 0,02 \text{ Pas}$
- Injekteringsövertryck $\Delta p = 2,5 \text{ MPa}$
- Kritisk sprickvidd $b_{cr} = 100 \mu\text{m}$

Den maximala inträngningslängden kan beräknas som

$$I_{\max} = \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot b_{\min} = \left(\frac{2,5 \cdot 10^6}{2 \cdot 1,4} \right) \cdot 100 \cdot 10^{-6} = 89 \text{ m}. \quad \text{Ekv 3.1}$$

Den karakteristiska injekteringstiden för detta bruk är

$$t_0 = \frac{6\Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2} = \frac{6 \cdot 2,5 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{1,4^2} = 2551 \text{ min}. \quad \text{Ekv 3.2}$$

Om en inträngning mellan borrhålen på 1 m + 0,5 m överlapp (50 % = 0,5 m) vill uppnås ger det en relativ inträngning i en 100 µm spricka på

$$I_D = \frac{I}{I_{\max}} = \frac{1,5}{89} = 0,0169. \quad \text{Ekv 3.3}$$

Om inträngningsfunktionerna i Gustafson & Stille (2005) används ger detta en dimensionslös injekteringstid av, $t_D = 0,00043$ och injekteringstiden,

$$t_{inj} = t_D \cdot t_0 = 0,00043 \cdot 2551 \approx 1,1 \text{ min.} \quad \text{Ekv 3.4}$$

Vilket innebär att cementinjekteringen inte är några problem med avseende på inträngning. Om cementinjekteringen utförs systematiskt från botten och upp kan cementinjekteringshålen längst upp på tunnelväggarna utnyttjas för grovtätning av taket. För att täta de stora sprickorna (>100 µm) i taket fodras en inträngning på minst 7 m (halva spännvidden). Med beräkningsgång enligt ovanstående fås en erforderlig injekteringstid av 25 min.

Inträngningsberäkningar med silica sol

Kritisksprickvidd har för dimensionering av silica sol injekteringen satts till 14 µm. Detta för att syftet med injekteringen är att reducera dropp i så stor omfattning som möjligt och 14 µm är den teoretiskt minsta sprickvidd som silica sol med säkerhet kan penetrera. Beräkningarna baseras på den silica sol som mest data och erfarenhet finns för, Meyco MP320. Andra förutsättningar för följande inträngningsberäkningar listas nedan:

- Blandningsförhållande 6:1 med 41 min geltid, 10 % NaCl används som accelator
- Silica sols initialviskositet $\mu_0 = 0,0055 \text{ Pas}$
- Gelinduktionstid $t_G \approx 1056 \text{ s} = 17,6 \text{ min}$
- Injekteringsövertryck $\Delta p = 2,5 \text{ MPa}$
- Borrhålsradie $r_w = 0,028 \text{ m}$
- Kritisk sprickvidd $b_{cr} = 14 \text{ µm}$

En tumregel ger den 1D inträngningen,

$$I_{1D} = b \sqrt{\frac{\Delta p \cdot t_G}{6 \cdot \mu_0}} = 14 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{2,5 \cdot 10^6 \cdot 1056}{6 \cdot 0,0055}} = 3,96 \text{ m.} \quad \text{Ekv 3.5}$$

2D inträngning kan beräknas som,

$$I_{2D} = 0,45 \cdot I_{1D} = 0,45 \cdot 3,96 \text{ m} = 1,78 \text{ m.} \quad \text{Ekv 3.6}$$

En inträngningslängd på 1,78 m innebär ett överlapp på över 100 % mellan injekteringshålen. 50 % överlapp är enligt Gustafson m.fl. (2004) rekommenderat att dimensionera för, för att uppnå tillfredsställande tätning. Detta innebär att

injekteringsövertrycket eller geltiden kan sänkas något för att minska inträngningslängden. I detta fall är dock syftet att reducerar dropp i största möjliga omfattning viktigast vilket innebär att en överdimensionering inledningsvis är bra. Om den inledande injekteringen visar på orimligt stora flöden ska i första hand injekteringsövertrycket justeras för att minska bruksåtgången och i andra hand blandningsförhållandet.

Sammanfattning av injekteringsförloppet

- Borrning av skärm enligt nuvarande design för cementinjektering.
- Blandningsförhållande, geltid = 41 min (6:1)
- På varje sats testas geltiden genom koppförsök (OBS, gäller endast silica sol).
- Injekterings övertryck, $\Delta p = 2,5$ MPa.
- Tid mellan blandningsstart och pumpstart ska vara max 5 min, efter 10 min slängs satsen (OBS, gäller endast silica sol).
- Injekteringstid väljs till halva geltiden, 21 min. Injekteringstid startar då ett övertryck på 2,5 MPa har uppnåtts.

Kontrollprogram

- Vattenförlustmätningar innan injektering utförs i samtliga injekteringshål med ett provtryck på 0,2 MPa över grundvattentryck under 5 min/injekteringshål.
- Vattenförlustmätning efter injektering utförs i kontrollhål med ett provtryck på 0,2 MPa under 5 min/injekteringshål. Borrning av kontrollhål sker i split spacing mellan mest vattenförande hål enligt vattenförlust innan injektering. Kontrollhålen borras 1 m kortare än injekteringshålerna (≥ 6 st/skärm, 4 i tak och 2 i vägg).

3.2 Efterinjektering i Öxneredstunneln

Efter utsprängning och förstärkning av Öxneredstunneln kunde konstateras att ett otillfredsställande stort antal dropp kvarstod vilket i framtiden skulle vålla problem för järnvägstrafiken. Förinjektering med mikrocement och viss efterinjektering med mikrocement och polyuretan samt montering av dränmattor i stora delar av tunneln har inte minskat inläckaget i den omfattning som krävs. Dropp från tak på installationer och spår med isbildning under vintern som följd innebär att tunneln inte kan öppnas för trafik innan åtgärd.

För att minska behovet av dränmattor beslöts att en efterinjektering skulle utföras på tre avsnitt av tunneln kallade etapp 1, 2 och 3, plus en extra injektering på delar av etapp 2 med syfte att täta synligt dropp. En analys baserad på vattenförluster i injekteringshål och kontrollhål var planerad att utföras i denna rapport. Tidspress under tunnelprojektets slutförande ledde till bristfälligt underlag till utvärdering från injekteringen. Bl.a. utfördes betydligt färre kontrollhål än tidigare planerat, dessutom saknades pumplogg (Häny-logg) från injekteringen. Detta ledde till att en utvärdering av injekteringen inte kunde utföras som planerat. En mindre analys genomförs baserade på de data från injekteringsprotokoll som finns tillgängliga.

Utvärderingarna och analyser av bergsmassans egenskaper och silica sols inträngning koncentreras till den del av utrymningstunneln, Paradiset, som ska efterinjekteras under våren 2007. Området som ska efterinjekteras i Paradiset har tidigare injekterats ett flertal gånger pga. stort inläckage. Enligt Ellison (2006) har totalt cirka 91 ton mikrocement samt en mindre mängd kembruk (polyuretan) injekterats. Dock är det bara i ett område mellan 0/080 och 0/100 som större mängder bruk har gått åt.

Tätningen av för- och efterinjekteringen har inte blivit tillräckligt bra för att anses som tillfredsställande. Inläckaget är fortfarande omfattande vilket kan ses i den droppkartering som utfördes, mätningar visar att vissa punktläckage genererar så mycket som över 0,5 l/min (Bilaga B, Droppkartering).

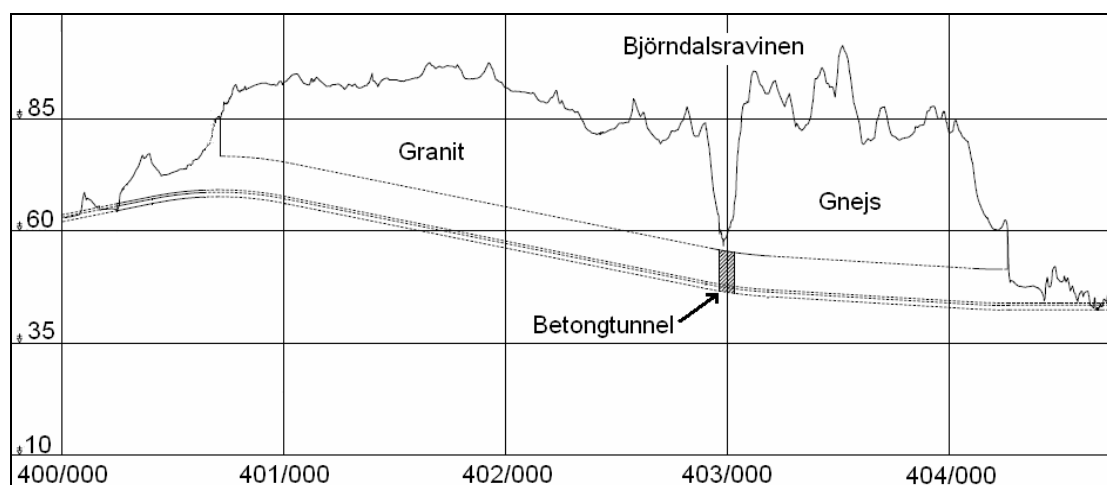
För att skapa underlag för injekteringsdesignen beskrivs geologin i området närmst tunnelsträckningen med en mer detaljerad studie av område kring räddningstunneln Paradiset. Ett fälttest med syfte att verifiera inträngningslängden av silica sol utfördes i södra parallelltunneln inte långt från området som ska efterinjekteras. Resultat från hydrauliska undersökningar vid försöket utnyttjas vid dimensionering av injekteringsdesignen, en mer detaljerad beskrivning av testet ges i avsnitt 3.2.3.

3.2.1 Geologisk beskrivning

Bergarter och dess strukturer

Berggrunden i området för tunneldrivningen kan delas in i två huvudsakliga bergarter, gnejs i söder och granit i norr. Övergången mellan bergarterna sker huvudsakligen i området kring Björndalsravinen. Cirka 1200 m tunnel söderut från ravinen sträcker sig genom gnejs och cirka 2200 m tunnel norrut genom granit. I Björndalsravinen saknas bergtäckning och tunneln utgörs här istället av en ren betongtunnel, se Figur 3.7 (SWECO VBB VIAK AB, 1995).

I gnejsen kan ett flertal olika gångar med granit, granodiorit, pegmatit och applit uppträda. I vissa partier kan också områden med migmatitiserad, dvs. uppsmält eller omvandlad gnejs förekomma. En viss förekomst av grönsten i form av linser eller tunna skivor finns och dess kontakt med omgivande berg kan vara helt eller delvis leromvandlad. Grönstenen är dock svår att lokalisera då den uppträder oregelbundet både avseende djup och plan.



Figur 3.7, profil spår-tunnel

Gnejsen är vid södra tunnelmynningen delvis starkt förskiffrad med förskiffringsriktning i huvudsak parallell med Göta älvs dalgång, N15-30°, med en stupning på mellan 30-60° mot väster. Förskiffringsgraden avtar mot norr och vrider mot en öst-västlig riktning med brantare stupning, 60-90° både söder och norrut. Områden förkommer som avviker mot detta vilket tyder på att en viss plastisk veckning har förekommit. Mellan 403/750 och 403/970 är gnejsen delvis veckad och inslag av pegmatitgångar samt grönstenskroppar har detekterats (SWECO VBB VIAK AB, 1995).

Graniten är mer eller mindre ögonförande och varierar från relativt massformig till att vara förgnejsad. En viss förekomst av pegmatit har också funnits vid kärnkarteringen. Graniten uppvisar en ökad förskiffringsgrad mot norr i tunnelsträckningen. Förskiffringsriktningen är vid Björndalsravinen öst-västlig liksom gnejsen och stupar brant mot norr. Längre norrut under NÄL (cirka 401/500) är förskiffringsriktningen mer nord-sydlig med brant stupning mot väster. Ytterligare längre norrut avviker förskiffringsriktningen något mot öster med västlig stupning (SWECO VBB VIAK AB, 1995).

Geohydrologi

Både i gnejsen och graniten förekommer jordfyllda dalar och förmodade svaghetszoner på ett fåtal ställen där vattenförande zoner kan förväntas. Inom gnejsen finns två jordfyllda lågpunkter vid 403/350 och 404/200. I graniten finns jordfyllda områden eller svaghetszoner vid 402/400 och 402/700. Dock kan det inte uteslutas att vattenförande sprickor kan förekomma längsmed hela tunnelsträckningen.

Vattenförlustmätningar i kärnborrhål ger en uppfattning om storleken på bergmassans permeabilitet. Konduktiviteten ligger enligt dessa mätningar mellan $3 \cdot 10^{-7}$ och $3 \cdot 10^{-8}$ m/s. Enligt (SWECO VBB VIAK AB, 1995) överskattas normalt bergets verkliga permeabilitet med denna metod varför representativa värden för graniten och gnejsen har valts till $4 \cdot 10^{-8}$ respektive $2 \cdot 10^{-8}$ m/s.

3.2.2 Geologiska egenskaper i Paradiset

Paradiset är belägen söder om Björndalsravinen och sträcker sig enbart genom den gnejs som beskrevs i avsnittet ovan. Bergtäckningen för tunnelsträckan som ska efterinjekteras är som lägst mellan 0/040-0/060, där är det cirka 19 m berg med ett ovanpåliggande jordlager med en mäktighet av cirka 4,5 m. Vertikalt ovan detta avsnitt löper en sänka vinkelrät mot tunneln med rinnande vatten på ytan, se Figur 3.8. Ett antagande görs att det i förlängningen nedåt av denna sänka finns en vattenförande sprickzon vilken kan vara orsaken till de tätningsproblem som uppstått.

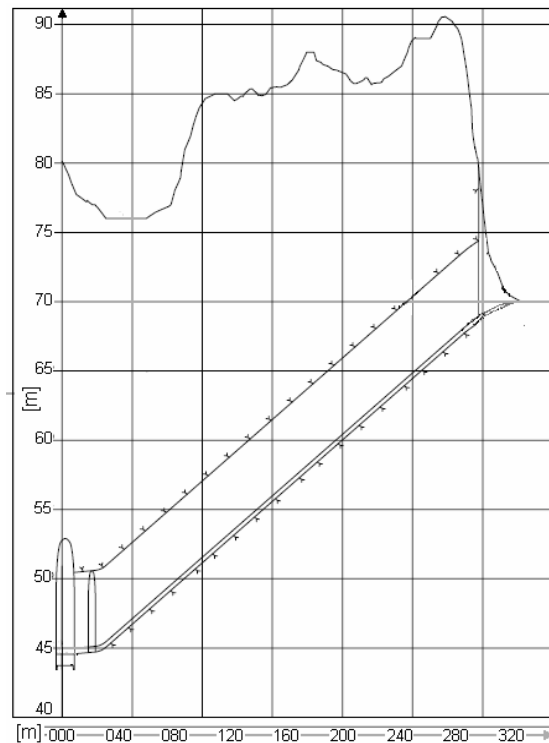
Ett grundvattentryckmätningshål beläget i huvudtunneln nära Paradiset visar under september på ett grundvattentryck av 3,15 bar dvs. 32 mvp. Med tanke på ovanliggande jord- och bergtäcke är det högre än förväntat. Dock visar övriga mätthål i tunneln på grundvattentryck mellan 1,5-2 bar, vilka stämmer bättre överens med ovanpåliggande jord- och bergtäcke. För att verifiera grundvattentrycket i Paradiset utförs mätningar i första injekteringsskärmen.

Ett område mellan 0/080-0/090 uppvisar mycket stort inläckage i väggar och tak. Inläckaget är dock inte enbart begränsat till detta område utan dropp finns längs med hela tunnelsträckningen i mer eller mindre omfattning (Bilaga B, Droppkartering).

Ett område med ytlig amfibolit finns i trakten av räddningstunneln (SGU, 1987). Amfibolit är en basisk bergart, vilket innebär att den är mer ”seg” i jämförelse med gnejs som tillhör de sura bergarterna vilka är mer spröda.

Allmänt vid tunneldrivning är att amfibolitstråk ofta är mer vattenförande och kopplas samman med problemområden.

Sprickor är karterade i och ovan Paradiset (Bilaga C, Sprickkartering) och visar på huvudsprickriktningar i N140° (SÖ) och N40° (NÖ) med stupningarna som varierar mellan 40° - 70° samt 40° - 60° för respektive huvudsprickriktning. Sprickgruppen med riktning N140° skär tunneln vinkelrät och de med riktning N40° löper nästintill parallellt med tunneln.



Figur 3.8, profil Paradiset

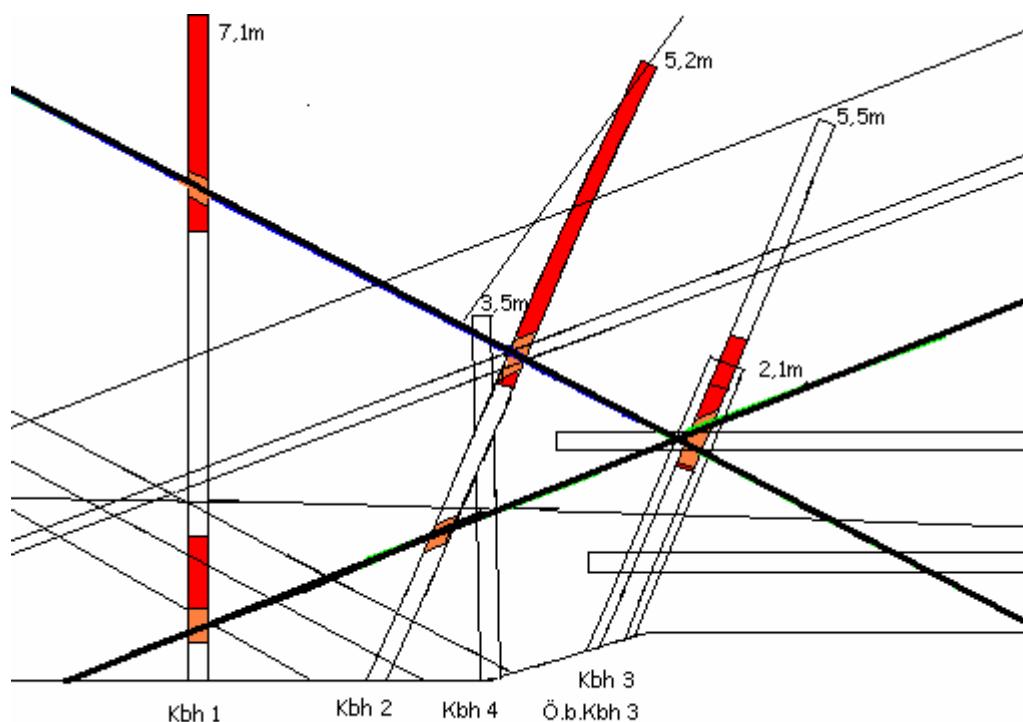
3.2.3 Fälttest, injektering med silica sol

Injekteringsförsök och hydrauliska tester genomförs i samarbete med ett annat examensarbete på Chalmers av geologstuderande Mikael Hellström som syftar till att verifiera inträngningslängden av silica sol. Hellström har karterat tunnelavsnittet, planerat borrning och karterat borrkärnorna. Efter injekteringen fortsätter Hellström med ytterligare analyser för att bekräfta inträngningslängden, se Hellström (2007). Denna rapport behandlar hydrauliska tester innan och efter injektering samt design av injekteringen. De hydrauliska testerna resulterar i en utvärdering av bergmassans egenskaper inför injekteringsförsöket. Fälttestet ger dessutom indata till en injekteringsdesign i räddningstunneln Paradiset belägen cirka 500m längre söderut.

Utvärdering av tunnelkartering och okulärbesiktning visade att ett lämpligt avsnitt för fälttestet med silica sol fanns i södra parallelltunneln vid sektion 403/150. Kriterier för att bergsmassan skulle anses som lämplig för testet var, få men tydliga sprickplan, dvs. relativt sprickfattigt och ingen sprutbetong. Detta för att lättare kunna särskilja de sprickor som finns och kunna skapa en konceptuellmodell av sprickmönstret. Att området inte är täckt med sprutbetong är nödvändigt för att en sprickkartering ska kunna genomföras.

Metod

Tre stycken kärnborrhål (kbh 1, 2 och 3) borrar innan injektering (se Figur 3.9). Vattenförlusttester för att utvärdera bergsmassans egenskaper och koppstester för att kalibrera silica solens geltider genomförs, se Bilaga D. Data från dessa tester ligger till grund för injekteringsparametrar.



Figur 3.9, konceptuellmodell över kbh 1-4 med borrhålslängder, spricksystemet och tidigare injekteringshål. Avsnitt markerade med röd färg representerar sektioner som uppvisar vattenförlust (Hellström, 2007).

Innan injektering beslöts att samband mellan injekteringshålen skulle säkerställas för bästa resultat. Detta genom vattenförlusttester med infärgning i vattnet, se Bilaga D.

Efter att samband mellan borrhålen säkerställdes inleds injekteringen i kbh 1. För att förhindra påverkan av kbh 2 och 3 under injektering utrustas dessa med latexstrumpor som blåses upp med kvävgas. Strumporna trycksätts med ett högre tryck än injekteringstrycket och förhindrar därmed bruket att fylla borrhålen. Åtgärden med strumporna motverkar påverkan på bergsmassan av borrhålen vilket innebär att injekteringen genomförs i ett jungfruligt berg med bibehållna egenskaper och förutsättningar. Injekteringen utförs med följande parametrar.

- Blandningsförhållande 60 min geltid (7:1), 10 % NaCl används som accelator
- Silica sols initialviskositet $\mu_0 = 0,0055 \text{ Pas}$
- Gelinduktionstid $t_G \approx 1836 \text{ s} = 30,6 \text{ min}$
- Injekteringsövertryck $\Delta p = 0,65 \text{ MPa}$
- Borrhålsradie $r_w = 0,028 \text{ m}$
- Kritisk sprickvidd $b_{cr} = 31 \mu\text{m}$

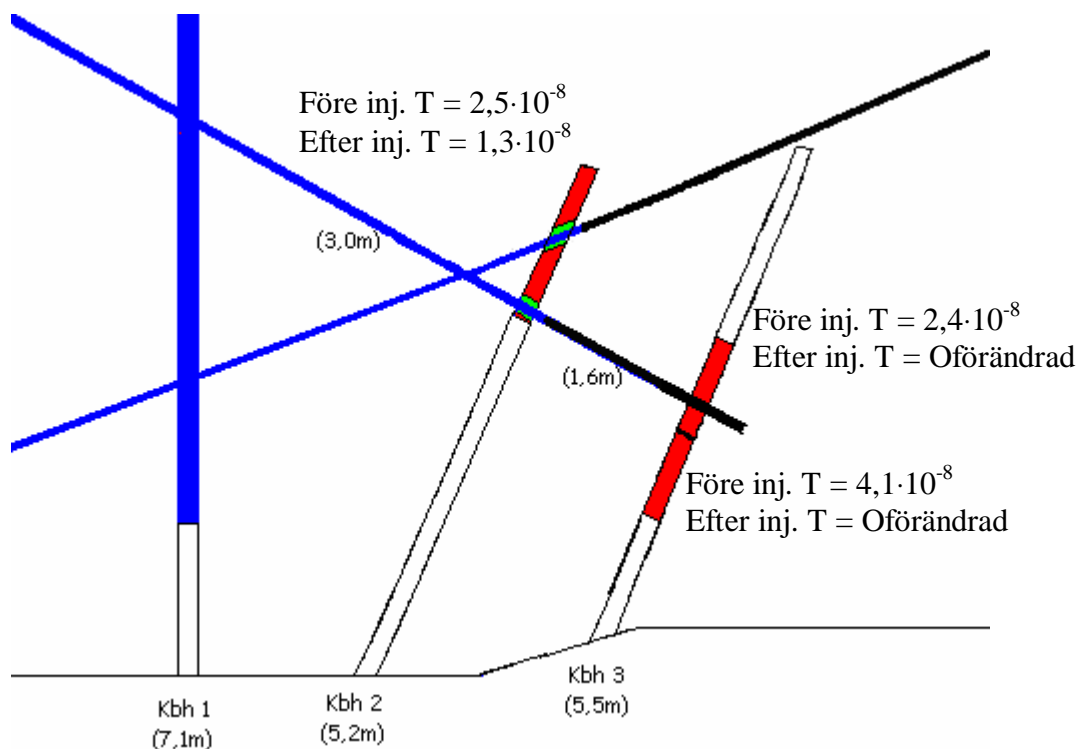
Vilket ger en 1-D resp. 2-D inträngning på 6,1 resp. 2,73 m.

Efter utförd injektering utförs vattenförlustmätningar i kbh 2 och 3 vilket nyttjas vid en jämförelse mellan transmissiviteter innan och efter injektering. Detta kan ge en indikation på framträngning av silica sol om en permeabilitetssänkning registreras.

Avslutningsvis överborras kbh 3 och ett nytt kbh (kbh 4) borrar mellan kbh 2 och 3 (se Figur 3.9) för analys av silica sols inträngningsförmåga.

Resultat

Vattenförlusterna innan och efter injektering presenteras i Figur 3.10 nedan. Antagen framträngning av silica sol baserad på en minskning i transmissivitet, T , illustreras av blå färg. Sektioner med registrerad vattenförlust illustreras med röd färg.



Figur 3.10, jämförelse mellan transmissivitet innan och efter injektering i de rödmarkerade sektionerna (Hellström, 2007).

Vattenförlusterna visar på att silica sol trängt fram till kbh 2 i och med en minskad T , men inte till kbh 3 eftersom T här är oförändrad. Inträngningslängden, L , som uppnåtts är därför mer än 3 m men mindre än 4,6 m, se Figur 3.10. Beräknad L , 1-D resp. 2-D, är 6,12 resp. 2,73 m. Vilket innebär en överskattning av L med ett endimensionellt beräkningsfall och en underskattning av L med ett tvådimensionellt beräkningsfall.

3.2.4 Injekteringsdesign

Som underlag för dimensionering av efterinjektering används data från fälttest i parallelltunnel vid 403/150, vilket pga. brist på kartering av tidigare utförda kärnborrhål är bästa data som finns tillgänglig. Sprickkarteringen från fälttestet jämförs med sprickorna karterade i Paradiset för att bekräfta undersökningsresultaten från fälttestets relevans vid applicering på efterinjekteringsproblemet. Jämförelsen visar att sprickkarteringarna stämmer väl överens och slutsatsen dras att data från fälttestet kan användas vid dimensioneringsberäkningar för Paradisets efterinjektering.

En efterinjekteringsdesign av Tommy Ellison, BESAB (Bilaga E), ligger till grund för designen. Denna föreslås användas de 20 första metrarna (0/030-0/050) och därefter

analyseras mha. det kontrollprogram för utvärdering av pågående injektering som sammanställts, se Bilaga F. Efter utvärdering av de inledande 20 metrarna utarbetas en uppdaterad design för resterande efterinjektering. Ett preliminärt förslag på uppdaterad design presenteras nedan.

Inträngningsberäkningar med silica sol

En sprickvidd på 20 μm har antagits för denna preliminära design vilket ger rimliga inträngningslängder i kombination med det begränsade injekteringsövertrycket. Emellertid styrks antagandet i och med att utvärderingar av vattenförlustmätning från fälttestet i parallelltunneln visar på aperturer i samma storleksordning. Utvärdering av tillgängliga data fortsätter parallellt med inledande efterinjektering för justering av antagna parametrar. Om inget annat anges gäller samma förutsättningar som under inledande efterinjektering, enligt Bilaga E.

Beräkningarna baseras på den silica sol som mest data och erfarenhet finns för, Meyco MP320. Andra förutsättningar för följande inträngningsberäkningar listas nedan:

- Blandningsförhållande 60 min geltid (7:1), 10 % NaCl används som accelator
- Silica sols initialviskositet $\mu_0 = 0,0055 \text{ Pas}$
- Gelinduktionstid $t_G \approx 1836 \text{ s} = 30,6 \text{ min}$
- Injekteringsövertryck $\Delta p = 1,4 \text{ MPa}$
- Borrhålsradie $r_w = 0,028 \text{ m}$
- Kritisk sprickvidd $b_{cr} = 20 \mu\text{m}$

En tumregel ger den 1-D inträngningen till,

$$I_{1D} = b \sqrt{\frac{\Delta p \cdot t_G}{6 \cdot \mu_0}} = 20 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{1,4 \cdot 10^6 \cdot 1836}{6 \cdot 0,0055}} = 5,61 \text{ m}. \quad \text{Ekv 3.7}$$

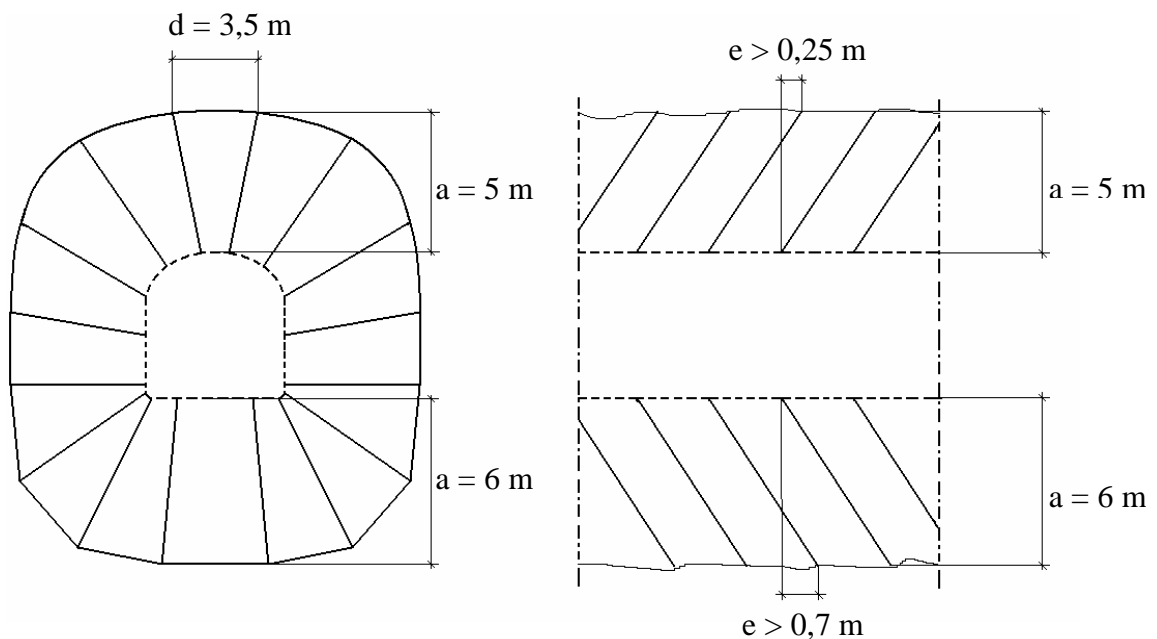
2D inträngning kan beräknas som,

$$I_{2D} = 0,45 \cdot I_{1D} = 0,45 \cdot 5,61 \text{ m} = 2,59 \text{ m}. \quad \text{Ekv 3.8}$$

En skillnad i jämförelse med designen av Ellison, Bilaga E, är att en längre geltid används, 60 istället för 45 min.

Skärmutformning

Ett överlapp på 50 % mellan skärmarna är önskvärt (Gustafson m.fl., 2004). Med en inträngningslängd på 2,59 m ges att max spetsavstånd blir 3,75 m, ett spetsavstånd på 3,5 m väljs för att vara på säkra sidan, se Figur 3.11. Om den inledande injekteringen visar på orimligt stora flöden ska i första hand injekteringsövertrycket justeras.



Figur 3.11, injekteringsskärm, Paradiset.

Skillnaden mot design av Ellison, Bilaga E, är en något större lutning av injekteringshålarna mot ökande sektion. c/c -avstånden i denna design ligger mellan de förslag som anges av Ellison för avsnitt med olika Q -värden. Antalet injekteringshål är 16st i denna design jämfört med 13-20st i Ellisons design.

Aktiv design

I inledande design utförd av Ellison, enligt Bilaga E, föreslås att ev. förändringar i designen ska ske i skärmgeometrin. Om stora bruksvolymerna injekteras ökas hålavstånden till nästkommande skärm. Dessutom föreslås tre olika designer för avsnitt med skilda Q -värden. Vid låga Q -värden ($\sim 0,1$) är c/c -avståndet 2,5 m och vid högre Q -värden (> 2) glesas c/c -avståndet ut till 4,0 m.

I denna design föreslås en skärmgeometri för hela tunneln med ev. förändringar i första hand av övriga injekteringsparametrar som injekteringsövertryck och blandningsförhållande. Injekteringen inleds med föreslagna tryck, injekteringstider och blandningsförhållande samt skärmgeometri enligt Figur 3.11. Förändringar av designen baseras på analyser av vattenförlust före och efter injektering samt injekterade bruksvolymerna. Ett kontrollprogram för uppföljning och insamling av data för uppdaterad design kan ses i Bilaga F.

Om vattenförlusterna innan injektering tyder på lätt permeabelt berg, kan geltid och injekteringsövertryck minskas för att bruksåtgången inte ska bli orimligt stor. Samma sak gäller omvänt, när liten vattenförlust registreras kan parametrarna ökas. Viktigt är att parametrarna inte ändras i för stor omfattning utan att kontrollberäkningar av inträngningslängden utförs. Jämförelsen mellan vattenförlusterna innan resp. efter injekteringen ger en indikation på att beräknad inträngningslängd stämmer genom minskade förluster. Om inte bör förändringar i designen utföras för att en längre inträngningslängd ska uppnås, som t.ex. ökning av tryck och geltid.

Sammanfattning av injekteringsförloppet

Om inget annat anges gäller samma förutsättningar som under inledande efterinjektering, enligt Ellison, Bilaga E.

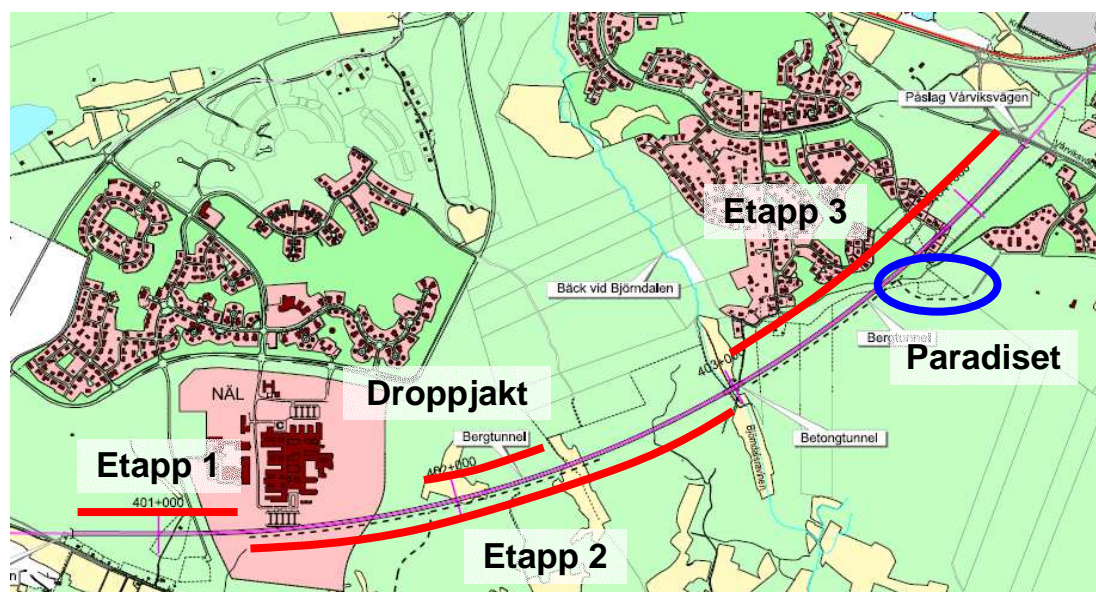
- Samtliga injekteringshål borraras med en vinkel på 1:1,5 - 1:2 mot ökande sektion.
- *c/c*-avstånd väljs till 3 m, vilket ger ett max spetsavstånd på cirka 3,5 m som motsvara cirka 50 % överlapp av inträngningslängden, se Figur 3.11.
- Skärmavstånd väljs till 2,5 m, vilket ger ett överlapp på cirka 0,25 m vid lutning 1:2 och cirka 0,9 m vid 1:1,5 för injektering i väggar och tak. Överlapp för botteninjekteringen blir större pga. längre injekteringshål, se Figur 3.11.
- Injekteringsövertryck, $\Delta p = 1,4$ MPa. Trycket ska uppnås på så kort tid som utrustning och mothållande tryck tillåter och därefter bibehållas injekteringstiden ut.
- Blandningsförhållande, geltid = 60 min (7:1, måste kalibreras)
- Injekteringstid väljs till halva geltiden, 30 min. Injekteringstid startar då ett övertryck på 1,4 MPa har uppnåtts.
- Tid mellan blandningsstart och pumpstart ska vara max 5 min, efter 10 min slängs satsen.

Uppdaterad design för en mer vattenförande zon baseras på studie av lognormalfördelning av vattenförlustmätningar från kontroll program enligt Bilaga F. Parametrar som blir aktuella att ändra är i första hand tryck och geltid samt eventuellt *c/c*-avstånd och skärmavstånd.

4 Utvärdering av injektering i Öxneredstunneln

Pga. tidsbrist från Banverkets sida utförs efterinjekteringen i räddningstunneln Paradiset (se Figur 4.1) först under våren 2007. Analys och utvärdering av injekteringen där är därför inte möjlig eftersom examensarbetet ifråga enbart sträcker sig över hösten 2006.

En utvärdering av utförd efterinjektering i huvudtunneln, kallade etapp 1, 2, 3 samt droppjakt i etapp 2, utförs i följande avsnitt (se Figur 4.1). Analysen baseras på data från injekteringsförloppet, droppkartering före och efter samt ev. förändringar i grundvattentryck och totalt inläckage i tunnel.



Figur 4.1, efterinjekterings etapper i huvudtunnel samt Paradiset (SWECO VBB VIAK AB, 1995).

Två olika utvärderingar utförs, en av injekteringsförloppet samt en före/efter analys av förändringar i grundvattentryck, inläckage och synliga dropp i tunneln.

4.1 Injekteringsförlopp

Data från injekteringsförlopp i form av injekterad volym/borrhål jämförs med borrhålsvolymen. Detta kan ge en indikation på huruvida injekteringsmedlet har lyckats penetrera sprickor i bergsmassan eller ej.

4.1.1 Resultat

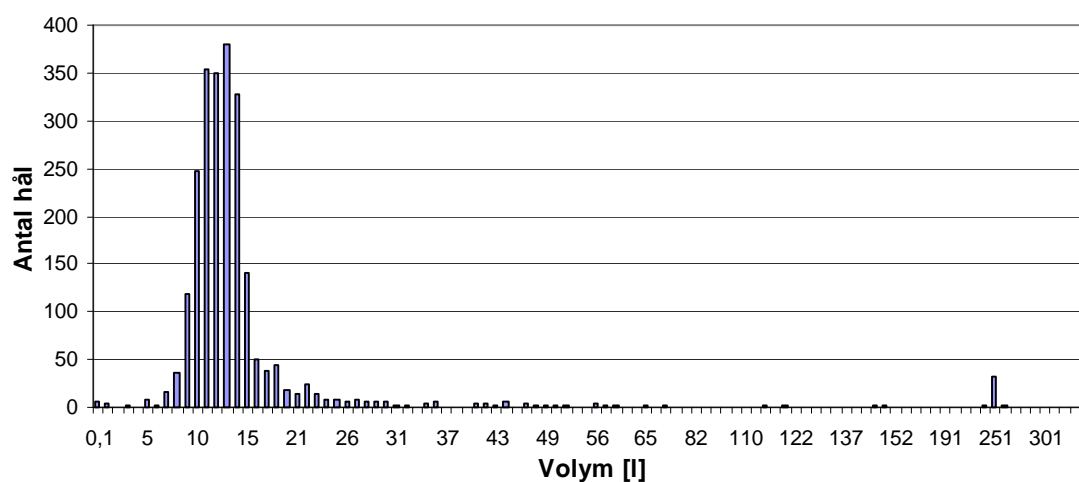
Ur injekteringsprotokoll från efterinjekteringen utförd av BESAB, fås att borrhålslängder mellan 5 och 6 m har använts. Vilket innebär att borrhålsvolymen, exklusive 0,5 m pga. av manschett, varierar mellan 11,1 och 13,5 liter. Enligt protokollen har droppjakten utförts med enbart 6 m borrlängd medan borrhålslängder för etapp 1, 2 och 3 varierar i större utsträckning. Medelborrhålslängd för etapp 1 är cirka 5,89 m, etapp 2, 5,77 m och etapp 3, 5,52 m enligt injekteringsprotokollen.

Median- och medelvärden av injekterad volym/borrhål för etapp 1, 2, 3 samt droppjakten totalt samt var för sig redovisas i Tabell 3 nedan. Beräkningarna av medelvärdet bortser från extrem värden för att ge en mer rättvisande bild av fördelningen.

Tabell 3, median- och medelvärden av injekterad volym/borrhål.

Etapp	Sektion [m]	Medianvärde [l]	Medelvärde [l]	Antal borrhål [st]
1	400/745-401/240	14	15,14	301
2	401/245-402/930	13	23,11	1625
3	403/040-404/085	11	12,20	232
Droppjakt	401/885-402/200	12	12,80	242
Totalt	3540	13	20,40	2400

Den injekterade volymen/borrhål visas grafiskt i Figur 4.2 nedan där samtliga borrhål är summerade med undantag för ett fåtal volymer större än 300 vilka pga. rent praktiska skäl utelämnats.



Figur 4.2, injekterad volym/borrhål, etapp 1, 2, 3, och droppjakt i etapp 2.

4.1.2 Analys

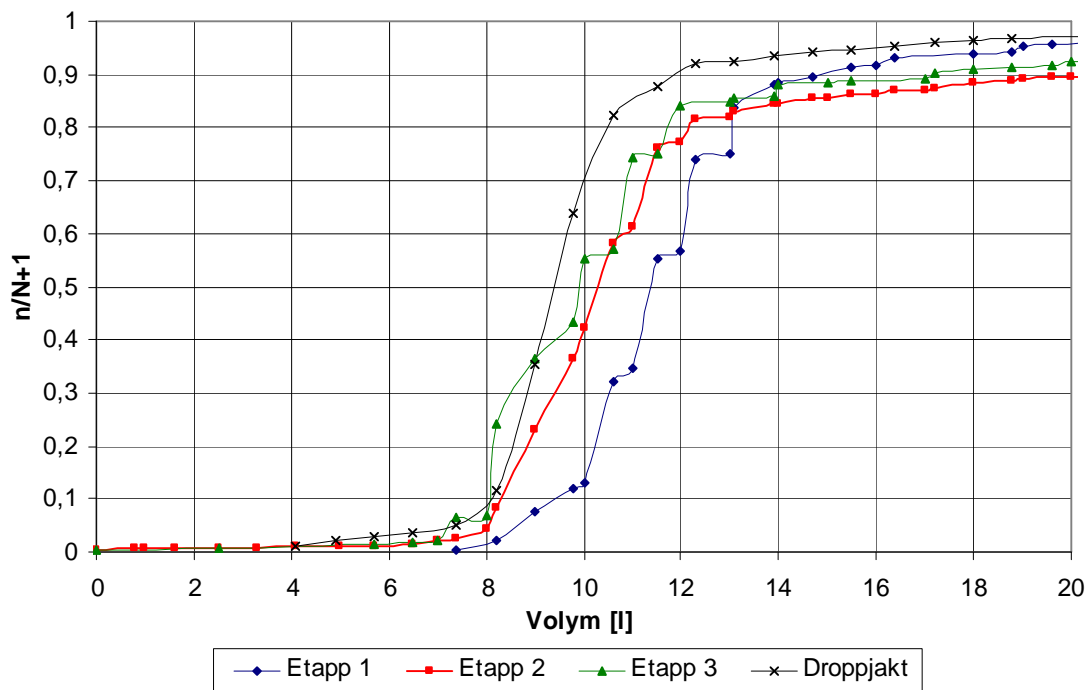
I Tabell 4 nedan jämförs median- och medelvärden från de injekterade volymerna med borrhålsvolymen. De injekterade volymerna är normerade mot 5 m borrhålslängd. Beräkningen av borrhålsvolymen förutsätter att manschetten placeras 0,5 m in i injekteringshålet vilket ger en verklig borrhålslängd på 4,5 m. Detta resulterar i en borrhålsvolym på 12,32 liter.

Tabell 4, injekterad volym/borrhål, etappvis och totalt. Volymerna är normerade mot en borrhålslängd på 5 m.

Etapp	Medianvolym [l]	Medelvolym [l]	Medelvolym – borrhålsvolym [l]	Antal borrhål [st]
1	11,5	13,7	1,4	301
2	10,6	19,8	7,5	1625
3	10,0	12,5	0,2	232
Droppjakt	9,8	11,3	-1,0	242
Totalt	10,6	17,5	5,2	2400

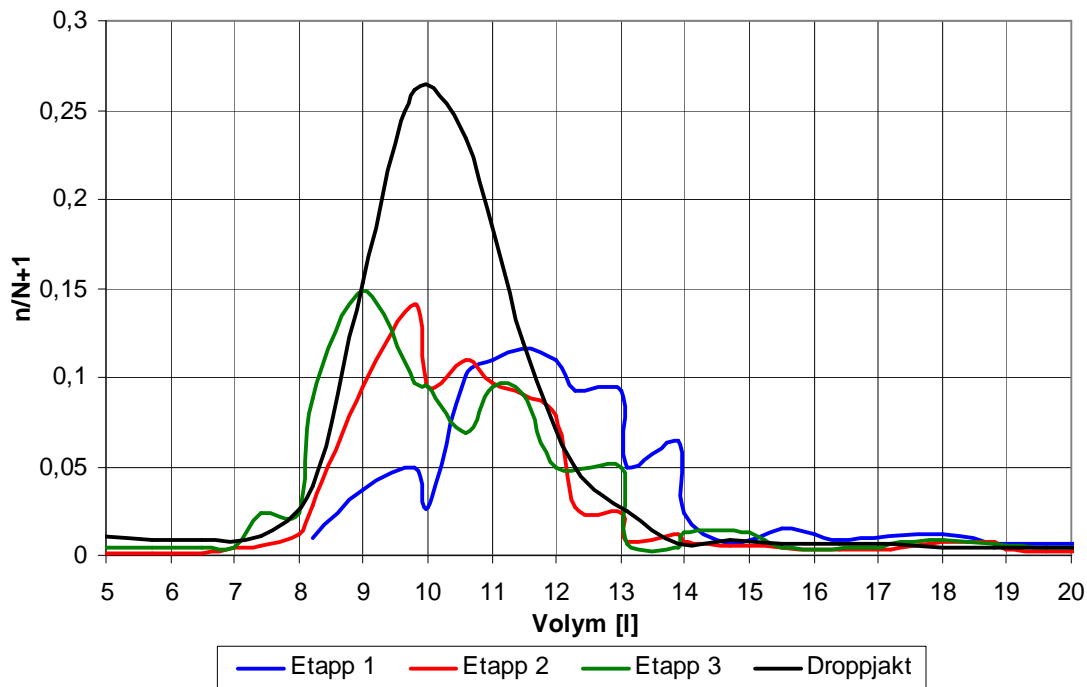
Jämförelsen i Tabell 4 visar på att det i etapp 1 och 2 utförts injektering med en resulterande bruksåtgång som klart överstiger borrhålsvolymen. Droppjakten visar emellertid på det motsatta och i etapp 3 har nästintill inget bruk trängt in. Det bör emellertid beaktas att ett fåtal injekteringshål med mycket stora injekterade volymer kraftigt påverkar resultatet av denna jämförelse. Om en jämförelse istället hade utförts mellan medianvolymen och borrhålsvolymen skulle samtliga etapper visa på negativa värden, dvs. en bruksåtgång som understiger borrhålsvolymen.

Figur 4.3 nedan visar på en kraftig koncentration av injekterade volymer mellan 8-14 liter/borrhål för samtliga etapper, detta ligger nära den beräknade borrhålsvolymen. De injekterade volymerna i Figur 4.3 är normerade mot en borrhålslängd på 5 m för att lättare kunna jämföra etapperna med varandra. Variationerna är emellertid stora, injekterade volymer på mellan 0-502 liter finns registrerade, volymer i det övre spannet redovisas dock inte i Figur 4.3.



Figur 4.3, fördelningen av de injekterade volymerna i etapp 1, 2, 3 samt droppjakt i etapp2. Volymerna är normerade mot en borrhålslängd på 5 m.

I Figur 4.4 redovisas de injekterade volymernas procentuella fördelning. En detaljstudie av injekterade volymer mellan 5-20 liter presenteras för att tydligare åskådliggöra de med högst frekvens.



Figur 4.4, procentuell fördelning av de injekterade volymerna per borrhål i etapp 1, 2, 3 samt droppjakt i etapp 2. En detaljstudie av injekterade volymer mellan 5-20 liter.

Vad som kan ses i Figur 4.4 är att etapp 1 och 2 har högre bruksåtgång än etapp 3 och droppjakten, vilket också konstaterades vid jämförelsen i Tabell 4 tidigare. En kraftig koncentration av de injekterade volymerna i droppjakten runt 10 liter visar också på att de flesta hålen här redan var täta och inte har resulterat i någon bruksåtgång utöver borrhålsvolymen.

Emellertid kan även en liten volym injekterat bruk över borrhålsvolymen täta ett stort antal sprickor. T.ex., om en liter bruk effektivt injekteras i berget med ett injekteringsövertryck på 7 bar, uppnås en radiell inträngning på 7,2 m i 443st sprickor med 0,1 mm sprickvidd. Fler exempel kan ses i Tabell 5 nedan. Detta innebär att även om endast en minimal bruksåtgång kan registreras under injektering bör pumpning fortgå hela injekteringstiden ut.

Tabell 5, inträngning och antal injekterade sprickor vid blandningsförhållande 1:7, för en liter effektivt injekterad volym bruk.

b [μm]	$\Delta p = 0,7 \text{ MPa}, t = 20 \text{ min}$		$\Delta p = 1,4 \text{ MPa}, t = 20 \text{ min}$	
	I [m]	Antal sprickor [st]	I [m]	Antal sprickor [st]
14	1,0	22620	1,4	15995
50	3,6	1773	5,1	1254
100	7,2	443	10,2	314
200	14,4	111	20,3	78

Oroväckande är det stora antal borrhål med lägre bruksåtgång än beräknad borrhålsvolym, vilket gäller för cirka 60 % av samtliga injekterade borrhål. Detta förutsätter emellertid att manschetten har placerats max 0,5 m in i borrhålen vid injektering vilket inte kan bekräftas. Dessutom kan injekteringshålerna vara så pass "täta" att luften endast komprimeras och inte trycks ut i berget. Vilket enligt vad överslagsberäkningar visar skulle kunna motsvara cirka en liter, beroende på injekteringstrycket, i minskad bruksåtgång.

4.2 Före/efter analys

Med hjälp av droppomfattnings-, grundvattentrycks- och inläckageförändringar i tunneln över tiden kan en jämförelse mellan mätdata innan och efter efterinjektering utföras. En analys kan genom detektering av ökade grundvattentryck samt minskade inläckage och dropp visa på att en lyckad efterinjektering har utförts.

4.2.1 Droppkartering

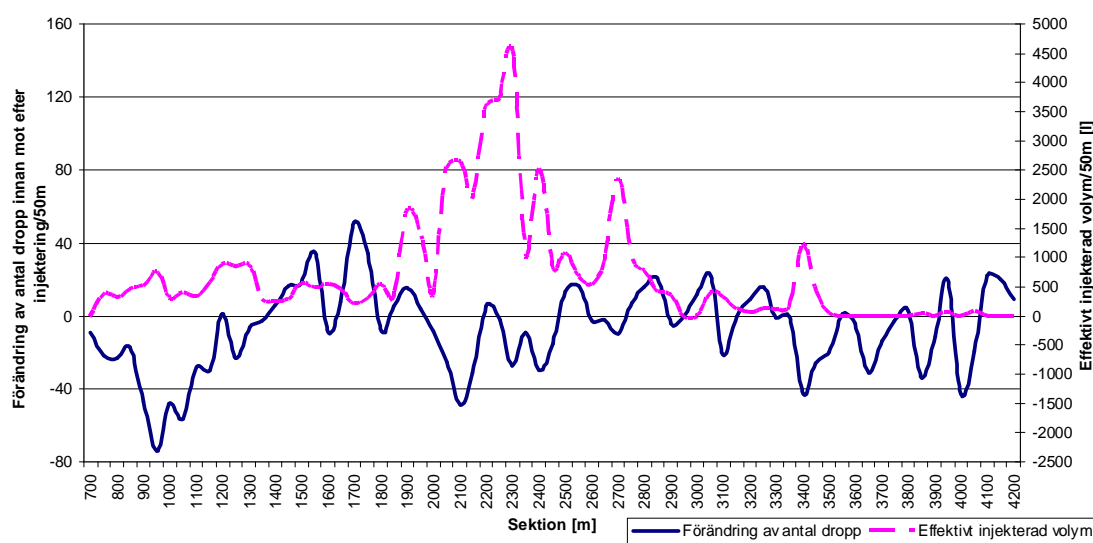
En droppkartering i huvudtunneln utförd på beställning av Banverket under vintern/våren 2006 före efterinjekteringen jämförs med en senare utförd droppkartering från hösten samma år när efterinjekteringsarbetet var slutfört. Karteringarna sammanställs genom att antal dropp per 100 m räknas. En generalisering till att analysera dropp per 100 m utförs för att undvika att resultatet påverkas av enbart flyttade istället för tätade dropp. Resultatet analyseras för etapp 1, 2, 3 och droppjakten var för sig. Dessa droppkarteringar ska inte förväxlas med den som utfördes i räddningstunneln Paradiset vilken redovisas i Bilaga B.

Totalt har fler dropp karterats innan än efter injekteringen med silica sol vilket tyder på en reducering av inläckaget, se Tabell 6. Vid flertalet 100 meters sektioner har emellertid fler antal dropp karterats efter än innan vilket tyder på stora variationer.

Tabell 6, Droppkartering innan och efter efterinjektering [dropp/100 m].

Etapp	Innan	Efter	Skillnad
1	130	58	72
2	67	68	-1
3	45	26	19
Droppjakt	96	68	28
Oinjekterad	11	32	21

I jämförelsen ovan ses att i etapp 2 är antalet dropp i princip oförändrade, övriga avsnitt visar emellertid på en relativt stor minskning av antalet dropp. En förklaring till detta kan vara att etapp 2 var den som utfördes först och att erfarenheter från denna sedan ledde till bättre resultat i övriga avsnitt. I Figur 4.5 visas en jämförelse mellan den effektivt injekterade bruksvolymen per 50 m sektion mot förändringen av antal dropp från innan till efter injekteringen på samma sektioner. Med effektivt injekterad bruksvolym menas den faktiska volymen bruk som tränger in i berget, dvs. injekterad volym – borrhålsvolym.



Figur 4.5, skillnad i antal dropp före och efter injektering per 50 m (ett negativt värde innebär ett minskat antal dropp) samt den effektivt injekterade volymen per 50 m.

En viss överensstämmelse mellan kurvorna i Figur 4.5 kan ses. Framförallt i sektioner där en hög bruksåtgång har uppnåtts kan tydliga minskningar av antalet dropp utläsas.

Sammanställningen visar också att alla områden som inte har efterinjekterats uppvisar nästan tre gånger fler dropp efter efterinjektering än innan. Dessa områden är belägna vid tunnelmynningarna, betongtunneln (sektion 2940–3030) och mellan sektion 3520–3880. Detta kan bero på naturliga årsvariationer som t.ex. nederbörd och temperatur.

Karteringen innan efterinjekteringen utfördes under vintern (minusgrader och tjäle) och karteringen efter utfördes i början på hösten (plusgrader) och kraftig nederbörd (se Figur 4.6).

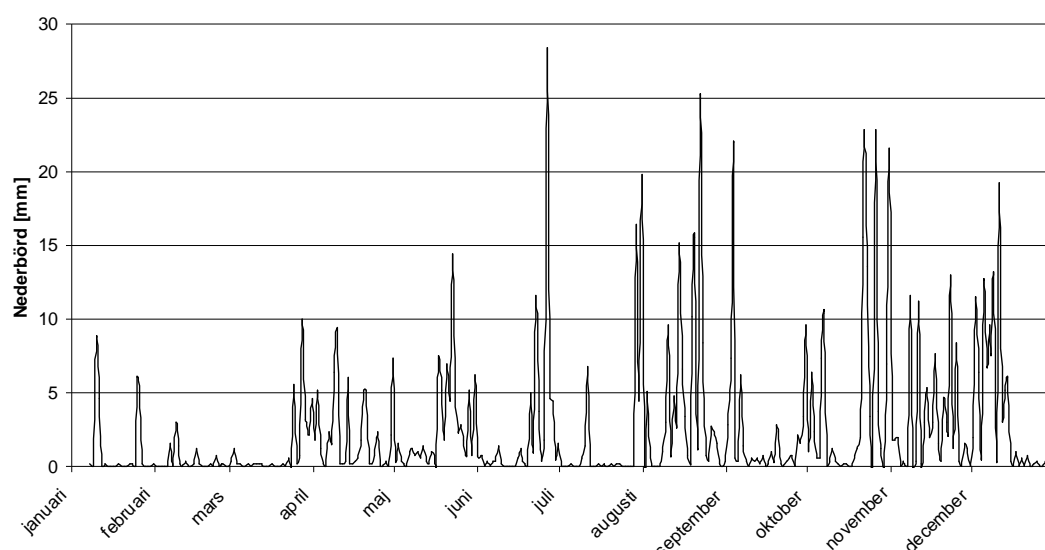
Om de oinjekterade avsnitten som redovisas i Tabell 6 ovan är representativa för hela tunneln innebär det att droppen innan efterinjektering nästan ska trefaldigas för att kompensera för naturliga variationer. Detta för att droppen i dessa avsnitt bör vara oförändrade om samma yttre förhållande råder. I Tabell 7 nedan har antal dropp innan efterinjekteringen därför trefaldigats för att kompensera för de yttre förhållandena.

Tabell 7, *Droppkartering innan och efter efterinjektering med silica sol där värden innan efterinjekteringen har trefaldigats [dropp/100 m].*

Etapp	Innan	Efter	Skillnad
1	390	58	232
2	201	68	133
3	135	26	109
Droppjakt	288	68	220
Oinjekterad	33	32	1

Om ovanstående resonemang är korrekt kan slutsatsen dras att efterinjekteringen reducerat inläckaget kraftigt i hela tunneln. Det är emellertid de dropp som karterats efteråt som fortfarande behöver åtgärdas.

Nederbörden under perioderna för karteringarna varierar kraftigt vilket ses tydligt i Figur 4.6.



Figur 4.6, *dygnsnederbörd Trollhättan 2006.*

Nederbörden har registrerats av en väderstation på Trollhättans kommunhus. Väderstationen ifråga smälter inte snön utan nederbörden registreras istället när snön smälter naturligt. Detta ger värden som är mer lika de förutsättningar som råder i

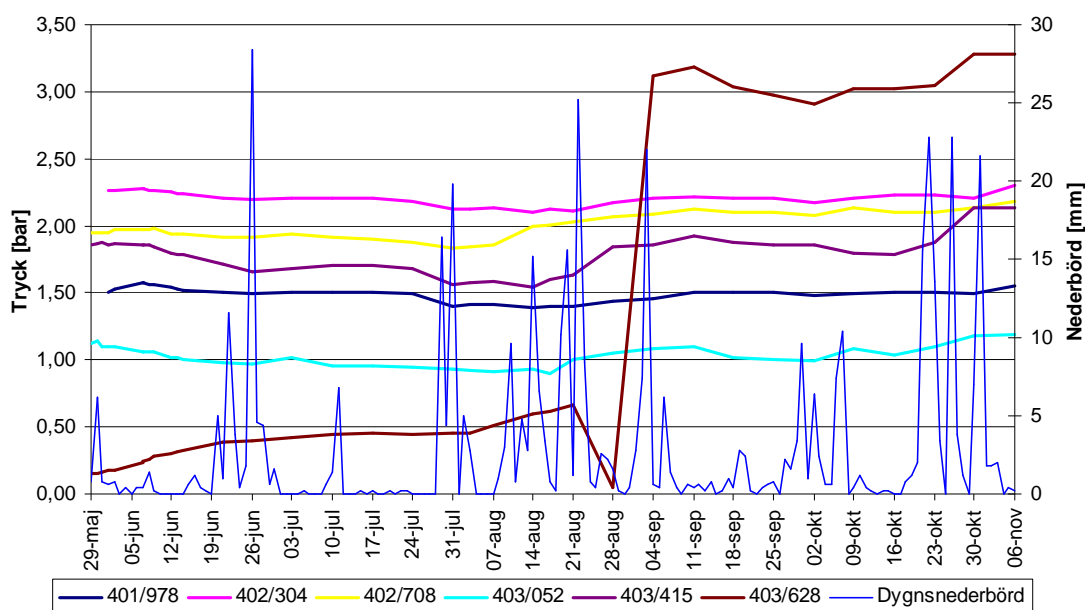
naturen eftersom snön varken påverkar grundvattnet eller inläckaget till tunneln innan den smälter.

Det är emellertid osäkert hur och framförallt när detta påverkar inläckaget i tunneln. Överslagberäkningar visar att i berg med en konduktivitet på $1 \cdot 10^{-7}$ m/s tar det cirka 3 år för vatten att transporteras 10 m. Detta innebär att det är mycket svårt att se några samband mellan nederbörd och grundvattentryck på tunnelnivå. Den huvudsakliga transporten av vatten sker dock i bergets sprickzoner, där konduktiviteten är betydligt högre, vilket innebär att grundvattentrycket påverkas betydligt snabbare i dessa avsnitt.

Det är dessutom svårt att dra slutsatser enbart utifrån droppkarteringarna. De är utförda under olika årstider med skilda väderförhållanden och av olika personer. Kriterierna för dropp vid de olika tillfällena är i stort sett de samma, detta är dock ingen garanti för att samma värderingar av dropp har använts. Försöket att kompensera för naturliga variationer är en grov och förenklad bild av verkligheten men kan ändå visa på ett tänkbart scenario.

4.2.2 Grundvattentryck

Grundvattentrycket har registrerats i 6st 21 m långa mätthål som sträcker sig utanför injekteringsskärmarna sedan i slutet av maj 2006 till och med början av november 2006. En jämförelse görs med dygnsnederbörden under samma period, se Figur 4.7.



Figur 4.7, grundvattentrycknivåer i tunnel över tiden under 2006.

Samtliga mätthål visar på relativt jämna grundvattentryck med undantag för mätthålet vid sektion 403/628 som bortses från i analysen med tanke på dess oregelbundna beteende.

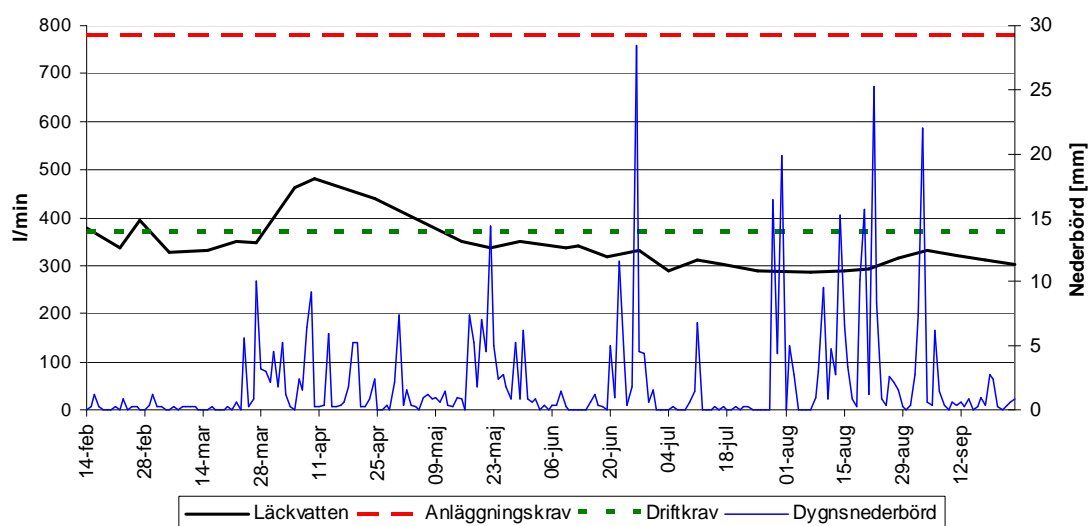
Grundvattennivåerna uppmätta i tunneln tyder på en liten ökning sen efterinjekteringen slutförts. Ökningen kan emellertid också förklaras genom årsvariationer med en torr sommar och en blöt höst. I jämförelsen ovan är det dock

svårt att se några direkta samband mellan nederbörd och grundvattentryck. Det bör också beaktas att det finns en naturlig fördröjning mellan nederbörd och grundvattentryck då infiltration från markyta till tunnelnivå tar en viss tid.

För att kunna dra några slutsatser beträffande injekteringens utförande och resultat från grundvattentryckmätningar krävs längre observationsserier. Detta för att separat analysera variationer under året och se tendenser ur längre perspektiv vilket ska särskiljas från nivåhöjningar resulterade av en injektering.

4.2.3 Inläckage

Mätningar av läckvatten från tunneln startade under februari 2006 innan efterinjekteringen påbörjades. I Figur 4.8 ses variationerna av läckvattnet tillsammans med anläggnings- och driftkraven på 370 resp. 780 l/min samt dygnsnederbörden under samma period.



Figur 4.8, läckvatten från Öxneredstunneln 2006.

En minskning av volymen läckvatten från tunneln kan ses efter mitten av april. Under hela april månad överskrider driftkravet på 370 l/min med ett max flöde på 481 l/min. Denna ”puckel” under april beror troligen på tjällossning i kombination med nederbörd. Det huvudsakliga inläckaget till tunneln sker via sprickzoner och vattentransporten sker därför relativt snabbt från markyta till tunnelnivå. Nederbörden som sker under juni och augusti hinner troligtvis avdunsta och tas upp av vegetation innan det når tunnelnivån varpå driftkravet uppfylls. Det är emellertid osäkert hur mycket minskningen av läckvattnet under våren har påverkats av efterinjekteringen och inte beror på naturliga årsvariationer. För att kunna dra några konkreta slutsatser beträffande detta krävs data från längre tidsperioder vilket dock saknas.

5 Slutsats & diskussion

En utvärdering av efterinjektering med silica sol i Öxneredstunneln visar att vid ett stort antal av injekteringshålerna har inte mer än hålfyllnad uppnåtts. Beräkningar och analyser visar emellertid att endast en liten mängd injekterad volym över borrhålsvolym kan täta en stor mängd sprickor. Kanske är det en rättvisande bild vid en efterinjekteringssituation, att ett stort antal injekteringshål endast är fyllda. Bergsmassan är vid efterinjektering redan injekterad minst en gång varför stora områden redan är väl tätade.

Droppkarteringen som genomfördes innan och efter efterinjekteringen i Öxnered visar på att en tätning av tunneln har erhållits. Det är emellertid väldigt osäkert p.g.a. stora årsvariationer och olika personer som har karterat. Utan kompensation för årstid m.m. ses endast en relativt liten förbättring. Om däremot resonemanget med årstidsvariationer införs tyder detta på ett betydligt bättre resultat.

Fälttestet i Öxneredstunneln visar på att inträngningslängden underskattas med den 2-D beräkningsmodellen samt överskattas med den 1-D modellen. Tidigare studier visar också på liknande resultat. Resultaten från detta fälttest kan därför ses som en bekräftelse på tidigare undersökningar.

Sprickvidden, b , är vid beräkning av inträngningslängd den mest utslagsgivande parametern varför det är viktigt att denna bestämmas noga. Tidiga undersökningar med kärnborrhål och provborrningar kan ge stora mängder data för utvärdering av denna.

Viktigt vid injekteringsförfarandet är att övertrycket uppnås snabbt och bibehålls hela injekteringstiden ut. Eller som Houlsby (1990) säger ”*Don't start grouting until everything is ready. After starting, don't stop until the grouting is finished*”, förutom noga övervägda avbrott vid oförutsedda läckage m.m. Injekteringstiden startar då dimensionerat övertryck uppnåtts. De beräkningsmodeller som används tar nämligen endast hänsyn till ett medeltryck varför sluttrycket är tämligen ointressant om det tar lång tid att uppnå.

Blandningsförfarandet har visat sig vara en av de kritiska punkterna vad gäller injektering med silica sol. Stora variationer har konstaterats i geltider och vågar har inte alltid haft den standard eller kalibrering som egentligen krävs. Geltiden varierar också p.g.a. temperatur, lagringstid och -förhållande varför s.k. kopptester bör genomföras vid varje injekteringssats. Detta för att få en bekräftelse på att blandningen är korrekt eller en indikation på att den behöver justeras till nästkommande sats.

P.g.a. bergsmassors oregelbundna hydrauliska egenskaper är en universal injekteringsdesign som fungerar för en hel tunnel omöjlig att konstruera. Det är emellertid relativt lätt att under injekterings gång förändra injekteringsparametrar som injekteringsövertryck och pumptid. Ett kontrollprogram som förslås i Bilaga F kan vara ett bra upplägg för att under injektering ta fram data till uppdaterad design, s.k. aktiv design, samt kontrollera tätningsförmågan på den design som används.

Referenser

Axelsson, M., (2006): *Strength criteria on grouting agents for hard rock*. Division of GeoEngineering, Geology, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden.

Axelsson, M., (2004): *Mechanical tests on silica sol*. Publ. 2004:3. Division of GeoEngineering, Geology, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden.

Axelsson, M. & Nilsson, J., (2002): *Sealing of narrow fractures in rock with use of silica sol*. Examensarbete. Väg och Vatten, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Barnes, H.A., Hutton, J.F, Walters, K., (1989): *An Introduction to Rheology*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, The Netherlands.

Bergsäker konsult AB, handläggare: Hargelius, H., (1999): *Geologisk och bergteknisk beskrivning, bergtunnel Km 434+560 – 437+590*. Göteborg.

Bodén, A., Eklund, D., Eriksson, M., Fransson, Å., Hansson, P., Lagerblad, B., Lindblom, U., Wilén, P., (2001): *Översikt av resultat från SKB:s FoU inom injekteringsteknik för bergtätning åren 1996-2000*. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB Rapport R-01-38,. Hämtat från: <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/R-01-38webb.pdf>, 2006-10-16.

Burström, P.G., (2001): *Byggnadsmaterial*. Studentlitteratur, Lund.

Carlsson, L. & Gustafson, G., (1991): *Provpumpning som en geohydrologisk undersökningsmetodik*. R66:1991, Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.

Devore, J. & Farnum, N., (1999): *Applied statistics for engineers and scientists*. Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove.

Fransson, Å., (2001): *Characterisation of Fractured Rock for Grouting Using Hydrogeological Methods*. Publ A 97, GEO institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Funehag, J., (2005): *Grouting of Hard Rock with Gelling Liquids*. GEO institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Funehag, J. & Gustafson, G., (2006): *Design of Grouting with Silica Sol in Hard Rock – New Methods for Calculation of Penetration Length, Part I*, GEO Institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Funehag, J. & Gustafson, G., (2005): *Grouting with silica sol in the Törnskogs Tunnel*. Report No. 2005:12, Division of GeoEngineering, Geology, Chalmers university of technology, Göteborg, Sweden.

Gustafson, G. & Stille, H., (2005): *Stop Criteria for Cement Grouting*. Felsbau 23 NR.3.

Gustafson, G., Fransson, Å., Funehag, J., Axelsson, M., (2004): Ett nytt angreppssätt för bergsbeskrivning och analysprocess för injektering. *Väg- och vattenbyggaren*, Nr. 4, 2004. GEO Institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Gustafson, G. & Claesson, J., (2003): *Steering Parameters for Rock Grouting*. Inlämnad till Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2005.

Gustafson, G. & Butron, C., (2006): *PM Nygårdstunneln, injektering med cement och silica sol för dropptätning*. Koncept 2006-10-16. GEO Institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Hansson, P., (1994): *Cementinjektering – Handbok i materialteknik för injekterare*. Elforsk rapport 94:12.

Hellström, M., (2007): *Verifiering av inträngningslängd*. Koncept 2007-01-22. Examensarbete vid GEO Institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Houlsby, A.C., (1990): *Construction and Design of Cement Grouting, A Guide to Grouting in Rock Foundations*. John Wiley & Sons Inc, New York, USA.

Industrial Science & Technology Network (2006): Silica particles. www.istninc.com, 2006-11-10.

Kutzner, C., (1996): *Grouting of Rock and Soil*. A.A Balkema, Rotterdam.

Lindblom, U., (2001): *Bergbyggnadsteknik*, Kurslitteratur i fortsättningskursen i bergsbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

Lundqvist, I., (1997): *Beskrivning till berggrundskartan, SGU Ser Af 160, 8B Vänersborg SO*, Uppsala.

de Marsily, G., (1986): *Quantitative Hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers*. Academic Press, Inc., Orlando, USA.

SGU, (1987): *Berggrundskarta över Vänersborg SO 8B, ser. Af nr 160*, Offset Center AB. Uppsala.

SGU, (1981): *Berggrundskarta över Göteborg NO 7B, ser. Af nr 136*, LiberKartor, Stockholm.

Stalkup, F. I. Jr., (1992): *Miscible Displacements*. Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX.

Statens strålskyddsinstitut, SSI, (2006): *Ordlista*. Hämtat från http://www.ssi.se/fakta_om_stroelning/ordfoerklar.html 2006-10-17

Stille, H., (2001): *Grouting-Research Work and Practical Application*. 4th Nordic Rock Grouting Symposium. SveBeFo Report 55, Stockholm.

SWECO VBB VIAK AB, (1995): *Byggnadsgeologisk beskrivning, Förfrågningsunderlag, Nordlänken delen Öxnered-Trollhättan*, Göteborg.

Tyréns, (2005): *Bygghandling Norge-Vänernbanan delen Torbacken – Hede*. Tunnelritning, ritningsnummer 1-532 373/4060 A.

UGC international, produktdatablad: Meyco®MP320, (2006): <http://www.ugc.basf.com/DCCUGC/EN/datasheets/injection/mineralgrouts/mineralgrouts.htm>

Vägverket, (2000): *Tätning av bergtunnlar – förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser*, Vägverket, 2000:101, Borlänge.

Warner, J., (2004): *Practical Handbook of Grouting*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, New Jersey.

Wikipedia, Den fria encyklopedin, (2006): <http://sv.wikipedia.org/wiki/Kategori:Kolloidkemi>, 2006-09-28

Reologiska tester på cement (Inj 30)

För att dimensionera inträngningen för en cementinjektering behövs information om brukets flytgräns och viskositet. Vidare är det viktigt att känna till andra egenskaper hos bruket som indirekt påverkar injekteringsdesignen men som är avgörande för ett lyckat injekteringsresultat. Exempel på dessa egenskaper är brukets blandning, blödning, flödes- och penetrationsförmåga. Syftet med undersökningarna är att uppdatera och/eller verifiera befintlig cementinjekteringsdesign för Nygårdstunneln samt notera arbetbarheten för bruket. Cementet som studeras är injektering 30 (Inj 30) med tillsatsmedlet SetControl 1.

Metod

För att utvärdera brukets flytgräns har följande tester gjorts:

- *Mud-balance*. Bestämmer densiteten på injekteringsbruket. Densiteten används sedan för att utvärdera flytgränsen.
- *Yield stick*. Mäter flytgränsen på bruket tillsammans med data från mud-balance. Mätningen utförs i samma mätglas som vid separation test.

För att kontrollera brukets övriga egenskaper görs:

- *Filter-pump*. Mäter penetrationsförmågan av bruket genom att mäta mängden bruk som passerar ett filter med känd vidd (75 och 125 μm).
- *Marsh-cone*. Mäter flödesförmågan av bruket genom att registrera den tid det tar för en viss volym (1000 ml) av bruket att passera genom konen.
- *Separation test*. Utförs i mätglas där blödningen av bruket mäts efter 1 och 2 timmar.

Ovanstående tester utfördes dels vid Nygårdstunneln, med samma förutsättningar och utrustning som vid injektering, samt i laboratorium vid Chalmers. Fälttestet jämförs med laboratorietester för att se likheter och/eller skillnader i bruksegenskaper. Dessutom gjordes reologiska tester på bruket med reometer för att noggrannare bestämma viskositets- och flytgränsförändringen över tiden.

Utförande

Fälttest

Fälttestet utfördes 2006-10-24 utanför Nygårdstunnel. Injekteringsbruket blandades på Lemcons injekteringsrigg med kolloidblandare. Injekteringsatsen var på 200 kg, med ett vct på 1,0 samt med 2,2 % tillsatsmedel SetControl (räknat som volymprocent på cementvikten). SetControl fungerar som en accelererande flyttillsats, vilket ger injekteringsbruket ett påskyndat tillstyvningsförlopp samt en god sammanhållning (Cementa). Ett vct på 1,0 valdes eftersom de flesta injekteringsförlopp startar med just vct 1,0. Efter blandning av bruket gjordes ovanstående fem tester.

Laboratorietester

Viskositeten och blödningen är starkt beroende av vct. Därför gjordes tester på följande blandningar: vct (viktförhållande):

- vct 1,15 med SetControl (2,2 volymprocent baserat på cementvikt)
- vct 1,0 med SetControl (2,2 viktprocent baserat på cementvikt)
- vct 1,0 utan SetControl
- vct 0,8 med SetControl (2,2 viktprocent baserat på cementvikt)

Ett vct på 1,15 har studerats eftersom mud-balance mätningen från Nygård tyder på ett sådant blandningsförhållande och inte 1,0 som var avsett. Tillsatsmedlet SetControl har använts som vikt- respektive volymprocent av cementvikten. Enligt Cementa ska tillsatsmedlet doseras som viktprocent av cementvikten medan blandningen i Nygård gjordes med en dosering baserad på volymprocent av cementvikten. Detta innebär en högre andel tillsatsmedel i blandningen, vilket dock inte borde påverka brukets egenskaper negativt.

Genom att använda nedanstående empiriska formel (Hansson, 1994) kan densiteten från mud-balance mätningarna omvandlas till vct,

$$vct = \frac{1}{\frac{6510}{3100 - \rho} - 3,1} . \quad \text{Ekv 1}$$

där ρ är densiteten uttryckt i kg/m^3 från mud-balance.

Genomförande i kronologisk ordning

Blandning

- Vatten och cement hälldes var för sig i mätglas och vägdes på våg med en noggrannhet av $\pm 0,1$ gram.
- Vatten och cement blandas med mixer i 3 minuter.
- Uppmätt mängd tillsatsmedel hålls i bruket och blandas under 2 minuter.
- Blandningen kontrolleras med sked för att säkerställa att inget cement har sedimenterat i botten av skålen.

Utrustningen som användes till blandning var en elvisp samt en Hobart blandare som vanligtvis används till att blanda murbruk (cement, vatten och sand).

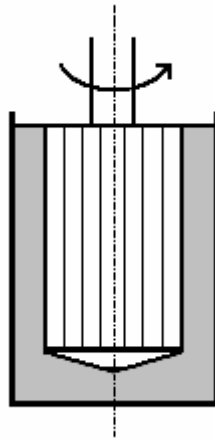
Efter blandning utfördes testerna i följande ordning

1. Mud-balance
2. Filter-pump
3. Marsh-cone
4. Yield stick
5. Separation test

Tiden det tog att utföra de första fyra testerna uppskattades till 15 minuter. Under denna tid bör blandningarnas egenskaper inte ha påverkats nämnvärt, vilket gör det möjligt att utvärdera de olika blandningarna sinsemellan.

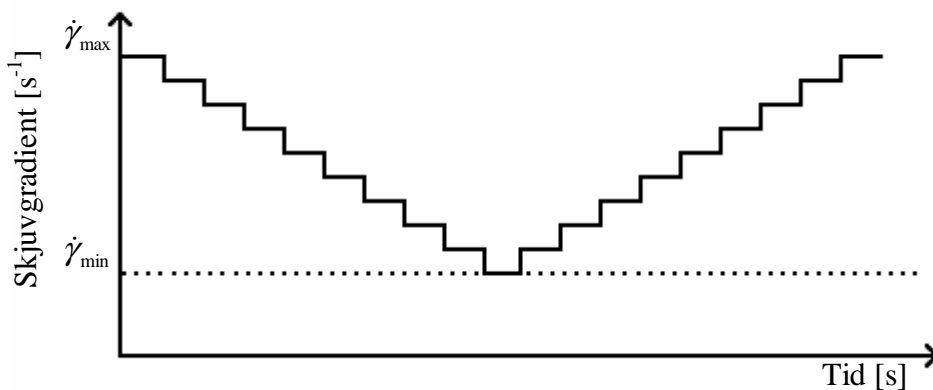
Reologiska tester

Utrustningen som användes var en reometer, Bohlin CVO200, med roterande cylinder. Bruket som analyseras placeras i en cylinderformad skål (30 mm i diameter), varefter en färad cylinder (25 mm i diameter) sänks ned i bruket (se Figur 1). När den inre cylindern roterar mäts vridmomentet. Tillsammans med de geometriska parametrarna kan skjuvgradienten och skjuvspänningen utvärderas.



Figur 1, schematisk bild över skålen och den roterande cylindern som användes vid de reologiska mätningarna.

Olika förutbestämda skjuvhastigheter programmerades i reometern. Vid varje skjuvgradient registrerades skjuvspänningen. Skjuvgradienten varierade från $0,5$ till 200 s^{-1} , vilket gav ca 100 mätintervall. En schematisk bild över programmet kan ses i Figur 2, där mätningarna började med höga skjuvgradients ner till låga och sedan tillbaka till höga. Detta för att utvärdera om cementbruket uppvisade ett tixotropiskt beteende, dvs. egenskaperna förändras efter omrörning. Alla reologiska tester utfördes vid 20°C .



Figur 2, schematisk bild över programmet som användes vid de reologiska mätningarna.

De utvärderade parametrarna från reometern, skjuvgradienten och skjuvspänningen, plottades i ett diagram. Genom att applicera Bingham modellen till kurvorna kan flytgränsen för bruket utvärderas.

Samtidigt som reologiska tester utfördes på bruket gjordes övriga fem undersökningsmetoder nämnda ovan för att studera likheter och skillnader för de tidigare utförda laborietesterna.

Utrustning som användes vid testerna

- Mud-balance
- Filter-pump
- Marsh-cone

- Yield sticks, 3st
- Mätglas, 3st
- Tidtagarur, 3st
- Bohlin reometer (CVO200)
- Våg (noggrannhet $\pm 0,1$ gram)
- Skålar och skedar för vägning av material
- Blandningsutrustning, elvisp och Hobart blandare
- Cement, Injektering 30 (Cementa AB)
- SetControl 1 (Cementa AB)

Resultat och diskussion

I Tabell 1 nedan redovisas resultatet från fälttestet utanför Nygårdstunneln.

Tabell 1, resultat från fälttestet vid Nygård. Blandningar betecknade med * betyder att tillsatsmedlet doserats som volymprocent av cementvikten. Blandning utfördes med kolloidblandare.

Blandning	Mud-balance [kg/m ³]	Marsh-cone [s]	Blödning		Flytgräns från Yield stick [Pa]	Filter-pump [ml]
			1 h	2 h		
vct/ tillsatsmedel	Direkt	Direkt	1 h	2 h	Direkt	Direkt
1,0/2,2 % *	1460	31	2,1	4,5	~0,01	300

För att verifiera resultatet från fälttestet gjordes laborietester, dessa redovisas i Tabell 2.

Tabell 2, resultat från laborietester. Tester utförda med filterpumpen redovisas inte, eftersom bruket inte passerade filtret. Blandningar betecknade med * betyder att tillsatsmedlet doserats som volymprocent av cementvikten. Blandning utfördes med elvisp.

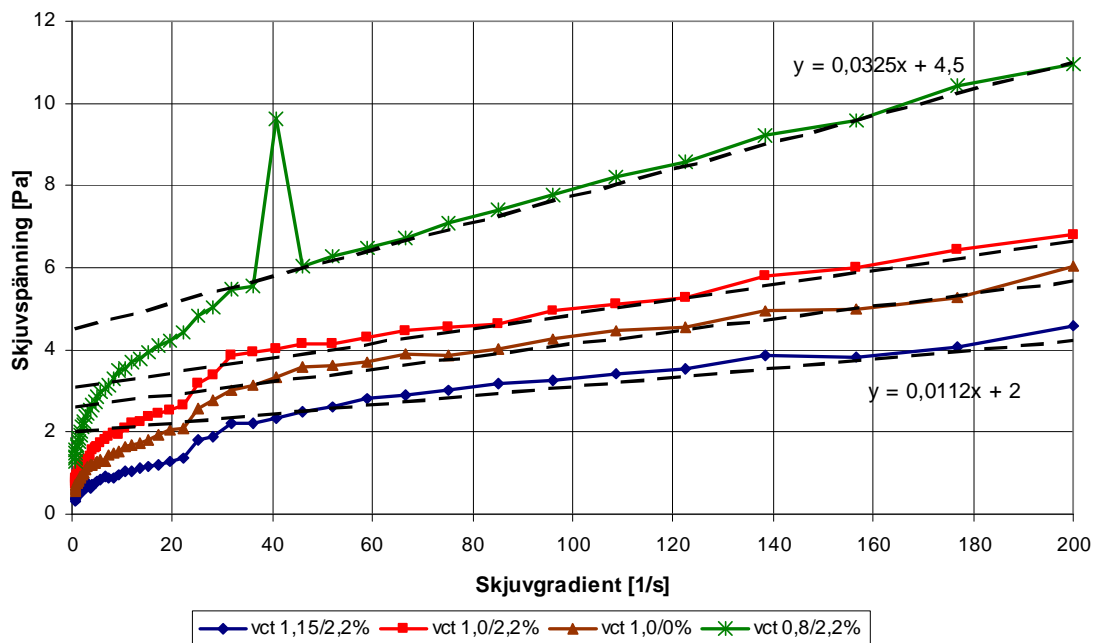
Blandning	Mud-balance [kg/m ³]	Marsh-cone [s]	Blödning		Flytgräns från Yield stick [Pa]
			1 h	2 h	
vct/ tillsatsmedel	Direkt	Direkt	1 h	2 h	Direkt
1,15/2,2 % *	1460	31	7	14	~0
1,0/2,2 %	1510	33	7	14	0,01-1
1,0/0 %	1510	34	5,5	12	0,01-1
0,8/2,2 %	1590	45	2	3	3

De första två laborietesterna (vct 1,0/0 % och 1,0/2,2 %) visade en högre densitet hos bruket från mud-balance mätningarna jämfört med mätningen i Nygård. Detta märktes även då marsh-cone tiderna var något högre än förväntat. Därför höjdes vct till 1,15 för den tredje blandningen och tillsatsmedlet doserades som volymprocent av cementvikten, vilket gav samma densitet och marsh-cone tider som blandningen vid Nygård. Därmed bör det ifrågasättas hur väl uppvägningen görs av cement och vatten innan injektering i Nygård. Samtliga bruksblandningar har kontrollerats mot Ekv. 1, där det verkliga vct överensstämmer väl med det beräknade.

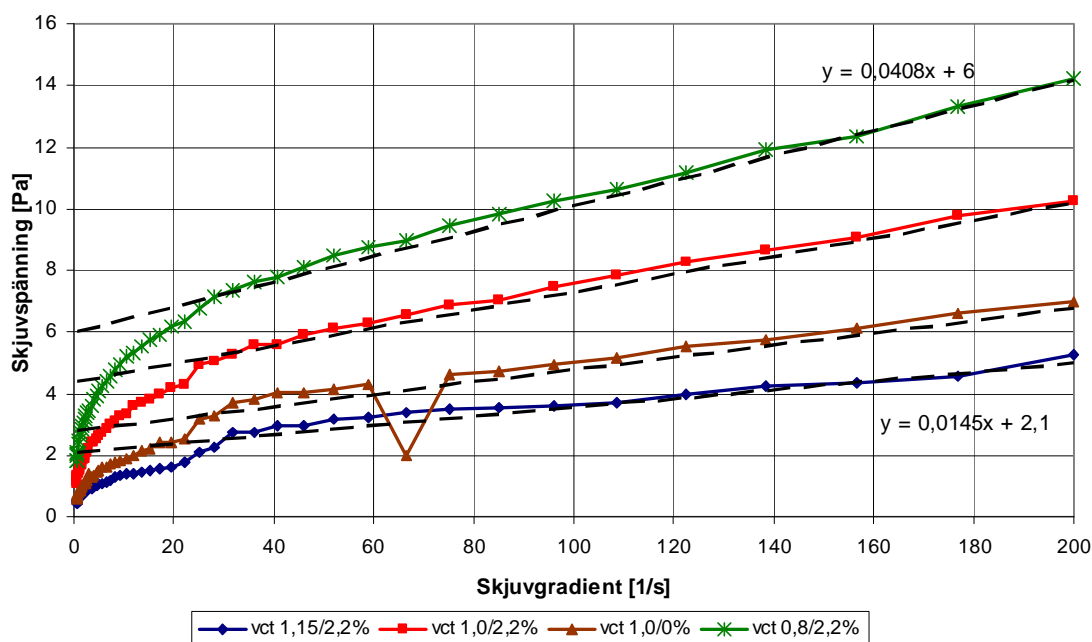
Alla utförda blandningar med vct 1,15 och 1,0 visade på en mycket hög blödning hos bruket (12-14 % efter 2 timmar) jämfört med blandningen från fälttestet (4,5 % efter 2 timmar). Anledningen till den höga separationen beror sannolikt till stor del på blandningsförfarandet. Cementet och vattnet blandades med elvisp vid Chalmers tills bruket var blandat. Kolloidblandaren vid Nygård ger en mycket effektivare blandning och därmed mindre separation. Att kolloidblandaren var effektiv märktes även då tester utförda med filterpumpen gjordes. Filterpumpen visade mycket goda penetrationsegenskaper för bruket blandat vid Nygård. När filterpumpen skulle användas till blandningarna gjorda på Chalmers, fastnade bruket i filtret, vilket gjorde det omöjligt att dra bruk genom pumpen. Den aktuella filtervidden byttes från 75 till 125 μm , dock utan några förbättrade penetrationsegenskaper.

Bruken med högt vct hade en låg flytgräns, 0-1 Pa, vilket var svårt att utvärdera med yield stick p.g.a. avläsningsnoggrannheten. Flytgränsen ökar då vct minskar, vilket redan är välkänt. Flytgränsen var lättare att utvärdera hos den styvare blandningen med vct 0,8 som hade en flytgräns runt 3 Pa.

Resultaten från de reologiska testerna med reometer efter 10 resp. 30 minuter redovisas i Figur 3 och Figur 4 nedan. Till varje kurva har en trendlinje anpassats. Flytgränsen har utvärderats vid den punkt där trendlinjen skär y-axeln. Värdena som plottats är de som började med höga skjuvgradients ner till låga. Detta eftersom värdena bäst representerar ett praktiskt injekteringsförlopp, med höga flöden i den inledande injekteringen ner till låga flöden mot slutet. Blandningarna med vct 1,15 och 1,0 visade ett svagt tixotrop beteende, som mest varierade skjuvspänningen med ca 1 Pa. Dock kommer det svagt tixotropa beteendet inte att påverka injekteringsförloppet nämnvärt. Lutningen på linjerna beskriver blandningarnas viskositet.



Figur 3, reometertest efter 10 minuter för de fyra olika blandningarna.



Figur 4, reometertest efter 30 minuter för de fyra olika blandningarna.

Utvärderingen visar att flytgränsen för blandningarna med vct 1,15 och 1,0 ligger runt 2-3 Pa efter 10 minuter. Blandningen med vct 0,8 har en högre flytgräns runt 4,5 Pa. Efter 30 minuter har flytgränsen ökat förutom blandningen med vct 1,15 och 1,0 utan tillsatsmedel, där flytgränsen är oförändrad. Flytgränsutvecklingen påverkas kraftigt av tillsatsmedlet. Blandningen med vct 1,0 och tillsatsmedel har ökat från 3,1 till 4,4 Pa under 20 minuter, samtidigt som blandningen utan tillsatsmedel endast visar på en marginell förändring från 2,6 till 2,8 Pa. Alla flytgränser från de reologiska testerna finns redovisade i Tabell 3.

Viskositeten efter 10 minuter är som lägst 11 mPas för blandningen med vct 1,15 och 33 mPas för blandningen med vct 0,8. Efter 30 minuter har viskositeten ökat till 15 mPas för vct 1,15 och 41 mPas för vct 0,8.

För att kontrollera resultatet från de tidigare laborietesterna och utfallet från yield sticks, gjordes samma tester parallellt med reometertesterna. Eftersom reometertesterna utfördes efter 10 och 30 minuter, gjordes tester med marsh-cone och yield stick under samma tidpunkter (Tabell 3).

Tabell 3, resultat från laborietester utförda parallellt med reometertester. Tester utförda med filterpumpen redovisas inte, eftersom bruket inte passerade filtret. Blandning utfördes med Hobart blandare.

Blandning	Mud-balance [kg/m ³]	Marsh-cone [s]		Blödning [%]		Flytgräns från Yield stick [Pa]		Flytgräns från Reometer [Pa]	
		10 min	30 min	1 h	2 h	10 min	30 min	10 min	30 min
vct/ tillsatsmedel	Direkt								
1,15/2,2 %	1460	32	32	6	18	~0	0,01	2,0	2,1
1,0/2,2 %	1510	32	36	5	14	0,01-1	0,01-1	3,1	4,4
1,0/0 %	1510	33	33	7	13	0,01-1	0,01-1	2,6	2,8
0,8/2,2 %	1600	40	41	2	2,5	1,5	2	4,5	6,0

Blandningarna med högt vct hade fortfarande en betydande blödning. Detta beror som sagts tidigare på blandningsförfarandet. Elvispen byttes mot en Hobart blandare, men blandningen uppvisade inte några förbättrade penetrationsegenskaper med filterpumpen. Värdena från mud-balance och marsh-cone är likvärdiga med de tidigare utförda testerna, både i fält och i laboratorium.

Flytgränsen från yield stick visade ungefär samma värden som för de tidigare testerna. Dock skiljer flytgränsen avsevärt mellan yield stick och reometer. Ett försök att kalibrera värdena från yield stick med reometern gick inte att utföra. Det finns flera skäl till varför yield stick visar felaktiga värden. Eftersom dessa pinnar är gjorda i trä, kommer de absorbera bruket när de sänks ned i blandningen. Detta medför att pinnarna blir tyngre, vilket ger felaktiga resultat vid nästa mätning. Efter upprepade mätningar blev en av pinnarna skeva vilket också kan leda till felaktiga avläsningar. Tvärsnittsåren ökar hos pinnarna när de absorberar bruket, vilket leder till en lägre flytgräns jämfört med mätningarna från reometern. Pinnarna kan dock fortfarande användas i fält. Även om de registrerar en flytgräns runt 0,01 Pa, kan antagandet göras att den verkliga flytgränsen ligger runt 2-4 Pa.

Droppkartering

Syftet med droppkarteringen är att skapa en uppfattning om mängden dropp i tunneln och att sammanställa referensdata för jämförelse efter genomförd efterinjektering med silica sol. Karteringen omfattar ett avsnitt av räddningstunneln Paradiset närmst huvudtunneln där efterinjektering senare kommer att genomföras. Droppkarteringen begränsas till att innefatta större inläckage i tunneln då en mer detaljerad kartering blir alltför omfattande med hänsyn till mängden dropp och blöta ytor i tunneln.

Metod

Droppkarteringen innefattar kartering av droppets placering, utbredning och kategori på tunneltak och -väggar vilket redovisas i sektionsskisser där placering/utbredning och kategori av respektive dropp kan utläsas. Under karteringen användes kriterier för dropp vilka kan ses i Tabell 1 nedan.

Tabell 1, droppkarteringskriterier.

Kategori	Beskrivning
1	Dropp, en droppe var 3-5 sekund
2	Ihärdigt droppande, en eller fler droppar per sekund
3	Rinnande vatten, droppar kan ej urskiljas

Vid kartering av dropp av kategori 3 registreras också ett flöde för jämförelse vid efterkontroll.

Resultat

En droppkartering av avsnitt 0/040-0/120 i räddningstunnel paradiset genomfördes 2006-09-12, karteringen redovisas i separat protokoll. Karteringen visar på ett stort antal dropp i hela avsnittet, dock fanns ett område mellan sektion 0/080-0/090 som uppvisade ett betydligt högre inläckage än övriga områden (se Bild 1).

Slutsats

Överlag kan konstateras att nordvästra tunnelväggen uppvisar ett större antal dropp samt att mycket dropp sker vid sprutbetongens slut på tunnelväggens nederkant. Detta dropp kan troligen förklaras med att vatten rinner från ovanliggande berg längsmed insidan av sprutbetonglagret.

Bild 1 visar ett område med mycket inläckage på norra tunnelväggen i avsnitt 0/085 där ett massivt inläckage registrerades.



Bild 1, avsnitt 0/085

Sprickkartering och dess inverkan på injekteringsdesignen

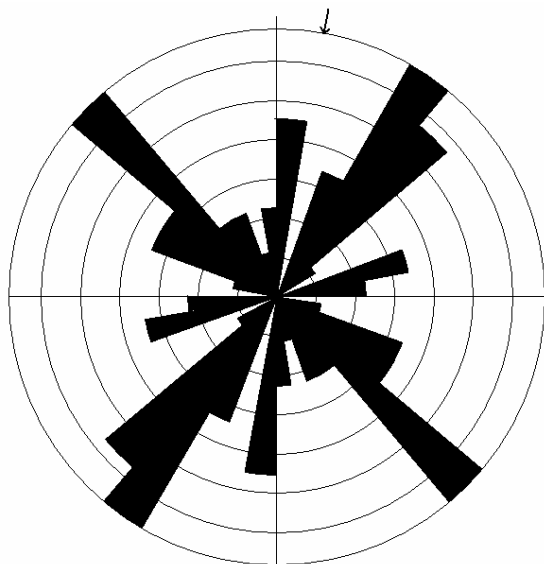
Karteringen syftar till att ge underlag för den geometriska utformningen av injekteringen map hålllängd, riktning och avstånd mellan manschett och bergyta. Målet med designen av injekteringshålen är att ”fånga in” en så stor andel av sprickplanen som möjligt, strävan är därför att borra injekteringshålen så nära vinkelrätt som möjligt mot huvudsprickriktningarna.

Metod

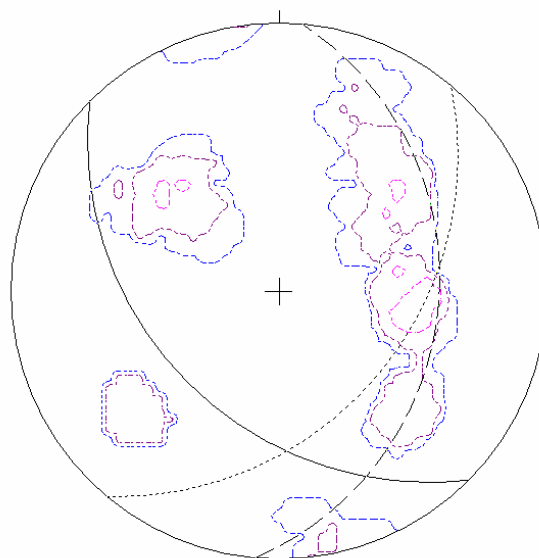
En kartering av synliga sprickor i Paradiset samt av sprickor på bergidagen ovan tunneln genomfördes 2006-09-06, data från karteringen redovisas i separat protokoll. Sprickorna i tunneln analyserades i samarbete med geologstuderande Mikael Hellström med avsikt att undvika missvisande sprickor orsakade av sprängning. Sprickorna karterades efter högerhandsregeln (Lindblom, 2001) och den grafiska presentationen har utförts med hjälp av programmet Georient®.

Resultat

Karteringen i tunneln har begränsningar pga att stora delar av tunneltak och -väggar är täckta med sprutbetong, dock är ett område mellan sula och tunnelvägg otäckt. Resultatet visar på huvudsprickriktningar i $N40^\circ$ (NÖ), $N135^\circ$ (SÖ) och $N5^\circ$ (N), se Figur 1. Sprickornas stupning varierar huvudsakligen mellan 40° och 60° , se Figur 2. I stereonätet illustreras huvudsprickriktningarnas strykning och stupning med punktmarkerad ($N40^\circ$), streckad ($N5^\circ$) respektive heldragen linje ($N135^\circ$).

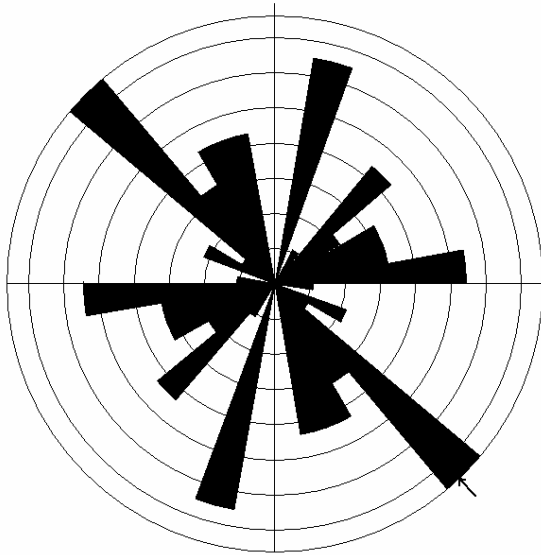


Figur 1, sprickkros i Paradiset

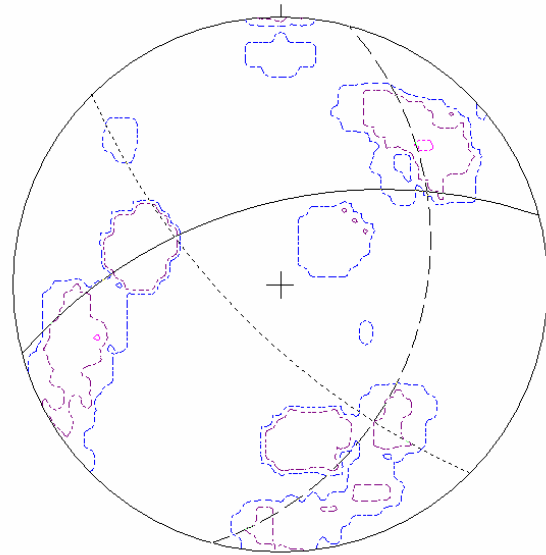


Figur 2, stereonät i Paradiset

Ytkarteringen följer tunnelsträckningen och visar på huvudsprickriktningar i N135° (SÖ), N15° (NNÖ) och N75° (ÖNÖ) nämnda i storleksordning, se Figur 3. Sprickornas stupning varierar för respektive huvudsprickriktning 70°-80° (punktmarkerad), 40°-50° (streckad) samt 50°-80° (heldragen) för respektive strykning nämnd ovan, se Figur 4.

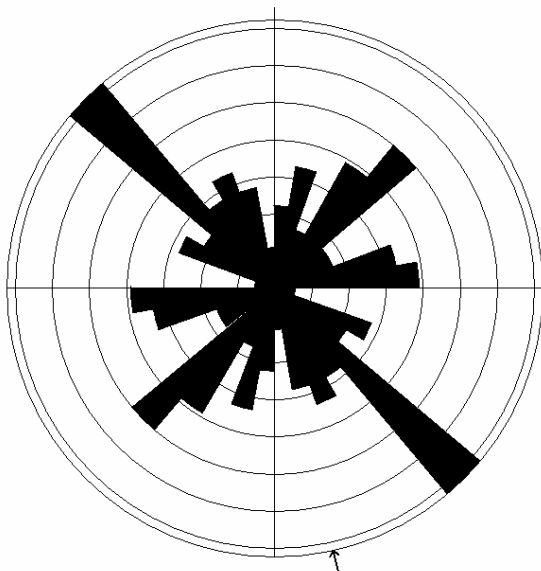


Figur 3, sprickros ovan Paradiset

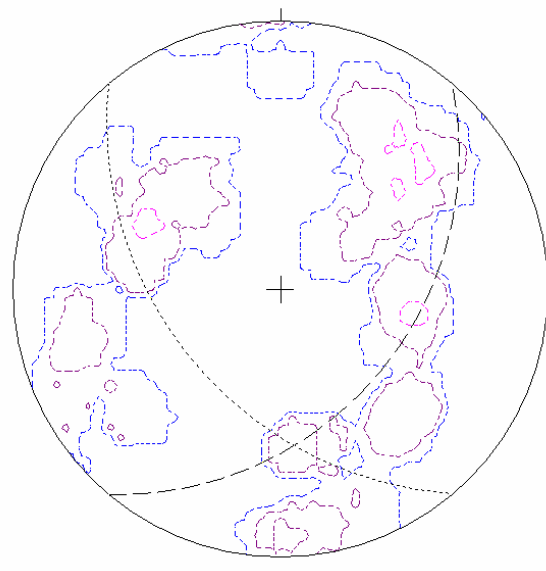


Figur 4, stereonät ovan Paradiset

En sammanvägning av karteringarna i tunneln och ovan tunneln ger huvudsprickriktningar i N140° (SÖ) och N40° (NÖ), se Figur 5. Stupningarna varierar huvudsakligen mellan 40° och 70° (punktmarkerad) samt 40° och 60° (streckad) för respektive huvudsprickriktning, se Figur 6.



Figur 5, sprickros totalt



Figur 6, stereonät totalt

Avsnittet av räddningstunneln Paradiset som ska efterinjekteras sträcker sig i N45° (NÖ) vilket innebär att huvudsprickriktningarna går vinkelrät mot respektive parallellt med tunnelriktningen.

Analys

Huvudsprickriktningarna i tunneln och ovan mark kring Paradiset stämmer väl överens med varandra, dock skiljer de sig åt vad avser frekvensen av respektive riktning. Sprickor vinkelräta mot tunnelriktningen är lika representerade i båda fallen, skillnaden ligger i sprickor parallella med tunneln som ska efterinjekteras där fler sprickor har karterats i tunneln än ovan. Ofta underrepresenteras sprickorna parallellt med tunneln vid en kartering i tunnel vilket inte är fallet här (Lindblom, 2001). Förklaringen till detta är att karteringen i tunneln även innefattar sprickor karterade längre upp i tunneln där tunnel svänger 45° och följer en N-S riktning vilket innebär att de parallella sprickorna här blir lättare att kartera. Varför dessa har karterats i mindre omfattning på ytan är dock okänt.

Slutsats

Sammanfattningsvis kan konstateras att strykningarna och stupningarna i den totala sammanvägningen anses som representativa för bergmassan.

Uppgifter om huvudsprickriktningarna och stupningar som sprickarteringen resulterar i ligger senare tillgrund för designen av efterinjekteringsskärmens riktning, längd, avstånd mellan bergyta och manschett, c/c-avstånd och mönster. För att vara "säker" på att uppnå önskat tätningsresultat dimensioneras injekteringsskärmarna med ett överlapp på 50 %.

Fälttest, injektering med silica sol

Injekteringsförsök och hydrogeologiska tester genomförs i samarbete med ett annat examensarbete på Chalmers av geologstuderande Mikael Hellström. Syftet med de hydrogeologiska testerna är att utvärdera bergmassans egenskaper vilket senare utnyttjas i injekteringsförsöket och framtida injekteringsdesign.

Metod

Utvärdering av tunnelkartering och okulärbesiktning visade att ett lämpligt avsnitt för injekteringsförsök med silica sol fanns i södra parallelltunneln vid sektion 403/150. 3st kärnborrhål borrades och tester för att utvärdera bergmassans och silica solens egenskaper genomfördes, vilka redovisas i kronologiskordning. Efter utförd injektering överborras kbh3 och ett nytt kbh borras mellan kbh 2 och 3 för analys av silica sols inträngningsförmåga.

Utförande/resultat/analys

Grundvattentryck mätningar 2006-05-24 till 28

Syftet är att bestämma storleken på grundvattentrycket vilket används vid dimensionering av injektering. Dimensionerande tryck vid inträngningsberäkningar är Δp vilket är skillnaden mellan injekterings- och grundvattentryck.

Installering av manschetter med manometrar i kbh 1,2 och 3 utförs 2006-05-24 kl. 20:20-20:45. Avläsning av grundvattentryck sker 2006-05-26 17:00 då även naturligtinflöde registreras, se Tabell 1.

Tabell 1. Grundvattentryck

Borrhål	Grundvattentryck [bar]
Kbh 1	0,8
Kbh 2	1,0
Kbh 3	0,9

Manschetterna i kbh 1 och 3 byter plats 2006-05-26 kl. 18:30 för att utesluta defekt manschett då grundvattentrycket är noll. En ny avläsning genomförs 2006-05-28 kl. 11:00. Grundvattentrycket är oförändrat i kbh 2 och 3, kbh 1 däremot har nu ett grundvattentryck jämbördigt med de tidigare nämnda. Osäkert är om manschetten var felaktigt monterad eller om tiden var den avgörande faktorn.

Naturligt inflöde 2006-05-26 och 28

Inflödet i tunneln från ett borrhål ger en uppskattning av omgivande bergmassas transmissivitet vilket används vid injekteringsdimensioneringen. Fullhålsinflödet under 1min mäts, mätningarna utförs tills ett konstant flöde erhålls.

Tabell 2. Inflöde

Borrhål	Inflöde [l/min]
Kbh 1	0
Kbh 2	0,016
Kbh 3	0,008

I kbh 1 saknas inflöde och grundvattentryck, ett försök med byte av manschetter för att utesluta defekt manschett utförs 2006-05-26 kl. 18:30. En ny mätning utförs 2006-05-28 kl. 11:00 dock saknas fortfarande mätbart inflöde, trots fungerande manschett och uppvisat grundvattentryck.

Reologiska tester på silica sol 2006-05-24 kl. 22:00

Avgörande för en lyckad injektering är en rätt blandad silica sol som har de egenskaper injekteringen är dimensionerad efter. Testet syftar till att kontrollera silica solens teoretiska geltider i tunnelsemiljö.

Följande förutsättningar gäller vid test på silica sol

- Blandningsförhållande: 1/5
- Teoretisk geltid: 25 min
- Silica Sol temperatur vid start: 9,8 °C
- Lufttemperatur: 7,3 °C

Uppmätningen av silica och NaCl sker vikt baserat. Totalt 12 kg blandas, 10 kg silica och 2 kg NaCl. Efter omrörning sätts tidtagaruret igång och en del av blandning hälls över i 7st mindre, transparenta kärl. Samtliga prov med silica sol gelar efter 26 min och 30 s, 1 min och 30 s över beräknad geltid vilket är tillräckligt nära för att anses som godkänt.

Vattenförlusttester (resultat i separat protokoll)

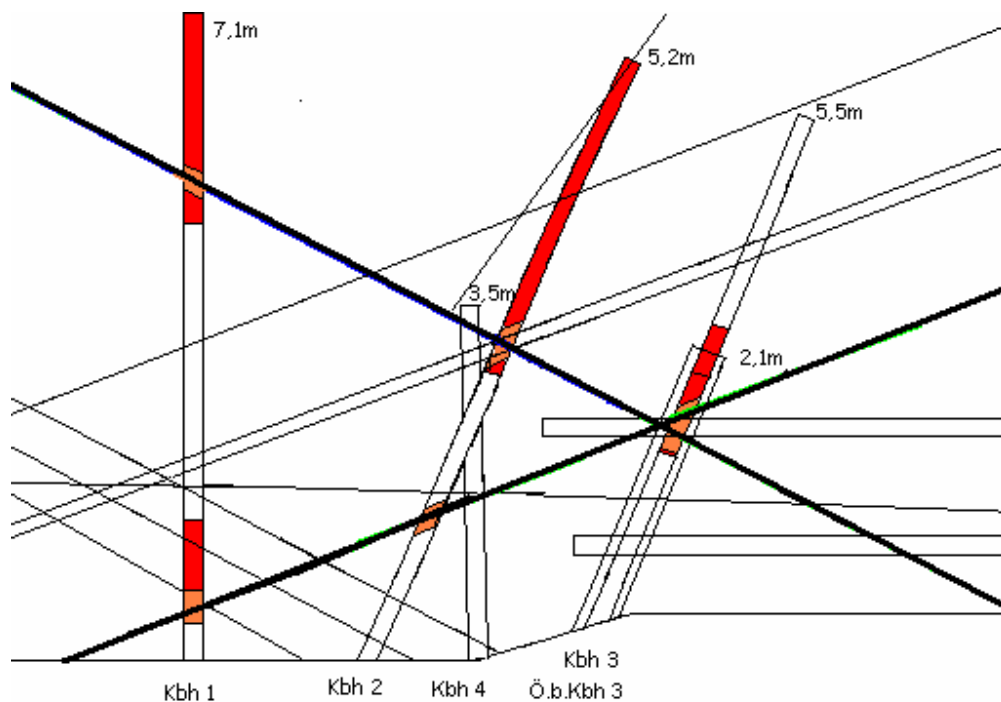
Data från vattenförlusttestet används för beräkning av transmissivitet och hydraulisk sprickvidd vilket ligger till grund för kommande injekteringsdesign.

Vattenförlustmätningar utförs sektionvis med enkelmanschett uppblåst till ett tryck av 14 bar. Pga. manschettens uppbyggnad utförs första mätningen i en större sektion (1,20 m) än övriga (1,0 m). Också yttersta metern av borrhålet förblir otestad pga. av manschettens längd. Sektioner angivna i protokoll utgår från borrhålsbotten, exempelvis sektion 3,2 innebär en mätsektion från 0-3,2 m.

Vattenförlusten mäts med hjälp av ett mätkärl som trycksätts med kvävgas till 4 bars tryck i test 1-3, 14 bar i test 4-5 och 7-14 bar i test 6. Vattenförlusten registreras under 10 min alternativt till konstant flöde uppnås. En kalibrering av mätkärl visar att en nivåsenkning med 6,5 cm motsvaras av en liter vatten. Under försöken uppmättes lufttemperaturen till 7,8 °C. Avsnitten med registrerade vattenförluster kan ses i Figur 1.

Sambandstester genom vattenförlust

Sambandstesterna utförs med syfte att kontrollera att samband mellan kbh 1-3 existerar. Samband mellan borrhålen är ett måste för att en lyckad injektering ska kunna genomföras senare. I Figur 1 nedan kan placering av kbh 1-3 ses.



Figur 1, konceptuellmodell över kbh:ns placering och sprickorna i testområdet (Hellström, 2007).

Test 1 för utvärdering av samband mellan borrhålen inleds 2006-05-29 kl. 20:20. En mekanisk manschett placeras 0,5 m in i kbh 1. Vattenförlusten mäts med hjälp av ett mätkärl som trycksätts till 14 bar. Kbh 2 och 3 är utrustade med manschetter och manometrar vilka kontrolleras under testets gång för registrering av eventuella tryckförändringar. Testet avbryts kl. 21:00 då hade en mindre förändring, 0,1 bar, iakttagits på manometern i kbh 2. Trycket i kbh 3 är oförändrat.

Test 2 med gul (riboflavin, B2-vitamin) infärgning i vattnet inleds 2006-05-29 kl. 21:10. Förutsättningarna är desamma som för test 1 med undantag för att manschetterna i kbh 2 och 3 har avlägsnats. Testet avbryts kl. 22:25, ingen infärgning har kunnat konstateras i kbh 2 eller 3 vilket har kontrollerats genom tömning av borrhålet på vatten.

Test 3 med gul (riboflavin, B2-vitamin) infärgning i vattnet inleds 2006-05-29 kl. 22:50. Förutsättningarna är desamma som för test 2 ovan förutom att testet utförs i kbh 2. Testet avbryts kl. 00:05 utan att något samband har kunnat konstateras.

Test 4 med blå (metylen) infärgning i vattnet inleds 2006-05-30 kl. 14:40. Förutsättningarna är desamma som för test 2 ovan. Testet avbryts kl. 15:40 utan att något samband har kunnat konstateras. Under test 4 registreras vattenförlusten varje minut vilket kan ses i separat protokoll.

Test 5 med blå (metylen) infärgning i vattnet inleds 2006-05-31 kl. 14:40. Förutsättningarna är desamma som för test 2 ovan förutom att testet utförs i kbh 3. Testet avbryts kl. 15:53 utan att något samband har kunnat konstateras mellan borrhålen, dock ses utträngningar på två platser på tunnelväggen. Vattenförlusten registrerades under testet vilket kan ses i separat protokoll. Ett problem som uppstod under mätningen var stora vattenförluster vilket resulterade i ett flertal mindre avbrott i testet då mätkärl fylldes upp. En orsak till de stora förlusterna antas vara ett förinjekteringsborrhål vilket skär genom kbh 3, senare kan även konstateras att blåinfärgning trängt fram vid dess utmynning i tunneln.

Test 6 med florocerande (urin) infärgning i vattnet inleds 2006-05-31 kl. 19:00. Förutsättningarna är desamma som för test 3 ovan förutom typ av infärgningsmedel. Testet avbryts kl. 20:45 med konstaterade samband mellan samtliga (kbh 1-3) borrhål. Även utträngning på tunnelväggen kan konstateras mellan kbh 2 och 3. Vattenförlusten registrerades under testet vilket kan ses i separat protokoll.

Injektering 2006-05-26 (resultat i separata protokoll)

Test av utrustning sker genom en provinjektering av vatten. Blandning av silica sol med ett vikt baserat blandningsförhållande av 1/7 sker i hydrofor. Injektering sker i kbh 1 med ett konstant tryck av 6,5 bar som uppnås med kvävgas. Under injekteringen är kbh 2 och 3 utrustade med latexstrumpor som trycksätts av en kompressor till 12 bar. Strumporna förhindrar att injektering fyller kbh 2 och 3, kbh 3 överborras för vidare analys av inträngning i sprickor. Ytterligare ett kbh borras mellan kbh 2 och 3 för vidare analys av inträngning i en specifik spricka som tros korsa kbh 1-3.

Utträngning av infärgat vatten kunde ses på bergväggen under injekteringsgången vilket tyder på att silica sol tränger in i berget. Vid injekterings slut kunde konstateras att en sjunktratt hade bildats i injekteringskärlets botten vilket visar på att inträngning av silica sol skedde även under injekteringsförloppets slutskede. Endast marginell åtgång av silica sol kunde registreras efter inledande hålfyllning detta kan dock under injekterings slutskede förklaras med ett allt mer trögflytande injekteringsmedel som "korkade igen" mätroret i glas på mätkärls utsida.

Vattenförlusttester 2006-06-04 (resultat i separat protokoll)

Efter injekteringen utförs nya tester i kbh 2 och 3 för analys av ev. förändrad transmissivitet som visar på silica solens framträngning. Testerna utförs enligt samma modell som testerna utförda innan injekteringen.

Utrustning, injektering och hydrauliska tester

Generator i spårtunnel utanför ingång till parallelltunneln vid 403/010.
Strömsladd
El-central
Belysning
Kompressor (strumpor och manschett)
Termometer
Stoppur
Tumstock
Verktyg
Tejp
Spännband
Vatten och tryckstegringspump (traktorvagn)
Transport
Papper
Anteckningsmaterial
Stolar

Hydrauliska tester

Manometrar (3st)
Manschetter för fullhålsflöde och grundvattentryck (3st)
Mätkärl
Manschett med 10 m slang alternativt stång för inflöde och vattenförlust sektionsvis
Villa mätare
Tryckkärl
Vattenslang och kopplingar mellan pump och villa mätare/tryckkärl
Vatten slang alternativt koppling mellan manschett och villa mätare/tryckkärl
Luftslang och kopplingar mellan kvävgas och tryckkärl
Protokoll

Injektering

Silica sol och NaCl
Dunkar (Silica Sol och NaCl)
Mätkärl för Silica sol (10 kg) och NaCl (2 kg) för 5:1 blandning
Våg

Bord till våg (Mona)
Testkoppor för geltid (transparenta)
Omrörningspinne
Blandare
Omrörare (borrmaskin med visp)
Hydrofor
Kvävgas (2 tuber á 150 bar)
Luftslang och kopplingar mellan kvävgas och hydrofor
Manschetter, flegångs (51 mm)
Armerad tryckslang mellan hydrofor och manschett
Manometrar
Strumpor (2st)
Plast ändpluggar
Plaströr till att föra in strumpor
Strumpmanschetter
Luftslang och kopplingar mellan kompressor och strumpor (dubbelkoppling)
Infärgning
Protokoll

Förslag till design av efterinjektering med silica sol i servicetunnel Paradiset, Tommy Ellison, BESAB.

Bakgrund

Järnvägstunneln och servicetunnel samt övriga tunnlar har förinjekterats med mikrocement, och en del efterinjektering har utförts med både cement och polyuretan. I spårtunneln har nyligen ett omfattande efterinjekteringsarbete med silikasol avslutats. Trots stora injekteringsinsatser i drivningsskedet är inläckaget i området kring servicetunnel Paradiset otillfredsställande högt. Restläckagen är i detta område omfattande, och det bedöms som verkningsfullt att utföra ytterligare injektering i detta område för att minska den totala inläckningen.

När det gäller utveckling av injekteringsteknik med silikasol samt tidigare erfarenheter, hänvisas till text i "Förslag till design av förinjektering med silikasol, Nordlänken delen Öxnered-Trollhättan". Erfarenheter från tidigare arbeten i spårtunneln kommer att sammanfattas av Chalmers i två examensarbeten. Peter Edrud och Henrik Svensson har gjort en utvärdering av injekteringsresultatet med utgångspunkt från vattenförlustmätningar, medan Michael Hellström har utifrån ett hydrogeologiskt perspektiv gjort hydrauliska tester i tidigare cementinjekterad bergmassa och inträngningsförsök med silikasol för att förbättra och kalibrera befintliga inträngningsmodeller.

Förslaget nedan bygger på erfarenheter från Törnskogstunneln och i någon mån från de utförda injekteringsarbetena i spårtunneln. De nämnda examensarbetena fanns inte tillgängliga vid tidpunkten för detta förslag. Dessutom har vi haft tillgång till geologisk kartering i tunneln samt injekteringsprotokoll från utförd cementinjektering.

Förslag

Allmänt

I området sektion 0/030–0/110 har omfattande förinjektering och efterinjektering med mikrocement utförts. Hela 20 skärmar har injekterats på den aktuella sträckan, och dessutom har ett stort antal hål efterinjekterats. Fler än 850 hål har injekterats, och totalt har cirka 91 ton cement samt en mindre mängd kembruk (polyuretan) tryckts in. Frånsett sektion 0/080-0/100 har det varit relativt små mängder cement per bormeter. Måttliga vattenförluster, relativt måttliga injekteringsmängder samt ett kraftigt restläckage tyder på att området är svårtätat. En sammanställning av utförd injektering finns i slutet av denna skrift.

Cementinjekteringen har troligen lyckats täta de grova strukturerna långt ut från tunneln, medan en stor mängd fina sprickor är nästan oinjekterade. Det injekteringskoncept som finns i bygghandlingen är tydligen mindre effektivt för att bemästra denna typ av finsprickigt berg med sprickfyllnadsmaterial. Om inläckningsmängden skall reduceras måste därför ett fintätningmaterial nyttjas. Det är då naturligt att använda silikasol som har visat sig effektivt i liknande bergmassa. Erfarenheter från Hallandsåsen tyder på detta.

Tidigare slutsatser från spårtunneln gäller, men här gäller det att få ner det totala inläckaget varför även botten måste behandlas. Att rensa botten är ett alltför omfattande och kostsamt

ingrepp, varför borrning genom sylta och väggkropp med foderrör väljs. Ytberget i botten kan befaras vara kraftigt uppsprucken av sprängskador.

Tunnelns utformning

Tunneln har enligt uppgift en tvärsnittsarea på 25 m² teoretiskt. Tunnelns bredd är omkring fem meter förutom nischen som börjar vid sektion 0/090 där tunnelbredden ökar till omkring åtta meter. Tunnelns höjd är omkring 5,5 m i mitten. Bergutfall gör att de verkliga måtten är större än de teoretiska.

Det finns en dränledning som är övertäckt med makadam på båda sidor om tunneln. Vägbanan behöver vara körbar med fordon under injekteringen. Foderrör i vägbanan kapas nära mark för att trafik skall vara möjlig.

Bergkvalitet

I området mellan 0/040-0/070 ligger Q-värdet i väggarna (bör gälla hela även tak och botten) på 0,1, medan resten av sträckan har ett Q-värde mellan 1-7. Antalet karterade sprickor är omkring sex stycken per meter. I området 0/040-0/070 är sprickfrekvensen troligen högre.

Huvuddelen av de vattenförande sprickorna ligger relativt nära vinkelrätt mot tunnelaxeln, och har en svag lutning från vertikalplanet mot fallande sektion.

Skärmutformning

Bottenhålen borraras med någon lutning, t ex 1:1,5 mot ökande sektion och motsatt i tak. Vägghålen borraras lämpligen, i likhet med takhålen, med vinkel mot fallande sektion. Lutande hål kan också vara lämpligt för att få utrymme för borrarutrustningen.

Håldjupen väljs så att stickningen blir minst 6 m i botten och cirka 5 m i tak och väggar. I botten borraras foderrör ner cirka en meter i berg, troligen cirka två meter totalt. Därefter borraras ytterligare minst sex meter i berg räknat vinkelrätt mot tunnelns längdaxel.

I spårtunneln användes hålavstånd i tunnelns periferi på 2,5 m, vilket ger ett genomsnittligt hålspetsavstånd på cirka 3,0 m. Avståndet mellan hålspetsarna anpassas med underlag av tidigare utförd injektering i området. Flera injekteringsomgångar och små injekteringsmängder tyder på ett svårinjekterat berg vilket innebär att hålavståndet bör minskas något, välj hålspetsavstånd 2,5 m. Vid stora injekteringsmängder ökas hålavståndet i en första omgång, välj hålspetsavstånd 4,0 m. Kontrollhål borraras mellan primärhålen vid stora vattenförluster eller stor injekteringsmängd i första omgången.

Preliminära borrarplan har upprättats och biläggs. Lämplig hållutning och hållängd anpassas efter borraragregatets möjligheter. Följande mängder gäller vid hållutning på 1,5:1.

Injektering i botten:

Sektion	Q-värde	Hålavstånd m	Skärmar st	Hål/rad st	Hållängd m (+foderrör)	Borrning m (+foderrör)
0/030-0/040	2-4	4,0	3	5	7	105
0/040-0/070	0,1 ?	2,5	12	7	7	588
0/070-0/110	2-7	4,0	10	5	7	350

Foderrörborrning tillkommer med 149 hål med 2 m per hål, totalt cirka 300 m.

Injektering i tak och väggar:

Sektion	Q-värde	Hålavstånd m	Skärmar st	Hål/rad st	Hållängd m	Borrning m
0/030-0/040	2-4	4,0	3	9	6	162
0/040-0/070	0,1?	2,5	12	13	6	990
0/070-0/110	2-7	4,0	10	9	6	540

Kontrollhål kan preliminärt antas bli ungefär enligt följande:

Injektering i botten:

Sektion	Q-värde	Hålavstånd m	Skärmar st	Hål/rad st	Hållängd m (+foderrör)	Borrning m (+foderrör)
0/030-0/040	2-4	4,0	1	4	6	24
0/040-0/070	0,1 ?	2,5	2	6	6	72
0/070-0/110	2-7	4,0	3	4	6	72

Foderrörborrning tillkommer med 40 hål med 2 m per hål, totalt cirka 80 m.

Injektering i tak och väggar:

Sektion	Q-värde	Hålavstånd m	Skärmar st	Hål/rad st	Hållängd m	Borrning m
0/030-0/040	2-4	4,0	1	9	5	45
0/040-0/070	0,1?	2,5	2	13	5	130
0/070-0/110	2-7	4,0	3	9	5	135

Injekteringsutförande

Vattenförlustmätning utförs i alla hål.

Samtliga hål injekteras med silikasol. I normalfallet används en geltid på cirka 45 minuter. Om ytläckage förekommer eller om inget mottryck erhålls efter att 500 liter injekterats, sänks geltiden i nästa sats till omkring 20 minuter.

Utrustning för cementinjektering och injekteringscement samt flytmedel bör finnas i beredskap för att användas om tidigare oinjekterade grova strukturer skulle påträffas. Dessa känns igen på kraftigt vattenflöde ur borrhålet samt stor vattenförlust >2 Lugeon.

Sammanfattning

För övrigt utförs injekteringen enligt följande riktlinjer.

- Borrhålen borras i enligt upprättade borrarplaner.

- Foderrör kapas strax över vägytan och skyddas från nedsmutsning.
- Raderna identifieras med sektion. Hålen numreras enligt borrhplaner.
- Renspolning av borrhålen utförs med högtryck och bakåtriktat munstycke. Uppåtriktade hål får renspolas med slang som förs in till hålets botten.
- Alla läckande hål vattenförlustmäts. Om hålen förefaller täta utförs vattenförlustmätning i minst vart fjärde hål fördelat över hela ytan.
- Engångspackers används där det är möjligt. Packern placeras cirka 0,5 m in i hålet. Låt oinjekterade hål stå öppna under injekteringen för indikering av eventuella samband. Om större vattenläckage uppstår under borrhningen monteras flergångsmanschett som stängs i väntan på injektering.
- Engångspackers får kvarsitta i injekteringshålen. Om flergångspacker har använts vid injekteringen, demonteras denna efter avslutad injektering varefter en engångspacker monteras. Efter injektering pluggas injekteringshålen med cement. Anläggningscement kan användas och $vct=0,28-0,30$ väljs för att bruket skall stanna kvar i hålen.
- Maximalt injekteringstryck väljs till 1,4 MPa över grundvattentrycket vid bergtäckning >10 m. Om bergtäckningen är mindre reduceras injekteringstrycket enligt bygglidningens direktiv.
- Bottenhålen borraras och injekteras först. Därefter borraras och injekteras vägghålen.
- Vägghålen injekteras i tur och ordning med början vid ena väggen. Om samband uppstår monteras manschett i sambandshålet. Eftertryckning utförs.
- Geltiden väljs till cirka 45-60 minuter. Kalibrering av denna blandning utförs inledningsvis. Vid stor bruksåtgång kan en kortare geltid väljas för andra satsen.
- Pumptiden skall vara cirka 30 minuter eller minst halva geltiden. Observera att även små mängder utöver hålvolymen kan bidra till ett bra tätningsresultat.
- Täta hål fylls med silikasol och eftertrycks med 1,0 MPa över grundvattentrycket.
- Borrhning av kontrollhål kan påbörjas en timme efter avslutad injektering.
- Kontrollhål borraras om större mängder injekteringsmedel har pumpats in, om inget sluttryck noteras eller om flera hål har haft samband.

Kunskapsuppbyggnad och uppföljning

Chalmers Geo har en bred kompetens inom hydrogeologi, och utvecklar teori för hydrogeologiska tester och genomförande av injektering i berg. Gruppen består av bland andra följande personer:

- Professor Gunnar Gustafson är en internationellt erkänd hydrogeolog.
- Teknologie doktor Åsa Fransson har nyligen avslutat en forskaruppgift som behandlar utförande och strategier vid efterinjektering.

- Johan Funehag har i sitt doktorandarbete utvecklat teorin bakom injektering med silikasol.
- Magnus Axelsson studerar i ett doktorandarbete egenskaper hos gelände vätskor och cementbaserade injekteringsmedel.

Arbetet i spårtunneln har följts av tre examensarbetare under Johan Funehags ledning. Resultatet av Michael Hellströms arbete kan användas för att göra mer noggranna beräkningar av inträngning av silikasol i bergsprickor. Peter Edrud och Henrik Svenssons arbete stördes av att vi inte hann göra tillräckligt många kontrollhål och att många av dessa var täta.

I servicetunneln skulle det vara av stort intresse att låta Chalmers Geo följa upp och eventuellt komma med förbättringar i designen under arbetet. På så sätt kan resultatet bli bättre samtidigt som kunskapen av denna omfattande injektering tas tillvara och kan nyttjas av branschen i framtiden.

Vi samarbetar gärna med Chalmers Geo och rekommenderar därför att institutionen får möjlighet att medverka i detta projekt.

Sammanfattning av injekteringsförloppet för silikasolskärm

Botten

1. Utsättning av injekteringshål enligt borrhplan.
2. Borrning injekteringshål i botten.
3. Renspolning med högtryck och bakåtriktat munstycke, eller slang i uppåtriktade hål.
4. Vattenförlustmätning av alla injekteringshål. ($\Delta p = 0,5$ MPa under 2 min per hål)
5. Injektering med silikasol: Meyco MP320, geltid: $t_{gel} \approx 45$ min. Injekteringsövertryck $\Delta p = 1,4$ MPa. Injektering under 30 min vid föreskrivet tryck.
6. Borrning av kontrollhål om stora vattenförluster, injekteringsmängder, samband eller inget mottryck.
7. Vattenförlustmätning i kontrollhålen ($\Delta p = 0,5$ MPa under 2 min per hål)
8. Injektering av kontrollhålen med silikasol enligt ovan
9. Försegling av injekteringshålen med Anläggningscement vct=0, 28-0,30

Tak och väggar

10. Borrning av injekteringshål i väggar och tak enligt borrhplan utförs när botteninjektering har slutförts och ligger minst 3 rader framför.
11. Renspolning med högtryck och bakåtriktat munstycke, eller slang i uppåtriktade hål.
12. Injektering med silikasol: Meyco MP320, geltid: $t_{gel} \approx 45$ min. Injekteringsövertryck $\Delta p = 1,4$ MPa. Injektering under 30 min vid föreskrivet tryck.
13. Borrning av kontrollhål om stora vattenförluster, injekteringsmängder, samband eller inget mottryck.
14. Vattenförlustmätning i kontrollhålen ($\Delta p = 0,5$ MPa under 2 min per hål)
15. Injektering av kontrollhålen med silikasol enligt ovan.
16. Försegling av injekteringshålen med Anläggningscement vct=0, 28-0,30

Hänvisningar

(1) "Grouting with silica sol in the Törnskog Tunnel. Grouting design for silica sol in full production.", Johan Funehag och Gunnar Gustafson, Chalmers Geo, Publ 2005:12.

AB BESAB

Tommy Ellison

Kontrollprogram

Följande kontrollprogram har sammanställt från erfarenheter och idéer ur diverse litteratur under arbetets gång.

- Grundvattentryck mätningar i två injekteringshål i första skärmen, ett i tak och ett i botten för att kalibrera injekteringsövertrycket.
- Vattenförlustmätningar innan injektering utförs i samtliga injekteringshål med ett provtryck på 0,5 MPa över grundvattentryck under 2 min.
- Vattenförlustmätningar i kontrollhål efter injektering utförs med samma tryck och tid som de innan injektering enligt kriterier nedan. Kriterierna anges i prioritetsordning, vilket innebär att om alternativ 1 stämmer in på utfallet av vattenförlusten innan injektering är det denna som gäller. Om inte, kontrolleras om alternativ 2 stämmer osv.
 1. Om ingen vattenförlust registreras i injekteringshålen och endast halfyllnad uppnås under injektering behöver inga kontrollhål borraras.
 2. Om endast ett injekteringshål visar på vattenförlust alternativt att mer silica sol går åt i ett injekteringshål, borraras ett kontrollhål mellan detta och ett injekteringshål i dess närhet.
 3. Om flera injekteringshål visar på vattenförlust alternativt mer silica sol går åt borraras kontrollhål mellan dessa, fem kontrollhål per skärm.
 4. Vid uppvisad vattenförlust eller åtgång av silica sol i flertalet hål placeras kontrollhållen mellan de hål som ger störst vattenförlust eller har högst åtgång av silica sol.
- Silica sol har olika egenskaper bl.a. beroende på dess ålder och lagring, vilket innebär att geltider måste kalibreras innan en ny injektering påbörjas. Detta sker genom provblandning av silica sol med olika blandningsförhållande. Lämpligen de som kan tänkas komma till användning under injekteringen.
- På varje sats testas dessutom geltiden genom koppförsök för att kontrollera vägningsutrustningens tillförlitlighet och att materialen har bibehållna egenskaper.

Pump-log sparas för samtliga injekteringssskärmar. Denna kan utnyttjas för att utvärdera det reella medelinjekteringsövertrycket som är avgörande för inträngningslängden.