

## **EFTERINJEKTERING: INLÄCKAGEPROGNOS OCH DESIGN - förslag till analys**

Åsa Fransson

Gunnar Gustafson

STIFTELSEN SVENSK BERGTEKNISK FORSKNING  
SWEDISH ROCK ENGINEERING RESEARCH

# **Efterinjektering: Inläckageprognos och design – förslag till analys**

## **Postexcavation grouting: Inflow prognosis and design – suggested analyses**

Åsa Fransson, Gunnar Gustafson, Chalmers



## Förord

Flertalet av dagens tunnlar utförs med förinjektering i samband med drivningen för att uppfylla aktuella täthetskrav, som kan vara relaterade både till risker för grundvattenpåverkan och tunnelns funktion i driftskedet. Vid höga täthetskrav kan efterinjektering krävas för att man ska komma ned till tillåtna nivåer på inläckaget, dvs injekteringsarbeten efter uttag av berget. En allmän erfarenhet inom branschen är att efterinjektering är svårt att lyckas med och i de fall man har nått goda resultat har kostnaden varit oproportionerligt hög. Detta har lett till en skeptisk inställning till metoden och utvecklingen av tekniken har blivit eftersatt. Resultat och erfarenhet från andra FoU-projekt inom injekteringsområdet har gjort att man ser nya möjligheter och en potential för effektivare efterinjektering. Det gäller både möjligheten att bedöma och beskriva sprickförhållanden, inträngningsförmåga hos olika injekteringsmedel och att simulera inträngning och tätningseffekt.

Föreliggande rapport är resultatet av en förstudie som belyser praktiska och teoretiska förutsättningar för efterinjektering och redovisar förslag till analyser som underlag för val av injekteringsstrategi. Arbetet är baserat på teoretiska modeller som tagits fram under senare år för att beskriva injekteringsprocessen och på data som ställts till förfogande av SKB (Åspö), Banverket (Hallandsås) och Vägverket (Törnskogstunneln). På grundval av dessa data har sex analys exempel beskrivits, tre ytligt belägna tunnlar (20 m djup) och tre djupt belägna (450 m). Exemplet redovisar prognos av inläckage och injekteringsbehov och förslag till injekteringsdesign, speciellt med hänsyn till risk för ”jacking”, ”back flow” och turbulens/erosion av injekteringsmedel med hänsyn till gradient. Metodiken utgör en grund för ytterligare simuleringar och överväganden genom komplement med ytterligare parametrar och anpassningar till olika praktikfall.

Projektet har utförts på Avdelningen för geologi och geoteknik vid Chalmers och samfinansierats av SBUF, Banverket, SKB och SveBeFo. Arbetet har följts av en referensgrupp bestående av Lars-Olof Dahlström, Banverket, Tommy Ellison, Besab, Ann Emmelin, SKB, Magnus Eriksson, Vattenfall Power Consultant, Bjarne Liljestränd, Lemcon, Kenneth Rosell, Banverket, Björn Stille, Skanska, och Pär Åhman, FoU Väst, samt undertecknad.

Stockholm i augusti 2006

Tomas Franzén

## Sammanfattning

En inledande litteraturgenomgång med fokus på efterinjektering visar att det är svårt att identifiera en ”praxis för efterinjektering”. Beskrivningarna är ofta kortfattade och angreppssätten olika. Följande rapport avser att gå igenom de praktiska och teoretiska förutsättningarna för efterinjektering och att redovisa strategier för efterinjektering baserade på detta. Ansatsen i detta projekt har därför varit att teoretiskt ställa samman kunnandet kring problemets delkomponenter och genomföra analyser relaterade till bergets egenskaper och processer som förväntas vara av betydelse vid för- och efterinjektering. Analyser och beräkningar är baserade på data från kärnbrorrhål från Äspölaboratoriet (KA3376B01), Törnskogstunneln (KB971) och Hallandsås (NV01).

Arbetet har genomförts genom att vidareutveckla och använda en analysmetod med tre steg. De olika stegen är:

- I. Prognos av inläckage och injekteringsbehov baserat på kärnbrorrhål.
- II. Förslag / underlag för design av injektering.
- III. Förslag / underlag för design av efterinjektering.

Arbetsgången ovan har använts för att möta projektets mål. Två delmål har varit att ge en redovisning av närbergets hydrogeologiska egenskaper efter förinjektering samt att ge en analys av spridning och tätningsförmåga hos fintättningsmedel i förinjekterat berg. Punkterna I-II ovan ger en möjlig beskrivning av det förinjekterade berget. Slutligen kan analyser i steg III kräva att förslag eller underlag för injekteringsdesign i steg II anpassas. Steg I-III skall sammantaget ses som en bas för en efterinjekteringsstrategi. Att presentera en potentiell strategi för efterinjektering har utgjort ytterligare ett delmål för projektet. Eftersom det som beskrivs här utgår från en teoretisk betraktelse är det för ett verkligt fall av central betydelse att göra en ingenjörsmässig bedömning av analyser, resultat och design. Prognoser av inläckage och injekteringsbehov (I) baserat på verkliga data visar att fintätning eller tätning av sprickor betydligt mindre än 100µm behövs för att nå låga inflöden (1-5 liter/min för 100m tunnel). Detta bekräftas av svårigheterna på Hallandsås, det minskade behovet av dräner på Törnskogstunneln vid användning av fintättningsmedel och resultatet vid användande av enbart cementbruk i tunneln på Äspölaboratoriet. Centrala parametrar för analysen är sprickviddsfördelning, sprickfrekvens, tunneldjup och inläckagekrav. För att minska riskerna relaterade till utförande och ekonomi vid tunnelbyggande är datakvalité och representativitet viktigt, noggranna undersökningar bör därför göras för både ”bra” och ”dåligt” berg. För punkten II ovan beräknas lämpliga intervall för injekteringstryck utifrån analys av deformation eller ”jacking” och återflöde av bruk, ”back-flow”. Den ökade gradient som fås runt en tunnel inför en efterinjektering kan sedan påverka föreslagen eller möjlig injekteringsdesign (II) vilket ger underlag för en ny design (III). Effekterna av en ökad gradient kan vara erosion av injekteringsmedel på grund av turbulent flöde och begränsningar av inträngningen. Rekommendationer ges hur skärm (stick) och hålgeometri kan anpassas inför en efterinjektering. De analyser som genomförts baserat på verkliga data ger exempel på föreslagen arbetsgång, vilka parametrar som är av betydelse och hur dessa kan variera.

*Nyckelord: Injektering, efterinjektering, inläckage, injekteringsbehov, design*

## Summary

An introductory literature review focusing on postexcavation grouting, shows that identifying a common established practice is difficult. Descriptions are often brief and the performance differs. Therefore, the approach chosen for this project has been to compile the knowledge of different components relevant to this problem and perform analyses related to rock properties and processes expected to be important for both pre- and postexcavation grouting. Analyses are based on data originating from core boreholes from the Äspö Hard Rock Laboratory (KA3376B01), Törnskogstunneln (KB971) and Hallandsås (NV01).

Work was made by developing and using a method for analyses including three steps:

- I. Prognosis of tunnel inflow and need for grouting based on borehole data.
- II. Suggestion of / input for grouting design.
- III. Suggestion of / input for postexcavation grouting design.

The steps presented above have been used to meet the objectives of the project. Two of the objectives have been to describe the hydrogeological properties of the rock adjacent to the tunnel after pre-grouting. Further, analyses of the spreading and the sealing ability of grouting materials for fine aperture fractures in a pre-grouted rock should be presented. The steps I and II above give a possible description of the pre-grouted rock and analyses in step III may demand a modification of the suggested grouting design in step II. Steps I-III in combination, is to be looked upon as a basis for a postexcavation grouting design, this as well was one of the objectives of the project. Of importance when choosing a final grouting design is a professional judgment from an engineering point of view since what is described here is a theoretical approach. A prognosis of tunnel inflow and the need for grouting based on core borehole data (I) shows that fine fracture sealing or sealing of fractures significantly finer than 100 $\mu$ m is needed to reach low inflows (1-5 litres/min for 100m of tunnel). This has been confirmed by the difficulties encountered at the Hallandsås, the decreased need for drains in the Törnskogstunnel and the results obtained when using a cement based grout only for the tunnel at the Äspö Hard Rock Laboratory. Parameters that are essential for the analysis are distribution of apertures, fracture frequency, depth of tunnel and the demands related to tunnel inflow. To decrease the risks concerning performance and economy while constructing a tunnel it is important to consider the quality of data and how representative these data are. Therefore careful investigations of both “good-” and “bad-quality” rock should be made. For step II above, advisable intervals for the grouting pressure are presented based on analyses of jacking and the back-flow of grout. Further, the increase seen for the pressure gradient adjacent to the tunnel following the excavation may influence the suggested design. Possible effects resulting from this increased gradient are erosion of the grouting material due to turbulent flow and limitations of the penetration length. Recommendations are given concerning how to modify the radial extension of the grouting fan and its geometry. The analyses performed based on field data are examples of how to use the presented method for analyses, what parameters that are important and how they can vary.

Keywords: Grouting, postexcavation grouting, inflow, design

## Nomenklatur

a	avstånd, borrhål spets [m]
$a_{Re \leq 10}$	avstånd från tunnelvägg där $Re \leq 10$ [m]
A	tunnelarea [ $m^2$ ]
b	sprickvidd, hydraulisk [m]
$b_{crit}$	kritisk sprickvidd, $b < b_{crit}$ , begränsad inträngning, filtrering [m]
$b_{min}$	minsta sprickvidd, ingen inträngning [m]
$b_{max}$	största sprickvidd utifrån analys av kärnborrhål [m]
D	måktighet akvifer [m]
F	total bredd, utbredning av injekteringsmedel vid gradient [m]
g	gravitation [ $m/s^2$ ]
G	kraft [ $Pa \cdot m^2$ ]
h	vattentryck [m]
$h_w$	vattentryck, borrhål [m]
dh/dL	gradient [-]
dh/dr	gradient [-]
dh/dx	lutning, gradient avsänkningstratt [-]
H	djup [m]
I	inträngning injekteringsmedel [m]
$I_{1-D}$	inträngning injekteringsmedel, 1D flöde [m]
$I_{2-D}$	inträngning injekteringsmedel, 2D flöde [m]
$I_D$	relativ inträngning injekteringsmedel [-]
$I_{max}$	maximal inträngning injekteringsmedel [m]
k	formparameter Paretofördelning
K	hydraulisk konduktivitet [m/s]
L	längd [m]
n(L)	antal sprickor, sektionsvis [-]
N	totalt antal sprickor [-]
$p_g$	injekteringstryck [Pa]
$p_w$	vattentryck [Pa]
dp/dx	tryckgradient [Pa/m]
P	kraft [ $Pa \cdot m^2$ ]
$\Delta p$	injekteringsövertryck [Pa]
q	flöde per breddenhet [ $m^2/s$ ]
$q_{inj}$	inflöde till injekterad tunnel [ $m^2/s$ ]
$q_{tot}$	inflöde till oinjekterad tunnel [ $m^2/s$ ]
Q	flöde [ $m^3/s$ ]
$Q_g$	flöde, injekteringsmedel [ $m^3/s$ ]
$Q_i$	flöde, enskild spricka [ $m^3/s$ ]
$Q_{inj}$	flöde, injekterad tunnel [ $m^3/s$ ]
Q/dh	specifik kapacitet [ $m^2/s$ ]
r	radie [m]
$r_t$	radie, tunnel [m]
$r_w$	radie, borrhål [m]
Re	reynolds tal [-]

$R_0$	influensradie [m]
$s$	avsänkning [m]
$s_w$	avsänkning, borrhål [m]
$t$	tjocklek injekterad zon [m]
$t_D$	relativ injekteringstid [-]
$t_{D1-D}$	relativ injekteringstid, 1D flöde [-]
$t_{D2-D}$	relativ injekteringstid, 2D flöde [-]
$t_0$	karaktäristisk injekteringstid [s]
$T$	transmissivitet [ $m^2/s$ ]
$T(L)$	transmissivitet, sektionvis [ $m^2/s$ ]
$T_g$	transmissivitet, injekteringsmedel [ $m^2/s$ ]
$T_i$	transmissivitet, enskild spricka [ $m^2/s$ ]
$T_{i,max}$	transmissivitet, största enskilda sprickan [ $m^2/s$ ]
$T_{100\mu m}$	transmissivitet, spricka med vidd $100 \mu m$ [ $m^2/s$ ]
$T_{inj}$	transmissivitet när vissa sprickor tätats [ $m^2/s$ ]
$T_{tot}$	total transmissivitet [ $m^2/s$ ]
$\bar{U}$	medelhastighet [m/s]
$v$	hastighet [m/s]
$x$	avstånd [m]
$Z_{gr}$	halva tjockleken ”fast plugg” för Binghamvätska [m]
$\alpha$	lutning grundvattenyta, tät botten [-]
$\mu$	viskositet [Pas]
$\mu_g$	viskositet, injekteringsmedel [Pas]
$\mu_w$	viskositet, vatten [Pas]
$\rho$	densitet [ $kg/m^3$ ]
$\rho_b$	densitet, bergmassa [ $kg/m^3$ ]
$\rho_w$	densitet, vatten [ $kg/m^3$ ]
$\sigma_H$	spänning, horisontell [Pa]
$\sigma_v$	spänning, vertikal [Pa]
$\tau_0$	flytgräns [Pa]
$\xi$	skinfaktor [-]
$\Theta$	parameter för variabelsubstitution, analys av inträngning [-]



## Innehållsförteckning

<b>Förord</b>	<b>i</b>
<b>Sammanfattning</b>	<b>ii</b>
<b>Summary</b>	<b>iii</b>
<b>Nomenklatur</b>	<b>iv</b>
<b>Innehållsförteckning</b>	<b>vi</b>
<b>1 Inledning.....</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrund .....	1
1.2 Mål och omfattning .....	3
<b>2 Teori.....</b>	<b>5</b>
2.1 Konceptuell modell.....	5
2.2 Geologi / hydrogeologi.....	6
<b>2.2.1</b> Skattning av transmissivitetsfördelning .....	6
2.2.2 Skattning av inläckage till tunnel .....	7
2.2.3 Tryck och gradient.....	8
2.2.4 Anisotropi.....	9
2.3 Injekteringsmedel .....	9
2.3.1 Reologi .....	9
2.3.2 Exempel på Binghamvätskor.....	10
2.3.3 Exempel på Newtonvätskor.....	10
2.4 Design / teknik – dimensionerande faktorer.....	11
2.4.1 Inträngning av injekteringsmedel .....	11
2.4.2 Deformation, ”jacking” – ytlig tunnel .....	13
2.4.3 Återflöde av bruk, ”back-flow” .....	14
2.4.4 Erosion – turbulent flöde (efterinjektering).....	15
2.4.5 Inträngning av Newtonvätska påverkad av gradient (efterinjektering).....	17
<b>3 Indata.....</b>	<b>21</b>
3.1 Geologi / hydrogeologi.....	21
3.1.1 Äspö: TASQ tunneln (APSE).....	21
3.1.2 Törnskogstunneln .....	22
3.1.3 Hallandsås.....	23
3.2 Metod för analys av inläckage samt förslag på injekteringsdesign.....	24
3.2.1 Prognos av inläckage och injekteringsbehov.....	24
3.2.2 Underlag för design av injektering .....	24
3.2.3 Underlag för design av efterinjektering.....	25
<b>4 Resultat och diskussion.....</b>	<b>27</b>
4.1 Prognos av inläckage och injekteringsbehov baserat på kärnborrhål: verkliga djup och tunneldimensioner .....	28
4.2 Underlag för design av injektering mht ”jacking” och ”back-flow” .....	30
4.3 Underlag för design av efterinjektering mht gradient .....	31
4.3.1 Förslag till anpassning av skärmgeometri/stick mht gradienter och inträngning.....	31

4.3.2	Förslag till anpassning av hålgeometri mht gradient.....	33
4.4	Jämförande analys baserat på kärnborrhålen KA3376B01, KB971 och NV01 för djupen 20 respektive 450 m: tunnelarea 50 m <sup>2</sup> .....	34
4.4.1	KA3376B01, Äspö (transmissivitetsdata), antaget djup 20 m .....	35
4.4.2	KB971, Törnskogstunneln (transmissivitetsdata), antaget djup 20 m.....	36
4.4.3	NV01, Hallandsås (transmissivitetsdata), antaget djup 20 m.....	37
4.4.4	KA3376B01, Äspö (transmissivitetsdata), antaget djup 450 m .....	39
4.4.5	KB971, Törnskogstunneln (transmissivitetsdata), antaget djup 450 m.....	40
4.4.6	NV01, Hallandsås (transmissivitetsdata), antaget djup 450 m.....	41
<b>5</b>	<b>Slutsatser och rekommendationer .....</b>	<b>45</b>

## Referenser

## Bilagor

Bilaga 1	Översikt: Metod och bilagor
Bilaga 2	Sammanställning av parametrar: Jämförande analys baserat på kärnborrhål KA3376B01, KB971 och NV01 för antagna djup 20 respektive 450 m (Bilaga 3 – Bilaga 6).
Bilaga 3	I. Prognos av inläckage och injekteringsbehov.
Bilaga 4	II. Underlag för design av injektering mht ”jacking” och ”back-flow”: Tillåtna tryckkombinationer ( $p_w$ och $\Delta p$ ).
Bilaga 5	II. Underlag för design av injektering: Skärmgeometri
Bilaga 6	III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient.



# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Efterinjektering i tunnlar måste i många lägen utföras för att man skall komma ned till godkända nivåer på inläckaget av grundvatten. I så gott som alla fall är tunneln förinjekterad, men med dagens krav på låga läckage kräver även ett litet kvarvarande inflöde att tunneln eftertätas. För efterinjektering har man provat cement och ett antal fintättningsmedel med begränsad framgång. En allmän sanning inom branschen är att efterinjektering är svår att lyckas med och i de fall man har nått goda resultat har kostnaden ansetts vara oproportionerligt hög. Ett talande uttryck är att: ”Det är lättare att flytta på vattnet än att täta berget.”

Följande rapport avser att gå igenom de praktiska och teoretiska förutsättningarna för efterinjektering och att redovisa strategier för efterinjektering baserade på detta. Projektet bör betraktas som en förstudie där kunnande och teori från ett antal delområden samlas för att analysera närmare varför efterinjektering i många fall inte varit så framgångsrika. I detta inledande avsnitt ges en kort beskrivning av några projekt med efterinjektering samt en genomgång av litteratur kopplad till efterinjektering. Detta görs som bas för det fortsatta arbetet för att beskriva nuvarande kunskap och ge en bild av vilka svårigheter och frågeställningar som är aktuella.

Genomgången tar avstamp i den studie som genomfördes av Andersson och Jansson (1996). Denna syftade till att klarlägga den uppfattning som då fanns inom den svenska anläggningsindustrin baserat på intervjuer. Vad beträffar efterinjektering rådde det då relativt stor enighet om att t ex storskalig efterinjektering var att föredra framför punktvisa insatser, cementbaserat material skulle användas i första hand, men med andra medel i beredskap eller med ett planerat kombinerat utförande. Det var även lämpligt att hålla injekteringsstrycket försiktigt till en början för att undvika stabilitetsproblem och ett stort utflöde av material i tunneln. Däremot rådde det olika uppfattning om exempelvis injekteringsordning. Att cementbaserade medel skulle användas fanns det enighet om men däremot inte vilken sort. Dessutom varierade valet av tryck mellan att ”chocka berget” och att hålla trycket lågt i början. Huvudslutsatsen i rapportens avslutande diskussionsavsnitt var att generella trender inte kunde urskiljas. Även Bergman och Nord (1982) baseras på intervjuformulär och frågor som behandlas är injekteringsplats i arbetscykeln samt vad är lagom täthetskrav. De krav som ställs på tunnlar täthet kunde i stora drag hänföras till tre orsaker: acceptabla drivningsförhållanden; god driftekonomi för färdig anläggning; och att i ekonomisk rimlig omfattning undvika omgivningsskador (t ex grundvattensänkning och försumpning). I en rapport ifrån Vägverket (2002) var målsättningen att söka och sammanställa befintlig kunskap kring området tätning och frostsäkring av tunnlar i jord och berg. Några översiktliga kommentarer om efterinjektering för ett antal tunnlar finns i rapporten:

- Region väst: efterinjektering med cement och polyuretan (Jerikotunneln, E20 och Viskantunneln, E6).
- Arlandabanan: ett relativt omfattande arbete med efterinjektering och dränsättning har utförts i de tre stationerna där kraven varit mycket höga.

- Malmbanan mellan Abisko och Björkliden, tunnel genom Nuolja fjället injekterades med ett polyuretanbaserat medel.
- Hällåsen i Söderhamn, cement och Siprogel (Rhoca Gil) och enligt kontrollant blev tätningsresultatet bättre med det kemiska injekteringsmedlet än med cement.

Några väl beskrivna efterinjekteringsstudier finns i *Grouting and Ground treatment, Proceedings of the third international conference* i New Orleans 2003. I det ena fallet (Narduzzo och Eng 2003) handlar det om injektering av tunnelbanan i Toronto. Fokus ligger på efterinjektering och då främst injektering mellan lining och jord / berg. Det som är speciellt för detta arbete är att man ser efterinjekteringen som en viktig del av det kontinuerliga underhållsarbetet och har därmed utvecklat både utrustning och rutiner för att kunna utföra arbetet. Det medel som används är akrylamidbaserat och man har på grund av detta även utvecklat tydliga rutiner för miljö- och säkerhetsarbetet. Palardy et al. (2003) beskriver efterinjektering av ett ventilationstorn (betonginjektering) för tunnel under vatten med hjälp av både cement och kemiska injekteringsmedel. Studien är intressant då den utgår ifrån noggranna förundersökningar (även hydrauliska tester) som underlag för beslut om vilken strategi och vilket bruk som skall användas. De bruk som användes var ett cementbruk baserat på Portland cement med silica fume, ett microcement på grund av att man träffade på finmaterial samt en resin av polyuretan. Andra redovisningar av efterinjekteringsarbeten finns men dessa är tyvärr inte alltid så detaljerade. I Laughton och Bruen (2003) står det exempelvis att vatteninflödet begränsades med hjälp av en kombination av för och efterinjektering, men inga detaljer om hur. En omfattande efterinjekteringsstudie som dessutom identifierar flera av de svårigheter man kan träffa på är Beitnes (2005). Denna beskriver arbetet med Romeriksporten. Några av slutsatserna är att följande aspekter är viktiga att inkludera vid design av efterinjektering:

- Metoder för att förutsäga svårighetsgrad och vilken ansträngning som krävs för att minska genomsläppligheten. Detta skall leda till en förbättrad injekteringsdesign eller förbättrad design av annan åtgärd för tätning.
- Hänsyn måste tas till grundvattentrycket, eftersom det och inflödet är direkt proportionella.
- Spänningstillståndet (*in-situ confinement stress*) i berget är viktigt eftersom en låg spänning i någon riktning ökar svårigheten att nå ett bra resultat.
- Risk- och sårbarhetsanalyser är viktiga.

En av de saker man var överens om i Andersson och Jansson (1996) var att cementbaserat material skulle användas i första hand, men med andra medel i beredskap eller med ett planerat kombinerat utförande. Ett möjligt alternativ är exempelvis polyuretan. En av slutsatserna i Andersson (1998) angående detta medel är att även om det finns en spridd åsikt att efterinjektering inte kan genomföras på ett effektivt sätt eftersom ett lägre tryck måste användas, så visar erfarenhet att expanderande polyuretan kan klara en sådan situation. En annan svårighet som i viss mån bör kunna kopplas till val av bruk är en av slutsatserna ifrån Hansson (2002) som utvärderat utförda injekteringsarbeten i Södra Länkens bergtunnlar. Resultatet är att man inte får in bruk i bergmassan i mer än vartannat efterinjekteringshål. Vid SL 01 är ca 44% av bruket

endast hålfyllnad. Motsvarande siffra för SL 03 är 55%. Detta förklaras dels med det lägre tryck som används vid efterinjektering (0.7-1.5 MPa, förinjektering upp till 2.9 MPa) men det kan även bero på att man inför sporadisk efterinjektering har svårt att träffa rätt när man borrar. Systematiska efterinjekteringskärmar är lättare att anvisa och utföra, men ger en högre totalkostnad. Kostnaden måste dock ställas i proportion till det troligtvis förbättrade resultatet. Erfarenheter ifrån injekteringsarbeten vid Helsingfors Metro (Ingenjörbyrå Saanio och Laine 1979) bekräftar behovet av olika typer av injekteringsmedel när inläckagekraven är högt ställda. Cementinjektering och medel med bättre inträngningsförmåga behövs. Här poängteras även vikten av att redan tidigt optimera injekteringskostnaderna och klargöra vad som totalt sett är det förmånligaste injekteringskedet.

## 1.2 Mål och omfattning

Projektets mål är att:

- Ge en redovisning av nuvarande praxis för efterinjektering.
- Ge en redovisning av närbergets hydrogeologiska egenskaper efter förinjektering.
- Ge en analys av spridning och tätningsförmåga hos fintättningsmedel i förinjekterat berg.
- Föreslå potentiellt framgångsrika strategier för efterinjektering.

Den första punkten har översiktligt behandlats i inledningen och sammanfattningsvis kan sägas att man utifrån studien om injekteringskunnandet i Sverige (Andersson och Jansson 1996) inte självklart kan säga att det finns en praxis eller given arbetsgång som man kan fånga upp och sedan följa vid efterinjektering. Rent praktiska och detaljerade beskrivningar av arbetsgången vid efterinjektering har inte heller varit lätta att finna. Denna rapport kommer därför att ta avstamp i de problem och frågeställningar som delvis beskrivits i inledningen men angreppssättet blir i huvudsak teoretiskt. Detta sker genom en konceptualisering av problemet samt en litteraturgenomgång av relevant teori för efterinjektering. Konceptualiseringen innebär i detta fall att utifrån aktuell frågeställning definiera viktiga processer och även beskriva en geometri för vilken frågeställningen kan studeras.

Vår ansats är att förinjekteringsproblematiken innehåller ett antal komponenter som var för sig är relativt väl kända men inte analyserats och utvärderats i ett sammanhang. Man bör därför ställa samman kunnandet kring problemets delkomponenter och genomföra analyser relaterade till bergets egenskaper och processer som förväntas vara av betydelse vid för- och efterinjektering. Verkliga data används för analyserna och från detta underlag kan en lämplig preliminär efterinjekteringsstrategi etableras och ett bredare forskningsprojekt planeras. För efterinjektering finns exempelvis en rad nedslående erfarenheter som upprepats inom branschen. Erfarenheterna brukar kunna summeras under följande punkter:

- Bruket kommer tillbaka in i tunneln.
- Det blir inte tätt.
- Man flyttar bara inläckaget.
- Det går inte att få ”stopp”.

- Kemmedel får inte användas.
- Det tar för lång tid.
- Det kostar för mycket.

De beskrivningar och analyser som görs bör därför spegla, förklara och om möjligt finna en lösning på dessa problem.

## 2 Teori

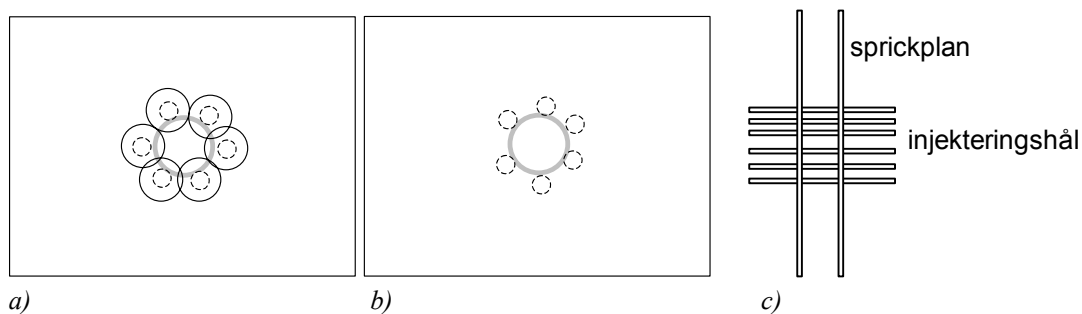
### 2.1 Konceptuell modell

I Rhén et al. (2003) beskrivs en konceptuell modell eller begreppsmodell som en modell vilken definierar:

- det geometriska (eller strukturella) ramverk i vilket ett problem skall lösas,
- storleken på den modellerade volymen (skalan),
- de ekvationer som styr ingående processer samt randvillkoren.

Rapporten skiljer på för- och efterinjektering. Den definition som används här beskrivs i Warner (2004) och skiljer på ”*pre-excavation grouting*” och ”*postexcavation grouting*”. Den förra är den injektering som görs under utsprängning/tunneldrivning och den senare genomförs efter utsprängning/tunneldrivning och/eller när installationen av lining är klar.

Storleken på den volym (skalan) där analysen antas gälla motsvarar tunnelns längd och ett tjugotal meter utanför tunnelradien. Längderna skall inte ses som absoluta utan innebär egentligen bara att det är en lokal analys med utgångspunkt ifrån tunneln. Beteendet i stor skala och tunnelns påverkan på omgivningarna kommer alltså inte att analyseras. Vattentrycket i borrhålet motsvarar det omgivande trycket i berget. Borrhålet korsar ett visst antal parallella sprickor som antas vara lika stora och där sprickvidden för respektive spricka antas vara konstant och motsvara den som återfinns i borrhålet med hjälp av hydrauliska tester. Figur 1 beskriver två av dessa sprickor, en med stor hydraulisk vidd och en med liten. De grå cirklarna representerar framtida tunnelprofil och de större cirklarna i den vänstra figuren (a) visar bruksinträngning i den större sprickan emedan de prickade cirklarna visar inträngningen för sprickan med mindre vidd (b). (c) visar en principiella skiss från sidan för de två sprickplanen och injekteringshål.



**Figur 1** Exempel på inträngning i två sprickor som identifierats längs ett borrhål. Den hydrauliska vidden i a) är större än den i b) vilket innebär att även inträngningslängderna skiljer sig åt. För att täta berget/sprickan krävs ett ”överlapp” av bruket från två närliggande borrhål. c) visar de två sprickplanen och injekteringshålerna från sidan.

Eftersom båda sprickorna korsas av samma injekteringskärm och injekteras samtidigt antas injekteringsstryck, vattentryck och bruksegenskaper vara samma. För att teoretiskt täta berget krävs ett ”överlapp” av bruket från två närliggande borrhål. I exemplet ovan



uppfylls detta i det närmaste för den större vidden emedan sprickan med den mindre vidden sannolikt inte alls har tätats. Om även den minsta sprickan måste tätas skall bruksval och design ta hänsyn till detta.

De samband och ekvationer som antas vara av betydelse i den konceptuella modellen är:

- En enskild sprickas förmåga att föra vatten,  $T$  (transmissiviteten) kan beskrivas med hjälp av  $Q/dh$  (specifik kapacitet) och är beroende av sprickans hydrauliska vidd,  $b$ .
- Fördelningen av hydrauliska viddar kan beskrivas med hjälp av en Paretofördelning (se även andra metoder i avsnitt 2.2.1). Den hydrauliska vidden i borrhålet antas beskriva hela sprickans vidd.
- Det totala inflödet till en tunnel skattas för att få en idé om vilka sprickor som behöver tätas för att nå ner till ett visst inläckage. Detta beräknas på två olika sätt och beror i ena fallet av: transmissiviteten för både det oinjekterade och det injekterade berget; tunnens djup, längd och radie; den injekterade zonens tjocklek; samt en skinfaktor. I det andra fallet tas ingen hänsyn till det injekterade områdets tjocklek,  $t$ , utan hela sprickan "tätas bort".
- Inträngningen av injekteringsmedlet är beroende av sprickans hydrauliska vidd, vattentrycket, injekteringstrycket och brukets flödesegenskaper.
- Tidsförloppet för injekteringen kan beskrivas med hjälp av vattentrycket, injekteringstrycket och brukets flödesegenskaper. Detta är inte den enda möjliga beskrivningen och i ett fortsatt forskningsarbete skall den förhoppningsvis utvecklas.
- För att täta berget krävs ett "överlapp" av bruket från två närliggande hål.
- Injekteringsdesignen är tänkt att ta hänsyn till inträngning av injekteringsmedel, deformation, "jacking" (ytlig tunnel), återflöde av bruk, "back-flow" och erosion på grund av turbulent flöde. De tre första faktorerna är viktiga både vid för- och efterinjektering. Risken för turbulent flöde och erosion av injekteringsmedlet ökar vid efterinjektering på grund av den tryckgradient som uppkommer runt den utsprängda tunneln.

## 2.2 Geologi / hydrogeologi

### 2.2.1 Skattning av transmissivitetsfördelning

Analysmetodikerna som presenteras nedan finns i princip beskriven i Gustafson et al. (2004).

En enskild sprickas förmåga att föra vatten,  $T$  (transmissiviteten) kan uppskattas med hjälp av  $Q/dh$  (specifik kapacitet, t ex Fransson 1999 och 2001) och är beroende av sprickans hydrauliska vidd,  $b$ , vattnets viskositet,  $\mu_w$ , och densitet,  $\rho_w$ , samt gravitationen,  $g$ :

$$T = \frac{\rho_w g b^3}{12 \mu_w} \approx \frac{Q}{dh} \quad (1)$$

Vid injektering är det vanligt att beskriva genomsläppligheten på berget utifrån ett Lugeonvärde (vattenförlust i liter/(meter·min·MPa) t ex Houlsby 1990). Detta tar dock inte hänsyn till antalet sprickor eller sprickviddsfördelningen. Eftersom både vattenflöde och bruksinträning påverkas av enskilda sprickors vidd utgår vår beskrivning ifrån denna.

Fransson (2002) och Gustafson och Fransson (2005) beskriver en metod för skattning av sprickviddsfördelningar baserat på sektionsvisa transmissiviteter och motsvarande antal sprickor, se Tabell 1. Fördelningen beskrivs med hjälp av en formparameter,  $k$ . Utifrån fördelningen av transmissiviteter skattas sedan en resulterande transmissivitet,  $T_{inj}$ , när successivt mindre sprickor tätas. Ofta korsar flera sprickor en och samma sektion och att i fält testa samtliga sprickor kan vara både tidskrävande och besvärligt. Detta innebär att en metod som kan skatta enskilda sprickors egenskaper behövs. Parametriska metoder som kräver antaganden relaterade till sprickavstånd och transmissivitet har tidigare beskrivits av Snow (1970), Osnes et al. (1988) och Axelsson et al. (1990). Enskilda sprickors egenskaper är exempelvis av intresse vid sk DFN-modellering (Discrete Fracture Network). FracMan (se Dershowitz et al. 1998), som används för den typen av modellering kan även användas för att ta fram en transmissivitetsfördelning ifrån hydrauliska tester. I FracMan baseras arbetsgången på en metod beskriven av Osnes et al. (1988). Samma referens används som bas för skattningen av spricktransmissiviteter i Öhman et al. (2005). En fördel med den metod som föreslås i denna rapport jämfört med metoderna i Snow (1970) och Osnes et al. (1988) är att antaganden relaterade till sprickavstånd och transmissivitet inte behövs utan beräkningarna kan utföras direkt utifrån sektionsvis transmissivitet och sprickfrekvens.

**Tabell 1** Indata för skattning av transmissivitets- och sprickviddsfördelning.

Indata	Resultat
Sektionsvis transmissivitet, $T(L)$	*Fördelning av transmissivitet och sprickvidd, $p(T < T_n)$ , $p(b < b_n)$
Antal sprickor per meter (samma intervall som ovan), $n(L)$	*Total transmissivitet och transmissivitet när vissa sprickor tätats, $T_{tot}$ och $T_{inj}$

### 2.2.2 Skattning av inläckage till tunnel

Inflödet till injekterad tunnel (t ex Fransson och Gustafson 2005):

$$q_{inj} = \frac{2\pi T_{tot} H / L}{\ln(2H / r_t) + (T_{tot} / T_{inj} - 1) \cdot \ln(1 + t / r_t) + \xi} \quad (2)$$

vid tätning av successivt mindre sprickor skattas för att få en bild av injekteringsbehovet. Med detta avses: Hur små sprickor behöver tätas för att nå ner till önskat inläckage? Innebär detta att både ”grov-” och ”fintätning” blir nödvändig?

$T_{tot}$  och  $T_{inj}$  är total transmissivitet respektive transmissivitet när vissa sprickor tätats baserat på sprickviddsfördelningen. Övriga parametrar i ekvationen ovan beskrivs i Tabell 2. Utifrån ett visst bruk ger parametrarna  $b_{crit}$  och  $b_{min}$  en bild av vad som är injekterbart (Eriksson 2002). För vidder större än  $b_{crit}$  påverkas inte bruket, för vidder mindre än  $b_{crit}$  filtreras det och för vidder mindre än  $b_{min}$  sker ingen inträngning. För prognos och känslighetsstudier är ett inledande rimligt intervall på skin för tunneln,  $\xi$ , 0-10 (Rhén et al. 1997). De beräkningar som presenteras här baseras på ”skin-värdet” 5.

**Tabell 2** Indata för skattning av inläckage och injekteringsbehov.

Indata	Resultat
$T_{tot}$ och $T_{inj}$ (baserat på $p(T < T_n)$ , $p(b < b_n)$ )	*Skattning av inflöde till tunnel vid tätning av successivt mindre (finare) sprickor, $q_{inj}$ När ingen injektering utförts, $q_{tot} = q_{inj}$ .  * $b_{crit}$ och $b_{min}$ ger en indikation på vilka sprickor som är injekterbara.
Tunnelarea $\rightarrow$ radie ( $A \rightarrow r_t$ )	
Tjocklek injekterad zon, $t$	
Djup till tunnelcentrum (urspr. grundvattennivå, $H$ )	
Borrhålslängd, $L$	
Skin för tunneln, $\xi$ (0-10, Rhén et al. 1997)	
$b_{crit}$ och $b_{min}$	

Uppskattat inflöde till tunneln utifrån enskilda strukturer kan även beräknas baserat på:

$$Q_i = \frac{2\pi T_i H}{\ln(2H/r_i) + \xi} \quad (3)$$

Om  $T_{max, inj}$  är största sprickan som är öppen efter injektering, eller  $i=i_{max, inj}$ , får vi

$$q_{inj} = \frac{\sum_{i=1}^{i_{max}} Q_i}{L} \quad (4)$$

Här tas ingen hänsyn till det injekterade områdets tjocklek,  $t$ , utan hela sprickan tätas bort.

### 2.2.3 Tryck och gradient

Enligt Carlsson och Gustafson (1991) definieras grundvattennivån eller grundvattnets trycknivå som grundvattnets tryckhöjd mätt i en punkt i magasinet hänförd till ett referensplan. Den hydrauliska gradienten beskrivs som grundvattennivåns ändring per längdenhet längs grundvattnets flödesbana eller i annan given riktning. Inflödet till ett borrhål eller en tunnel resulterar i en tryckminskning i flödesriktningen. Ju närmare tunnelperiferin, ju större gradient. Flödes hastigheten i en spricka beror både på sprickans vidd och gradienten och en kombination av stor vidd och stor flödes hastighet ökar risken för turbulent flöde. Grundvattentrycket är av betydelse vid injekteringsdesign då detta påverkar inflödet av vatten och då injekteringstrycket måste

vara tillräckligt för att få en inträngning av injekteringsmedlet. Vid laminärt flöde kan vattnets rörelse beskrivas som välordnad (all rörelse sker i skikt i strömningsriktningen). Turbulent strömning är av virvlande karaktär vilket i större utsträckning bör påverka ett injekteringsmedel i negativ riktning. Ekvationer som beskriver beräkning av Reynolds tal och gradient runt en tunnel återfinns i 2.4.4.

#### 2.2.4 Anisotropi

Anisotropi innebär i generell mening att en fysikalisk egenskap är olika i olika riktningar. I detta specifika fall avser anisotropin främst bergmassans hydrauliska egenskaper i olika riktningar. I Rhén et al. (1997) beskrivs exempelvis hur de hydrauliska egenskaperna varierar i olika riktningar i Äspölaboratoriet baserat på sonderingshål i sektion 1400-3600m. I detta fall ges riktningarna som strykningen för ett plan som antas vara vinkelrätt mot borrhålen. Resultatet är att sprickor med en strykning nära NW är mer genomsläppliga jämfört med de sprickor som har en NE riktning. Baserat på det aritmetiska medelvärdet skulle  $\text{Log}_{10}(T)$  i NW riktning vara ungefär  $-6$  och motsvarande värde i NE riktning mellan  $-8$  och  $-9$ . Under antagandet att detta skulle handla om enskilda sprickor skulle detta motsvara hydrauliska sprickvidder på ca  $100\mu\text{m}$ ,  $20\mu\text{m}$  respektive  $10\mu\text{m}$ . Från ett geomekaniskt perspektiv har man funnit att även den största horisontella spänningen,  $\sigma_H$ , har en NW-SE riktning.

Ur ett injekteringsperspektiv kan anisotropin exempelvis vara av betydelse när generellt genomsläppliga strukturer återfinns subparallellt med en tunnel. Detta innebär att det blir svårare att träffa strukturen runt delar av tunnelvärsnittet.

### 2.3 Injekteringsmedel

#### 2.3.1 Reologi

Flytgräns,  $\tau_0$  och viskositet,  $\mu$  är två viktiga parametrar vid beskrivning av reologi eller flytegenskaper för injekteringsmedel. Dessa två kommer att beskrivas i ytterligare detalj nedan. Andra processer som kan påverka injekteringen är till exempel begränsad inträngning på grund av kornstorlek och att bruket separerar. En viktig skillnad mellan exempelvis ett cementbruk och vatten eller ett så kallat kemiskt injekteringsmedel är reologin. Ett cementbruk som är en partikelsuspension beskrivs ofta som en så kallad Binghamvätska eller ett bruk med viskositeten,  $\mu_g$ , and flytgränsen,  $\tau_0$ . Vatten brukar beskrivas som en Newtonvätska och har då enbart en viskositet,  $\mu_w$ . I Hässler (1991) uttrycks medelhastigheten för en Newtonvätska i en horisontell kanal:

$$\bar{U} = -\frac{b^2}{12\mu_w} \frac{dp}{dx} \quad (5)$$

För en Binghamvätska blir detta istället:

$$\bar{U} = -\frac{b^2}{12\mu_g} \frac{dp}{dx} \left( 1 - 3\frac{Z_{gr}}{b} + 4\left(\frac{Z_{gr}}{b}\right)^3 \right) \quad (6)$$

där  $2Z_{gr}$  är den totala tjockleken på den fasta "plugg" som bildas centralt i kanalen.  $Z_{gr}$  är beroende av flytgränsen,  $\tau_0$ , tryckgradienten,  $dp/dx$  och sprickvidden,  $b$ , enligt följande samband:

$$Z_{gr} = \min \left( \frac{\tau_0}{\left| \frac{dp}{dx} \right|}, \frac{b}{2} \right) \quad (7)$$

Baserat på Ekvation 6 och Ekvation 7 fås den maximala bruksinträngningen,  $I_{max}$ , för en Binghamvätska när flödes hastigheten är noll. Detta beskrivs i ytterligare detalj i 2.4.1. Numeriska beräkningar som baseras på egenskaper hos bergmassan och brukets reologi och dess inträngningsförmåga har exempelvis behandlats i Håkansson (1993), Hässler (1991) och Eriksson (2002). Axelsson (2006) undersöker kriterier för injekteringsmedels hållfasthet vid injektering av sprickigt berg. Studierna inkluderar en Bingham- och en Newtonvätska och i Axelsson och Gustafson (2005) beskrivs en robust metod för att ta fram flytgräns för en Binghamvätska.

### 2.3.2 Exempel på Binghamvätskor

Cementbaserade injekteringsmedel kan beskrivas som en Binghamvätska. I Fjällberg och Lagerblad (2003) beskrivs olika typer av cementbaserade injekteringsmedel med avseende på cementreaktioner, bindetid och flytförmåga. En indelning som görs i den experimentella delen av rapporten är att skilja på långsamt härdande och snabbhärdande cement. Typiskt för de snabbhärdande cementen är att de innehåller mera aluminat, C3A, som reagerar snabbare än de andra klinkerkomponenterna. Enligt Fjällberg och Lagerblad (2003) är de långsamt härdande portlandcementen att föredra om bindetiden inte har någon större betydelse eftersom de snabbhärdande cementen kan få problem med för tidig (okontrollerad) bindning. Det är dessutom lättare att uppnå bra flytförmåga vid lägre vct med de långsamt härdande cementen än med de snabbhärdande.

### 2.3.3 Exempel på Newtonvätskor

När exempelvis sprickvidden är begränsande kan fintätning bli nödvändig. De material som kort beskrivs här är Silica sol och Polyuretan. Detta för att båda har möjlighet att tränga in i små sprickor men funktionen på medlen är olika.

*Silica sol* är en kolloidal lösning av kiselpartiklar i vatten (Funehag 2005). När silica solen blandas med vanligt koksalt startar reaktionen och kiselpartiklarna bildar bindningar mellan sig.

*Polyuretan* produceras genom polymerisation av polyisocyanat och polyol, antingen som ett en- eller tvåkomponentsmaterial (Andersson 1998). Vid injektering med polyuretan bildas CO<sub>2</sub> gas när polyuretanet reagerar med vatten. När medlet injekteras i ett vattenflöde gör kontinuerlig gelning och volymökning hos medlet att polyuretanskummet drivs uppströms så snart en plugg har bildats nerströms.

## 2.4 Design / teknik – dimensionerande faktorer

Enligt den konceptuella modellen och metodkapitlet tar designen hänsyn till injekteringsmedlets inträngning, deformation ("jacking") och återflöde ("back-flow"). Ekvationer för detta beskrivs i avsnitten 2.4.1, 2.4.2 och 2.4.3. Deformation eller "jacking" berör främst ytliga tunnlar och de ekvationer som används här utgår ifrån den vertikalspänning som fås på grund av ovanliggande last. Eventuella deformationer orsakade av spänningstillståndet runt tunneln ingår inte i analysen. Deformation och injekteringsmedlets inträngning och eventuella återflöde är viktiga både vid för- och efterinjektering. När tunneln är utsprängd tillkommer ytterligare en faktor, den ökade gradienten som kan påverka designen av efterinjekteringen. En större gradient kan leda till turbulent flöde och ökad risk för erosion av injekteringsmedlet. Ekvationer som beskriver beräkning av gradient återfinns i avsnitt 2.4.4, detta påverkar injektering med både Bingham- och Newtonvätskor. Det avslutande avsnittet (2.4.5) beskriver den maximala inträngningen som kan förväntas vid injektering med en Newtonvätska i ett gradientfält.

### 2.4.1 Inträngning av injekteringsmedel

Reologiska parametrar för bruket, grundvattentrycket och de vidder som behöver tätas för att nå ett visst inflöde fungerar som indata för beräkning av injekteringstryck och injekteringstid (Gustafson och Stille 2005). Parametrar såsom injekteringstryck, injekteringstid, antal borrhål, borrhålsavstånd kan varieras för att finna en lämplig injekteringsstrategi och skärmgeometri, se Tabell 3.

**Tabell 3** Indata för skattning av inträngning och injekteringstid.

Indata	Resultat
Flytgräns, $\tau_0$ Viskositet, $\mu_g$ $b_{crit}$ och $b_{min}$	*Skatta maximal inträngning, $I_{max}$ .
Hydraulisk sprickvidd, $b$ Grundvattentryck, $p_w$	*Parametrar såsom injekteringstryck, injekteringstid, antal borrhål, borrhålsavstånd kan varieras för att finna en lämplig injekteringsstrategi och skärmgeometri.
Injekteringstryck, $p_g$ Injekteringstid, $t$ Borrhålsavstånd (spets), $a$	

### Binghamvätska

Följande beräkningsgång och ekvationer används vid skattning av inträngningslängd och injekteringstid. Detta beskrivs i detalj i Gustafson och Stille (2005). Den maximala inträngningen kan beskrivas med följande uttryck:

$$I_{max} = \frac{\Delta p b}{2\tau_0} \quad (8)$$

där injekteringsövertrycket,  $\Delta p$ , vattentrycket,  $p_w$ , och totala injekteringsstrycket,  $p_g$ , förhåller sig på följande sätt:

$$p_g = p_w + \Delta p \quad (9)$$

Den karakteristiska injekteringstiden,  $t_0$ , beror enbart av injekteringsrelaterade parametrar och uttrycks:

$$t_0 = \frac{6\Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2} \quad (10)$$

Två dimensionslösa parametrar, en relativ inträngning,  $I_D$ , och en relativ injekteringstid,  $t_D$ , definieras på följande sätt:

$$I_D = \frac{I}{I_{\max}} \quad (11)$$

och

$$t_D = \frac{t}{t_0} \quad (12)$$

Den dimensionslösa tiden,  $t_D$ , används för att skatta parametern

$$\theta_{1D} = \frac{t_D}{2(0.6 + t_D)} \quad (13)$$

för endimensionellt flöde och

$$\theta_{2D} = \frac{t_D}{2(3 + t_D)} \quad (14)$$

för tvådimensionellt flöde. Avslutningsvis används dessa för att beräkna ett värde på den dimensionslösa inträngningen:

$$I_D = \sqrt{\theta^2 + 4\theta} - \theta \quad (15)$$

som tillsammans med Ekvation 11 och den maximala inträngningen,  $I_{\max}$  (Ekvation 8) ger inträngningen,  $I$ .  $I_D$  uttrycker alltså hur stor andel av den totala inträngningen man har nått.

### *Newtonvätska*

Motsvarande parametrar som för Binghamvätskan kan även beräknas för en Newtonvätska, se Funehag (2005). Den karakteristiska injekteringstiden,  $t_0$ , som vid sidan av injekteringsparametrarna även är beroende av sprickvidden,  $b$  beskrivs:

$$t_0 = \frac{12 \cdot 10^4 \cdot \mu_g \cdot r_w^2}{\Delta p \cdot b^2} \quad (16)$$

Den relativa tiden,  $t_0$ , och inträngningen,  $I_D$ , uttrycks som:

$$t_D = \frac{t}{t_0} \quad (17)$$

och

$$I_D = \frac{I}{100 \cdot r_w} \quad (18)$$

Följande ekvationer kan användas för att lösa ut,  $I_D$ , för en- och tvådimensionellt flöde:

$$t_{D1-D} = \frac{I_D^2}{2} \quad (19)$$

$$t_{D2-D} = \frac{I_D^2}{2} \cdot \ln(100 \cdot I_D) - \frac{I_D^2}{4} + 2.5 \cdot 10^{-5} \quad (20)$$

Relationen mellan den endimensionella och tvådimensionella inträngningarna kan också uttryckas:

$$I_{1-D} \approx 2 \cdot I_{2-D} \quad (21)$$

Arbete pågår med att förfina och vidareutveckla beräkningarna ovan.

#### *2.4.2 Deformation, "jacking" – ytlig tunnel*

Lombardi (2003) och Milanovic (2004) definierar "hydro-jacking" som öppnandet av redan befintliga sprickor emedan "hydro-fracturing" beskrivs som bildandet av nya sprickor. Båda händelserna kan uppkomma när trycket under ett hydrauliskt test eller under injektering överskrider ett visst kritiskt tryck. Enligt Lombardi (2003) är det senare en förhållandevis sällsynt händelse under injekteringsarbeten. Alla observerade tryckfall under injektering bör inte, enligt författaren, tolkas som "hydro-fracturing" eftersom även redan existerande sprickor kan öppnas plötsligt.



Under antagandet att bergblocken på varje sida om en spricka är rimligt styva och genom att ställa upp en kraftjämvikt kan en resulterande kraft för systemet uttryckas (Gustafson 2005):

$$P = \int_A \Delta p(r) \cdot dA < \Delta p \int_0^I 2\pi r \frac{I-r}{I} dr = \Delta p \cdot \frac{\pi I^2}{3} \quad (22)$$

Ekvationen beskriver att den resulterande ”lyftande” kraften av injekteringstrycket i sprickan måste vara större än den totala normalspänningen över sprickan om den skall lyftas eller ”jackas” av det inträngande bruket (Lombardi 2003). Den kraft som vill sluta sprickan är minst:

$$G = (\sigma_3 - p_w) \cdot \pi I^2 \quad (23)$$

Under antagandet att vertikalspänningen

$$\sigma_v = \rho_b g H \quad (24)$$

är den minsta huvudspänningen fås följande ekvation:

$$\Delta p \leq 3\rho_b g H \quad (25)$$

eller

$$p_g \leq 3\rho_b g H - 2p_w \quad (26)$$

där  $\rho_b$  är bergmassans densitet och H är tunnelns djup eller mäktigheten på berget över tunneln. Ekvation 26 härleds med hjälp av följande steg:

$$\rho_b g H \geq p_w + \frac{\Delta p}{3} \quad (27)$$

$$\rho_b g H \geq p_w + \frac{p_g - p_w}{3} \quad (28)$$

$$3\rho_b g H \geq 3p_w + p_g - p_w \quad (29)$$

#### 2.4.3 Återflöde av bruk, “back-flow”

För att undvika återflöde kan följande uttryck formuleras (Axelsson 2006):

$$p_w < 2\tau_0 \cdot \frac{I}{b} \quad (30)$$

Denna ekvation samt Ekvation 8 och Ekvation 11 ger:

$$p_w < \frac{I}{(\Delta p b / 2\tau_0)} \cdot \Delta p = \frac{I}{I_{\max}} \Delta p = I_D \Delta p \quad (31)$$

eller

$$\frac{p_w}{\Delta p} < I_D \quad (32)$$

Kvoten mellan vattentrycket,  $p_w$ , och injekteringsövertrycket,  $\Delta p$ , bör alltså vara mindre än den dimensionslösa inträngningen,  $I_D$ .

#### 2.4.4 Erosion – turbulent flöde (efterinjektering)

Turbulent flöde ökar risken för erosion väsentligt (se Axelsson 2006). Gränsen för laminärt – turbulent flöde är enligt Gustafson (1986) när Reynolds tal,  $Re < 300-2300$ . Enligt Zimmermann (2005) kan en övergång mellan laminärt och turbulent flöde för en spricka förväntas vid  $Re \approx 10$ .

Reynolds tal kan uttryckas utifrån sprickvidd, vätskans egenskaper och gradienten (Gustafson 1986):

$$Re = \frac{6\mu^2}{\rho^2 g} \cdot \frac{1}{b^3} = - \frac{dh}{dL} \quad (33)$$

eller

$$Re = \frac{\rho v 2b}{\mu} \quad (34)$$

där  $v$  är flödes hastigheten. Enligt Zimmermann (2005) uttrycks Reynolds tal för flöde i en spricka som:

$$Re = \frac{\rho v b}{\mu} \quad (35)$$

vilket även kan uttryckas:

$$Re = \frac{\rho K \frac{dh}{dL} b}{\mu} = \frac{\rho T dh}{\mu dL} \quad (36)$$

För att uppskatta storleken på gradienten används Thiems ekvation (t ex de Marsily 1986). Transmissiviteten närmast borrhålet eller tunneln antas vara  $T_1$  och transmissiviteten ifrån avståndet,  $r_1$  ifrån borrhålet antas vara  $T_0$ .

$$s_w = h_0 - h_w = \frac{Q}{2\pi T_i} \ln \frac{r_1}{r_w} + \frac{Q}{2\pi T_0} \ln \frac{R_0}{r_1} \quad (37)$$

Radien,  $r$ , där uttrycket gäller är större än borrhåls- eller tunnelradien ( $r_w$  eller  $r_t$ ), men mindre än  $r_1$ ,  $r_w < r < r_1$  eller  $r_t < r < r_1$ . Detta kan även uttryckas:

$$s = h_0 - h(r) = \frac{Q}{2\pi} \left[ \frac{\ln \frac{r_1}{r}}{T_1} + \frac{\ln \frac{R_0}{r}}{T_0} \right] \quad (38)$$

vilket ger gradienten

$$-\frac{dh}{dr} = -\frac{Q}{2\pi T_1} \left[ \frac{d}{dr} (\ln r_1 - \ln r) \right] = \frac{Q}{2\pi T_1 r} \quad (39)$$

eller

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{Q}{T_1 2\pi r} = \frac{Q_i}{T_i 2\pi r} = \frac{Q_{inj}}{T_{inj} 2\pi r} \quad (40)$$

Den del av Ekvation 40 som inkluderar flödet och transmissiviteten för varje enskild spricka,  $Q_i$  och  $T_i$ , används för att skatta gradienten som en funktion av radien för en oinjekterad spricka. För att skatta flödet,  $Q_i$ , antas att transmissiviteten kan beräknas med hjälp av den specifika kapaciteten,  $T \approx Q/dh$ :

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{Q_i}{T_i 2\pi r} = \frac{T_i dh}{T_i 2\pi r} = \frac{dh}{2\pi r} \quad (41)$$

Detta används för att skatta värden för Reynolds tal enligt Ekvation 36 ( $dh/dr = dh/dL$ ).

Flödet in till färdig tunnel kan skattas med hänsyn till tunneldjup,  $H$ , tunnelradien,  $r_t$  och skinfaktorn,  $\xi$ . För en tätad tunnel kan flödet uttryckas:

$$Q_{inj} = \frac{2\pi T_{tot} H}{\ln(2H/r_t) + (T_{tot}/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1 + t/r_t) + \xi} \quad (42)$$

Ekvation 42 och den del av Ekvation 40 som innehåller transmissivitet för injekterad tunnel,  $T_{inj}$ , ger i sin tur:

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{T_{tot}H}{\ln(2H/r_t) + (T_{tot}/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1+t/r_t) + \xi} \cdot \frac{1}{T_{inj}r} \quad (43)$$

vilket också kan skrivas:

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{H}{r} \cdot \frac{T_{tot}}{T_{inj}} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_t) + (T_{tot}/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1+t/r_t) + \xi} \quad (44)$$

Detta kan som en tumregel för en ”vanlig” tunnel ( $\ln(2H/r_t) \approx 2$ ,  $\ln(1+t/r_t) \approx 1$ ,  $\xi \approx 5$ ) formuleras som:

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{H}{r} \cdot \frac{T_{tot}/T_{inj}}{T_{tot}/T_{inj} + 6} \quad (45)$$

För en tätad respektive en oinjekterad tunnel skulle detta innebära:

$$\text{Tätad tunnel:} \quad T_{tot}/T_{inj} \rightarrow \infty \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r} \quad (46)$$

$$\text{Oinjekterad tunnel:} \quad T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{7r} \quad (47)$$

#### 2.4.5 Inträngning av Newtonvätska påverkad av gradient (efterinjektering)

I Kruseman och de Ridder (1979) beskrivs flödet per breddenhet för en lutande akvifer:

$$q = \frac{Q}{F} = KD\alpha \quad (48)$$

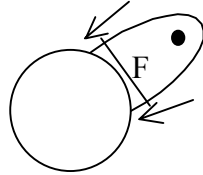
där  $\alpha$  är lutningen på grundvattenytan (lutning tät botten) och D är akviferens mäktighet.  $\alpha$  kan även uttryckas:

$$\alpha = \frac{q}{KD} \quad (49)$$

Vid konstant pumpning / injektion med flödet Q i en sådan akvifer kan lutningen för avsänkningstratten / konen för tryckökning beskrivas som:

$$-\frac{dh}{dx} = \frac{Q}{2\pi rKD} \quad (50)$$

Figur 2 visar en principiell skiss av hur den injekterade Newtonvätskan påverkas av gradienten runt en tunnel.



Tunnel

**Figur 2** Principiell skiss av den injekterade Newtonvätskan, injektering vid gradient runt en tunnel.  $F/2$  ger en skattning av den av gradienten påverkade inträngningen.

Längs x-axeln finns en punkt där lutningen,  $\alpha$ , och lutningen  $dh/dx$  är samma men med olika tecken, vilket leder till att den kombinerade lutningen är 0. Ekvation 48 och Ekvation 50 ger:

$$\alpha = \frac{Q}{2\pi K D x_0} \quad (51)$$

eller

$$x_0 = \frac{Q}{2\pi K D \alpha} \quad (52)$$

För att skatta bruksflödet,  $Q_g$ , antas att transmissiviteten kan beräknas med hjälp av den specifika kapaciteten,  $T_g = Q_g/dh$ . Transmissiviteten,  $T_g$  och trycket,  $dh$  (i mvp) för injekteringsmedlet kan uttryckas:

$$Q_g = T_g \cdot dh = T_g \cdot \frac{\Delta p}{\rho_w g} \quad (53)$$

vilket tillsammans med Ekvation 52 ger:

$$x_0 = \frac{T_g \cdot \frac{\Delta p}{\rho_w g}}{2\pi T_g \alpha} = \frac{\Delta p}{2\pi \rho_w g \alpha} \quad (54)$$

Vidden för den zon dit flödet kan förväntas beräknas utifrån:

$$F = 2\pi x_0 = \frac{\Delta p}{\rho_w g \alpha} \quad (55)$$

Som ett exempel kan gradienten,  $\alpha$ , för en antaget oinjekterad spricka i en oinjekterad omgivning beräknas enligt Ekvation 41:

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{Q_i}{T_i 2\pi r} = \frac{T_i dh}{T_i 2\pi r} = \frac{dh}{2\pi r} = \alpha \quad (56)$$

Ekvation 55 och Ekvation 56 ger:

$$F = \frac{\Delta p}{\rho_w g \alpha} = \frac{\Delta p 2\pi r}{\rho_w g dh} \quad (57)$$

för  $r_i < r$ .

Här antas att injekteringen sker i ett gradientfält med parallella trycklinjer. Runt en tunnel sker ett radiellt flöde vilket innebär att flödet bör konvergera i riktning mot tunneln. Bredden  $F$  kan därför förväntas vara överskattad.  $F/2$  ger en skattning av den av gradienten påverkade inträngningen.



### 3 Indata

#### 3.1 Geologi / hydrogeologi

Som underlag för analys används tre olika projekt med tillräckliga data för att kunna beräkna en sprickviddsfördelning. Projekten är intressanta dels eftersom tunnlnarna återfinns på olika djup och dels har kärnborrhålen olika medelsprickfrekvens, se Tabell 4. Detta möjliggör en jämförelse och en belysning av olika situationer. Dessutom har samtliga projekt haft forskningskaraktär (Emmelin et al. 2004, Funehag och Gustafson 2004 och Funehag och Gustafson 2005) därför finns en dokumentation som inte alltid återfinns för normala projekt.

**Tabell 4** Sammanställning av borrhålsdata, underlag för analyser.

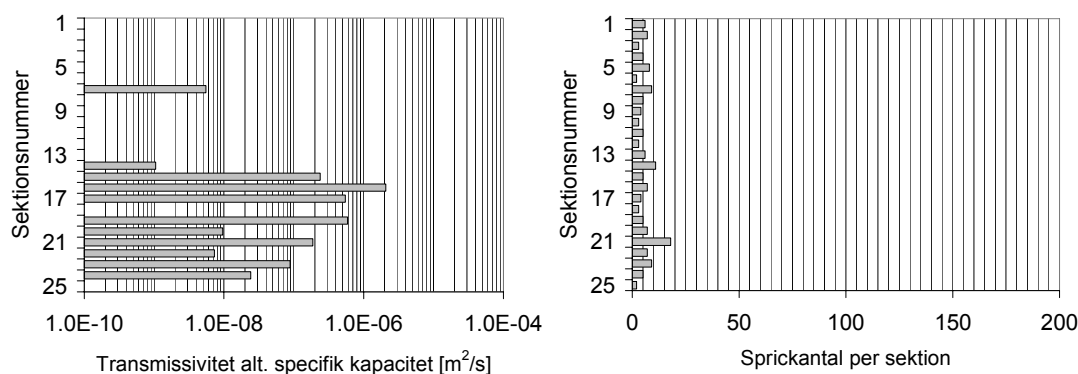
Plats	Borrhål	Längd	Antal sektioner	Antal sprickor	Antal sprickor per m.
Äspö Djup: ca 450 m	KA3376B01	3-78 m (75m)	25 à 3m	149	2.0
Törnskogstunneln Djup: ca 20 m	KB791	4-169 m (165m)	55 à 3m	873	5.3
Hallandsås Djup ca: 100 m	NV01	11-71 m (60m)	6 à 10m	987	16.5

##### 3.1.1 Äspö: TASQ tunneln (APSE)

Äspö Hard Rock Laboratory (Äspö HRL) utgör en viktig del av Svensk Kärnbränslehanterings (SKB) forsknings- och utvecklingsarbete. Laboratoriet finns norr om Oskarshamn på ön Äspö och når ett djup av ca 450 meter (se t ex Rhén et al. 1997). Laboratoriet utgörs till största delen av en tunnel vars totallängd är 3600 meter.

Indata (kärnborrhål: KA3376B01) härrör ifrån ett område beläget på 450 meters djup. Transmissivitetsdata för KA3376B01 kommer ifrån en detaljerad undersökning av naturliga inflöden gjorda med Posiva flödeslogg (t ex Rouhiainen 2000). Dessa data har kompletterats med uppmätt inflöde under borrhning. Det uppmätta vattentrycket i kärnborrhålet var ca 340 m (Emmelin et al. 2004). Här byggdes TASQ-tunneln som inledningsvis är ca 5 meter bred och 5.5 meter som högst (ca 25 m<sup>2</sup>). Dimensionerna ökar något i slutet av tunneln i anslutning till ett experimentområde för Äspö Pillar Stability Experiment (APSE t ex Andersson och Eng 2005). Den huvudsakliga bergarten längs kärnborrhålet är Äspödiorit. Medelsprickfrekvensen för intervallet är 2 sprickor per meter. Sektionsvisa transmissiviteter alternativt specifika kapaciteter och antalet sprickor per sektion redovisas i Figur 3.





**Figur 3** Transmissivitet och antal sprickor per sektion för 25 sektioner à 3 m längs KA3376B01, TASQ-tunneln, Äspö.

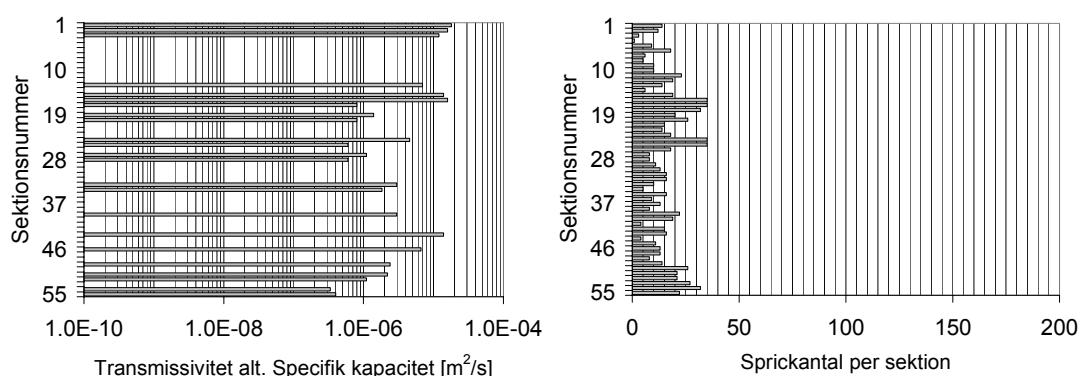
### 3.1.2 Törnskogstunneln

Törnskogstunneln återfinns i Sollentuna, nära Stockholm och är en del av Norrortsleden, en motorväg som skall koppla väg E4 och väg E18. Den totala tunnel längden är 2.1 km och den består av två separata rör med två filer i varje riktning.

I det arbete som presenterats i Funehag och Gustafson (2005) injekterades det ena tunnelröret (T201) med Silica sol emedan det andra (T202) injekterades med cement. Vid sektion 12/050 till 12/150 korsar tunneln en sprickzon. Tunnelarean är ca 80 m<sup>2</sup> (12.2 meter bred och 8.2 meter som högst). Djupet till tunnelcentrum från markytan (≈ursprunglig grundvattennivå) är ca 20 m (Funehag och Gustafson 2005).

Transmissivitetsdata för KB971 kommer ifrån sektionsvisa vattenförlustmätningar. Generellt består kärnborrhål KB791 som används som underlag för beräkningarna av en röd medelkornig granit. Pegmatit korsar borrhålet på flera ställen.

Medelsprickfrekvensen för intervallet är 5.3 sprickor per meter. Sektionsvisa transmissiviteter alternativt specifika kapaciteter och antalet sprickor per sektion redovisas i Figur 4.

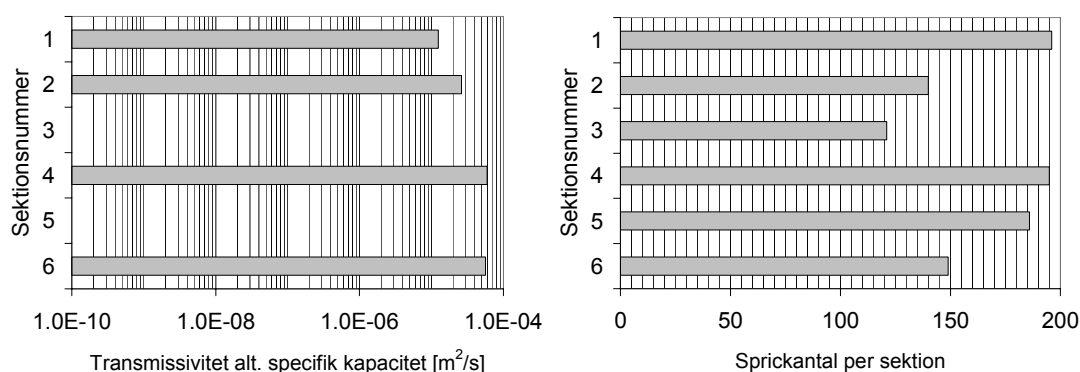


**Figur 4** Transmissivitet och antal sprickor per sektion för 55 sektioner à 3 m längs KB791, Törnskogstunneln.

### 3.1.3 Hallandsås

Tunneln genom Hallandsås består av två parallella rör för enkelspårig järnväg. Båda tunnelrören är 8.6 km långa och det byggs tvärtunnlar mellan dessa vid ca var 500:e meter.

Arbetet som presenteras i Funehag och Gustafson (2004) beskriver injektering i den nordvästra stoffen. Stoffen var tidigare cementinjekterad med ultrafin cement. Tunneln är ca 7 meter bred och 9 meter hög (ca 60 m<sup>2</sup>). Transmissivitetsdata för NV01 har skattats utifrån det ackumulerade inflödet under borrning vilka legat till grund för beräkningar av sektionsvisa inflöden. Sluttrycket för tryckuppbyggnadstest i intervallet 0-73.5 meter av NV01 var 5.6 bar. Tunneln återfinns på ett djup av ca 100 meter. Geologin för de första 72 metrarna av kärnborrhål NV01 beskrivs som ställvis svagt vittrad gnejs/gnejsgranit med varierande uppsprickning. Inledningsvis påträffas även en granatförande amfibolit. Amfiboliten uppträder som gångar eller stråk i gnejsen. Erfarenhetsmässigt är gångarnas strykning N50°O, alltså subparallella med tunneln, stupningen är 30-50°V och bredden är ca 5-15m (Funehag och Gustafson 2004). Medelsprickfrekvensen för intervallet är 16.5 sprickor per meter. Sektionsvisa transmissiviteter alternativt specifika kapaciteter och antalet sprickor per sektion redovisas i Figur 5.



**Figur 5** Transmissivitet och antal sprickor per sektion för 6 sektioner à 10 m längs NV01, Hallandsås.

### 3.2 Metod för analys av inläckage samt förslag på injekteringsdesign

#### 3.2.1 Prognos av inläckage och injekteringsbehov

Analysen utförs i enlighet med ekvationerna i 2 baserat på de tre kärnbrorhålen (Tabell 4). Analysen utförs i två delar:

1. För verkliga tunneldjup och verkliga tunneldimensioner.
2. För djupen 20m och 450m och antagen gemensam tunneldimension (50 m<sup>2</sup>).

Den första delen (1) syftar till att belysa de verkliga fallen och den andra delen (2) skall möjliggöra en direkt jämförelse mellan olika typer av berg. Återstående analyser (nedan) baseras på (2).

#### 3.2.2 Underlag för design av injektering

Analysen utgår ifrån beräkningarna i punkt (2) i föregående avsnitt (3.2.1). Två olika fall beaktas:

1. Inläckage till färdig tunnel uppskattas utifrån att tunneln enbart injekterats med cementbruk. Med detta antas att sprickor med  $b < 100 \mu\text{m}$  inte kan tätas.
2. Maximalt inläckage antas (1 L/min för 100m tunnel) och både cement och fininjektering utförs som förinjektering.

Som dimensionerande sprickvidder används:

- $b$  för max totalt inläckage (t ex 1 L/min för 100m tunnel).
- $100 \mu\text{m}$  (gräns cement-fintätning).
- $b_{\text{max}}$  utifrån analys av kärnbrorhål.

För att beskriva det förinjekterade berget görs underlag för val av förinjekteringsdesign som tar hänsyn till:

- Deformation, ”jacking” (på grund av överlast dvs främst för ytligt liggande tunnlar).
- Återflöde av bruk, ”back-flow”.
- Inträngning.

Indata för analyserna presenteras i Tabell 5.

**Tabell 5** Indata för analys av deformation, återflöde och inträngning.

Indata, kärnbrorhål	Djup [m]	Tunnelarea [m <sup>2</sup> ]	$\Delta p$ [MPa]	Brukstyp	Injekterings tid [min]
KA3376B01 Äspö	20	50	Tillåtna mht deformation och återflöde av bruk.	<u>B1</u> : Cement	20
	450			$\tau_0$ : 2 Pa	40
KB971 Törnskogstunneln				$\mu_g$ : 0.02 Pas	80
				<u>B2</u> : Cement	(30)
NV01 Hallandsås				$\tau_0$ : 13 Pa	kompl.
				$\mu_g$ : 0.01 Pas	
				<u>N</u> : Silica sol	
				$\mu_g$ : 0.005 Pas	

Tre olika injekteringsmedel ingår i analyserna: två av Binghamtyp med stor skillnad i flytgräns; och ett av Newtontyp. De injekteringstider som använts är 20, 40 och 80 minuter samt ytterligare en kompletterande beräkning för 30 minuter. Analyserna genomförs i enlighet med avsnitt 2.4.1, 2.4.2 och 2.4.3.

### 3.2.3 Underlag för design av efterinjektering

Deformation, återflöde och inträngning som beskrivs i avsnittet ovan är viktiga även vid efterinjektering. I de fall där fintätning inte utförts som en del av förinjekteringen får den ske som en del av efterinjekteringen. Den största förändringen vid en efterinjekteringssituation jämfört med en förinjekteringssituation är de gradienter som uppkommer runt tunneln. Analysen fokuserar därför på effekten av olika gradienter med syfte att undvika turbulent flöde eftersom detta riskerar att erodera injekteringsmedlet. Om detta gör att exempelvis hålplaceringen påverkas kan det kräva andra bruksinträngningar än en förinjekteringssituation vilket även kan kräva justering av injekteringsmedlets reologi. Viktiga parametrar är tunneldjup samt förväntad  $b_{\max}$  utifrån analys. Gradienten runt tunneln kan även begränsa inträngningen av injekteringsmedlet. Beräknad inträngning för en förinjekteringssituation bör därför eventuellt justeras med hänsyn till detta. Analyserna genomförs i enlighet med avsnitt 2.4.4 och 2.4.5 och skall resultera i följande:

- Skattning av gradienter och avstånd ifrån tunnelvägg där risken för turbulent flöde minskar.
- Skattning av maximal inträngning vid injektering i gradientfält (för Newtonvätska).

Dessa analyser ger förslag alternativt underlag för eventuell modifiering av designen i avsnitt 3.2.2. Det eventuellt modifierade förslaget eller underlaget skall ses som en bas för en potentiell strategi för efterinjektering. En översikt av metod och bilagor presenteras i Bilaga 1.



## 4 Resultat och diskussion

Två av projektets delmål har varit att ge en redovisning av närbergets hydrogeologiska egenskaper efter förinjektering samt att ge en analys av spridning och tätningsförmåga hos fintättningsmedel i förinjekterat berg. Detta används som bas för att föreslå potentiellt framgångsrika strategier för efterinjektering.

Arbetet har genomförts genom att vidareutveckla och använda en analysmetod med flera steg, se Bilaga 1 och Bilaga 2. De olika stegen är:

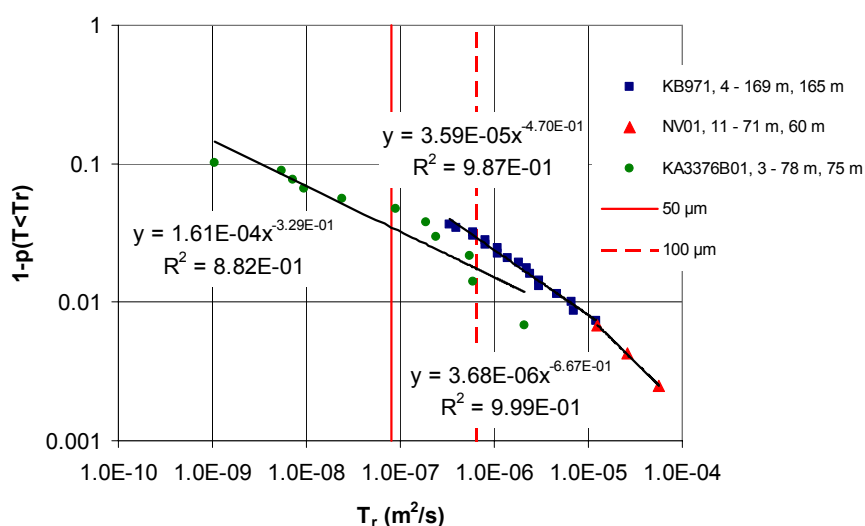
- I. Prognos av inläckage och injekteringsbehov baserat på kärnborrhål.
- II. Förslag / underlag för design av injektering.
- III. Förslag / underlag för design av efterinjektering.

Den konceptuella modell som ligger till grund för analyserna och de processer som den tar hänsyn till behandlas i 2.1. Detta innebär med nödvändighet att förenklingar görs och bakomliggande ekvationer återfinns i avsnitt 2. Antagandet om parallella sprickor med samma storlek och konstant sprickvidd motsvarande den som återfinns i borrhålet med hjälp av hydrauliska tester, innebär exempelvis att spridningen av bruket inte i detalj kan studeras. Sprickvidden lokalt har dock stor betydelse för huruvida bruket alls kan tränga in i sprickan vilket är av avgörande betydelse för en övergripande design kopplad till grov- och fintätning. Om injekteringsmedlet inte alls kan komma in i sprickan så är analyser av dess spridning mindre väsentliga. Inledningsvis beskrivs berget baserat på information ifrån kärnborrhål för att prognostisera inläckage och identifiera injekteringsbehov. Vad kan man täta med ett cementbruk och när krävs fininjektering? I steg II ges förslag alternativt ett underlag för injekteringsdesign som tar hänsyn till att ett cementbruk har en begränsad möjlighet att täta berget (sprickor  $> 50 - 100 \mu\text{m}$ ), att sprickor vid ytligt belägna tunnlar kan deformeras vid för höga injekteringsstryck, ”jacking” och att det finns risk för återflöde av bruket, ”back-flow”. Injekteringsdesignen i steg II ger en möjlig beskrivning av ett förinjekterat berg. Tillåtna tryck och förslag på skärmgeometri för denna design gäller även som utgångspunkt för en efterinjekteringssituation men den ökade gradienten kan förändra designen på grund av risk för turbulent flöde och begränsningar i inträngning. I steg III ges därför förslag alternativt underlag för eventuell modifiering av steg II. Det eventuellt modifierade förslaget eller underlaget skall ses som en bas för en potentiellt framgångsrik strategi för efterinjektering. Resultatet skall naturligtvis vägas mot erfarenhet och ingenjörsmässiga bedömningar.

Att genomföra arbetet med hjälp av en analysmetod där design av både för- och efterinjektering ingår förväntas bättre beskriva en helhet än om egenskaper för det förinjekterade berget hade antagits. Teoretiskt ger detta även en bättre möjlighet att inför en efterinjektering skapa en bild av vad som åstadkommit med förinjekteringen, baserat på information eller antaganden om berget, det bruk och den teknik som använts vid förinjekteringen. Dessutom möjliggör angreppssättet en beskrivning av skillnader när fintätning utförs som en förinjektering eller när den görs som en efterinjektering.

#### 4.1 Prognos av inläckage och injekteringsbehov baserat på kärnborrhål: verkliga djup och tunneldimensioner

Den inledande analysen syftar till att beskriva berget genom att prognostisera inläckage och identifiera injekteringsbehov. Figur 6 presenterar Paretofördelningar för de tre borrhålen KA3376B01 (Äspö), KB971 (Törnskogstunneln) och NV01 (Hallandsås). I figuren utgörs exponenten för linjerna av  $-k$  och den flackaste lutningen (lägst  $k$ -parameter) fås för KA3376B01 (Äspö, 0.33) och den brantaste för NV01 (Hallandsås, 0.67). Enligt Figur 6 har 90% av sprickorna ( $1 - p(T < T_r) = 0.1$ ) längs KA3376B01 en transmissivitet som är mindre än  $10^{-8}$  till  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Om man extrapolerar linjen för NV01 har 90% av sprickorna en transmissivitet som är lägre än  $10^{-6}$  till  $10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s. Gränsen för vad som anses vara injekterbart med cement är 50 - 100 µm, se Figur 6, och detta innebär att samtliga borrhål har en stor andel sprickor som kan kräva fintätning. Hur många dessa blir beror på fördelningarna i figuren men också på sprickfrekvensen (Tabell 6) och på de inflödeskrav som ställs på tunneln. Borrhål NV01 på Hallandsås har störst andel stora sprickor men också den största sprickfrekvensen vilket gör att även sprickor med förhållandevis liten sprickvidd kan vara många till antalet.



**Figur 6** Paretofördelningar för KB971 (Törnskogstunneln), NV01 (Hallandsås) och KA3376B01 (Äspö).

Med utgångspunkt ifrån Paretofördelningarna och de hydrauliska mätningarna fås en största sprickvidd,  $b_{max}$ , på 400 – 500 µm för de två grundaste tunnlarna (Törnskogstunneln ca 20 m och Hallandsås ca 100 m). För borrhålet på Äspö som återfinns på 450 m djup ger analysen en största sprickvidd på ca 130 µm. Överensstämmelsen mellan de detaljerade mätningarna för borrhål KA3376B01 och den beräknade Paretofördelningen var god varför uppmätta data användes för analys (se Bilaga 3). Det stora djupet gör att det prognostiserade inläckaget för oinjekterad tunnel baserat på Äspödata är av samma storleksordning som för Törnskogstunneln (57 respektive 82 L/min för 100m).

Om sprickor större än 100  $\mu\text{m}$  tätas skulle det prognostiserade återstående inläckaget för en tunnel i anslutning till kärnborrhålen vid Äspö, Törnskogstunneln och Hallandsås bli 52, 25 respektive 427 L/min för 100m tunnel. För att nå ner till ett inläckage på  $Q < 1$  L/min för 100m tunnel skulle sprickor mellan 10 – 20 $\mu\text{m}$  behöva tätas. Utifrån de analyser som utförts för de tre kärnborrhålen innebär detta alltså behov av fintätning i samtliga fall. Poängteras bör att inläckagekravet på 1 L/min för 100m är lågt satt och skall ses som ett exempel, de vidder som behöver tätas om inflöden på 5 L/min för 100m skulle uppnås blir enligt beräkningarna mellan 15 – 30 $\mu\text{m}$ .

**Tabell 6** Analys av inläckage och sprickvidder baserat på kärnborrhål KA3376B01, KB971 och NV01, för verkliga tunneldjup och tunneldimensioner.

	KA3376B01 Äspö	KB971 Törnskogstunneln	NV01 Hallandsås
Djup [m]	450 m	20 m	100 m
Vattentryck [m]	340 m	20 m (antaget)	56 m
Tunnelarea [m <sup>2</sup> ]	25 m <sup>2</sup>	80 m <sup>2</sup>	60 m <sup>2</sup>
Sprickfrekvens [1/m]	2.0	5.3	16.5
$b_{\text{max}}$ [ $\mu\text{m}$ ]	128 $\mu\text{m}$	509 $\mu\text{m}$	459 $\mu\text{m}$
Q [L/min för 100m]	57	82	660
Q vid tätn. av $b > 100\mu\text{m}$ [L/min för 100m]	52	25	427
b som bör tätas för $Q < 1$ L/min för 100m [ $\mu\text{m}$ ]	20 $\mu\text{m}$	12 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$
b som bör tätas för $Q < 5$ L/min för 100m [ $\mu\text{m}$ ]	25 $\mu\text{m}$	30 $\mu\text{m}$	15 $\mu\text{m}$

Vid injekteringsdesign är det viktigt att fundera över hur representativa borrhålen är. För en mer heltäckande design bör exempelvis undersökningar göras både av det ”dåliga” och av det ”bra” berget. En annan fråga är osäkerheten i indata. Osäkerheten i de indata som ligger till grund för de analyser som presenteras i Figur 6 ökar från KA3376B01 via KB971 till NV01. För KA3376B01 har en detaljerad undersökning av naturliga inflöden gjorts med Posiva flödeslogg (Rouhiainen 2000). Dessa data har kompletterats med uppmätt inflöde under borrning. För KB971 har sektionsvisa vattenförlustmätningar gjorts och för NV01 har det ackumulerade inflödet under borrning legat till grund för beräkningar av sektionsvisa inflöden. I detta fall består analysen dessutom av färre och längre sektioner.

Osäkerheter och frågor angående representativitet till trots så speglar analyserna i Figur 6 och Tabell 6 erfarenheter ifrån de olika tunnelprojekten. Samtliga skulle enligt analysen kräva någon typ av fintätning för att nå ner till låga inflöden. I tunneln i anslutning till kärnborrhål KA3376B01 på Äspö användes enbart cementbruk, se Emmelin et al. (2004) och Eriksson et al. (2005). Där var målsättningen att kunna täta sprickor i storleksordningen 50 - 100 $\mu\text{m}$  (fokus på inflöden som vid detta djup gav  $> 2$  L/min). Mer detaljerade analyser pågår för att ytterligare verifiera resultatet och jämföra



med verkliga inflöden. För Törnskogstunneln genomfördes injektering med ett injekteringsmedel av Newtontyp (Silica sol) i ett delavsnitt av ena tunnelröret och parallellt utfördes injektering med cementbruk i det andra tunnelröret (Funehag och Gustafson 2005). Silica solens förmåga att täta mindre sprickor kunde indirekt visas genom kartering av fukt i tunnlarna då antalet ytor och storleken på dessa var mindre i det rör som injekterats med Silica sol jämfört med det cementinjekterade tunnelröret. Slutligen har arbetet i Hallandsås visat att enbart cementinjektering inte har fyllt behoven. Däremot fungerade tätning med ett medel av Newtontyp (Rhoca Gil) bra, ett injekteringsmedel som dock har andra negativa egenskaper. Ett mindre fältförsök på Hallandsås (Funehag och Gustafson 2004) pekar även det på ett behov av både ”grov-” och ”fintätning”. En kompletterande injektering med Silica Sol gjordes i ett frontläge för tunneln som redan var cementinjekterat. Den resulterande hydrauliska konduktiviteten var av storleksordningen  $1 \cdot 10^{-9}$  m/s. Vissa skillnader finns mellan de analyser som presenteras i Funehag och Gustafson (2004) jämfört med de som presenteras här. Detta härrör ifrån osäkerheter i indata men förändrar inte de principiella slutsatserna utan påengtar snarare behovet och vikten av bra data.

#### 4.2 Underlag för design av injektering mht ”jacking” och ”back-flow”

Centrala frågeställningar är hur designen av för- och efterinjektering påverkas av:

- Deformation på grund av för högt injekteringstryck, ”jacking”
- Återflöde av bruket på grund av för kort injekteringstid, för lättflytande injekteringsmedel eller för lång härdningstid, ”back-flow”.

Resultaterande förslag / underlag för injekteringsdesign, beskrivs utifrån följande parametrar (se Bilaga 2):

- Injekteringsmedel
- Injekteringstider, beräkningar har utförts för 20, (30), 40 respektive 80 min.
- Tillåtna injekteringsövertryck,  $\Delta p$ , alternativt intervall för detta.
- Resultaterande intervall för inträngningslängder,  $I$ , för lämpliga injekteringsmedel (Binghamvätska används för ”grovtätning”), tider och tryck. Begränsande och därför dimensionerande vidd:  $b = 100 \mu\text{m}$ .
- Resultaterande intervall för inträngningslängder,  $I$ , för lämpliga injekteringsmedel (Newtonvätska används för ”fintätning”), tider och tryck. Dimensionerande vidd:  $b$  när  $Q < 1$  L/min för 100m tunnel.
- Antaget stick, här 3 m.
- Förslag på eller intervall för hålantal fås utifrån parametrarna ovan.  $I$  beräkningarna översätts arean på tunneln till en cirkelradie. Stick för borrhålen adderas och en omkrets beräknas. Hålavståndet antas i beräkningarna vara samma som inträngningslängden (antagandet är här att man vill nå till närmast närliggande hål). Omkrets / inträngningslängd = hålantal. Hållängd och borrhålsvinkel har inte bestämts. Rimligheten i detta (och övriga analyser) vid slutlig design skall vägas mot praktisk erfarenhet.

Tillåtna injekteringsövertryck och tider utgår ifrån en analys av deformation (”jacking”) och risk för återflöde av bruk (”back-flow”). Dessa frågeställningar är viktiga både vid

för- och efterinjektering. Analyserna i Bilaga 4 och Bilaga 5 baseras på två olika bruk av Binghamtyp samt en Newtonvätska, egenskaper presenteras i Tabell 5.

### 4.3 Underlag för design av efterinjektering mht gradient

En central frågeställning vid efterinjektering är hur den påverkas av den ökade gradienten. Här har två delfrågor analyserats:

- Ökad gradient med risk för turbulent flöde och erosion av injekteringsmedlet som följd (Bingham och Newton). Övergång mellan laminärt och turbulent flöde antas vid Reynolds tal,  $Re > 10$  (Zimmermann 2005).
- Minskad inträngning till följd av den ökade gradienten (Newton).

Resultaterande förslag / underlag för design av efterinjektering, beskrivs utifrån följande parametrar (se Bilaga 2):

- Avstånd från tunnelvägg där  $Re \leq 10$ ,  $a_{Re \leq 10}$ .
- Intervall för maximal inträngning,  $F_1/2 - F_2/2$ , vid injektering i gradientfält för de tillåtna injekteringsövertrycken  $\Delta p_1$  och  $\Delta p_2$ .

Analyser baseras på eventuell deformation ”jacking” relaterat till last från ovanliggande berg. Eventuella deformationer orsakade av spänningstillståndet i övrigt runt tunneln ingår inte i analysen. Detta problem har exempelvis belysts av Beitnes (2005) där han kommenterar att spänningstillståndet i berget är viktigt eftersom en låg spänning i någon riktning ökar svårigheten att nå ett bra resultat. I vissa fall kan det därför vara nödvändigt att välja ett lägre injekteringsstryck och ett större antal injekteringshål eller längre injekteringstider för att lyckas med efterinjekteringen.

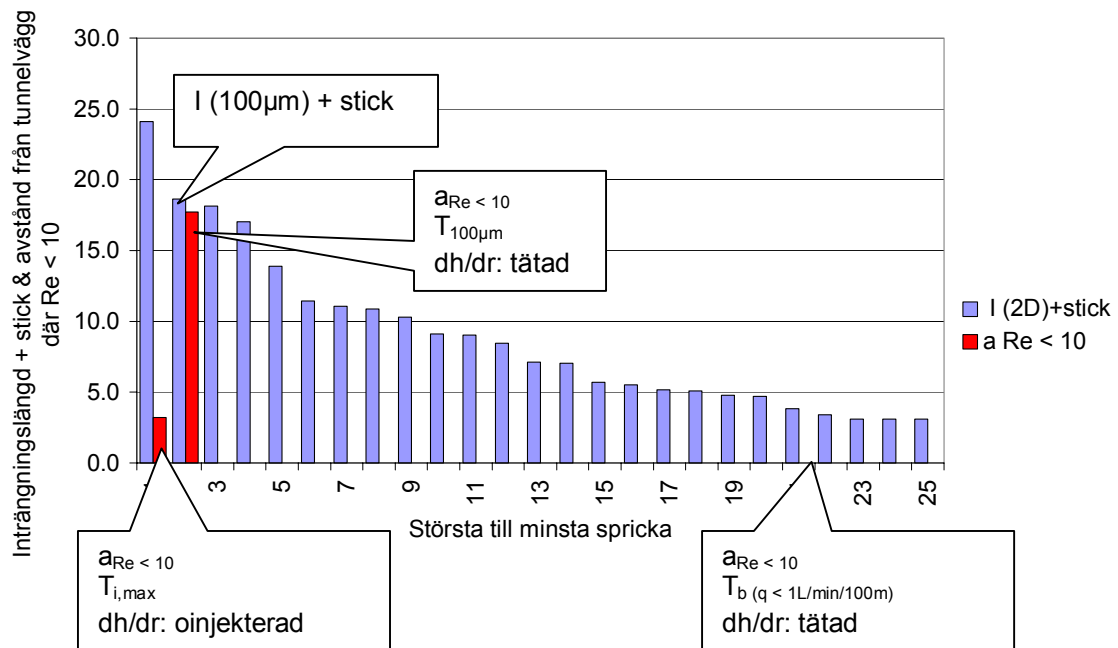
#### 4.3.1 Förslag till anpassning av skärmgeometri/stick mht gradienter och inträngning

Gradienten är av central betydelse för parametrarna ovan. Den är dock svår att beräkna eftersom den varierar längs tunneln och förändras allteftersom sprickorna i tunneln tätas. Avstånd från tunnelvägg där  $Re \leq 10$ ,  $a_{Re \leq 10}$ , beräknas därför utifrån gradienterna för extremfallen: en oinjekterad tunnel (Ekvation 47 alternativt Ekvation 41) och en tätad tunnel (Ekvation 46). Beräkningen av Reynolds tal som en funktion av avståndet ifrån tunnelvägg vid en oinjekterad tunnel görs sedan baserat på den totala transmissiviteten längs tunneln,  $T_{tot}$  och utifrån transmissiviteten för den största enskilda sprickan,  $T_{i,max}$ . För de avslutande beräkningarna som redovisas i Bilaga 2 används gradienten för en tätad tunnel (Ekvation 46) och transmissiviteten för den minsta sprickvidd som måste tätas för att nå inflödet  $Q < 1$  L/min för 100m tunnel,  $T_{b(Q < 1 \text{ L/min för } 100\text{m})}$ , och transmissiviteten för en spricka med vidden  $100 \mu\text{m}$ ,  $T_{100\mu\text{m}}$ . Gradienten för en tätad tunnel kommer att resultera i en överskattning av avståndet,  $a_{Re \leq 10}$ , vilket bör vara på den säkra sidan. Överskattningen gör att dessa värden är att betrakta som något osäkra. Innanför avståndet,  $a_{Re \leq 10}$ , antas turbulent flöde vilket riskerar att blanda om och erodera injekteringsmedel både av Bingham- och Newton-typ. Figur 7 sammanställer inträngningslängder och avstånd  $a_{Re \leq 10}$  för en av analyserna för KA3376B01 (”grovtätning”). Detta används som underlag för att eventuellt förändra skärmgeometrin på grund av skattad inträngning vid förinjekteringen och uppkommen gradient inför efterinjekteringen.

Om en kompletterande ”grovtätning” behövs placeras om möjligt skärmen:

1. Utanför  $a_{Re} \leq 10$  för  $T_{i,max}$  &  $dh/dr$  (Ekv. 41, oinjekterad tunnel)  
...och möjligen även...
2. Utanför  $a_{Re} \leq 10$  för  $T_{tot}$  &  $dh/dr$  (Ekv. 47, oinjekterad tunnel) för att minska risken för turbulens (ej inkluderad i figuren).

Vid anisotropi där man kan ha haft svårt att korsa vissa strukturer under förinjekteringen kan en kompletterande ”grovtätning” med skärmarna placerade i motsatt riktning vara till nytta.



**Figur 7** Inträngningslängder och avstånd,  $a_{Re} \leq 10$  vid ”grovtätning” baserat på borrhål KA3376B01 ( $H$ : 450m,  $\tau_0$ : 13Pa,  $\mu_g$ : 0.01Pas,  $\Delta p$ : 10MPa, injekteringstid: 30min). Används som underlag för att eventuellt förändra skärmgeometri/stick med hänsyn till gradienter och inträngning. Vid ”fintätning” placera främst skärm innanför I (100 $\mu$ m)+ stick (kompletterar grovtätning) och utanför  $a_{Re} \leq 10$  för  $T_{i,max}$  (minskar risk för turbulens).

För ”fintätning” är det sedan lämpligt att placera skärmen:

1. Innanför avståndet, I (100 $\mu$ m)+ stick för att komplettera tidigare ”grovtätning”.
2. Utanför  $a_{Re} \leq 10$  för  $T_{i,max}$  &  $dh/dr$  (Ekv. 41, oinjekterad tunnel) för att minska risken för turbulens  
...och möjligen även...
3. Utanför  $a_{Re} \leq 10$  för  $T_{tot}$  &  $dh/dr$  (Ekv. 47, oinjekterad tunnel, ej inkluderad i figuren).
4. Utanför  $a_{Re} \leq 10$  för  $T_{100\mu m}$ ,  $T_b(Q < 1L/min \text{ för } 100m)$  &  $dh/dr$  (Ekv. 46, tätad tunnel)

Punkterna 3 och 4 avser även de att minska risken för turbulens. Den överskattade gradienten gör dock att värdena är osäkra (underskattade).

#### 4.3.2 Förslag till anpassning av hålgeometri mht gradient

För medel av Newtontyp beräknas även maximal inträngning vid injektering i ett gradientfält. Intervallet på inträngningen för de tillåtna injekteringsövertrycken  $\Delta p_1$  och  $\Delta p_2$  blir  $F_1/2 - F_2/2$ , se principiell skiss i Figur 2. Dessa parametrar skall jämföras med beräknade inträngningslängder för de tillåtna injekteringsövertrycken  $\Delta p_1$  och  $\Delta p_2$  så att:

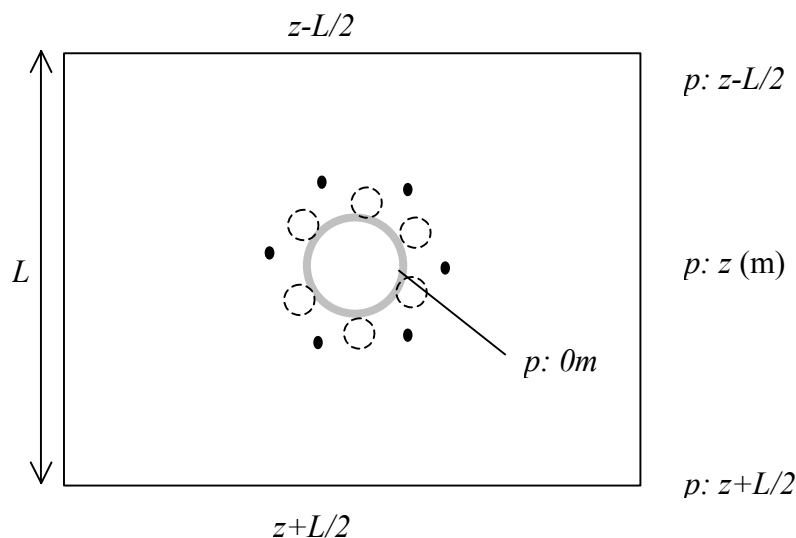
$$F_1 / 2 \geq I_1 \quad (58)$$

och

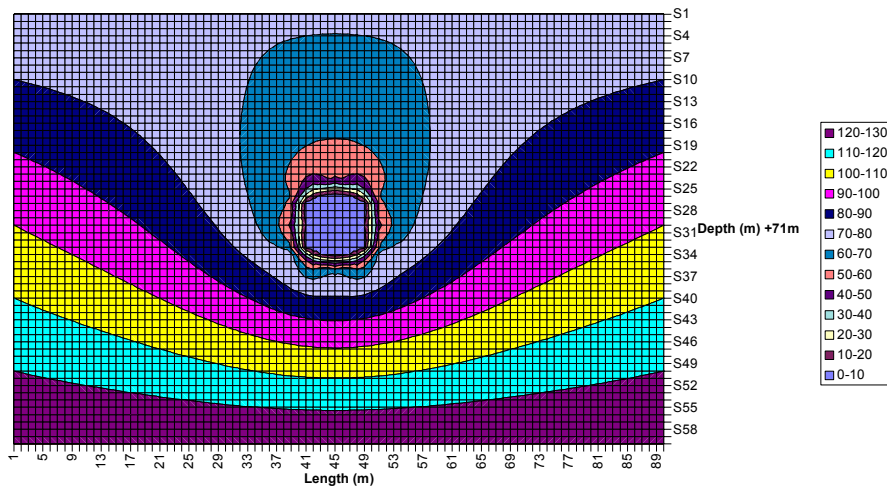
$$F_2 / 2 \geq I_2 \quad (59)$$

Om så ej är fallet bör exempelvis hålavståndet ändras.

Som Ekvation 47 och Ekvation 46 visar så ökar gradienten när tunneln tätas. Detta inträffar även när en enskild spricka successivt tätas eftersom den tillgängliga flödesarean minskar och gradienten ökar. I Figur 8 presenteras en möjlighet där vartannat borrhål är borrat med större stick. Vid injekteringen tätas sedan de innersta borrhålen först med en teoretiskt begränsad spridning. Ett exempel på resulterande gradienter visas i Figur 9. Mellanliggande hål med större stick där gradienten är mindre injekteras därefter.



**Figur 8** Förslag på hålgeometri med injektering av vartannat hål vid efterinjektering. Mellanliggande hål (svarta punkter) har borrats med ökat stick.



**Figur 9** Principiell figur över gradient efter injektering av vartannat håll vid efterinjektering. Mellanliggande håll har borrats med något större stick, ger injektering med lägre gradient.

En annan möjlighet är att utnyttja det faktum att man flyttar vatten. Genom att göra enbart taket tätare tillåts ett större totalt inflöde till tunneln och eftersom gradienten inte blir så stor minskar droppet i taket. Detta förutsätter att kravet eller det totalt tillåtna inläckaget till tunneln möjliggör en mer begränsad generell tätningssats.

#### 4.4 Jämförande analys baserat på kärnborrhålen KA3376B01, KB971 och NV01 för djupen 20 respektive 450 m: tunnelarea 50 m<sup>2</sup>

Nedan följer resultatet ifrån ett antal analys exempel baserat på de tre kärnborrhålen KA3376B01, KB971 och NV01. Bilaga 1 presenterar en översikt av metod och bilagor och Bilaga 2 sammanställer analysresultaten. För att kunna göra en jämförande analys och identifiera olika svårigheter har två olika djup: 20 och 450 m samt tunnelarean 50 m<sup>2</sup> använts. Transmissivitetsdata är samma som för analysen med verkliga djup och tunneldimensioner, se Figur 6 och Tabell 6. I Bilaga 3 - Bilaga 6 presenteras varje delanalys för sig, i detta avsnitt presenteras varje tunnel med visst djup för sig inklusive inläckageprognos och underlag för val av injekteringsdesign med motivering.

Bilaga 3 innehåller prognos av inläckage och injekteringsbehov. I denna bilaga beskrivs berget med avseende på prognostiserat inläckage för oinjekterad tunnel och vid tätning ner till 100 µm. Detta för att identifiera behovet av fintätning. Svårigheten speglas sedan delvis i hur små sprickvidder som behöver tätas för att nå ett teoretiskt inläckage på 1 L/min för 100m tunnel. Bilaga 4 visar vilka kombinationer av injekteringsstryck (vattentryck,  $p_w$ , och injekteringsövertryck,  $\Delta p$ ) som är tillåtna mht deformation ("jacking") och återflöde av cementbruk ("back-flow"). I denna beräkningsbilaga kan man även utläsa vilken inträngningslängd som fås i en 100µm spricka med ett visst bruk, vid viss injekteringstid och för en viss kombination av tryck. Bilaga 5 ger underlag för val av skärmgeometri och Bilaga 6 utgör en extra kontroll och presenterar

underlag för eventuell modifiering av injekteringsdesignen inför en efterinjektering. Beräkningarna utgår ifrån de ekvationer som presenteras i teoriavsnittet.

#### 4.4.1 KA3376B01, Äspö (transmissivitetsdata), antaget djup 20 m

Kombinationen av en låg sprickfrekvens (2 sprickor/m, Tabell 6) och ett litet djup ger ett lågt prognostiserat inläckage till oinjekterad tunnel (5 L/min för 100m, se Bilaga 2). De små sprickvidderna ( $b_{\max}$ : 128  $\mu\text{m}$ ) gör att enbart en liten andel av inläckaget kan åtgärdas med ett cementbruk: 4.4 L/min för 100m återstår enligt beräkningar när sprickor > 100  $\mu\text{m}$  tätats. För att nå ett slutligt inläckage på 1 L/min för 100m krävs tätning av sprickor ner till ca 40  $\mu\text{m}$ . Eftersom tätning krävs av både små och stora sprickvidder för att nå 1 L/min för 100m delas injekteringen förslagsvis in i två omgångar: en ”grov-” och en ”fintätning”. De små vidderna kan även motivera att enbart en omgång med ”fintätning” görs.

##### *Förslag förinjektering Omgång 1: ”grovtätning”*

För djupet 20 m och ett lättflytande bruk (B1:  $\tau_{0,}$ : 2 Pa och  $\mu_g$ : 0.02 Pas) fås exempelvis inga acceptabla tryckkombinationer för injekteringstiderna 20 min och 40 min (se Bilaga 4). Först efter 80 minuter tillåts ett injekteringsövertryck på 0.5 MPa (där  $\Delta p + p_w = p_g$  ger totalt injekteringstryck). Ett högre injekteringstryck riskerar att deformera sprickan emedan ett lägre tryck eller en kortare tid kan leda till återflöde av bruket. Med ett mer trögflytande bruk (B2:  $\tau_{0,}$ : 13 Pa och  $\mu_g$ : 0.01 Pas) fås acceptabla tryckkombinationer för samtliga tre injekteringstider. Det trögflytande bruket (B2) gör dock att inträngningslängden i en 100  $\mu\text{m}$  vid spricka blir kort (1.7 m, se Bilaga 2). Inträngningslängden vid ”grovtätningen” beräknas i samma dokument (Bilaga 4) och dimensionerande antas en 100  $\mu\text{m}$  spricka vara eftersom det är så små sprickor som ett cementbruk förväntas kunna täta. För bruk B1 (se Bilaga 2), en injekteringstid på 80 minuter och ett antaget stick på 3m skulle 9 injekteringshål behövas (hålavstånd antas vara samma som inträngningslängd). För bruk B2 skulle 26 injekteringshål krävas. För en grund tunnel (20 m) är inget av de två bruken ideala. Det lättflytande bruket kräver för lång injekteringstid och det trögflytande ger för kort inträngning. Ett ”reologiskt” mellanting skulle bättre lösa situationen. Resonemanget ovan gäller vid 20 meters djup och injekteringsdesignen kan därför baseras på detta för samtliga exempel vid detta djup. Lämpligt bruk, injekteringstid och tryck väljs utifrån vad som är tillåtet mht deformation och återflöde.

En kompletterande kontroll av inträngningen i den största sprickan vid övertrycket 0.5 MPa och injekteringstiden 80 minuter bör även göras. I detta fall fås för en spricka med vidden 128  $\mu\text{m}$  en inträngning på ca 6 m (Bilaga 5). Denna analys är av betydelse om brukets inträngning av någon anledning bör begränsas.

##### *Förslag förinjektering Omgång 2: ”fintätning”*

Eftersom stelningsförloppet för Newtonvätskan kan styras ses risken för återflöde inte som ett problem under förutsättning att trycket hålls i borrhålet under hela injekteringstiden. Detta så att vattnet inte börjar röra sig in i injekteringsmedlet med risk för fingering och uppblandning som följd. Även om tryckprofilen för en Newtonvätska inte helt överensstämmer med tryckprofilen för en härdande Binghamvätska så är de

villkor som ställts upp för deformation eller ”jacking” på den säkra sidan. Det maximalt tillåtna injekteringsövertrycket med hänsyn till deformation är därför samma som för Binghamvätskan, dvs 0.5 MPa.

För att nå ett slutligt inläckage på 1 L/min för 100m krävs tätning av sprickor ner till ca 40  $\mu\text{m}$  (Bilaga 2). Inträngningen för injekteringsmedlet (newtonvätska) i en sådan spricka vid 20 minuters injekteringstid och injekteringsövertrycket 0.5 MPa är 2.4 m. Detta skulle med ett antaget stick på 3 m och en teoretisk inträngning som är lika med hålavståndet resultera i en injekteringsskärm med ca 20 borrhål, se Bilaga 2.

#### *Anpassning av design vid efterinjektering*

Gradienten runt tunneln förväntas bli för liten för att turbulent flöde skall uppstå ( $a_{Re \leq 10}$  markerad med 0 m i Bilaga 2 eftersom  $Re \leq 10$  redan vid tunnelvägg). Teoretiskt begränsas inte heller inträngningen av fininjekteringsmedlet av den gradient som uppstår runt tunneln eftersom  $F_1/2$  och  $F_2/2$  är större än  $I_1$  och  $I_2$  (map b för  $Q < 1$  L/min för 100m) (1.0 och 5.1 m jämfört med 1.1 och 2.4 m). Detta trots att gradienten är beräknad för tätad tunnel (Ekvation 46) och förväntas underskatta värdena på  $F_1/2$  och  $F_2/2$ . Samma sak gäller vid jämförelser baserat på oinjekterad tunnel (Ekv. 47 alt. Ekv. 41). Utifrån de analyser som ingår i rapporten kan alltså samma underlag för design (II. Förslag / underlag design injektering, Bilaga 2) användas oberoende om injekteringen utförs som för- eller efterinjektering. Skärmen för fintätning bör placeras innanför avståndet,  $I$  (100 $\mu\text{m}$ ) + stick, för att minska risken att man drar på sig vatten för ej grovtätade strukturer och istället komplettera den tätning som gjorts med grovtätningen. För injekteringsmedlet B1 och injekteringstiden 80 min skulle detta innebära innanför  $4.9 + 3 = 8$  m. För B2 och 20 min injekteringstid blir motsvarande avstånd:  $1.7 + 3 = 4.7$  m.

#### *4.4.2 KB971, Törnskogstunneln (transmissivitetsdata), antaget djup 20 m*

Djupet överensstämmer med det verkliga djupet för kärnborrhålet. Den högre sprickfrekvensen (5 sprickor/m, Tabell 6) och brantare Paretofördelningen (Figur 6) ger ett större inläckage än prognostiserat baserat på KA3376B01 (20m). Inläckaget till oinjekterad tunnel beräknas till 80 L/min för 100m, se Bilaga 2. De större sprickvidderna ( $b_{\text{max}}$ : 510  $\mu\text{m}$ ) gör att en jämfört med KA3376B01 (20m) stor andel av inläckaget kan åtgärdas med ett cementbruk: 22 L/min för 100m återstår enligt beräkningar när sprickor  $> 100$   $\mu\text{m}$  tätats. För att nå ett slutligt inläckage på 1 L/min för 100m krävs tätning av sprickor ner till ca 13  $\mu\text{m}$ . Eftersom tätning krävs av både små och stora sprickvidder för att nå 1 L/min för 100m delas injekteringen förslagsvis in i minst två omgångar: därav en ”grov-” och en ”fintätning”.

#### *Förslag förinjektering Omgång 1: ”grovtätning”*

Eftersom designen baseras på inträngningen i 100  $\mu\text{m}$  spricka överensstämmer analysen med *Förslag förinjektering Omgång 1: ”grovtätning”* presenterad under KA3376B01, Äspö, med antaget djup 20 m (avsnitt 4.4.1). För bruk B1 (se Bilaga 2) och en injekteringstid på 80 minuter skulle alltså 9 injekteringshål behövas (hålavstånd antas vara samma som inträngningslängd). För bruk B2 skulle 26 injekteringshål krävas. Inget av bruken är ideala.

En kompletterande kontroll av inträngningen i den största sprickan vid övertrycket 0.5 MPa och injekteringstiden 80 minuter bör även göras. I detta fall fås för en spricka med vidden 510  $\mu\text{m}$  en inträngning på ca 25 m (Bilaga 5). Denna analys är av betydelse om brukets inträngning av någon anledning bör begränsas. Även detta pekar på att ett annat bruk bör väljas eftersom inträngningen i den stora sprickan är av samma storleksordning som djupet. Risk för uppträngning av bruk på markytan kan finnas.

#### *Förslag förinjektering omgång 2: "fintätning"*

Inledande kommentarer angående Newtonvätskan beskrivs i avsnitt 4.4.1 under samma rubrik som ovan. Det maximalt tillåtna injekteringsövertrycket med hänsyn till deformation är därför samma som för Binghamvätskan, dvs 0.5 MPa.

För att nå ett slutligt inläckage på 1 L/min för 100m krävs tätning av sprickor ner till ca 13  $\mu\text{m}$ . Inträngningen för injekteringsmedlet (newtonvätska) i en sådan spricka vid 20 minuters injekteringstid och injekteringsövertrycket 0.5 MPa är 0.7 m. Detta skulle med ett antaget stick på 3 m och en teoretisk inträngning som är lika med hålavståndet resultera i en injekteringsskärm med 59 borrhål, se Bilaga 2.

#### *Anpassning av design vid efterinjektering*

Gradienten runt tunneln förväntas bli sådan att man teoretiskt befinner sig i en övergång mellan laminärt och turbulent flöde ( $a_{Re \leq 10}$  är 16.3 m för sprickvidden  $T_{i,max}$ , Bilaga 2). Eftersom det är på gränsen behöver det inte nödvändigtvis vara ett problem. Teoretiskt begränsas inte inträngningen av fininjekteringsmedlet av den gradient som uppstår eftersom  $F_1/2$  och  $F_2/2$  är större än  $I_1$  och  $I_2$  (map b för  $Q < 1$  L/min för 100m) (1.0 och 5.1 m jämfört med 0.3 och 0.7 m). Detta trots att gradienten är beräknad för tätad tunnel (Ekvation 46) och förväntas underskatta värdena på  $F_1/2$  och  $F_2/2$ . Samma sak gäller vid jämförelser baserat på oinjekterad tunnel (Ekv. 47 alt. Ekv. 41).

Utifrån de analyser som ingår i rapporten kan alltså samma underlag för design (II. Förslag / underlag design injektering, Bilaga 2) användas oberoende om injekteringen utförs som för- eller efterinjektering. Skärmen för fintätning bör placeras innanför avståndet,  $I$  (100 $\mu\text{m}$ ) + stick, för att minska risken att man drar på sig vatten för ej grovtätade strukturer och istället komplettera den tätning som gjorts med grovtätningen. För injekteringsmedlet B1 och injekteringstiden 80 min skulle detta innebära innanför  $4.9 + 3 = 8$  m. För B2 och 20 min injekteringstid blir motsvarande avstånd:  $1.7 + 3 = 4.7$  m.

#### *4.4.3 NV01, Hallandsås (transmissivitetensdata), antaget djup 20 m*

Djupet är ca 1/5 av det verkliga djupet för kärnborrhålet. En sprickfrekvens på 16 sprickor/m (Tabell 6) och den brantaste Paretofordelningen (Figur 6) ger ett stort inläckage redan på detta djup. Inläckaget till oinjekterad tunnel beräknas till 266 L/min för 100m tunnel. De större sprickvidderna ( $b_{max}$ : 460  $\mu\text{m}$ ) gör att lite mindre än hälften av inläckaget kan åtgärdas med ett cementbruk: 161 L/min för 100m återstår enligt beräkningar när sprickor  $> 100$   $\mu\text{m}$  tätats. För att nå ett slutligt inläckage på 1 L/min för 100m krävs tätning av sprickor ner till ca 15  $\mu\text{m}$ . Eftersom tätning krävs av både små



och stora sprickvidder för att nå 1 L/min för 100m delas injekteringen förslagsvis in i minst två omgångar: därav en ”grov-” och en ”fintätning”.

#### *Förslag förinjektering Omgång 1: ”grovtätning”*

Eftersom designen baseras på inträngningen i 100 µm spricka överensstämmer analysen med *Förslag förinjektering Omgång 1: ”grovtätning”* presenterad under KA3376B01, Äspö, med antaget djup 20 m (avsnitt 4.4.1). För bruk B1 (se Bilaga 2) och en injekteringstid på 80 minuter skulle alltså 9 injekteringshål behövas (hålavstånd antas vara samma som inträngningslängd). För bruk B2 skulle 26 injekteringshål krävas. Inget av bruken är ideala.

En kompletterande kontroll av inträngningen i den största sprickan vid övertrycket 0.5 MPa och injekteringstiden 80 minuter bör även göras. I detta fall fås för en spricka med vidden 460 µm en inträngning på ca 23 m (Bilaga 5). Denna analys är av betydelse om brukets inträngning av någon anledning bör begränsas. Även detta pekar på att ett annat bruk bör väljas eftersom inträngningen i den stora sprickan är av samma storleksordning som djupet. Risk för uppträning av bruk på markytan kan finnas.

#### *Förslag förinjektering Omgång 2: ”fintätning”*

Inledande kommentarer angående Newtonvätskan beskrivs i avsnitt 4.4.1 under samma rubrik som ovan. Det maximalt tillåtna injekteringsövertrycket med hänsyn till deformation är därför samma som för Binghamvätskan, dvs 0.5 MPa.

För att nå ett slutligt inläckage på 1 L/min för 100m krävs tätning av sprickor ner till ca 15 µm. Inträngningen för injekteringsmedlet (newtonvätska) i en sådan spricka vid 20 minuters injekteringstid och injekteringsövertrycket 0.5 MPa är 0.9 m. Detta skulle med ett antaget stick på 3 m och en teoretisk inträngning som är lika med hålavståndet resultera i en injekteringsskärm med 51 borrhål, se Bilaga 2.

#### *Anpassning av design vid efterinjektering*

Gradienten runt tunneln förväntas bli sådan att man teoretiskt befinner sig i en övergång mellan laminärt och turbulent flöde ( $a_{Re \leq 10}$  är 10.9 m i Bilaga 2 för sprickvidden  $T_{i,max}$ ). Eftersom det är på gränsen behöver det inte nödvändigtvis vara ett problem. Teoretiskt begränsas inte inträngningen av fininjekteringsmedlet av den gradient som uppstår eftersom  $F_1/2$  och  $F_2/2$  är större än  $I_1$  och  $I_2$  (map b för  $Q < 1$  L/min för 100m) (1.0 och 5.1 m jämfört med 0.4 och 0.9 m). Detta trots att gradienten är beräknad för tätad tunnel (Ekvation 46) och förväntas underskatta värdena på  $F_1/2$  och  $F_2/2$ . Samma sak gäller vid jämförelser baserat på oinjekterad tunnel (Ekv. 47 alt. Ekv. 41).

Utifrån de analyser som ingår i rapporten kan alltså samma underlag för design (II. Förslag / underlag design injektering, Bilaga 2) användas oberoende om injekteringen utförs som för- eller efterinjektering. Skärmen för fintätning bör placeras innanför avståndet,  $I (100\mu\text{m}) + \text{stick}$ , för att minska risken att man drar på sig vatten för ej grovtätade strukturer och istället komplettera den tätning som gjorts med grovtätningen. För injekteringsmedlet B1 och injekteringstiden 80 min skulle detta innebära innanför

$4.9 + 3 = 8$  m. För B2 och 20 min injekteringstid blir motsvarande avstånd:  $1.7 + 3 = 4.7$  m.

#### 4.4.4 KA3376B01, Äspö (transmissivitetsdata), antaget djup 450 m

Djupet överensstämmer med det verkliga djupet för kärnbrorhålet. Vattentrycket antas här vara samma som djupet (något lägre i verkligt fall, se Tabell 6). En liten andel av flödet tätas bort med "grovtätning" (från 77 till 71 L/min för 100m tunnel). Sprickor ner till 16  $\mu\text{m}$  behöver tätas för att nå slutligt inläckage på 1 L/min för 100m. På grund av detta delas injekteringen lämpligtvis in i två omgångar: en "grov-" och en "fintätning". De små vidderna kan även motivera att enbart en omgång med "fintätning" görs.

##### *Förslag förinjektering Omgång 1: "grovtätning"*

För djupet 450 m och ett lättflytande bruk (B1:  $\tau_{0,}$ : 2 Pa och  $\mu_g$ : 0.02 Pas) fås inga acceptabla tryckkombinationer. I samtliga fall riskeras återflöde. Med ett mer trögflytande bruk (B2:  $\tau_{0,}$ : 13 Pa och  $\mu_g$ : 0.01 Pas) fås acceptabla tryckkombinationer för injekteringstiderna 40 och 80 min. En kompletterande analys för 30 minuter visar att även detta är möjligt. För detta krävs ett injekteringsövertryck på 10 MPa. Resonemanget ovan gäller vid 450 meters djup och injekteringsdesignen kan därför baseras på detta för samtliga tunnlar vid detta djup.

Det teoretiskt framtagna hålantalet på 2 hål (Bilaga 2) är naturligtvis inte lämpligt utan skall ses som ett teoretiskt minsta värde. En kompletterande kontroll av inträngningen i den största sprickan vid övertrycket 10 MPa och injekteringstiden 30 minuter bör även göras. I detta fall fås för en spricka med vidden 128  $\mu\text{m}$  en inträngning på ca 23 m (Bilaga 5). Denna analys är av betydelse om brukets inträngning av någon anledning bör begränsas.

##### *Förslag förinjektering Omgång 2: "fintätning"*

Inledande kommentarer angående Newtonvätskan beskrivs i avsnitt 4.4.1 under samma rubrik som ovan. Det maximalt tillåtna injekteringsövertrycket med hänsyn till deformation är därför samma som för Binghamvätskan, dvs 10 MPa.

För att nå ett slutligt inläckage på 1 L/min för 100m krävs tätning av sprickor ner till ca 16  $\mu\text{m}$ . Inträngningen för injekteringsmedlet (newtonvätska) i en sådan spricka vid 20 minuters injekteringstid och injekteringsövertrycket 10 MPa är 4.1 m. Detta skulle med ett antaget stick på 3 m och en teoretisk inträngning som är lika med hålavståndet resultera i en injekteringsskärm med 11 borrhål, se Bilaga 2. Ett större antal borrhål kan vara lämpligt för att ta hänsyn till sprickviddsvariationer och/eller korta sprickor. Enligt beräkningarna ger ett injekteringsövertryck på 0.1 – 10 MPa inträngningar på mellan 0.4 – 4.1 m vilket skulle resultera i max 107 och minst 11 borrhål. De höga vattentrycken och det orealistiska antalet borrhål gör dock att ett högre injekteringsövertryck kan vara lämpligt, se Andersson (1998) och Axelsson (2006) som rekommenderar "resoluta" tryck och flöden för att lyckas med injekteringen. Med detta tolkas att tryck och flöden skall vara tillräckligt höga (och möjligen snabbt uppnås) för att kunna stoppa upp vattenflödet och möjliggöra en spridning av injekteringsmedlet. Detta måste naturligtvis vägas mot riskerna för blockutfall i tunneln.

### *Anpassning av design vid efterinjektering*

Gradienten runt en oinjekterad tunnel förväntas leda till turbulent flöde i den största sprickan innanför ett avstånd på ca 3 m från tunnelvägg (se Bilaga 6). För en  $100\mu\text{m}$  spricka förväntas turbulent flöde innanför avståndet 15-20 m, detta innebär sannolikt en överskattning av avståndet eftersom gradienten utgår ifrån tätad tunnel (Ekvation 46). Teoretiskt begränsas möjligen inträngningen av fininjekteringsmedlet av den gradient som uppstår runt tunneln om för låga injekteringsövertryck används.  $F_1/2$  och  $F_2/2$  för  $T_{i,\text{max}}$  är större än eller nära  $I_1$  och  $I_2$  (map b för  $Q < 1$  L/min för 100m) (0.3 och 28 m jämfört med 0.4 och 4.1 m). För en tätad tunnel (Ekvation 46) som dock förväntas underskatta värdena på  $F_1/2$  och  $F_2/2$  blir jämförelsen 0.05-4.5 m och 0.4-4.1 m där  $F/2$  inte längre är större än  $I$ . Detta motiverar val av de högre injekteringsövertrycken.

Baserat på de analyser som ingår i rapporten bör alltså ett tryck i den övre delen av intervallet (0.1-10 MPa) användas vid fintätning som efterinjektering. Risk finns för turbulent flöde med erosion av injekteringsmedlet som följd. Ett högre tryck minskar även påverkan ifrån gradienten runt tunneln där inträngningen av bruket kan bli begränsad. Skärmen för fintätning bör placeras innanför avståndet,  $I (100\mu\text{m}) + \text{stick}$ , för att minska risken att man drar på sig vatten för ej grovtätade strukturer och istället komplettera den tätning som gjorts med grovtätningen. De analyser som gjorts inkluderar inte risken för deformation av tunneln, t ex blockutfall, på grund av för höga injekteringstryck. Det slutliga valet av injekteringsövertryck bör därför göras med hänsyn tagen även till detta.

#### *4.4.5 KB971, Törnskogstunneln (transmissivitetsdata), antaget djup 450 m*

Djupet är betydligt större än det verkliga djupet för kärnborrhålet. Möjligen gör detta att exemplet representerar få verkliga fall. Bergkvalité och sprickvidder påverkas av djupet och är generellt betydligt bättre / mindre på större djup där ytnära processer inte påverkar berget (se KA3376B01 på 450m djup). Ungefär 1/3 av flödet tätas bort med "grovtätning" (från 1257 till 441 L/min för 100m tunnel). Mycket små sprickor, ner till  $5\mu\text{m}$ , behöver tätas för att nå slutligt inläckage på 1 L/min för 100m. På grund av detta delas injekteringen lämpligtvis in i minst två omgångar: en "grov-" och en "fintätning". De stora inflödena och små sprickvidderna motiverar även en tät konstruktion såsom en lining.

#### *Förslag förinjektering Omgång 1: "grovtätning"*

Eftersom designen baseras på inträngningen i  $100\mu\text{m}$  spricka överensstämmer analysen med *Förslag förinjektering Omgång 1: "grovtätning"* presenterad under KA3376B01, Äspö, med antaget djup 450 m (avsnitt 4.4.4).

Det teoretiskt framtagna hållantalet på 2 håll (Bilaga 2) är naturligtvis inte lämpligt utan skall ses som ett teoretiskt minsta värde. En kompletterande kontroll av inträngningen i den största sprickan vid övertrycket 10 MPa och injekteringstiden 30 minuter bör även göras. I detta fall fås för en spricka med vidden  $510\mu\text{m}$  en inträngning på ca 92 m (Bilaga 5). Denna analys är av betydelse om brukets inträngning av någon anledning bör begränsas.

### *Förslag förinjektering Omgång 2: ”fintätning”*

Inledande kommentarer angående Newtonvätskan beskrivs i avsnitt 4.4.1 under samma rubrik som ovan. Det maximalt tillåtna injekteringsövertrycket med hänsyn till deformation är därför samma som för Binghamvätskan, dvs 10 MPa.

För att nå ett slutligt inläckage på 1 L/min för 100m krävs tätning av sprickor ner till ca 5  $\mu\text{m}$ . Inträngningen för injekteringsmedlet (newtonvätska) i en sådan spricka vid 20 minuters injekteringstid och injekteringsövertrycket 10 MPa är 1.3 m. Detta skulle med ett antaget stick på 3 m och en teoretisk inträngning som är lika med hålavståndet resultera i en injekteringskärm med 34 borrhål, se Bilaga 2. Ett något större antal borrhål kan vara lämpligt för att ta hänsyn till sprickviddsvariationer och/eller korta sprickor. Detta skulle man kunna kontrollera genom att placera mellanliggande kontrollhål som eventuellt används som injekteringshål. Enligt beräkningarna ger ett injekteringsövertryck på 0.1 – 10 MPa inträngningar på mellan 0.1 – 1.3 m vilket skulle resultera i max 341 och minst 34 borrhål. De höga vattentrycken och det orealistiska antalet borrhål gör dock att ett högre injekteringsövertryck kan vara lämpligt, se Andersson (1998) och Axelsson (2006) som rekommenderar ”resoluta” tryck och flöden för att lyckas med injekteringen. Detta måste naturligtvis vägas mot riskerna för blockutfall i tunneln.

### *Anpassning av design vid efterinjektering*

Gradienten runt en oinjekterad tunnel förväntas leda till turbulent flöde i de största sprickorna (Re vid tunnelvägg ca 1000, Re vid 10 m ca 300, se Bilaga 6). För en 100 $\mu\text{m}$  spricka är skattningen att turbulent flöde återfinns innanför ett avstånd från tunnelvägg på mellan 15-20 m, detta innebär sannolikt en överskattning av avståndet eftersom gradienten utgår ifrån tätad tunnel (Ekvation 46). Teoretiskt begränsas troligen inte inträngningen av fininjekteringsmedlet av den gradient som uppstår runt tunneln om för låga injekteringsövertryck används.  $F_1/2$  och  $F_2/2$  för  $T_{i,\text{max}}$  är större än  $I_1$  och  $I_2$  (map b för  $Q < 1$  L/min för 100m) (0.3 och 28 m jämfört med 0.1 och 1.3 m). För en tätad tunnel (Ekvation 46) som dock förväntas underskatta värdena på  $F_1/2$  och  $F_2/2$  blir jämförelsen 0.05-4.5 m och 0.1-1.3 m där  $F/2$  är nära eller större än  $I$ .

Baserat på de analyser som ingår i rapporten bör ett tryck i den övre delen av intervallet (0.1-10 MPa) användas för att minska påverkan ifrån gradienten. Detta framförallt på grund av risken för turbulent flöde med risk för erosion och uppblandning av injekteringsmedlet som följd. Skärmen för fintätning bör placeras innanför avståndet,  $I$  (100 $\mu\text{m}$ ) + stick, för att minska risken att man drar på sig vatten för ej grovtätade strukturer och istället komplettera den tätning som gjorts med grovtätningen. De analyser som gjorts inkluderar inte risken för deformation av tunneln, t ex blockutfall, på grund av för höga injekteringstryck. Det slutliga valet av injekteringsövertryck bör därför göras med hänsyn tagen även till detta.

#### *4.4.6 NV01, Hallandsås (transmissivitetsdata), antaget djup 450 m*

Djupet är ca 4 gånger större än det verkliga djupet för kärnborrhålet. Möjligen gör detta att exemplet representerar få verkliga fall. Bergkvalité och sprickvidder påverkas av djupet och är generellt betydligt bättre / mindre på större djup där ytnära processer inte påverkar berget (se KA3376B01 på 450m djup). Mindre än hälften av inflödet tätas bort

med ”grovtätning” (från 4200 till ca 2900 L/min för 100m tunnel). Sprickor, ner till 15  $\mu\text{m}$ , behöver tätas för att nå slutligt inläckage på 1 L/min för 100m. På grund av detta delas injekteringen lämpligtvis in i minst två omgångar: en ”grov-” och en ”fintätning”. De stora inflödena och små sprickvidderna motiverar även en tät konstruktion såsom en lining.

#### *Förslag förinjektering Omgång 1: ”grovtätning”*

Eftersom designen baseras på inträngningen i 100  $\mu\text{m}$  spricka överensstämmer analysen med *Förslag förinjektering Omgång 1: ”grovtätning”* presenterad under KA3376B01, Äspö, med antaget djup 450 m (avsnitt 4.4.4).

Det teoretiskt framtagna hålantalet på 2 hål (Bilaga 2) är naturligtvis inte lämpligt utan skall ses som ett teoretiskt minsta värde. En kompletterande kontroll av inträngningen i den största sprickan vid övertrycket 10 MPa och injekteringstiden 30 minuter bör även göras. I detta fall fås för en spricka med vidden 460  $\mu\text{m}$  en inträngning på ca 83 m (Bilaga 5). Denna analys är av betydelse om brukets inträngning av någon anledning bör begränsas.

#### *Förslag förinjektering Omgång 2: ”fintätning”*

Inledande kommentarer angående Newtonvätskan beskrivs i avsnitt 4.4.1 under samma rubrik som ovan. Det maximalt tillåtna injekteringsövertrycket med hänsyn till deformation är därför samma som för Binghamvätskan, dvs 10 MPa.

För att nå ett slutligt inläckage på 1 L/min för 100m krävs tätning av sprickor ner till ca 15  $\mu\text{m}$ . Inträngningen för injekteringsmedlet (newtonvätska) i en sådan spricka vid 20 minuters injekteringstid och injekteringsövertrycket 10 MPa är 3.9 m. Detta skulle med ett antaget stick på 3 m och en teoretisk inträngning som är lika med hålavståndet resultera i en injekteringsskärm med 11 borrhål, se Bilaga 2. Ett större antal borrhål kan vara lämpligt för att ta hänsyn till sprickviddsvariationer och/eller korta sprickor. Enligt beräkningarna ger ett injekteringsövertryck på 0.1 – 10 MPa inträngningar på mellan 0.4 – 3.9 m vilket skulle resultera i max 114 och minst 11 borrhål. De höga vattentrycken och det orealistiska antalet borrhål gör dock att ett högre injekteringsövertryck kan vara lämpligt, se Andersson (1998) och Axelsson (2006) som rekommenderar ”resoluta” tryck och flöden för att lyckas med injekteringen. Detta måste naturligtvis vägas mot riskerna för blockutfall i tunneln.

#### *Anpassning av design vid efterinjektering*

Gradienten runt en oinjekterad tunnel förväntas leda till turbulent flöde i de största sprickorna ( $Re$  vid tunnelvägg ca 1000,  $Re$  vid 10 m ca 300, se Bilaga 6). För en 100 $\mu\text{m}$  spricka är skattningen att turbulent flöde återfinns innanför ett avstånd från tunnelvägg på mellan 15-20 m, detta innebär sannolikt en överskattning av avståndet eftersom gradienten utgår ifrån tätad tunnel (Ekvation 46). Teoretiskt begränsas möjligen inträngningen av fininjekteringsmedlet av den gradient som uppstår runt tunneln om för låga injekteringsövertryck används.  $F_1/2$  och  $F_2/2$  för  $T_{i,max}$  är större än eller nära  $I_1$  och  $I_2$  (map b för  $Q < 1$  L/min för 100m) (0.3 och 28 m jämfört med 0.4 och 3.9 m). För en tätad tunnel (Ekvation 46) som dock förväntas underskatta värdena på  $F_1/2$  och  $F_2/2$  blir

jämförelsen 0.05-4.5 m och 0.4-3.9 m där  $F/2$  för de lägre injekteringsövertrycket inte längre är större än  $I$ . Detta motiverar val av de högre injekteringsövertrycken.

Baserat på de analyser som ingår i rapporten bör ett tryck i den övre delen av intervallet (0.1-10 MPa) användas för att minska påverkan ifrån gradienten. Detta framförallt på grund av risken för turbulent flöde med risk för erosion och uppblandning av injekteringsmedlet som följd. Ett högre tryck minskar även påverkan ifrån gradienten runt tunneln där inträngningen av bruket kan bli begränsad. Skärmen för fintätning bör placeras innanför avståndet,  $I$  ( $100\mu\text{m}$ ) + stick, för att minska risken att man drar på sig vatten för ej grovtätade strukturer och istället komplettera den tätning som gjorts med grovtätningen. De analyser som gjorts inkluderar inte risken för deformation av tunneln, t ex blockutfall, på grund av för höga injekteringsstryck. Det slutliga valet av injekteringsövertryck bör därför göras med hänsyn tagen även till detta.



## 5 Slutsatser och rekommendationer

En slutsats baserad på den inledande litteraturgenomgången är att man inte självklart kan säga att det finns *en* praxis eller given arbetsgång vid efterinjektering. Ansatsen har därför varit att teoretiskt ställa samman kunnandet kring problemets delkomponenter och genomföra analyser relaterade till bergets egenskaper och processer som förväntas vara av betydelse vid för- och efterinjektering. Analyser och beräkningar är baserade på data från kärnbrorhåll ifrån Äspölaboratoriet (KA3376B01), Törnskogstunneln (KB971) och Hallandsås (NV01).

Arbetet har genomförts genom att vidareutveckla och använda en analysmetod med flera steg, se Tabell 7, Bilaga 1 och Bilaga 2. De olika stegen är:

- I. Prognos av inläckage och injekteringsbehov baserat på kärnbrorhåll.
- II. Förslag / underlag för design av injektering.
- III. Förslag / underlag för design av efterinjektering.

**Tabell 7** Arbetsgång: steg I-III, inklusive centrala parametrar.

I. Prognos av inläckage och injekteringsbehov.	Fördelning, T & b (Pareto), Sprickfrekvens, Djup + Krav ↓ 100µm och $b_{max}$ (grov), $b_{Q<L/min}$ för 100m (fin)
II. Underlag för design av injektering mht ”jacking” och ”back-flow”.	Val av injekteringsmedel <u>Kontroll</u> : Tillåtet tryckintervall mht II. och <i>tid</i> , $\Delta p_1 - \Delta p_2$ (t) → Intervall för <u>inträngning</u> , <u>hålavstånd</u> → <u>hålantal</u> Val för att minimera <i>tidsåtgång</i>
III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient.	<u>Kontroll</u> : Turbulent flöde, $a_{Re \leq 10}$ Anpassa <u>skärmgeometri</u> (stick) i II.? <u>Tryck</u> ? <u>Kontroll</u> : Inträngning, $F/2 \geq I$ Anpassa <u>hålavstånd</u> , <u>tryck</u> , <u>skärmgeometri</u> i II.?

Arbetsgången ovan har använts för att möta projektets mål. Två delmål har varit att ge en redovisning av närbergets hydrogeologiska egenskaper efter förinjektering samt att ge en analys av spridning och tätningsförmåga hos fintätningsmedel i förinjekterat berg. Punkterna I-II ovan ger en möjlig beskrivning av det förinjekterade berget. Slutligen kan analyser i steg III kräva att förslag eller underlag för injekteringsdesign i steg II anpassas, sammantaget skall detta ses som en bas för en efterinjekteringsstrategi. Att presentera en potentiell strategi för efterinjektering har utgjort ytterligare ett delmål för projektet. Fördelar med arbetssättet ovan är att en analysmetod där design av både för- och efterinjektering ingår bättre beskriver en helhet än om egenskaper för det förinjekterade berget hade antagits. Teoretiskt ger detta även en bättre möjlighet att inför en efterinjektering skapa en bild av vad som åstadkommit med en förinjektering, baserat på information eller antaganden om berget, det bruk och den teknik som använts



vid förinjekteringen. Den konceptuella modellen i avsnitt 2.1 och ekvationerna i avsnitt 2 beskriver i ytterligare detalj vilka processer som analyserna tagit hänsyn till. För ett verkligt fall är naturligtvis en ingenjörsmässig bedömning av analyser, resultat och design av central betydelse.

Följande slutsatser kan dras i relation till punkt I. *Prognos av inläckage och injekteringsbehov baserat på kärnborrhål:*

- Analysen av data för KA3376B01 (Äspö), KB971 (Törnskogstunneln) och NV01 (Hallandsås) för verkliga djup och tunneldimensioner identifierar ett behov av fintätning i samtliga fall. Detta överensstämmer med de erfarenheter som presenterats i Emmelin et al. (2004) och Eriksson et al. (2005), Funehag och Gustafson (2004) och Funehag och Gustafson (2005).
- Omfattningen på fintätningen är i analysen främst beroende av resulterande Paretofördelningar, T och b, men också av sprickfrekvensen, tunneldjupet och av de inflödeskrav som ställs på tunneln, se Tabell 7. Antagandet är att sprickor >100µm kan åtgärdas med "grovtätning" med exempelvis ett cementbruk. Sprickvidden, b för max totalt inläckage (t ex 1 L/min för 100m) avgör omfattningen på "fintätningen". Detta utgör underlag för val av lämpliga injekteringsmedel, vilket ytterligare utvärderas i punkt II.
- Borrhålens representativitet och kvalitén på indata har betydelse för resultatet. För en mer heltäckande design krävs undersökningar både av det "bra" och det "dåliga" berget. Dålig upplösning och kvalitet på data kommer att påverka både inläckageprognos, design och därmed också den slutliga kostnaden för projektet.

För punkt II. *Förslag / underlag för design av injektering* har de två centrala frågeställningar varit hur design av för- och efterinjektering påverkas av: (1) Deformation på grund av för högt injekteringsstryck, "jacking"; och (2) Återflöde av bruket, "back-flow". Bilaga 2 sammanfattar de parametrar som utgör underlag för val av design och de genomräknade exemplen ger en bild av hur parametervärdena kan variera. Förinjekteringssituationen ges av en viss sprickviddsfördelning och sprickfrekvens kombinerat med ett visst tunneldjup och för tunneln uppsatta inläckagekrav. Detta kan inte bara lösas på ett sätt, men parametrarna och deras intervall i Bilaga 2 ger möjliga lösningar som också ger en bild av det förinjekterade berget. Vilka tryckintervall är "tillåtna" med avseende på "jacking" och "back-flow"? Hur långt skulle baserat på geologin lämpliga injekteringsmedel teoretiskt nå under viss tid och med visst injekteringsstryck? Vad återstår att täta vid en efterinjektering? Med antagandet att injekteringsmedlet skall nå till närliggande borrhål (I = hålavstånd) kan antalet injekteringshål beräknas, se Tabell 7. Slutligt val av design kan vid sidan av den ingenjörsmässiga bedömningen exempelvis utgå från att minimera tidsåtgång. Detta är dock inte vidare utvecklat här.

Punkten III. *Förslag / underlag för design av efterinjektering* tar hänsyn till den gradient som uppkommer när man drivit tunneln. Här har två delfrågor analyserats:

- På vilka avstånd ifrån tunnelvägg fås en gradient som innebär en risk för turbulent flöde med erosion av injekteringsmedlet som följd (för Bingham- och Newtonvätska)? Övergång mellan laminärt och turbulent flöde antas vid Reynolds tal,  $Re > 10$  (Zimmermann 2005).

- Begränsas den beräknade inträngningen i (II) till följd av den ökade gradienten runt tunneln (för Newtonvätska)?

Båda analyserna behandlar ett av delmålen som var att ge en analys av spridning och tätningsförmåga hos fintättningsmedel i förinjekterat berg. Sammantaget, med de förslag och eventuella modifieringar och begränsningar som ges av analyserna i punkterna I-III fås en redovisning av närbergets hydrogeologiska egenskaper efter förinjektering och tunneldrivning och en möjlig strategi för efterinjektering. Detta utgör ytterligare ett av delmålen med projektet.

Analysen baseras på eventuell deformation ”jacking” relaterat till last från ovanliggande berg. Eventuella deformationer orsakade av spänningstillståndet i övrigt runt tunneln ingår inte i analysen. Detta problem har exempelvis belysts av Beitnes (2005) där han kommenterar att spänningstillståndet i berget är viktigt eftersom en låg spänning i någon riktning ökar svårigheten att nå ett bra resultat. I vissa fall kan det därför vara nödvändigt att välja ett lägre injekteringsstryck och ett större antal injekteringshål eller längre injekteringstider för att lyckas med efterinjekteringen.

#### *Rekommendationer avseende anpassning av skärmgeometri / stick*

Om en kompletterande ”grovtätning” behövs kan följande rekommendationer ges för hur skärmen kan placeras (se principiell skiss i Figur 7):

- Utanför avståndet där  $Re \leq 10$ ,  $a_{Re \leq 10}$  för  $T_{i,max}$  &  $dh/dr$  (Ekv. 41)  
...och möjligen även...
- Utanför  $a_{Re \leq 10}$  för  $T_{tot}$  &  $dh/dr$  (Ekv. 47)

Båda avser att minska den andel av borrhåslängden som hamnar inom området där det finns större risk för turbulent flöde. Vid anisotropi där man kan ha haft svårt att korsa vissa strukturer under förinjekteringen kan en kompletterande ”grovtätning” med skärmarna placerade i motsatt riktning vara till nytta.

För en ”fintätning” är det sedan lämpligt att placera skärmen:

- Innanför avståndet,  $I$  (100 $\mu$ m) + stick för att komplettera tidigare ”grovtätning” och minska risken att ta på sig stora mängder vatten ifrån större strukturer.
- Utanför avståndet där  $Re \leq 10$ ,  $a_{Re \leq 10}$  för  $T_{i,max}$  &  $dh/dr$  (Ekv. 41) för att minska risken för turbulens  
...och möjligen även...
- Utanför  $a_{Re \leq 10}$  för  $T_{tot}$  &  $dh/dr$  (Ekv. 47)
- Utanför  $a_{Re \leq 10}$  för  $T_{100\mu m}$ ,  $T_{b(Q < 1L/min \text{ för } 100m)}$  &  $dh/dr$  (Ekv. 46)

De två sista punkterna avser även de att minska risken för turbulens. Den överskattade gradienten i den sista punkten gör dock att värdena är osäkra (men förmodligen på säkra sidan eftersom gradienten är överskattad).

*Rekommendationer avseende anpassning av hålgeometri mht gradient*

Eventuell begränsning i inträngning för fintättningsmedlet (Newtonvätska) hanteras genom att jämföra så att:

- $F_1 / 2 \geq I_1$
- $F_2 / 2 \geq I_2$

för de tillåtna injekteringsövertrycken  $\Delta p_1$  och  $\Delta p_2$  (se principiell skiss, Figur 2). Om så ej är fallet kan exempelvis hålavstånd, injekteringstryck eller skärmgeometri ändras, se Tabell 7.

Placering och fördelning av borrhål inom en skärm kan även det göras så att man påverkar storleken på gradienten. Två förslag har behandlats i denna rapport:

- Större stick på vartannat borrhål, de med mindre stick injekteras först.
- Beroende av tätningsbehovet fördelas borrhålen och tätningsinsatsen ojämnt runt tunnelperiferin. För att minska exempelvis takdropp görs fintätning i taket emedan målsättningen blir en lägre täthet i övrigt. Detta flyttar vattnet och minskar gradienten och inflödet i taket.

Ett antal beräkningsexempel har gjorts baserat på de tre kärnborrhålen. De avstånd,  $a_{Re \leq 10}$ , innanför vilka turbulent flöde kan förväntas vid en efterinjekteringssituation samt den av gradienten eventuellt begränsade inträngningen av fintättningsmedlet (Newtonvätska),  $F/2$ , presenteras även de i Bilaga 2. Sammantaget fås de största svårigheterna vid efterinjektering vid stora djup. De höga vattentrycken gör att ett högre injekteringsövertryck och därmed också flöde kan vara lämpligt. Detta är i linje med Andersson (1998) och Axelsson (2006) som båda rekommenderar ”resoluta” tryck och/eller flöden för att lyckas med injekteringen. Att fintäta som en del av förinjekteringen underlättar.

## Referenser

- Andersson, C, Eng, A, 2005. Äspö Pillar Stability Experiment –Final experiment design, monitoring results and observations. SKB, R-05-02, Stockholm.
- Andersson, H, 1998. Chemical rock grouting. An experimental study on polyurethane foams. Doktorsavhandling, Department of geotechnical engineering, Chalmers university of technology, Göteborg.
- Andersson, H, Jansson, T, 1996. Projekt injektering Förstudie, Sammanställning av svenskt injekteringskunnande. SKB, PR D-96-027, Stockholm.
- Axelsson, M, 2006. Strength criteria on grouting agents for hard rock –Laboratory studies performed on gelling liquid and cementitious grout. Licentiatuppsats, Chalmers University of Technology, Division of GeoEngineering. Göteborg.
- Axelsson, M, Gustafson, G, 2005. A robust method to determine the shear strength of cement-based injection grouts in the field. Tunnelling and Underground Space Technology, tillgänglig online DOI: 10.1016/j.tust.2005.09.002.
- Axelsson, C-L, Jonsson, E-K, Geier, J, Dershowitz, W, 1990. Discrete fracture modelling. SKB Progress Report 25-89-21, Stockholm.
- Beitnes, A, 2005. Lessons to be learned from Romeriksporten. Tunnels and Tunnelling International, vol. 37, no. 6, Juni, 2005, sid 36-38.
- Bergman, S G A, Nord, G, 1982. Täta tunnlår lagom. BeFo Nr 64:1/82, Stiftelsen Bergteknisk Forskning, Stockholm.
- Carlsson, L, Gustafson, G, 1991. Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik. Rapport R66:1991, Bygghälsningsrådet, Stockholm.
- Dershowitz, W, Lee, G, Geier, J, Foxford, T, LaPointe, P, Thomas, A, 1998. User documentation, FracMan Interactive discrete feature data analysis, geometric modelling, and exploration simulation. Version 2.6, Golder Associates inc., Seattle, USA.
- Emmelin A, Eriksson E, Fransson, Å. 2004. Characterisation, design and execution of two grouting fans at 450 m level, SKB Äspö HRL. R-04-59, Stockholm.
- Eriksson, M, 2002. Prediction of grout spread and sealing effect. A probabilistic approach. Doktorsavhandling, Royal Institute of Technology, Division of Soil and Rock Mechanics, Stockholm.
- Eriksson, M, Fransson, Å, Emmelin, A, 2005. Grouting trials in hard jointed rock – investigation, design and execution. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering i Osaka, Japan.

- Fjällberg, L, Lagerblad, B, 2003. Cementbaserade injekteringsmedel – olika typer, cementreaktioner, bindetid och flytförmåga. CBI rapport 1:2003, Cement och Betonginstitutet, Stockholm.
- Fransson, Å, 1999. Grouting predictions based on hydraulic tests of short duration: analytical, numerical and experimental approaches. Licentiatuppsats, Chalmers University of Technology, Department of Geology, Göteborg.
- Fransson, Å, 2001. Characterisation of fractured rock for grouting using hydrogeological methods. Doktorsavhandling, Chalmers University of Technology, Department of Geology, Göteborg.
- Fransson, Å, 2002. Nonparametric method for transmissivity distributions along boreholes. *Ground Water*, 40(2), sid 201-204.
- Fransson, Å, Gustafson, G, 2005. Development of a Computer-Based Analysis Tool for Characterization of Fractured Rock for Grouting, PM.
- Funehag, J, 2005. Grouting of hard rock with gelling liquids, field and laboratory studies of Silica sol. Licentiatuppsats, Chalmers University of Technology, Division of GeoEngineering. Göteborg.
- Funehag, J, Gustafson, G, 2004. Injekteringsförsök med Cembinder U22 I Hallandsås. Publikation 2004:1, Division of GeoEngineering, Chalmers university of technology, Göteborg.
- Funehag, J, Gustafson, G, 2005. Grouting with silica sol in the Törnskog tunnel Grouting design for silica sol in full production. Report No. 2005:12, Division of GeoEngineering, Chalmers university of technology, Göteborg.
- Gustafson, G, 1986. Geohydrologiska förundersökningar i berg. Stiftelsen Bergteknisk Forskning, BeFo 84:1/86. Stockholm.
- Gustafson, G, 2005. TN 050928, Rev 051003: Considerations on grouting pressure, PM.
- Gustafson, G, Fransson, Å, Funehag J, Axelsson, M, 2004. Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering. Väg- och vattenbyggaren 4, 2004.
- Gustafson, G, Fransson, Å, 2005. The Use of the Pareto Distribution for Fracture Transmissivity Assessment. *Hydrogeology Journal*, Issue: Online First DOI: 10.1007/s10040-005-0440-y.
- Gustafson, G, Stille, H, 2005. Stop Criteria for Cement Grouting. *Felsbau Rock and Soil Engineering*, No. 3, sid 62-68.

- Hansson, A, 2002. Utvärdering av utförda injekteringsarbeten i Södra Länkens bergtunnlar Väg- och vattenbyggnadsteknik, 2002:014.
- Houlsby, A C, 1990. Construction and design of cement grouting, a guide to grouting in rock foundations. John Wiley & Sons, New York.
- Håkansson, U, 1993. Rheology of fresh cement-based grout. Doktorsavhandling, Royal Institute of Technology, Division of Soil and Rock Mechanics, Stockholm.
- Hässler, L, 1991. Grouting of rock. Simulation and classification. Doktorsavhandling, Royal Institute of Technology, Division of Soil and Rock Mechanics, Stockholm.
- Ingenjörbyrå Saanio och Laine, 1979. Injekteringsarbetena i spårtunnlar mellan Brunnsgratan – Gloet, Slutrapport 16.08.1979.
- Kruseman, G P, de Ridder, N A, 1979. Analysis and evaluation of pumping test data, Bulletin 11, International Institute for Land Reclamation and Improvement / ILRI. Wageningen, Netherlands.
- Laughton, C, Bruen, M, P, 2003. Construction of the numi underground laboratory facilities. Proceedings - Rapid Excavation and Tunneling Conference, 2003, sid 1061-1069.
- Lombardi, G, 2003. Grouting of rock masses. Grouting and Ground treatment, Proceedings of the third international conference, ASCE, Geotechnical special publication No 120.
- de Marsily, G, 1986. Quantitative Hydrogeology. Groundwater hydrology for engineers. Academic Press, Inc., San Diego.
- Milanovic, P T, 2004. Water resources engineering in karst. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, USA.
- Narduzzo, L, Eng, P, 2003. The Toronto Transit Commission's subway tunnel and station leak remediation grouting program. Grouting and Ground treatment, Proceedings of the third international conference, ASCE, Geotechnical special publication No 120.
- Osnes, JD, Winberg, A, Andersson, J-E, 1988. Analysis of well test data – Application of probabilistic models to infer hydraulic properties of fractures. Topical Report RSI-0338. RE/SPEC INC, Rapid City, USA.
- Palardy, D, Ballivy, G, Vrignaud, J-P, Ballivy, C, 2003. Injection of a ventilation tower of an underwater road tunnel using cement and chemical grouts. Grouting and Ground treatment, Proceedings of the third international conference, ASCE, Geotechnical special publication No 120.

Rhén, I (ed.), Gustafson, G, Stanfors, R, Wikberg, P, 1997. Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/5 Models based on site characterisation 1986-1995. SKB, TR 97-06, Stockholm.

Rhén, I, Follin, S, Hermanson, J, 2003. Hydrogeological Site Descriptive Model – a strategy for its development during Site Investigations. SKB, R-03-08, Stockholm.

Rouhiainen, P, 2000. Difference flow measurements in borehole KLX02 at Laxemar. Äspö Hard Rock Laboratory. SKB IPR 01-06, Stockholm.

Snow, DT, 1970. The frequency and apertures of fractures in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, No. 7, sid 23-40.

Vägverket, 2002. Förstudie till FoU-ramprojekt Tätning och frostsäkring av tunnlar. Avdelningen för bro och tunnel.

Warner, J, 2004. *Practical Handbook of Grouting: soil, rock and structures*. Wiley, Hoboken, New Jersey, USA.

Zimmermann, R W, 2005. Influence of Reynolds number on fluid flow in rock fractures. Bergmekanikdag 2005, Stiftelsen svensk bergteknisk forskning och svenska bergmekanikgruppen.

*Öhman, J, Niemi, A, Tsang, C-F, 2005. Probabilistic estimation of fracture transmissivity from Wellbore hydraulic data accounting for depth-dependent anisotropic rock stress. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences No. 42, sid 793-804.*

## **Bilagor**

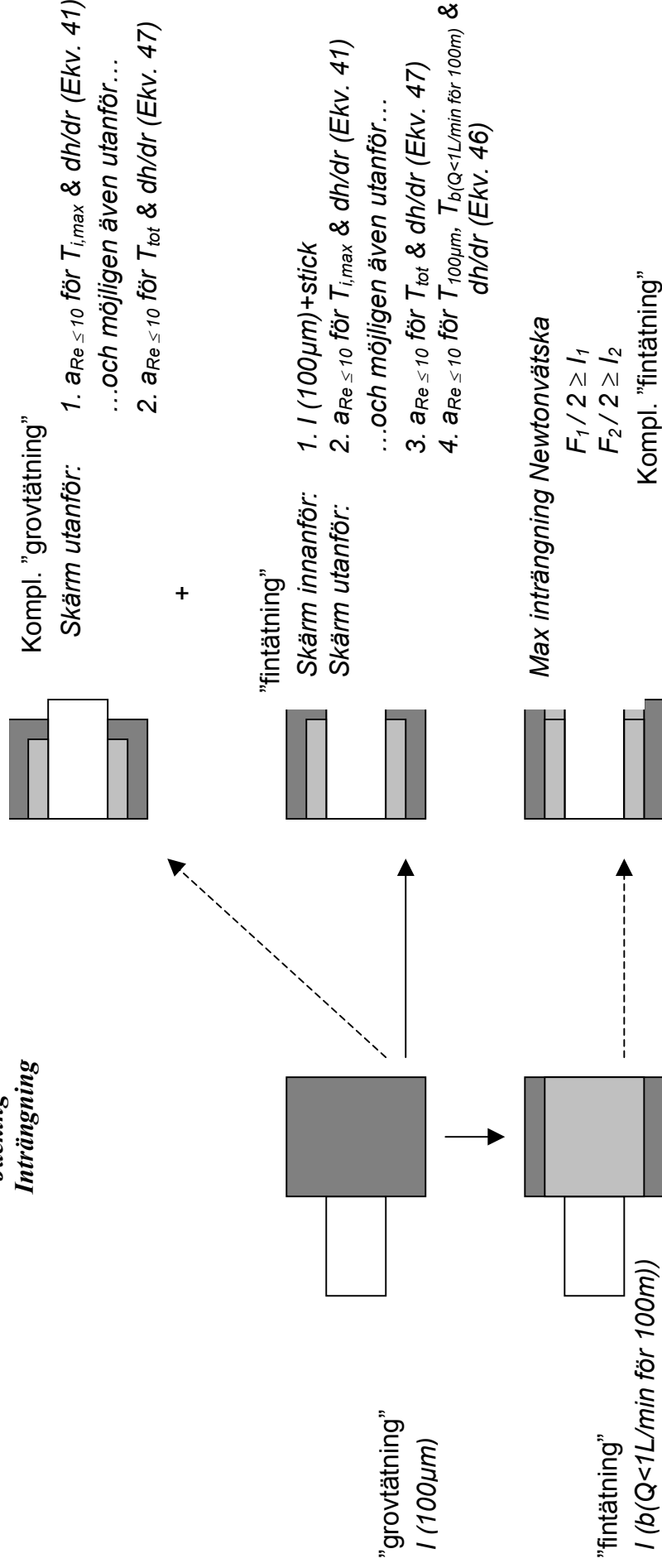
- Bilaga 1      Översikt: Metod och bilagor
- Bilaga 2      Sammanställning av parametrar: Jämförande analys baserat på kärnbrorrhål KA3376B01, KB971 och NV01 för antagna djup 20 respektive 450 m (Bilaga 3 – Bilaga 6).
- Bilaga 3      I. Prognos av inläckage och injekteringsbehov.
- Bilaga 4      II. Underlag för design av injektering mht ”jacking” och ”back-flow”: Tillåtna tryckkombinationer ( $p_w$  och  $\Delta p$ ).
- Bilaga 5      II. Underlag för design av injektering: Skärmgeometri
- Bilaga 6      III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient.





Förinjektering  
 "Back-flow"  
 "Jacking"  
 Inträngning

**1 Efterinjektering**  
 Gradient – turbulens (B+N) & begränsning inträngning (N)



**I.**  
 Prognos av:

- Inläckage.
- Injekteringsbehov.

**Bilaga 3**

**II.**

- Underlag för design av injektering mht "jacking" och "back-flow".
- En möjlig beskrivning av förinjekterat berg.

**Bilaga 4 och Bilaga 5**

**III.**

- Underlag för design av efterinjektering mht gradient.
- Underlag för eventuell modifiering av II. "Underlag för injekteringsdesign".
- I - III. sammantaget, möjlig strategi för efterinjektering.

**Bilaga 6**



Bilaga 2 Sammanställning av parametrar: Jämförande analys baserat på kärnborrhål KA3376B01, KB971 och NV01 för antagna djup 20 respektive 450 m (Bilaga 3 - Bilaga 6).

Tunnel	Äspö / KA3376B01		Törnskogstunneln / KB971		Hallandsås / NV01	
<b>I. Prognos av inläckage och injektionsbehov</b>						
Djup [m]	20	450	20	450	20	450
$b_{max}$ [µm]	128µm		510µm		460µm	
Q [L/min för 100m]	5	77	80	1257	266	4200
<b>"Krav"</b>						
Q när $b > 100\mu\text{m}$ [L/min för 100m]	4.4	71	22	441	161	2876
b ( $Q < 1$ L/min för 100m) [µm]	41µm	16µm	13µm	5µm	15µm	15µm
<b>II. Förslag / underlag design injektoring</b>	"grov"	"fin"	"grov"	"fin"	"grov"	"fin"
Injektionsmedel <sup>1</sup>	B1 (B2)	N	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö
Injektionstid [min] <sup>2</sup>	80 (20)	20	30	20		
$\Delta p$ alt. $\Delta p_1 - \Delta p_2$ [MPa] <sup>3</sup>	0.5 (0.5)	0.1 - 0.5	10	0.1 - 10		
I alt. $I_1 - I_2$ (100µm) [m] <sup>4</sup>	4.9 (1.7)		18.1			
I alt. $I_1 - I_2$ för b ( $Q < 1$ L/min för 100m) <sup>5</sup>	-	1.1 - 2.4	-	0.4 - 4.1		0.4 - 3.9
Stick [m] <sup>6</sup>	3	3	3	3	3	3
Hålantal (I = hålavstånd) <sup>7</sup>	9 (26)	42 - 19	> 2	107 - 11	114 - 51	114 - 11
<b>III. Förslag / underlag design efterinjektoring</b>	"grov"	"fin"	"grov"	"fin"	"grov"	"fin"
$a_{Re \leq 10}$ , $O_{inj}$ . ( $T_{tot}/T_{i,max}$ ) <sup>8</sup>	0 m / 0 m	8.5 m / 3.2 m	22.7 m / 16.3 m	420 m / 450 m	28.7 m / 10.9 m	510 m / 330 m
$F_1/2 - F_2/2$ ( $F/2 \geq 1$ ) <sup>9</sup>	-	7.4-37m	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö
$F_1/2 - F_2/2$ ( $F/2 \geq 1$ ) <sup>10</sup>	-	6.4-32m	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö
$a_{Re \leq 10}$ , Tät. ( $T_b(Q < 1$ L/min för 100m)/ $T_{100\mu\text{m}}$ ) <sup>11</sup>	0 m / 0 m	0 m / 17.7 m	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö
$F_1/2 - F_2/2$ ( $F/2 \geq 1$ ) <sup>12</sup>	-	1.0-5.1m	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö
		<b>0.05-4.5m</b>	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö	Se Äspö

Kommentarer följer på nästa sida

Värden i kursiv stil är orimliga. Samtliga resultat skall vid slutlig design vägas mot erfarenhet och praxis.

- B1: Cement 1:  $\tau_0$ : 2 Pa,  $\mu_g$ : 0.02 Pas  
B2: Cement 2:  $\tau_0$ : 13 Pa,  $\mu_g$ : 0.01 Pas  
N: Silica sol,  $\mu_g$ : 0.005 Pas

- <sup>1</sup> Lämpligt injekteringsmedel baserat på analys av "back-flow", "jacking" och inträngning (ej "back-flow" för Newtonvätska).
- <sup>2</sup> Beräkningarna är utförda för tiderna 20, (30), 40 och 80 min och ges i tabellen den kortaste tiden som krävs enligt punkt 1.
- <sup>3</sup> Lämpligt  $\Delta p$  eller intervall för  $\Delta p$  baserat på analys av "back-flow", "jacking" och inträngning (ej "back-flow" för Newtonvätska).
- <sup>4</sup> Beräknas, eftersom vi vill kunna täta sprickor ner till 100 $\mu$ m med ett medel av Binghamtyp blir denna vidd dimensionerande.
- <sup>5</sup> Beräknas, eftersom vi vill kunna täta sprickor ner till den vidd som ger ett inflöde  $Q < 1$  L/min för 100m tunnel med ett medel av Newtontyp blir denna vidd dimensionerande.
- <sup>6</sup> Värdet antas, ändrat värde påverkar omkrets (nedan) och hållantal. Vid efterinjektering kan valet av stick påverkas pga gradienten.
- <sup>7</sup> Tunnelradie + stick ger omkrets, denna divideras med inträngningslängden, I. Injekteringsmedlet skall nå till närliggande borrhål (I antas = hålavstånd).
- <sup>8</sup>  $a_{Re \leq 10}$  är avstånd från tunnelvägg där  $Re \leq 10$ . Beräknas för en oinjekterad tunnel (dh/dr, se Ekv. 47 alt. Ekv. 41) baserat på totala transmissiviteten längs tunneln och transmissiviteten för den största enskilda sprickan ( $T_{tot}$  alt.  $T_{i,max}$ ). Innanför detta avstånd risk för turbulent flöde, gäller injekteringsmedel av Bingham- och Newtontyp.
- <sup>9-10</sup> För medel av Newtontyp beräknas maximal inträngning vid injektering i gradientfält. Intervall på inträngningen för de tillåtna injekteringsöverttrycken  $\Delta p_1$  och  $\Delta p_2$  blir  $F_1/2 - F_2/2$ . Detta beräknas både utifrån gradienten i Ekv. 47 och Ekv. 41. Vid jämförelse bör  $F_1 / 2 \geq I_1$  och  $F_2 / 2 \geq I_2$ . Exempel: Jämför "ljusa" fält för II. och III., 20m djup, motsvarande görs för 450m djup.
- <sup>11</sup>  $a_{Re \leq 10}$  är avstånd från tunnelvägg där  $Re \leq 10$ . Beräknas för en tätad tunnel (dh/dr, se Ekv. 46) baserat på transmissiviteten för den minsta sprickvidd, b, som måste tätas för att nå inflödet  $Q < 1$  L/min för 100m tunnel och transmissiviteten för en spricka med vidden 100 $\mu$ m ( $T_{b(Q < 1 L/min \text{ för } 100m)}$  alt.  $T_{100\mu m}$ ). Innanför detta risk för turbulent flöde, gäller injekteringsmedel av Bingham- och Newtontyp. Innebär en överskattning eftersom gradienten baseras på tät tunnel.
- <sup>12</sup> För medel av Newtontyp beräknas maximal inträngning vid injektering i gradientfält. Intervall på inträngningen för de tillåtna injekteringsöverttrycken  $\Delta p_1$  och  $\Delta p_2$  blir  $F_1/2 - F_2/2$ . Utgår ifrån gradient för tätad tunnel (dh/dr, se Ekv. 46), innebär därför en underskattning.

## **Bilaga 3 I. Prognos av inläckage och injekteringsbehov.**

### *3.1 KA3376B01*

**Bilaga 3:1a** KA3376B01: Verkliga tunneldjup och tunneldimensioner.

**Bilaga 3:1b** KA3376B01: Djup: 20m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>.

**Bilaga 3:1c** KA3376B01: Djup: 450m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>.

### *3.2 KB971*

**Bilaga 3:2a** KB971: Verkliga tunneldjup och tunneldimensioner.

**Bilaga 3:2b** KB971: Djup: 20m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>.

**Bilaga 3:2c** KB971: Djup: 450m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>.

### *3.3 NV01*

**Bilaga 3:3a** NV01: Verkliga tunneldjup och tunneldimensioner.

**Bilaga 3:3b** NV01: Djup: 20m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>.

**Bilaga 3:3c** NV01: Djup: 450m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>.

### Bilaga 3:1a KA3376B01: Verkliga tunneldjup och tunneldimensioner.

#### Transmissivitet och skattning av inläckage till tunnel

Borrhål KA3376B01 3 - 78 m

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	H [m]	340.00	Tunnelarea [m <sup>2</sup> ]		$r_t$ [m]	
$g$ [m <sup>2</sup> /s]	9.81	L [m]	80.00		25		2.82
$\mu$ [Pas]	1.30E-03	$r_i$ [m]	2.80				
		t [m]	5.00				
		$\xi$	5.00				

Q [L/min]	Distribution, T	$T_{tot}$ 3.77E-06	$T_{tot}/T_{inj}$ 1.00		q [m <sup>2</sup> /s] 9.59E-06	Q [L/min*100m] 57.53
		Residual, $T_{inj}$	$T_{tot}/T_{inj}$	b [μm]	$q_{inj}$ [m <sup>2</sup> /s]	$Q_{inj}$ [L/min*100m]
27	1.31195E-06	2.46E-06	1.53	128	9.11E-06	54.68
12	5.8309E-07	1.87E-06	2.01	98	8.73E-06	52.36
11	5.345E-07	1.34E-06	2.82	95	8.14E-06	48.87
9	4.37318E-07	9.01E-07	4.18	89	7.32E-06	43.89
4.67	2.26919E-07	6.74E-07	5.59	71	6.62E-06	39.73
2.5	1.21477E-07	5.52E-07	6.82	58	6.11E-06	36.69
2.23	1.08358E-07	4.44E-07	8.48	56	5.54E-06	33.24
2.1	1.02041E-07	3.42E-07	11.01	55	4.85E-06	29.09
1.75	8.5034E-08	2.57E-07	14.66	51	4.11E-06	24.65
1.17	5.68513E-08	2.00E-07	18.82	45	3.50E-06	21.00
1.13	5.49077E-08	1.45E-07	25.93	44	2.79E-06	16.75
0.9	4.37318E-08	1.02E-07	37.10	41	2.12E-06	12.71
0.5	2.42954E-08	7.73E-08	48.77	34	1.69E-06	10.16
0.48	2.33236E-08	5.39E-08	69.86	33	1.24E-06	7.45
0.23	1.11759E-08	4.28E-08	88.11	26	1.01E-06	6.05
0.2	9.71817E-09	3.30E-08	114.03	25	7.97E-07	4.78
0.16	7.77454E-09	2.53E-08	149.12	23	6.20E-07	3.72
0.15	7.28863E-09	1.80E-08	209.57	23	4.49E-07	2.69
0.12	5.8309E-09	1.21E-08	310.16	21	3.07E-07	1.84
0.11	5.345E-09	6.80E-09	553.86	20	1.74E-07	1.05
0.05	2.42954E-09	4.37E-09	861.56	16	1.13E-07	0.68
0.03	1.45773E-09	2.92E-09	1292.33	13	7.54E-08	0.45
0.02	9.71817E-10	1.94E-09	1938.50	12	5.04E-08	0.30
0.02	9.71817E-10	9.72E-10	3877.00	12	2.53E-08	0.15
0.02	9.71817E-10	1.34E-21	#####	12	3.48E-20	0.00
77.54	3.77E-06					

Analys 1a: Verkligt tunneldjup (vattentryck) och verklig tunnelarea: 25m<sup>2</sup>

### Bilaga 3:1b KA3376B01: Djup: 20m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>.

#### Transmissivitet och skattning av inläckage till tunnel

Borrhål KA3376B01 3 - 78 m

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	H [m]	20.00	Tunnelarea [m <sup>2</sup> ]	50	$r_i$ [m]	3.99
$g$ [m <sup>2</sup> /s]	9.81	L [m]	80.00				
$\mu$ [Pas]	1.30E-03	$r_i$ [m]	4.00				
		t [m]	5.00				
		$\xi$	5.00				

	$T_{tot}$ 3.77E-06	$T_{tot}/T_{inj}$ 1.00		$q$ [m <sup>2</sup> /s] 8.10E-07	$Q$ [L/min*100m] 4.86
Distribution, T	Residual, $T_{inj}$	$T_{tot}/T_{inj}$	b [μm]	$q_{inj}$ [m <sup>2</sup> /s]	$Q_{inj}$ [L/min*100m]
1.31195E-06	2.46E-06	1.53	128	7.65E-07	4.59
5.8309E-07	1.87E-06	2.01	98	7.29E-07	4.37
5.345E-07	1.34E-06	2.82	95	6.74E-07	4.05
4.37318E-07	9.01E-07	4.18	89	5.99E-07	3.59
2.26919E-07	6.74E-07	5.59	71	5.37E-07	3.22
1.21477E-07	5.52E-07	6.82	58	4.92E-07	2.95
1.08358E-07	4.44E-07	8.48	56	4.43E-07	2.66
1.02041E-07	3.42E-07	11.01	55	3.84E-07	2.30
8.5034E-08	2.57E-07	14.66	51	3.22E-07	1.93
5.68513E-08	2.00E-07	18.82	45	2.72E-07	1.63
5.49077E-08	1.45E-07	25.93	44	2.15E-07	1.29
4.37318E-08	1.02E-07	37.10	41	1.62E-07	0.97
2.42954E-08	7.73E-08	48.77	34	1.29E-07	0.77
2.33236E-08	5.39E-08	69.86	33	9.37E-08	0.56
1.11759E-08	4.28E-08	88.11	26	7.59E-08	0.46
9.71817E-09	3.30E-08	114.03	25	5.98E-08	0.36
7.77454E-09	2.53E-08	149.12	23	4.64E-08	0.28
7.28863E-09	1.80E-08	209.57	23	3.35E-08	0.20
5.8309E-09	1.21E-08	310.16	21	2.29E-08	0.14
5.345E-09	6.80E-09	553.86	20	1.30E-08	0.08
2.42954E-09	4.37E-09	861.56	16	8.39E-09	0.05
1.45773E-09	2.92E-09	1292.33	13	5.61E-09	0.03
9.71817E-10	1.94E-09	1938.50	12	3.75E-09	0.02
9.71817E-10	9.72E-10	3877.00	12	1.88E-09	0.01
9.71817E-10	1.34E-21	#####	12	2.59E-21	0.00
3.77E-06					

Analys 1b: Tunneldjup (vattentryck): 20m och tunnelarea: 50m<sup>2</sup>



### Bilaga 3:1c KA3376B01: Djup: 450m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>.

#### Transmissivitet och skattning av inläckage till tunnel

Borrhål KA3376B01 3 - 78 m

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	H [m]	450.00	Tunnelarea [m <sup>2</sup> ]	$r_i$ [m]
$g$ [m <sup>2</sup> /s]	9.81	L [m]	80.00	50	3.99
$\mu$ [Pas]	1.30E-03	$r_i$ [m]	4.00		
		t [m]	5.00		
		$\xi$	5.00		

	$T_{tot}$ 3.77E-06	$T_{tot}/T_{inj}$ 1.00		q [m <sup>2</sup> /s] 1.28E-05	Q [L/min*100m] 76.70
Distribution, T	Residual, $T_{inj}$	$T_{tot}/T_{inj}$	b [μm]	$q_{inj}$ [m <sup>2</sup> /s]	$Q_{inj}$ [L/min*100m]
1.31195E-06	2.46E-06	1.53	128	1.23E-05	73.64
5.8309E-07	1.87E-06	2.01	98	1.19E-05	71.10
5.345E-07	1.34E-06	2.82	95	1.12E-05	67.20
4.37318E-07	9.01E-07	4.18	89	1.02E-05	61.47
2.26919E-07	6.74E-07	5.59	71	9.42E-06	56.51
1.21477E-07	5.52E-07	6.82	58	8.80E-06	52.79
1.08358E-07	4.44E-07	8.48	56	8.08E-06	48.47
1.02041E-07	3.42E-07	11.01	55	7.18E-06	43.10
8.5034E-08	2.57E-07	14.66	51	6.20E-06	37.18
5.68513E-08	2.00E-07	18.82	45	5.35E-06	32.13
5.49077E-08	1.45E-07	25.93	44	4.35E-06	26.08
4.37318E-08	1.02E-07	37.10	41	3.35E-06	20.13
2.42954E-08	7.73E-08	48.77	34	2.71E-06	16.25
2.33236E-08	5.39E-08	69.86	33	2.01E-06	12.06
1.11759E-08	4.28E-08	88.11	26	1.64E-06	9.86
9.71817E-09	3.30E-08	114.03	25	1.30E-06	7.83
7.77454E-09	2.53E-08	149.12	23	1.02E-06	6.12
7.28863E-09	1.80E-08	209.57	23	7.42E-07	4.45
5.8309E-09	1.21E-08	310.16	21	5.10E-07	3.06
5.345E-09	6.80E-09	553.86	20	2.90E-07	1.74
2.42954E-09	4.37E-09	861.56	16	1.88E-07	1.13
1.45773E-09	2.92E-09	1292.33	13	1.26E-07	0.76
9.71817E-10	1.94E-09	1938.50	12	8.42E-08	0.51
9.71817E-10	9.72E-10	3877.00	12	4.22E-08	0.25
9.71817E-10	1.34E-21	#####	12	5.82E-20	0.00
3.77E-06					

Analys 1c: Tunneldjup (vattentryck): 450m och tunnelarea: 50m<sup>2</sup>

### Bilaga 3:2a KB971: Verkliga tunneldjup och tunneldimensioner. Sprickor storleksordning 1-61

T-distribution

Borrhål

KB971

4 - 169 m

N

873

k

0.47

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

1000

$g$  [m<sup>2</sup>/s]

9.81

$\mu$  [Pas]

1.30E-03

H [m]

20.00

L [m]

165.00

$r_i$  [m]

5.05

t [m]

5.00

$\xi$

5.00

Tunnelarea [m<sup>2</sup>]

80

$r_i$  [m]

5.05

Paretosum 1.54

873 = N

Paretodistribution

r	$1/r^{1/k}$	$T_r$	$p(T < T_r)$	$T_{uppmatt}$	Distribution	Residual, $T_{inj}$	$T_{tot}/T_{inj}$	$T_{tot}/T_{inj}$	b [µm]	$q_{inj}$ [m <sup>2</sup> /s]	Q [L/min*100m]
1	1	8.27E-05	0.998855835		8.27E-05	4.46E-05	2.85	1.00	509	1.16E-05	69.73
2	0.22883	1.89E-05	0.99771167		1.89E-05	2.57E-05	4.96		311	9.90E-06	59.42
3	0.09657	7.99E-06	0.996567506		7.99E-06	1.77E-05	7.20		233	8.56E-06	51.34
4	0.05236	4.33E-06	0.995423341		4.33E-06	1.34E-05	9.54		190	7.49E-06	44.96
5	0.03257	2.70E-06	0.994279176		2.70E-06	1.07E-05	11.95		162	6.64E-06	39.85
6	0.0221	1.83E-06	0.993135011		1.83E-06	8.83E-06	14.42		143	5.95E-06	35.69
7	0.01592	1.32E-06	0.991990847		1.32E-06	7.52E-06	16.95		128	5.38E-06	32.25
8	0.01198	9.91E-07	0.990846682		9.91E-07	6.52E-06	19.52		116	4.89E-06	29.37
9	0.00933	7.72E-07	0.989702517		7.72E-07	5.75E-06	22.14		107	4.49E-06	26.92
10	0.00745	6.17E-07	0.988558352		6.17E-07	5.14E-06	24.80		99	4.14E-06	24.82
11	0.00609	5.04E-07	0.987414188		5.04E-07	4.63E-06	27.49		93	3.83E-06	23.00
12	0.00506	4.18E-07	0.986270023		4.18E-07	4.21E-06	30.22		87	3.57E-06	21.41
13	0.00426	3.53E-07	0.985125858		3.53E-07	3.86E-06	32.98		82	3.34E-06	20.01
14	0.00364	3.01E-07	0.983981693		3.01E-07	3.56E-06	35.78		78	3.13E-06	18.77
15	0.00315	2.60E-07	0.982837529		2.60E-07	3.30E-06	38.60		75	2.94E-06	17.66
16	0.00274	2.27E-07	0.981693364		2.27E-07	3.07E-06	41.45		71	2.78E-06	16.67
17	0.00241	1.99E-07	0.980549199		1.99E-07	2.87E-06	44.33		68	2.63E-06	15.78
18	0.00213	1.77E-07	0.979405034		1.77E-07	2.70E-06	47.23		65	2.49E-06	14.97
19	0.0019	1.57E-07	0.97826087		1.57E-07	2.54E-06	50.15		63	2.37E-06	14.23
20	0.00171	1.41E-07	0.977116705		1.41E-07	2.40E-06	53.11		61	2.26E-06	13.56
21	0.00154	1.27E-07	0.97597254		1.27E-07	2.27E-06	56.08		59	2.16E-06	12.94
22	0.00139	1.15E-07	0.974828375		1.15E-07	2.16E-06	59.08		57	2.06E-06	12.37
23	0.00127	1.05E-07	0.973684211		1.05E-07	2.05E-06	62.10		55	1.97E-06	11.85
24	0.00116	9.57E-08	0.972540046		9.57E-08	1.96E-06	65.14		53	1.89E-06	11.36
25	0.00106	8.78E-08	0.971395881		8.78E-08	1.87E-06	68.20		52	1.82E-06	10.92
26	0.00098	8.08E-08	0.970251716		8.08E-08	1.79E-06	71.28		50	1.75E-06	10.50
27	0.0009	7.45E-08	0.969107551		7.45E-08	1.71E-06	74.39		49	1.68E-06	10.11
28	0.00083	6.90E-08	0.967963387		6.90E-08	1.64E-06	77.51		48	1.62E-06	9.74
29	0.00077	6.40E-08	0.966819222		6.40E-08	1.58E-06	80.65		47	1.57E-06	9.40
30	0.00072	5.96E-08	0.965675057		5.96E-08	1.52E-06	83.81		46	1.51E-06	9.08
31	0.00067	5.55E-08	0.964530892		5.55E-08	1.46E-06	86.99		45	1.46E-06	8.78
32	0.00063	5.19E-08	0.963386728		5.19E-08	1.41E-06	90.19		44	1.42E-06	8.50
33	0.00059	4.86E-08	0.962242563		4.86E-08	1.36E-06	93.40		43	1.37E-06	8.24
34	0.00055	4.56E-08	0.961098398		4.56E-08	1.32E-06	96.64		42	1.33E-06	7.98
35	0.00052	4.29E-08	0.959954233		4.29E-08	1.27E-06	99.89		41	1.29E-06	7.75
36	0.00049	4.04E-08	0.958810069		4.04E-08	1.23E-06	103.16		40	1.25E-06	7.52
37	0.00046	3.81E-08	0.957665904		3.81E-08	1.20E-06	106.45		39	1.22E-06	7.31
38	0.00044	3.60E-08	0.956521739		3.60E-08	1.16E-06	109.75		39	1.18E-06	7.10
39	0.00041	3.41E-08	0.955377574		3.41E-08	1.13E-06	113.07		38	1.15E-06	6.91
40	0.00039	3.23E-08	0.95423341		3.23E-08	1.09E-06	116.41		37	1.12E-06	6.73
41	0.00037	3.06E-08	0.953089245		3.06E-08	1.06E-06	119.76		37	1.09E-06	6.55
42	0.00035	2.91E-08	0.95194508		2.91E-08	1.03E-06	123.13		36	1.06E-06	6.39
43	0.00033	2.77E-08	0.950800915		2.77E-08	1.01E-06	126.52		35	1.04E-06	6.23
44	0.00032	2.64E-08	0.949656751		2.64E-08	9.80E-07	129.92		35	1.01E-06	6.08
45	0.0003	2.51E-08	0.948512586		2.51E-08	9.55E-07	133.34		34	9.88E-07	5.93
46	0.00029	2.40E-08	0.947368421		2.40E-08	9.31E-07	136.77		34	9.65E-07	5.79
47	0.00028	2.29E-08	0.946224256		2.29E-08	9.08E-07	140.23		33	9.43E-07	5.66
48	0.00026	2.19E-08	0.945080092		2.19E-08	8.86E-07	143.69		33	9.21E-07	5.53
49	0.00025	2.10E-08	0.943935927		2.10E-08	8.65E-07	147.17		32	9.01E-07	5.41
50	0.00024	2.01E-08	0.942791762		2.01E-08	8.45E-07	150.67		32	8.81E-07	5.29
51	0.00023	1.93E-08	0.941647597		1.93E-08	8.26E-07	154.18		31	8.62E-07	5.17
52	0.00022	1.85E-08	0.940503432		1.85E-08	8.08E-07	157.71		31	8.44E-07	5.06
53	0.00021	1.77E-08	0.939359268		1.77E-08	7.90E-07	161.25		30	8.26E-07	4.96
54	0.00021	1.71E-08	0.938215103		1.71E-08	7.73E-07	164.81		30	8.10E-07	4.86
55	0.0002	1.64E-08	0.937070938		1.64E-08	7.56E-07	168.39		30	7.93E-07	4.76
56	0.00019	1.58E-08	0.935926773		1.58E-08	7.41E-07	171.98		29	7.78E-07	4.67
57	0.00018	1.52E-08	0.934782609		1.52E-08	7.25E-07	175.58		29	7.62E-07	4.57
58	0.00018	1.46E-08	0.933638444		1.46E-08	7.11E-07	179.20		29	7.48E-07	4.49
59	0.00017	1.41E-08	0.932494279		1.41E-08	6.97E-07	182.83		28	7.34E-07	4.40
60	0.00016	1.36E-08	0.931350114		1.36E-08	6.83E-07	186.48		28	7.20E-07	4.32
61	0.00016	1.32E-08	0.93020595		1.32E-08	6.70E-07	190.14		28	7.07E-07	4.24

## Sprickor storleksordning 129-200

129	3.2E-05	2.67E-09	0.852402746	2.67E-09	2.69E-07	473.19	16	2.92E-07	1.75
130	3.2E-05	2.63E-09	0.851258581	2.63E-09	2.67E-07	477.86	16	2.89E-07	1.74
131	3.1E-05	2.59E-09	0.850114416	2.59E-09	2.64E-07	482.54	16	2.87E-07	1.72
132	3.1E-05	2.55E-09	0.848970252	2.55E-09	2.61E-07	487.24	16	2.84E-07	1.70
133	3E-05	2.51E-09	0.847826087	2.51E-09	2.59E-07	491.96	16	2.81E-07	1.69
134	3E-05	2.47E-09	0.846681922	2.47E-09	2.56E-07	496.69	16	2.79E-07	1.67
135	2.9E-05	2.43E-09	0.845537757	2.43E-09	2.54E-07	501.44	16	2.76E-07	1.66
136	2.9E-05	2.39E-09	0.844393593	2.39E-09	2.52E-07	506.20	16	2.73E-07	1.64
137	2.8E-05	2.35E-09	0.843249428	2.35E-09	2.49E-07	510.98	16	2.71E-07	1.63
138	2.8E-05	2.32E-09	0.842105263	2.32E-09	2.47E-07	515.77	15	2.68E-07	1.61
139	2.8E-05	2.28E-09	0.840961098	2.28E-09	2.45E-07	520.58	15	2.66E-07	1.60
140	2.7E-05	2.25E-09	0.839816934	2.25E-09	2.42E-07	525.40	15	2.64E-07	1.58
141	2.7E-05	2.21E-09	0.838672769	2.21E-09	2.40E-07	530.25	15	2.61E-07	1.57
142	2.6E-05	2.18E-09	0.837528604	2.18E-09	2.38E-07	535.10	15	2.59E-07	1.55
143	2.6E-05	2.15E-09	0.836384439	2.15E-09	2.36E-07	539.97	15	2.57E-07	1.54
144	2.6E-05	2.12E-09	0.835240275	2.12E-09	2.34E-07	544.86	15	2.54E-07	1.53
145	2.5E-05	2.08E-09	0.83409611	2.08E-09	2.32E-07	549.76	15	2.52E-07	1.51
146	2.5E-05	2.05E-09	0.832951945	2.05E-09	2.30E-07	554.68	15	2.50E-07	1.50
147	2.4E-05	2.02E-09	0.83180778	2.02E-09	2.28E-07	559.62	15	2.48E-07	1.49
148	2.4E-05	2.00E-09	0.830663616	2.00E-09	2.26E-07	564.57	15	2.46E-07	1.47
149	2.4E-05	1.97E-09	0.829519451	1.97E-09	2.24E-07	569.54	15	2.43E-07	1.46
150	2.3E-05	1.94E-09	0.828375286	1.94E-09	2.22E-07	574.52	15	2.41E-07	1.45
151	2.3E-05	1.91E-09	0.827231121	1.91E-09	2.20E-07	579.52	14	2.39E-07	1.44
152	2.3E-05	1.89E-09	0.826086957	1.89E-09	2.18E-07	584.54	14	2.37E-07	1.42
153	2.2E-05	1.86E-09	0.824942792	1.86E-09	2.16E-07	589.57	14	2.35E-07	1.41
154	2.2E-05	1.83E-09	0.823798627	1.83E-09	2.14E-07	594.62	14	2.33E-07	1.40
155	2.2E-05	1.81E-09	0.822654462	1.81E-09	2.12E-07	599.69	14	2.31E-07	1.39
156	2.2E-05	1.78E-09	0.821510297	1.78E-09	2.11E-07	604.77	14	2.30E-07	1.38
157	2.1E-05	1.76E-09	0.820366133	1.76E-09	2.09E-07	609.86	14	2.28E-07	1.37
158	2.1E-05	1.74E-09	0.819221968	1.74E-09	2.07E-07	614.98	14	2.26E-07	1.35
159	2.1E-05	1.71E-09	0.818077803	1.71E-09	2.05E-07	620.11	14	2.24E-07	1.34
160	2E-05	1.69E-09	0.816933638	1.69E-09	2.04E-07	625.26	14	2.22E-07	1.33
161	2E-05	1.67E-09	0.815789474	1.67E-09	2.02E-07	630.42	14	2.20E-07	1.32
162	2E-05	1.65E-09	0.814645309	1.65E-09	2.00E-07	635.60	14	2.19E-07	1.31
163	2E-05	1.63E-09	0.813501144	1.63E-09	1.99E-07	640.80	14	2.17E-07	1.30
164	1.9E-05	1.60E-09	0.812356979	1.60E-09	1.97E-07	646.02	14	2.15E-07	1.29
165	1.9E-05	1.58E-09	0.811212815	1.58E-09	1.96E-07	651.25	14	2.13E-07	1.28
166	1.9E-05	1.56E-09	0.81006865	1.56E-09	1.94E-07	656.50	14	2.12E-07	1.27
167	1.9E-05	1.54E-09	0.808924485	1.54E-09	1.92E-07	661.76	13	2.10E-07	1.26
168	1.8E-05	1.52E-09	0.80778032	1.52E-09	1.91E-07	667.05	13	2.08E-07	1.25
169	1.8E-05	1.51E-09	0.806636156	1.51E-09	1.89E-07	672.35	13	2.07E-07	1.24
170	1.8E-05	1.49E-09	0.805491991	1.49E-09	1.88E-07	677.66	13	2.05E-07	1.23
171	1.8E-05	1.47E-09	0.804347826	1.47E-09	1.86E-07	683.00	13	2.04E-07	1.22
172	1.8E-05	1.45E-09	0.803203661	1.45E-09	1.85E-07	688.35	13	2.02E-07	1.21
173	1.7E-05	1.43E-09	0.802059497	1.43E-09	1.84E-07	693.72	13	2.00E-07	1.20
174	1.7E-05	1.41E-09	0.800915332	1.41E-09	1.82E-07	699.10	13	1.99E-07	1.19
175	1.7E-05	1.40E-09	0.799771167	1.40E-09	1.81E-07	704.51	13	1.97E-07	1.18
176	1.7E-05	1.38E-09	0.798627002	1.38E-09	1.79E-07	709.93	13	1.96E-07	1.18
177	1.6E-05	1.36E-09	0.797482838	1.36E-09	1.78E-07	715.37	13	1.94E-07	1.17
178	1.6E-05	1.35E-09	0.796338673	1.35E-09	1.77E-07	720.83	13	1.93E-07	1.16
179	1.6E-05	1.33E-09	0.795194508	1.33E-09	1.75E-07	726.30	13	1.92E-07	1.15
180	1.6E-05	1.32E-09	0.794050343	1.32E-09	1.74E-07	731.79	13	1.90E-07	1.14
181	1.6E-05	1.30E-09	0.792906178	1.30E-09	1.73E-07	737.30	13	1.89E-07	1.13
182	1.6E-05	1.29E-09	0.791762014	1.29E-09	1.71E-07	742.83	13	1.87E-07	1.12
183	1.5E-05	1.27E-09	0.790617849	1.27E-09	1.70E-07	748.38	13	1.86E-07	1.12
184	1.5E-05	1.26E-09	0.789473684	1.26E-09	1.69E-07	753.94	13	1.85E-07	1.11
185	1.5E-05	1.24E-09	0.788329519	1.24E-09	1.68E-07	759.52	13	1.83E-07	1.10
186	1.5E-05	1.23E-09	0.787185355	1.23E-09	1.66E-07	765.13	12	1.82E-07	1.09
187	1.5E-05	1.21E-09	0.78604119	1.21E-09	1.65E-07	770.74	12	1.81E-07	1.08
188	1.4E-05	1.20E-09	0.784897025	1.20E-09	1.64E-07	776.38	12	1.79E-07	1.08
189	1.4E-05	1.19E-09	0.78375286	1.19E-09	1.63E-07	782.04	12	1.78E-07	1.07
190	1.4E-05	1.17E-09	0.782608696	1.17E-09	1.62E-07	787.71	12	1.77E-07	1.06
191	1.4E-05	1.16E-09	0.781464531	1.16E-09	1.61E-07	793.40	12	1.76E-07	1.05
192	1.4E-05	1.15E-09	0.780320366	1.15E-09	1.59E-07	799.11	12	1.74E-07	1.05
193	1.4E-05	1.13E-09	0.779176201	1.13E-09	1.58E-07	804.84	12	1.73E-07	1.04
194	1.4E-05	1.12E-09	0.778032037	1.12E-09	1.57E-07	810.59	12	1.72E-07	1.03
195	1.3E-05	1.11E-09	0.776887872	1.11E-09	1.56E-07	816.36	12	1.71E-07	1.02
196	1.3E-05	1.10E-09	0.775743707	1.10E-09	1.55E-07	822.15	12	1.70E-07	1.02
197	1.3E-05	1.09E-09	0.774599542	1.09E-09	1.54E-07	827.95	12	1.68E-07	1.01
198	1.3E-05	1.07E-09	0.773455378	1.07E-09	1.53E-07	833.78	12	1.67E-07	1.00
199	1.3E-05	1.06E-09	0.772311213	1.06E-09	1.52E-07	839.62	12	1.66E-07	1.00
200	1.3E-05	1.05E-09	0.771167048	1.05E-09	1.51E-07	845.48	12	1.65E-07	0.99

**Bilaga 3:2b** KB971: Djup: 20m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>.  
*Sprickor storleksordning 1-61*

T-distribution

Borrhål

KB971

4 - 169 m

N

873

k

0.47

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

1000

$g$  [m<sup>2</sup>/s]

9.81

$\mu$  [Pas]

1.30E-03

H [m]

20.00

L [m]

165.00

$r_i$  [m]

4.00

t [m]

5.00

$\xi$

5.00

Tunnelarea [m<sup>2</sup>]

50

$r_i$  [m]

4.00

3.99

Paretosum 1.54

873 = N

Paretodistribution

r	$1/r^{1/k}$	$T_r$	$p(T < T_r)$	$T_{uppmatt}$	Distribution	Residual, $T_{inj}$	$T_{tot}/T_{inj}$	$T_{tot}/T_{inj}$	b [ $\mu$ m]	$q_{inj}$ [m <sup>2</sup> /s]	Q [L/min*100m]
1	1	8.27E-05	0.998855835		8.27E-05	4.46E-05	2.85	1.00	509	1.10E-05	66.08
2	0.22883	1.89E-05	0.99771167		1.89E-05	2.57E-05	4.96	1.00	311	9.23E-06	55.35
3	0.09657	7.99E-06	0.996567506		7.99E-06	1.77E-05	7.20	1.00	233	7.87E-06	47.20
4	0.05236	4.33E-06	0.995423341		4.33E-06	1.34E-05	9.54	1.00	190	6.82E-06	40.91
5	0.03257	2.70E-06	0.994279176		2.70E-06	1.07E-05	11.95	1.00	162	6.00E-06	35.97
6	0.0221	1.83E-06	0.993135011		1.83E-06	8.83E-06	14.42	1.00	143	5.33E-06	32.00
7	0.01592	1.32E-06	0.991990847		1.32E-06	7.52E-06	16.95	1.00	128	4.79E-06	28.76
8	0.01198	9.91E-07	0.990846682		9.91E-07	6.52E-06	19.52	1.00	116	4.35E-06	26.07
9	0.00933	7.72E-07	0.989702517		7.72E-07	5.75E-06	22.14	1.00	107	3.97E-06	23.81
10	0.00745	6.17E-07	0.988558352		6.17E-07	5.14E-06	24.80	1.00	99	3.65E-06	21.88
11	0.00609	5.04E-07	0.987414188		5.04E-07	4.63E-06	27.49	1.00	93	3.37E-06	20.22
12	0.00506	4.18E-07	0.986270023		4.18E-07	4.21E-06	30.22	1.00	87	3.13E-06	18.77
13	0.00426	3.53E-07	0.985125858		3.53E-07	3.86E-06	32.98	1.00	82	2.92E-06	17.51
14	0.00364	3.01E-07	0.983981693		3.01E-07	3.56E-06	35.78	1.00	78	2.73E-06	16.39
15	0.00315	2.60E-07	0.982837529		2.60E-07	3.30E-06	38.60	1.00	75	2.57E-06	15.40
16	0.00274	2.27E-07	0.981693364		2.27E-07	3.07E-06	41.45	1.00	71	2.42E-06	14.51
17	0.00241	1.99E-07	0.980549199		1.99E-07	2.87E-06	44.33	1.00	68	2.29E-06	13.71
18	0.00213	1.77E-07	0.979405034		1.77E-07	2.70E-06	47.23	1.00	65	2.17E-06	12.99
19	0.0019	1.57E-07	0.97826087		1.57E-07	2.54E-06	50.15	1.00	63	2.06E-06	12.34
20	0.00171	1.41E-07	0.977116705		1.41E-07	2.40E-06	53.11	1.00	61	1.96E-06	11.74
21	0.00154	1.27E-07	0.97597254		1.27E-07	2.27E-06	56.08	1.00	59	1.87E-06	11.20
22	0.00139	1.15E-07	0.974828375		1.15E-07	2.16E-06	59.08	1.00	57	1.78E-06	10.70
23	0.00127	1.05E-07	0.973684211		1.05E-07	2.05E-06	62.10	1.00	55	1.71E-06	10.24
24	0.00116	9.57E-08	0.972540046		9.57E-08	1.96E-06	65.14	1.00	53	1.64E-06	9.81
25	0.00106	8.78E-08	0.971395881		8.78E-08	1.87E-06	68.20	1.00	52	1.57E-06	9.42
26	0.00098	8.08E-08	0.970251716		8.08E-08	1.79E-06	71.28	1.00	50	1.51E-06	9.05
27	0.0009	7.45E-08	0.969107551		7.45E-08	1.71E-06	74.39	1.00	49	1.45E-06	8.71
28	0.00083	6.90E-08	0.967963387		6.90E-08	1.64E-06	77.51	1.00	48	1.40E-06	8.39
29	0.00077	6.40E-08	0.966819222		6.40E-08	1.58E-06	80.65	1.00	47	1.35E-06	8.09
30	0.00072	5.96E-08	0.965675057		5.96E-08	1.52E-06	83.81	1.00	46	1.30E-06	7.82
31	0.00067	5.55E-08	0.964530892		5.55E-08	1.46E-06	86.99	1.00	45	1.26E-06	7.55
32	0.00063	5.19E-08	0.963386728		5.19E-08	1.41E-06	90.19	1.00	44	1.22E-06	7.31
33	0.00059	4.86E-08	0.962242563		4.86E-08	1.36E-06	93.40	1.00	43	1.18E-06	7.08
34	0.00055	4.56E-08	0.961098398		4.56E-08	1.32E-06	96.64	1.00	42	1.14E-06	6.86
35	0.00052	4.29E-08	0.959954233		4.29E-08	1.27E-06	99.89	1.00	41	1.11E-06	6.65
36	0.00049	4.04E-08	0.958810069		4.04E-08	1.23E-06	103.16	1.00	40	1.08E-06	6.46
37	0.00046	3.81E-08	0.957665904		3.81E-08	1.20E-06	106.45	1.00	39	1.05E-06	6.27
38	0.00044	3.60E-08	0.956521739		3.60E-08	1.16E-06	109.75	1.00	39	1.02E-06	6.09
39	0.00041	3.41E-08	0.955377574		3.41E-08	1.13E-06	113.07	1.00	38	9.88E-07	5.93
40	0.00039	3.23E-08	0.95423341		3.23E-08	1.09E-06	116.41	1.00	37	9.61E-07	5.77
41	0.00037	3.06E-08	0.953089245		3.06E-08	1.06E-06	119.76	1.00	37	9.36E-07	5.62
42	0.00035	2.91E-08	0.95194508		2.91E-08	1.03E-06	123.13	1.00	36	9.12E-07	5.47
43	0.00033	2.77E-08	0.950800915		2.77E-08	1.01E-06	126.52	1.00	35	8.89E-07	5.33
44	0.00032	2.64E-08	0.949656751		2.64E-08	9.80E-07	129.92	1.00	35	8.67E-07	5.20
45	0.0003	2.51E-08	0.948512586		2.51E-08	9.55E-07	133.34	1.00	34	8.46E-07	5.08
46	0.00029	2.40E-08	0.947368421		2.40E-08	9.31E-07	136.77	1.00	34	8.26E-07	4.96
47	0.00028	2.29E-08	0.946224256		2.29E-08	9.08E-07	140.23	1.00	33	8.07E-07	4.84
48	0.00026	2.19E-08	0.945080092		2.19E-08	8.86E-07	143.69	1.00	33	7.88E-07	4.73
49	0.00025	2.10E-08	0.943935927		2.10E-08	8.65E-07	147.17	1.00	32	7.71E-07	4.62
50	0.00024	2.01E-08	0.942791762		2.01E-08	8.45E-07	150.67	1.00	32	7.54E-07	4.52
51	0.00023	1.93E-08	0.941647597		1.93E-08	8.26E-07	154.18	1.00	31	7.37E-07	4.42
52	0.00022	1.85E-08	0.940503432		1.85E-08	8.08E-07	157.71	1.00	31	7.22E-07	4.33
53	0.00021	1.77E-08	0.939359268		1.77E-08	7.90E-07	161.25	1.00	30	7.07E-07	4.24
54	0.00021	1.71E-08	0.938215103		1.71E-08	7.73E-07	164.81	1.00	30	6.92E-07	4.15
55	0.0002	1.64E-08	0.937070938		1.64E-08	7.56E-07	168.39	1.00	30	6.78E-07	4.07
56	0.00019	1.58E-08	0.935926773		1.58E-08	7.41E-07	171.98	1.00	29	6.65E-07	3.99
57	0.00018	1.52E-08	0.934782609		1.52E-08	7.25E-07	175.58	1.00	29	6.52E-07	3.91
58	0.00018	1.46E-08	0.933638444		1.46E-08	7.11E-07	179.20	1.00	29	6.39E-07	3.83
59	0.00017	1.41E-08	0.932494279		1.41E-08	6.97E-07	182.83	1.00	28	6.27E-07	3.76
60	0.00016	1.36E-08	0.931350114		1.36E-08	6.83E-07	186.48	1.00	28	6.15E-07	3.69
61	0.00016	1.32E-08	0.93020595		1.32E-08	6.70E-07	190.14	1.00	28	6.04E-07	3.62

## Sprickor storleksordning 106-177

106	4.9E-05	4.06E-09	0.878718535	4.06E-09	3.44E-07	369.93	19	3.16E-07	1.90
107	4.8E-05	3.98E-09	0.877574371	3.98E-09	3.40E-07	374.26	18	3.13E-07	1.88
108	4.7E-05	3.90E-09	0.876430206	3.90E-09	3.36E-07	378.60	18	3.09E-07	1.86
109	4.6E-05	3.83E-09	0.875286041	3.83E-09	3.33E-07	382.96	18	3.06E-07	1.84
110	4.5E-05	3.75E-09	0.874141876	3.75E-09	3.29E-07	387.33	18	3.03E-07	1.82
111	4.4E-05	3.68E-09	0.872997712	3.68E-09	3.25E-07	391.71	18	2.99E-07	1.80
112	4.4E-05	3.61E-09	0.871853547	3.61E-09	3.22E-07	396.11	18	2.96E-07	1.78
113	4.3E-05	3.54E-09	0.870709382	3.54E-09	3.18E-07	400.53	18	2.93E-07	1.76
114	4.2E-05	3.48E-09	0.869565217	3.48E-09	3.14E-07	404.96	18	2.90E-07	1.74
115	4.1E-05	3.41E-09	0.868421053	3.41E-09	3.11E-07	409.40	18	2.87E-07	1.72
116	4.1E-05	3.35E-09	0.867276888	3.35E-09	3.08E-07	413.86	17	2.84E-07	1.70
117	4E-05	3.29E-09	0.866132723	3.29E-09	3.04E-07	418.33	17	2.81E-07	1.68
118	3.9E-05	3.23E-09	0.864988558	3.23E-09	3.01E-07	422.82	17	2.78E-07	1.67
119	3.8E-05	3.17E-09	0.863844394	3.17E-09	2.98E-07	427.33	17	2.75E-07	1.65
120	3.8E-05	3.12E-09	0.862700229	3.12E-09	2.95E-07	431.84	17	2.72E-07	1.63
121	3.7E-05	3.06E-09	0.861556064	3.06E-09	2.92E-07	436.38	17	2.69E-07	1.61
122	3.6E-05	3.01E-09	0.860411899	3.01E-09	2.89E-07	440.93	17	2.66E-07	1.60
123	3.6E-05	2.96E-09	0.859267735	2.96E-09	2.86E-07	445.49	17	2.64E-07	1.58
124	3.5E-05	2.91E-09	0.85812357	2.91E-09	2.83E-07	450.07	17	2.61E-07	1.57
125	3.5E-05	2.86E-09	0.856979405	2.86E-09	2.80E-07	454.66	17	2.59E-07	1.55
126	3.4E-05	2.81E-09	0.85583524	2.81E-09	2.77E-07	459.27	16	2.56E-07	1.54
127	3.3E-05	2.76E-09	0.854691076	2.76E-09	2.75E-07	463.90	16	2.53E-07	1.52
128	3.3E-05	2.72E-09	0.853546911	2.72E-09	2.72E-07	468.53	16	2.51E-07	1.51
129	3.2E-05	2.67E-09	0.852402746	2.67E-09	2.69E-07	473.19	16	2.49E-07	1.49
130	3.2E-05	2.63E-09	0.851258581	2.63E-09	2.67E-07	477.86	16	2.46E-07	1.48
131	3.1E-05	2.59E-09	0.850114416	2.59E-09	2.64E-07	482.54	16	2.44E-07	1.46
132	3.1E-05	2.55E-09	0.848970252	2.55E-09	2.61E-07	487.24	16	2.42E-07	1.45
133	3E-05	2.51E-09	0.847826087	2.51E-09	2.59E-07	491.96	16	2.39E-07	1.44
134	3E-05	2.47E-09	0.846681922	2.47E-09	2.56E-07	496.69	16	2.37E-07	1.42
135	2.9E-05	2.43E-09	0.845537757	2.43E-09	2.54E-07	501.44	16	2.35E-07	1.41
136	2.9E-05	2.39E-09	0.844393593	2.39E-09	2.52E-07	506.20	16	2.33E-07	1.40
137	2.8E-05	2.35E-09	0.843249428	2.35E-09	2.49E-07	510.98	16	2.30E-07	1.38
138	2.8E-05	2.32E-09	0.842105263	2.32E-09	2.47E-07	515.77	15	2.28E-07	1.37
139	2.8E-05	2.28E-09	0.840961098	2.28E-09	2.45E-07	520.58	15	2.26E-07	1.36
140	2.7E-05	2.25E-09	0.839816934	2.25E-09	2.42E-07	525.40	15	2.24E-07	1.35
141	2.7E-05	2.21E-09	0.838672769	2.21E-09	2.40E-07	530.25	15	2.22E-07	1.33
142	2.6E-05	2.18E-09	0.837528604	2.18E-09	2.38E-07	535.10	15	2.20E-07	1.32
143	2.6E-05	2.15E-09	0.836384439	2.15E-09	2.36E-07	539.97	15	2.18E-07	1.31
144	2.6E-05	2.12E-09	0.835240275	2.12E-09	2.34E-07	544.86	15	2.16E-07	1.30
145	2.5E-05	2.08E-09	0.83409611	2.08E-09	2.32E-07	549.76	15	2.14E-07	1.29
146	2.5E-05	2.05E-09	0.832951945	2.05E-09	2.30E-07	554.68	15	2.13E-07	1.28
147	2.4E-05	2.02E-09	0.83180778	2.02E-09	2.28E-07	559.62	15	2.11E-07	1.26
148	2.4E-05	2.00E-09	0.830663616	2.00E-09	2.26E-07	564.57	15	2.09E-07	1.25
149	2.4E-05	1.97E-09	0.829519451	1.97E-09	2.24E-07	569.54	15	2.07E-07	1.24
150	2.3E-05	1.94E-09	0.828375286	1.94E-09	2.22E-07	574.52	15	2.05E-07	1.23
151	2.3E-05	1.91E-09	0.827231121	1.91E-09	2.20E-07	579.52	14	2.04E-07	1.22
152	2.3E-05	1.89E-09	0.826086957	1.89E-09	2.18E-07	584.54	14	2.02E-07	1.21
153	2.2E-05	1.86E-09	0.824942792	1.86E-09	2.16E-07	589.57	14	2.00E-07	1.20
154	2.2E-05	1.83E-09	0.823798627	1.83E-09	2.14E-07	594.62	14	1.98E-07	1.19
155	2.2E-05	1.81E-09	0.822654462	1.81E-09	2.12E-07	599.69	14	1.97E-07	1.18
156	2.2E-05	1.78E-09	0.821510297	1.78E-09	2.11E-07	604.77	14	1.95E-07	1.17
157	2.1E-05	1.76E-09	0.820366133	1.76E-09	2.09E-07	609.86	14	1.94E-07	1.16
158	2.1E-05	1.74E-09	0.819221968	1.74E-09	2.07E-07	614.98	14	1.92E-07	1.15
159	2.1E-05	1.71E-09	0.818077803	1.71E-09	2.05E-07	620.11	14	1.90E-07	1.14
160	2E-05	1.69E-09	0.816933638	1.69E-09	2.04E-07	625.26	14	1.89E-07	1.13
161	2E-05	1.67E-09	0.815789474	1.67E-09	2.02E-07	630.42	14	1.87E-07	1.12
162	2E-05	1.65E-09	0.814645309	1.65E-09	2.00E-07	635.60	14	1.86E-07	1.12
163	2E-05	1.63E-09	0.813501144	1.63E-09	1.99E-07	640.80	14	1.84E-07	1.11
164	1.9E-05	1.60E-09	0.812356979	1.60E-09	1.97E-07	646.02	14	1.83E-07	1.10
165	1.9E-05	1.58E-09	0.811212815	1.58E-09	1.96E-07	651.25	14	1.81E-07	1.09
166	1.9E-05	1.56E-09	0.81006865	1.56E-09	1.94E-07	656.50	14	1.80E-07	1.08
167	1.9E-05	1.54E-09	0.808924485	1.54E-09	1.92E-07	661.76	13	1.79E-07	1.07
168	1.8E-05	1.52E-09	0.80778032	1.52E-09	1.91E-07	667.05	13	1.77E-07	1.06
169	1.8E-05	1.51E-09	0.806636156	1.51E-09	1.89E-07	672.35	13	1.76E-07	1.05
170	1.8E-05	1.49E-09	0.805491991	1.49E-09	1.88E-07	677.66	13	1.74E-07	1.05
171	1.8E-05	1.47E-09	0.804347826	1.47E-09	1.86E-07	683.00	13	1.73E-07	1.04
172	1.8E-05	1.45E-09	0.803203661	1.45E-09	1.85E-07	688.35	13	1.72E-07	1.03
173	1.7E-05	1.43E-09	0.802059497	1.43E-09	1.84E-07	693.72	13	1.70E-07	1.02
174	1.7E-05	1.41E-09	0.800915332	1.41E-09	1.82E-07	699.10	13	1.69E-07	1.01
175	1.7E-05	1.40E-09	0.799771167	1.40E-09	1.81E-07	704.51	13	1.68E-07	1.01
176	1.7E-05	1.38E-09	0.798627002	1.38E-09	1.79E-07	709.93	13	1.67E-07	1.00
177	1.6E-05	1.36E-09	0.797482838	1.36E-09	1.78E-07	715.37	13	1.65E-07	0.99

**Bilaga 3:2c KB971: Djup: 450m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>.**  
*Sprickor storleksordning 1-61*

T-distribution

Borrhål

KB971

4 - 169 m

N

873

k

0.47

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

1000

$g$  [m<sup>2</sup>/s]

9.81

$\mu$  [Pas]

1.30E-03

H [m]

450.00

L [m]

165.00

$r_i$  [m]

4.00

t [m]

5.00

$\xi$

5.00

Tunnelarea [m<sup>2</sup>]

50

$r_i$  [m]

4.00

3.99

Paretosum 1.54

873 = N

Paretodistribution

r	$1/r^{1/k}$	$T_r$	$p(T < T_r)$	$T_{uppmatt}$	Distribution	Residual, $T_{inj}$	$T_{tot}/T_{inj}$	$T_{tot}/T_{inj}$	b [ $\mu$ m]	$q_{inj}$ [m <sup>2</sup> /s]	Q [L/min*100m]
1	1	8.27E-05	0.998855835		8.27E-05	4.46E-05	2.85	1.00	509	2.10E-04	1257.09
2	0.22883	1.89E-05	0.99771167		1.89E-05	2.57E-05	4.96		311	1.60E-04	960.89
3	0.09657	7.99E-06	0.996567506		7.99E-06	1.77E-05	7.20		233	1.41E-04	847.85
4	0.05236	4.33E-06	0.995423341		4.33E-06	1.34E-05	9.54		190	1.26E-04	755.24
5	0.03257	2.70E-06	0.994279176		2.70E-06	1.07E-05	11.95		162	1.13E-04	678.72
6	0.0221	1.83E-06	0.993135011		1.83E-06	8.83E-06	14.42		143	1.02E-04	614.81
7	0.01592	1.32E-06	0.991990847		1.32E-06	7.52E-06	16.95		128	9.35E-05	560.85
8	0.01198	9.91E-07	0.990846682		9.91E-07	6.52E-06	19.52		116	8.58E-05	514.81
9	0.00933	7.72E-07	0.989702517		7.72E-07	5.75E-06	22.14		107	7.92E-05	475.14
10	0.00745	6.17E-07	0.988558352		6.17E-07	5.14E-06	24.80		99	7.34E-05	440.67
11	0.00609	5.04E-07	0.987414188		5.04E-07	4.63E-06	27.49		93	6.84E-05	410.48
12	0.00506	4.18E-07	0.986270023		4.18E-07	4.21E-06	30.22		87	6.40E-05	383.84
13	0.00426	3.53E-07	0.985125858		3.53E-07	3.86E-06	32.98		82	6.00E-05	360.19
14	0.00364	3.01E-07	0.983981693		3.01E-07	3.56E-06	35.78		78	5.65E-05	339.07
15	0.00315	2.60E-07	0.982837529		2.60E-07	3.30E-06	38.60		75	5.33E-05	320.10
16	0.00274	2.27E-07	0.981693364		2.27E-07	3.07E-06	41.45		71	5.05E-05	302.98
17	0.00241	1.99E-07	0.980549199		1.99E-07	2.87E-06	44.33		68	4.79E-05	287.46
18	0.00213	1.77E-07	0.979405034		1.77E-07	2.70E-06	47.23		65	4.56E-05	273.34
19	0.0019	1.57E-07	0.97826087		1.57E-07	2.54E-06	50.15		63	4.34E-05	260.43
20	0.00171	1.41E-07	0.977116705		1.41E-07	2.40E-06	53.11		61	4.14E-05	248.60
21	0.00154	1.27E-07	0.97597254		1.27E-07	2.27E-06	56.08		59	3.96E-05	237.71
22	0.00139	1.15E-07	0.974828375		1.15E-07	2.16E-06	59.08		57	3.79E-05	227.67
23	0.00127	1.05E-07	0.973684211		1.05E-07	2.05E-06	62.10		55	3.64E-05	218.37
24	0.00116	9.57E-08	0.972540046		9.57E-08	1.96E-06	65.14		53	3.50E-05	209.75
25	0.00106	8.78E-08	0.971395881		8.78E-08	1.87E-06	68.20		52	3.36E-05	201.72
26	0.00098	8.08E-08	0.970251716		8.08E-08	1.79E-06	71.28		50	3.24E-05	194.24
27	0.0009	7.45E-08	0.969107551		7.45E-08	1.71E-06	74.39		49	3.12E-05	187.25
28	0.00083	6.90E-08	0.967963387		6.90E-08	1.64E-06	77.51		48	3.01E-05	180.71
29	0.00077	6.40E-08	0.966819222		6.40E-08	1.58E-06	80.65		47	2.91E-05	174.57
30	0.00072	5.96E-08	0.965675057		5.96E-08	1.52E-06	83.81		46	2.81E-05	168.80
31	0.00067	5.55E-08	0.964530892		5.55E-08	1.46E-06	86.99		45	2.72E-05	163.37
32	0.00063	5.19E-08	0.963386728		5.19E-08	1.41E-06	90.19		44	2.64E-05	158.25
33	0.00059	4.86E-08	0.962242563		4.86E-08	1.36E-06	93.40		43	2.56E-05	153.42
34	0.00055	4.56E-08	0.961098398		4.56E-08	1.32E-06	96.64		42	2.48E-05	148.84
35	0.00052	4.29E-08	0.959954233		4.29E-08	1.27E-06	99.89		41	2.41E-05	144.51
36	0.00049	4.04E-08	0.958810069		4.04E-08	1.23E-06	103.16		40	2.34E-05	140.40
37	0.00046	3.81E-08	0.957665904		3.81E-08	1.20E-06	106.45		39	2.28E-05	136.50
38	0.00044	3.60E-08	0.956521739		3.60E-08	1.16E-06	109.75		39	2.21E-05	132.79
39	0.00041	3.41E-08	0.955377574		3.41E-08	1.13E-06	113.07		38	2.15E-05	129.26
40	0.00039	3.23E-08	0.95423341		3.23E-08	1.09E-06	116.41		37	2.10E-05	125.90
41	0.00037	3.06E-08	0.953089245		3.06E-08	1.06E-06	119.76		37	2.04E-05	122.69
42	0.00035	2.91E-08	0.95194508		2.91E-08	1.03E-06	123.13		36	1.99E-05	119.63
43	0.00033	2.77E-08	0.950800915		2.77E-08	1.01E-06	126.52		35	1.94E-05	116.70
44	0.00032	2.64E-08	0.949656751		2.64E-08	9.80E-07	129.92		35	1.90E-05	113.90
45	0.0003	2.51E-08	0.948512586		2.51E-08	9.55E-07	133.34		34	1.85E-05	111.22
46	0.00029	2.40E-08	0.947368421		2.40E-08	9.31E-07	136.77		34	1.81E-05	108.65
47	0.00028	2.29E-08	0.946224256		2.29E-08	9.08E-07	140.23		33	1.77E-05	106.18
48	0.00026	2.19E-08	0.945080092		2.19E-08	8.86E-07	143.69		33	1.73E-05	103.81
49	0.00025	2.10E-08	0.943935927		2.10E-08	8.65E-07	147.17		32	1.69E-05	101.54
50	0.00024	2.01E-08	0.942791762		2.01E-08	8.45E-07	150.67		32	1.66E-05	99.36
51	0.00023	1.93E-08	0.941647597		1.93E-08	8.26E-07	154.18		31	1.62E-05	97.25
52	0.00022	1.85E-08	0.940503432		1.85E-08	8.08E-07	157.71		31	1.59E-05	95.23
53	0.00021	1.77E-08	0.939359268		1.77E-08	7.90E-07	161.25		30	1.55E-05	93.28
54	0.00021	1.71E-08	0.938215103		1.71E-08	7.73E-07	164.81		30	1.52E-05	91.40
55	0.0002	1.64E-08	0.937070938		1.64E-08	7.56E-07	168.39		30	1.49E-05	89.59
56	0.00019	1.58E-08	0.935926773		1.58E-08	7.41E-07	171.98		29	1.46E-05	87.84
57	0.00018	1.52E-08	0.934782609		1.52E-08	7.25E-07	175.58		29	1.44E-05	86.15
58	0.00018	1.46E-08	0.933638444		1.46E-08	7.11E-07	179.20		29	1.41E-05	84.52
59	0.00017	1.41E-08	0.932494279		1.41E-08	6.97E-07	182.83		28	1.38E-05	82.94
60	0.00016	1.36E-08	0.931350114		1.36E-08	6.83E-07	186.48		28	1.36E-05	81.42
61	0.00016	1.32E-08	0.93020595		1.32E-08	6.70E-07	190.14		28	1.33E-05	79.94

*Sprickor storleksordning 660-731*

660	1E-06	8.29E-11	0.244851259	8.29E-11	1.31E-08	9713.94	5	2.77E-07	1.66
661	1E-06	8.27E-11	0.243707094	8.27E-11	1.30E-08	9775.58	5	2.75E-07	1.65
662	1E-06	8.24E-11	0.242562929	8.24E-11	1.29E-08	9837.80	5	2.73E-07	1.64
663	9.9E-07	8.21E-11	0.241418764	8.21E-11	1.29E-08	9900.61	5	2.71E-07	1.63
664	9.9E-07	8.19E-11	0.2402746	8.19E-11	1.28E-08	9964.02	5	2.70E-07	1.62
665	9.9E-07	8.16E-11	0.239130435	8.16E-11	1.27E-08	10028.05	5	2.68E-07	1.61
666	9.8E-07	8.13E-11	0.23798627	8.13E-11	1.26E-08	10092.70	5	2.66E-07	1.60
667	9.8E-07	8.11E-11	0.236842105	8.11E-11	1.25E-08	10157.97	5	2.65E-07	1.59
668	9.8E-07	8.08E-11	0.235697941	8.08E-11	1.25E-08	10223.88	5	2.63E-07	1.58
669	9.7E-07	8.06E-11	0.234553776	8.06E-11	1.24E-08	10290.44	5	2.61E-07	1.57
670	9.7E-07	8.03E-11	0.233409611	8.03E-11	1.23E-08	10357.66	5	2.60E-07	1.56
671	9.7E-07	8.01E-11	0.232265446	8.01E-11	1.22E-08	10425.54	5	2.58E-07	1.55
672	9.6E-07	7.98E-11	0.231121281	7.98E-11	1.21E-08	10494.11	5	2.56E-07	1.54
673	9.6E-07	7.96E-11	0.229977117	7.96E-11	1.21E-08	10563.35	5	2.54E-07	1.53
674	9.6E-07	7.93E-11	0.228832952	7.93E-11	1.20E-08	10633.30	5	2.53E-07	1.52
675	9.6E-07	7.91E-11	0.227688787	7.91E-11	1.19E-08	10703.95	5	2.51E-07	1.51
676	9.5E-07	7.88E-11	0.226544622	7.88E-11	1.18E-08	10775.32	5	2.49E-07	1.50
677	9.5E-07	7.86E-11	0.225400458	7.86E-11	1.17E-08	10847.42	5	2.48E-07	1.49
678	9.5E-07	7.83E-11	0.224256293	7.83E-11	1.17E-08	10920.26	5	2.46E-07	1.48
679	9.4E-07	7.81E-11	0.223112128	7.81E-11	1.16E-08	10993.85	5	2.45E-07	1.47
680	9.4E-07	7.78E-11	0.221967963	7.78E-11	1.15E-08	11068.21	5	2.43E-07	1.46
681	9.4E-07	7.76E-11	0.220823799	7.76E-11	1.14E-08	11143.34	5	2.41E-07	1.45
682	9.3E-07	7.73E-11	0.219679634	7.73E-11	1.14E-08	11219.27	5	2.40E-07	1.44
683	9.3E-07	7.71E-11	0.218535469	7.71E-11	1.13E-08	11295.99	5	2.38E-07	1.43
684	9.3E-07	7.69E-11	0.217391304	7.69E-11	1.12E-08	11373.52	5	2.36E-07	1.42
685	9.3E-07	7.66E-11	0.21624714	7.66E-11	1.11E-08	11451.88	5	2.35E-07	1.41
686	9.2E-07	7.64E-11	0.215102975	7.64E-11	1.10E-08	11531.08	5	2.33E-07	1.40
687	9.2E-07	7.61E-11	0.21395881	7.61E-11	1.10E-08	11611.13	5	2.32E-07	1.39
688	9.2E-07	7.59E-11	0.212814645	7.59E-11	1.09E-08	11692.05	5	2.30E-07	1.38
689	9.1E-07	7.57E-11	0.211670481	7.57E-11	1.08E-08	11773.85	5	2.28E-07	1.37
690	9.1E-07	7.54E-11	0.210526316	7.54E-11	1.07E-08	11856.55	5	2.27E-07	1.36
691	9.1E-07	7.52E-11	0.209382151	7.52E-11	1.07E-08	11940.15	5	2.25E-07	1.35
692	9.1E-07	7.50E-11	0.208237986	7.50E-11	1.06E-08	12024.69	5	2.24E-07	1.34
693	9E-07	7.48E-11	0.207093822	7.48E-11	1.05E-08	12110.16	5	2.22E-07	1.33
694	9E-07	7.45E-11	0.205949657	7.45E-11	1.04E-08	12196.58	5	2.20E-07	1.32
695	9E-07	7.43E-11	0.204805492	7.43E-11	1.04E-08	12283.98	5	2.19E-07	1.31
696	9E-07	7.41E-11	0.203661327	7.41E-11	1.03E-08	12372.37	5	2.17E-07	1.30
697	8.9E-07	7.38E-11	0.202517162	7.38E-11	1.02E-08	12461.77	5	2.16E-07	1.29
698	8.9E-07	7.36E-11	0.201372998	7.36E-11	1.01E-08	12552.18	5	2.14E-07	1.29
699	8.9E-07	7.34E-11	0.200228833	7.34E-11	1.01E-08	12643.64	5	2.13E-07	1.28
700	8.8E-07	7.32E-11	0.199084668	7.32E-11	1.00E-08	12736.16	5	2.11E-07	1.27
701	8.8E-07	7.29E-11	0.197940503	7.29E-11	9.93E-09	12829.75	5	2.10E-07	1.26
702	8.8E-07	7.27E-11	0.196796339	7.27E-11	9.85E-09	12924.44	5	2.08E-07	1.25
703	8.8E-07	7.25E-11	0.195652174	7.25E-11	9.78E-09	13020.25	5	2.07E-07	1.24
704	8.7E-07	7.23E-11	0.194508009	7.23E-11	9.71E-09	13117.19	5	2.05E-07	1.23
705	8.7E-07	7.21E-11	0.193363844	7.21E-11	9.64E-09	13215.28	5	2.03E-07	1.22
706	8.7E-07	7.19E-11	0.19221968	7.19E-11	9.57E-09	13314.56	5	2.02E-07	1.21
707	8.7E-07	7.16E-11	0.191075515	7.16E-11	9.49E-09	13415.02	5	2.00E-07	1.20
708	8.6E-07	7.14E-11	0.18993135	7.14E-11	9.42E-09	13516.71	5	1.99E-07	1.19
709	8.6E-07	7.12E-11	0.188787185	7.12E-11	9.35E-09	13619.64	5	1.97E-07	1.18
710	8.6E-07	7.10E-11	0.187643021	7.10E-11	9.28E-09	13723.84	5	1.96E-07	1.18
711	8.6E-07	7.08E-11	0.186498856	7.08E-11	9.21E-09	13829.32	5	1.94E-07	1.17
712	8.5E-07	7.06E-11	0.185354691	7.06E-11	9.14E-09	13936.11	5	1.93E-07	1.16
713	8.5E-07	7.04E-11	0.184210526	7.04E-11	9.07E-09	14044.24	5	1.91E-07	1.15
714	8.5E-07	7.02E-11	0.183066362	7.02E-11	9.00E-09	14153.73	5	1.90E-07	1.14
715	8.5E-07	6.99E-11	0.181922197	6.99E-11	8.93E-09	14264.61	5	1.89E-07	1.13
716	8.4E-07	6.97E-11	0.180778032	6.97E-11	8.86E-09	14376.91	5	1.87E-07	1.12
717	8.4E-07	6.95E-11	0.179633867	6.95E-11	8.79E-09	14490.64	5	1.86E-07	1.11
718	8.4E-07	6.93E-11	0.178489703	6.93E-11	8.72E-09	14605.84	5	1.84E-07	1.10
719	8.4E-07	6.91E-11	0.177345538	6.91E-11	8.65E-09	14722.54	5	1.83E-07	1.10
720	8.3E-07	6.89E-11	0.176201373	6.89E-11	8.58E-09	14840.77	5	1.81E-07	1.09
721	8.3E-07	6.87E-11	0.175057208	6.87E-11	8.51E-09	14960.55	5	1.80E-07	1.08
722	8.3E-07	6.85E-11	0.173913043	6.85E-11	8.44E-09	15081.93	5	1.78E-07	1.07
723	8.3E-07	6.83E-11	0.172768879	6.83E-11	8.38E-09	15204.92	5	1.77E-07	1.06
724	8.2E-07	6.81E-11	0.171624714	6.81E-11	8.31E-09	15329.56	5	1.75E-07	1.05
725	8.2E-07	6.79E-11	0.170480549	6.79E-11	8.24E-09	15455.89	5	1.74E-07	1.04
726	8.2E-07	6.77E-11	0.169336384	6.77E-11	8.17E-09	15583.94	5	1.73E-07	1.04
727	8.2E-07	6.75E-11	0.16819222	6.75E-11	8.10E-09	15713.75	5	1.71E-07	1.03
728	8.1E-07	6.73E-11	0.167048055	6.73E-11	8.04E-09	15845.35	5	1.70E-07	1.02
729	8.1E-07	6.71E-11	0.16590389	6.71E-11	7.97E-09	15978.78	5	1.68E-07	1.01
730	8.1E-07	6.69E-11	0.164759725	6.69E-11	7.90E-09	16114.07	5	1.67E-07	1.00
731	8.1E-07	6.67E-11	0.163615561	6.67E-11	7.84E-09	16251.27	5	1.65E-07	0.99

### Bilaga 3:3a NV01: Verkliga tunneldjup och tunneldimensioner. Sprickor storleksordning 1-61

T-distribution

Borrhål

NV01	N	987	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	H [m]	56.00	Tunnelarea [m <sup>2</sup> ]
11 - 71 m	k	0.667	g [m <sup>2</sup> /s]	9.81	L [m]	60.00	60
			$\mu$ [Pas]	1.30E-03	r <sub>i</sub> [m]	4.37	r <sub>i</sub> [m]
					t [m]	5.00	4.37
					$\xi$	5.00	

Paretosum 2.55

987 = N

Paretodistribution

r	1/r <sup>1/k</sup>	T <sub>r</sub>	$\rho$ (T<T <sub>r</sub> )	T <sub>uppmatt</sub>	Distribution	T <sub>tot</sub> Residual, T <sub>inj</sub>	T <sub>tot</sub> /T <sub>inj</sub>	T <sub>tot</sub> /T <sub>inj</sub>	b [µm]	q [m <sup>2</sup> /s]	Q [L/min*100m]
1	1	6.07E-05	0.998987854		6.07E-05	9.41E-05	1.64	459	1.04E-04	623.35	
2	0.35374	2.15E-05	0.997975709		2.15E-05	7.26E-05	2.13	324	9.97E-05	597.99	
3	0.19261	1.17E-05	0.996963563		1.17E-05	6.10E-05	2.54	265	9.64E-05	578.21	
4	0.12513	7.59E-06	0.995951417		7.59E-06	5.34E-05	2.90	229	9.36E-05	561.78	
5	0.08955	5.43E-06	0.994939271		5.43E-06	4.79E-05	3.23	205	9.13E-05	547.62	
6	0.06813	4.13E-06	0.993927126		4.13E-06	4.38E-05	3.53	187	8.92E-05	535.12	
7	0.05407	3.28E-06	0.99291498		3.28E-06	4.05E-05	3.82	173	8.73E-05	523.89	
8	0.04426	2.69E-06	0.991902834		2.69E-06	3.78E-05	4.09	162	8.56E-05	513.67	
9	0.0371	2.25E-06	0.990890688		2.25E-06	3.56E-05	4.35	153	8.40E-05	504.29	
10	0.03168	1.92E-06	0.989878543		1.92E-06	3.37E-05	4.60	145	8.26E-05	495.60	
11	0.02746	1.67E-06	0.988866397		1.67E-06	3.20E-05	4.84	138	8.12E-05	487.50	
12	0.0241	1.46E-06	0.987854251		1.46E-06	3.05E-05	5.07	132	8.00E-05	479.91	
13	0.02138	1.30E-06	0.986842105		1.30E-06	2.92E-05	5.29	127	7.88E-05	472.77	
14	0.01913	1.16E-06	0.98582996		1.16E-06	2.81E-05	5.51	123	7.77E-05	466.02	
15	0.01725	1.05E-06	0.984817814		1.05E-06	2.70E-05	5.72	118	7.66E-05	459.62	
16	0.01566	9.50E-07	0.983805668		9.50E-07	2.61E-05	5.93	115	7.56E-05	453.53	
17	0.0143	8.67E-07	0.982793522		8.67E-07	2.52E-05	6.14	111	7.46E-05	447.73	
18	0.01312	7.96E-07	0.981781377		7.96E-07	2.44E-05	6.34	108	7.37E-05	442.18	
19	0.0121	7.34E-07	0.980769231		7.34E-07	2.37E-05	6.53	105	7.28E-05	436.87	
20	0.01121	6.80E-07	0.979757085		6.80E-07	2.30E-05	6.73	103	7.20E-05	431.77	
21	0.01042	6.32E-07	0.978744939		6.32E-07	2.24E-05	6.92	100	7.11E-05	426.87	
22	0.00971	5.89E-07	0.977732794		5.89E-07	2.18E-05	7.10	98	7.04E-05	422.14	
23	0.00909	5.51E-07	0.976720648		5.51E-07	2.12E-05	7.29	96	6.96E-05	417.59	
24	0.00853	5.17E-07	0.975708502		5.17E-07	2.07E-05	7.47	94	6.89E-05	413.19	
25	0.00802	4.86E-07	0.974696356		4.86E-07	2.02E-05	7.65	92	6.82E-05	408.94	
26	0.00756	4.59E-07	0.973684211		4.59E-07	1.98E-05	7.83	90	6.75E-05	404.83	
27	0.00715	4.33E-07	0.972672065		4.33E-07	1.93E-05	8.00	88	6.68E-05	400.84	
28	0.00677	4.10E-07	0.971659919		4.10E-07	1.89E-05	8.18	87	6.62E-05	396.97	
29	0.00642	3.89E-07	0.970647773		3.89E-07	1.85E-05	8.35	85	6.55E-05	393.22	
30	0.0061	3.70E-07	0.969635628		3.70E-07	1.82E-05	8.52	84	6.49E-05	389.57	
31	0.00581	3.52E-07	0.968623482		3.52E-07	1.78E-05	8.69	82	6.43E-05	386.02	
32	0.00554	3.36E-07	0.967611336		3.36E-07	1.75E-05	8.85	81	6.38E-05	382.57	
33	0.00529	3.21E-07	0.96659919		3.21E-07	1.72E-05	9.02	80	6.32E-05	379.21	
34	0.00506	3.07E-07	0.965587045		3.07E-07	1.69E-05	9.18	79	6.27E-05	375.93	
35	0.00484	2.94E-07	0.964574899		2.94E-07	1.66E-05	9.35	78	6.21E-05	372.73	
36	0.00464	2.82E-07	0.963562753		2.82E-07	1.63E-05	9.51	77	6.16E-05	369.61	
37	0.00446	2.70E-07	0.962550607		2.70E-07	1.60E-05	9.67	75	6.11E-05	366.57	
38	0.00428	2.60E-07	0.961538462		2.60E-07	1.57E-05	9.83	74	6.06E-05	363.59	
39	0.00412	2.50E-07	0.960526316		2.50E-07	1.55E-05	9.99	74	6.01E-05	360.68	
40	0.00396	2.40E-07	0.95951417		2.40E-07	1.53E-05	10.14	73	5.96E-05	357.84	
41	0.00382	2.32E-07	0.958502024		2.32E-07	1.50E-05	10.30	72	5.92E-05	355.05	
42	0.00368	2.23E-07	0.957489879		2.23E-07	1.48E-05	10.45	71	5.87E-05	352.33	
43	0.00356	2.16E-07	0.956477733		2.16E-07	1.46E-05	10.61	70	5.83E-05	349.66	
44	0.00344	2.08E-07	0.955465587		2.08E-07	1.44E-05	10.76	69	5.78E-05	347.05	
45	0.00332	2.02E-07	0.954453441		2.02E-07	1.42E-05	10.92	68	5.74E-05	344.48	
46	0.00321	1.95E-07	0.953441296		1.95E-07	1.40E-05	11.07	68	5.70E-05	341.97	
47	0.00311	1.89E-07	0.95242915		1.89E-07	1.38E-05	11.22	67	5.66E-05	339.51	
48	0.00302	1.83E-07	0.951417004		1.83E-07	1.36E-05	11.37	66	5.62E-05	337.09	
49	0.00292	1.77E-07	0.950404858		1.77E-07	1.34E-05	11.52	66	5.58E-05	334.72	
50	0.00284	1.72E-07	0.949392713		1.72E-07	1.33E-05	11.67	65	5.54E-05	332.39	
51	0.00275	1.67E-07	0.948380567		1.67E-07	1.31E-05	11.82	64	5.50E-05	330.10	
52	0.00267	1.62E-07	0.947368421		1.62E-07	1.29E-05	11.97	64	5.46E-05	327.85	
53	0.0026	1.58E-07	0.946356275		1.58E-07	1.28E-05	12.11	63	5.43E-05	325.64	
54	0.00253	1.53E-07	0.94534413		1.53E-07	1.26E-05	12.26	62	5.39E-05	323.47	
55	0.00246	1.49E-07	0.944331984		1.49E-07	1.25E-05	12.41	62	5.36E-05	321.34	
56	0.00239	1.45E-07	0.943319838		1.45E-07	1.23E-05	12.55	61	5.32E-05	319.24	
57	0.00233	1.41E-07	0.942307692		1.41E-07	1.22E-05	12.70	61	5.29E-05	317.17	
58	0.00227	1.38E-07	0.941295547		1.38E-07	1.20E-05	12.85	60	5.25E-05	315.14	
59	0.00221	1.34E-07	0.940283401		1.34E-07	1.19E-05	12.99	60	5.22E-05	313.14	
60	0.00216	1.31E-07	0.939271255		1.31E-07	1.18E-05	13.13	59	5.19E-05	311.17	
61	0.00211	1.28E-07	0.938259109		1.28E-07	1.17E-05	13.28	59	5.15E-05	309.23	



## Sprickor storleksordning 906-977

906	3.7E-05	2.24E-09	0.082995951	2.24E-09	1.70E-07	912.15	15	1.29E-06	7.74
907	3.7E-05	2.23E-09	0.081983806	2.23E-09	1.67E-07	924.31	15	1.27E-06	7.64
908	3.7E-05	2.23E-09	0.08097166	2.23E-09	1.65E-07	936.78	15	1.26E-06	7.54
909	3.7E-05	2.22E-09	0.079959514	2.22E-09	1.63E-07	949.57	15	1.24E-06	7.44
910	3.7E-05	2.22E-09	0.078947368	2.22E-09	1.61E-07	962.69	15	1.22E-06	7.34
911	3.7E-05	2.22E-09	0.077935223	2.22E-09	1.59E-07	976.15	15	1.21E-06	7.24
912	3.6E-05	2.21E-09	0.076923077	2.21E-09	1.56E-07	989.97	15	1.19E-06	7.14
913	3.6E-05	2.21E-09	0.075910931	2.21E-09	1.54E-07	1004.17	15	1.17E-06	7.04
914	3.6E-05	2.21E-09	0.074898785	2.21E-09	1.52E-07	1018.76	15	1.16E-06	6.94
915	3.6E-05	2.20E-09	0.07388664	2.20E-09	1.50E-07	1033.75	15	1.14E-06	6.84
916	3.6E-05	2.20E-09	0.072874494	2.20E-09	1.48E-07	1049.16	15	1.12E-06	6.74
917	3.6E-05	2.20E-09	0.071862348	2.20E-09	1.45E-07	1065.01	15	1.11E-06	6.64
918	3.6E-05	2.19E-09	0.070850202	2.19E-09	1.43E-07	1081.32	15	1.09E-06	6.54
919	3.6E-05	2.19E-09	0.069838057	2.19E-09	1.41E-07	1098.12	15	1.07E-06	6.44
920	3.6E-05	2.18E-09	0.068825911	2.18E-09	1.39E-07	1115.41	15	1.06E-06	6.34
921	3.6E-05	2.18E-09	0.067813765	2.18E-09	1.37E-07	1133.23	15	1.04E-06	6.25
922	3.6E-05	2.18E-09	0.066801619	2.18E-09	1.34E-07	1151.59	15	1.02E-06	6.15
923	3.6E-05	2.17E-09	0.065789474	2.17E-09	1.32E-07	1170.53	15	1.01E-06	6.05
924	3.6E-05	2.17E-09	0.064777328	2.17E-09	1.30E-07	1190.07	15	9.92E-07	5.95
925	3.6E-05	2.17E-09	0.063765182	2.17E-09	1.28E-07	1210.24	15	9.75E-07	5.85
926	3.6E-05	2.16E-09	0.062753036	2.16E-09	1.26E-07	1231.07	15	9.59E-07	5.75
927	3.6E-05	2.16E-09	0.061740891	2.16E-09	1.24E-07	1252.59	15	9.43E-07	5.66
928	3.6E-05	2.16E-09	0.060728745	2.16E-09	1.21E-07	1274.85	15	9.26E-07	5.56
929	3.5E-05	2.15E-09	0.059716599	2.15E-09	1.19E-07	1297.87	15	9.10E-07	5.46
930	3.5E-05	2.15E-09	0.058704453	2.15E-09	1.17E-07	1321.70	15	8.94E-07	5.36
931	3.5E-05	2.15E-09	0.057692308	2.15E-09	1.15E-07	1346.38	15	8.77E-07	5.26
932	3.5E-05	2.14E-09	0.056680162	2.14E-09	1.13E-07	1371.96	15	8.61E-07	5.17
933	3.5E-05	2.14E-09	0.055668016	2.14E-09	1.11E-07	1398.48	15	8.45E-07	5.07
934	3.5E-05	2.14E-09	0.05465587	2.14E-09	1.09E-07	1426.01	15	8.29E-07	4.97
935	3.5E-05	2.13E-09	0.053643725	2.13E-09	1.06E-07	1454.59	15	8.13E-07	4.88
936	3.5E-05	2.13E-09	0.052631579	2.13E-09	1.04E-07	1484.29	15	7.96E-07	4.78
937	3.5E-05	2.13E-09	0.051619433	2.13E-09	1.02E-07	1515.19	15	7.80E-07	4.68
938	3.5E-05	2.12E-09	0.050607287	2.12E-09	1.00E-07	1547.34	15	7.64E-07	4.58
939	3.5E-05	2.12E-09	0.049595142	2.12E-09	9.79E-08	1580.83	15	7.48E-07	4.49
940	3.5E-05	2.12E-09	0.048582996	2.12E-09	9.58E-08	1615.75	15	7.32E-07	4.39
941	3.5E-05	2.11E-09	0.04757085	2.11E-09	9.37E-08	1652.18	15	7.16E-07	4.30
942	3.5E-05	2.11E-09	0.046558704	2.11E-09	9.16E-08	1690.24	15	7.00E-07	4.20
943	3.5E-05	2.11E-09	0.045546559	2.11E-09	8.95E-08	1730.02	15	6.84E-07	4.10
944	3.5E-05	2.10E-09	0.044534413	2.10E-09	8.74E-08	1771.66	15	6.68E-07	4.01
945	3.5E-05	2.10E-09	0.043522267	2.10E-09	8.53E-08	1815.27	15	6.52E-07	3.91
946	3.5E-05	2.10E-09	0.042510121	2.10E-09	8.32E-08	1861.02	15	6.36E-07	3.82
947	3.4E-05	2.09E-09	0.041497976	2.09E-09	8.11E-08	1909.05	15	6.20E-07	3.72
948	3.4E-05	2.09E-09	0.04048583	2.09E-09	7.90E-08	1959.54	15	6.04E-07	3.63
949	3.4E-05	2.09E-09	0.039473684	2.09E-09	7.69E-08	2012.69	15	5.88E-07	3.53
950	3.4E-05	2.08E-09	0.038461538	2.08E-09	7.48E-08	2068.72	15	5.72E-07	3.43
951	3.4E-05	2.08E-09	0.037449393	2.08E-09	7.27E-08	2127.85	15	5.57E-07	3.34
952	3.4E-05	2.08E-09	0.036437247	2.08E-09	7.07E-08	2190.37	15	5.41E-07	3.24
953	3.4E-05	2.07E-09	0.035425101	2.07E-09	6.86E-08	2256.56	15	5.25E-07	3.15
954	3.4E-05	2.07E-09	0.034412955	2.07E-09	6.65E-08	2326.76	15	5.09E-07	3.06
955	3.4E-05	2.07E-09	0.03340081	2.07E-09	6.44E-08	2401.35	15	4.93E-07	2.96
956	3.4E-05	2.06E-09	0.032388664	2.06E-09	6.24E-08	2480.75	15	4.78E-07	2.87
957	3.4E-05	2.06E-09	0.031376518	2.06E-09	6.03E-08	2565.45	15	4.62E-07	2.77
958	3.4E-05	2.06E-09	0.030364372	2.06E-09	5.83E-08	2655.98	15	4.46E-07	2.68
959	3.4E-05	2.05E-09	0.029352227	2.05E-09	5.62E-08	2752.99	15	4.31E-07	2.58
960	3.4E-05	2.05E-09	0.028340081	2.05E-09	5.42E-08	2857.17	15	4.15E-07	2.49
961	3.4E-05	2.05E-09	0.027327935	2.05E-09	5.21E-08	2969.37	15	3.99E-07	2.40
962	3.4E-05	2.04E-09	0.026315789	2.04E-09	5.01E-08	3090.55	15	3.84E-07	2.30
963	3.4E-05	2.04E-09	0.025303644	2.04E-09	4.80E-08	3221.83	15	3.68E-07	2.21
964	3.4E-05	2.04E-09	0.024291498	2.04E-09	4.60E-08	3364.52	15	3.53E-07	2.12
965	3.4E-05	2.03E-09	0.023279352	2.03E-09	4.40E-08	3520.18	15	3.37E-07	2.02
966	3.3E-05	2.03E-09	0.022267206	2.03E-09	4.19E-08	3690.66	15	3.22E-07	1.93
967	3.3E-05	2.03E-09	0.021255061	2.03E-09	3.99E-08	3878.19	15	3.06E-07	1.84
968	3.3E-05	2.02E-09	0.020242915	2.02E-09	3.79E-08	4085.47	15	2.91E-07	1.74
969	3.3E-05	2.02E-09	0.019230769	2.02E-09	3.59E-08	4315.77	15	2.75E-07	1.65
970	3.3E-05	2.02E-09	0.018218623	2.02E-09	3.38E-08	4573.17	15	2.60E-07	1.56
971	3.3E-05	2.02E-09	0.017206478	2.02E-09	3.18E-08	4862.74	15	2.44E-07	1.47
972	3.3E-05	2.01E-09	0.016194332	2.01E-09	2.98E-08	5190.92	15	2.29E-07	1.37
973	3.3E-05	2.01E-09	0.015182186	2.01E-09	2.78E-08	5565.98	15	2.13E-07	1.28
974	3.3E-05	2.01E-09	0.01417004	2.01E-09	2.58E-08	5998.74	15	1.98E-07	1.19
975	3.3E-05	2.00E-09	0.013157895	2.00E-09	2.38E-08	6503.63	15	1.83E-07	1.10
976	3.3E-05	2.00E-09	0.012145749	2.00E-09	2.18E-08	7100.31	15	1.67E-07	1.00
977	3.3E-05	2.00E-09	0.011133603	2.00E-09	1.98E-08	7816.33	15	1.52E-07	0.91

### Bilaga 3:3b NV01: Djup: 20m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>. Sprickor storleksordning 1-61

T-distribution

Borrhål

NV01

11 - 71 m

N

987

k

0.667

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>]

1000

$g$  [m<sup>2</sup>/s]

9.81

$\mu$  [Pas]

1.30E-03

H [m]

20.00

L [m]

60.00

$r_i$  [m]

4.00

t [m]

5.00

$\xi$

5.00

Tunnelarea [m<sup>2</sup>]

50

$r_i$  [m]

3.99

Paretosum 2.55

987 = N

Pareto distribution

r	$1/r^{1/k}$	$T_r$	$p(T < T_r)$	$T_{uppmatt}$	Distribution	$T_{tot}$ Residual, $T_{inj}$	$T_{tot}/T_{inj}$	$q$ [m <sup>2</sup> /s]	Q [L/min*100m]
1	1	6.07E-05	0.998987854	6.07E-05	6.07E-05	9.41E-05	1.64	4.44E-05	266.31
2	0.35374	2.15E-05	0.997975709	2.15E-05	2.15E-05	7.26E-05	2.13	3.94E-05	236.61
3	0.19261	1.17E-05	0.996963563	1.17E-05	1.17E-05	6.10E-05	2.54	3.79E-05	227.44
4	0.12513	7.59E-06	0.995951417	7.59E-06	7.59E-06	5.34E-05	2.90	3.67E-05	219.91
5	0.08955	5.43E-06	0.994939271	5.43E-06	5.43E-06	4.79E-05	3.23	3.56E-05	213.48
6	0.06813	4.13E-06	0.993927126	4.13E-06	4.13E-06	4.38E-05	3.53	3.46E-05	207.84
7	0.05407	3.28E-06	0.99291498	3.28E-06	3.28E-06	4.05E-05	3.82	3.38E-05	202.82
8	0.04426	2.69E-06	0.991902834	2.69E-06	2.69E-06	3.78E-05	4.09	3.30E-05	198.27
9	0.0371	2.25E-06	0.990890688	2.25E-06	2.25E-06	3.56E-05	4.35	3.24E-05	194.12
10	0.03168	1.92E-06	0.989878543	1.92E-06	1.92E-06	3.37E-05	4.60	3.17E-05	190.30
11	0.02746	1.67E-06	0.988866397	1.67E-06	1.67E-06	3.20E-05	4.84	3.11E-05	186.75
12	0.0241	1.46E-06	0.987854251	1.46E-06	1.46E-06	3.05E-05	5.07	3.06E-05	183.44
13	0.02138	1.30E-06	0.986842105	1.30E-06	1.30E-06	2.92E-05	5.29	3.01E-05	180.34
14	0.01913	1.16E-06	0.98582996	1.16E-06	1.16E-06	2.81E-05	5.51	2.96E-05	177.43
15	0.01725	1.05E-06	0.984817814	1.05E-06	1.05E-06	2.70E-05	5.72	2.91E-05	174.67
16	0.01566	9.50E-07	0.983805668	9.50E-07	9.50E-07	2.61E-05	5.93	2.87E-05	172.06
17	0.0143	8.67E-07	0.982793522	8.67E-07	8.67E-07	2.52E-05	6.14	2.83E-05	169.58
18	0.01312	7.96E-07	0.981781377	7.96E-07	7.96E-07	2.44E-05	6.34	2.79E-05	167.21
19	0.0121	7.34E-07	0.980769231	7.34E-07	7.34E-07	2.37E-05	6.53	2.75E-05	164.95
20	0.01121	6.80E-07	0.979757085	6.80E-07	6.80E-07	2.30E-05	6.73	2.71E-05	162.79
21	0.01042	6.32E-07	0.978744939	6.32E-07	6.32E-07	2.24E-05	6.92	2.68E-05	160.72
22	0.00971	5.89E-07	0.977732794	5.89E-07	5.89E-07	2.18E-05	7.10	2.65E-05	158.73
23	0.00909	5.51E-07	0.976720648	5.51E-07	5.51E-07	2.12E-05	7.29	2.61E-05	156.81
24	0.00853	5.17E-07	0.975708502	5.17E-07	5.17E-07	2.07E-05	7.47	2.58E-05	154.97
25	0.00802	4.86E-07	0.974696356	4.86E-07	4.86E-07	2.02E-05	7.65	2.55E-05	153.19
26	0.00756	4.59E-07	0.973684211	4.59E-07	4.59E-07	1.98E-05	7.83	2.52E-05	151.48
27	0.00715	4.33E-07	0.972672065	4.33E-07	4.33E-07	1.93E-05	8.00	2.50E-05	149.82
28	0.00677	4.10E-07	0.971659919	4.10E-07	4.10E-07	1.89E-05	8.18	2.47E-05	148.21
29	0.00642	3.89E-07	0.970647773	3.89E-07	3.89E-07	1.85E-05	8.35	2.44E-05	146.65
30	0.0061	3.70E-07	0.969635628	3.70E-07	3.70E-07	1.82E-05	8.52	2.42E-05	145.14
31	0.00581	3.52E-07	0.968623482	3.52E-07	3.52E-07	1.78E-05	8.69	2.39E-05	143.68
32	0.00554	3.36E-07	0.967611336	3.36E-07	3.36E-07	1.75E-05	8.85	2.37E-05	142.26
33	0.00529	3.21E-07	0.96659919	3.21E-07	3.21E-07	1.72E-05	9.02	2.35E-05	140.87
34	0.00506	3.07E-07	0.965587045	3.07E-07	3.07E-07	1.69E-05	9.18	2.33E-05	139.53
35	0.00484	2.94E-07	0.964574899	2.94E-07	2.94E-07	1.66E-05	9.35	2.30E-05	138.22
36	0.00464	2.82E-07	0.963562753	2.82E-07	2.82E-07	1.63E-05	9.51	2.28E-05	136.94
37	0.00446	2.70E-07	0.962550607	2.70E-07	2.70E-07	1.60E-05	9.67	2.26E-05	135.70
38	0.00428	2.60E-07	0.961538462	2.60E-07	2.60E-07	1.57E-05	9.83	2.24E-05	134.49
39	0.00412	2.50E-07	0.960526316	2.50E-07	2.50E-07	1.55E-05	9.99	2.22E-05	133.30
40	0.00396	2.40E-07	0.95951417	2.40E-07	2.40E-07	1.53E-05	10.14	2.20E-05	132.15
41	0.00382	2.32E-07	0.958502024	2.32E-07	2.32E-07	1.50E-05	10.30	2.18E-05	131.02
42	0.00368	2.23E-07	0.957489879	2.23E-07	2.23E-07	1.48E-05	10.45	2.17E-05	129.91
43	0.00356	2.16E-07	0.956477733	2.16E-07	2.16E-07	1.46E-05	10.61	2.15E-05	128.83
44	0.00344	2.08E-07	0.955465587	2.08E-07	2.08E-07	1.44E-05	10.76	2.13E-05	127.78
45	0.00332	2.02E-07	0.954453441	2.02E-07	2.02E-07	1.42E-05	10.92	2.11E-05	126.75
46	0.00321	1.95E-07	0.953441296	1.95E-07	1.95E-07	1.40E-05	11.07	2.10E-05	125.73
47	0.00311	1.89E-07	0.95242915	1.89E-07	1.89E-07	1.38E-05	11.22	2.08E-05	124.74
48	0.00302	1.83E-07	0.951417004	1.83E-07	1.83E-07	1.36E-05	11.37	2.06E-05	123.77
49	0.00292	1.77E-07	0.950404858	1.77E-07	1.77E-07	1.34E-05	11.52	2.05E-05	122.82
50	0.00284	1.72E-07	0.949392713	1.72E-07	1.72E-07	1.33E-05	11.67	2.03E-05	121.89
51	0.00275	1.67E-07	0.948380567	1.67E-07	1.67E-07	1.31E-05	11.82	2.02E-05	120.97
52	0.00267	1.62E-07	0.947368421	1.62E-07	1.62E-07	1.29E-05	11.97	2.00E-05	120.07
53	0.0026	1.58E-07	0.946356275	1.58E-07	1.58E-07	1.28E-05	12.11	1.99E-05	119.19
54	0.00253	1.53E-07	0.94534413	1.53E-07	1.53E-07	1.26E-05	12.26	1.97E-05	118.33
55	0.00246	1.49E-07	0.944331984	1.49E-07	1.49E-07	1.25E-05	12.41	1.96E-05	117.48
56	0.00239	1.45E-07	0.943319838	1.45E-07	1.45E-07	1.23E-05	12.55	1.94E-05	116.64
57	0.00233	1.41E-07	0.942307692	1.41E-07	1.41E-07	1.22E-05	12.70	1.93E-05	115.82
58	0.00227	1.38E-07	0.941295547	1.38E-07	1.38E-07	1.20E-05	12.85	1.92E-05	115.01
59	0.00221	1.34E-07	0.940283401	1.34E-07	1.34E-07	1.19E-05	13.00	1.90E-05	114.22
60	0.00216	1.31E-07	0.939271255	1.31E-07	1.31E-07	1.18E-05	13.13	1.89E-05	113.44
61	0.00211	1.28E-07	0.938259109	1.28E-07	1.28E-07	1.17E-05	13.28	1.88E-05	112.67

## Sprickor storleksordning 885-956

885	3.8E-05	2.32E-09	0.104251012	2.32E-09	2.17E-07	711.84	15	5.55E-07	3.33
886	3.8E-05	2.31E-09	0.103238866	2.31E-09	2.15E-07	719.49	15	5.49E-07	3.30
887	3.8E-05	2.31E-09	0.102226721	2.31E-09	2.13E-07	727.30	15	5.44E-07	3.26
888	3.8E-05	2.30E-09	0.101214575	2.30E-09	2.10E-07	735.26	15	5.38E-07	3.23
889	3.8E-05	2.30E-09	0.100202429	2.30E-09	2.08E-07	743.38	15	5.32E-07	3.19
890	3.8E-05	2.30E-09	0.099190283	2.30E-09	2.06E-07	751.67	15	5.26E-07	3.16
891	3.8E-05	2.29E-09	0.098178138	2.29E-09	2.04E-07	760.14	15	5.20E-07	3.12
892	3.8E-05	2.29E-09	0.097165992	2.29E-09	2.01E-07	768.78	15	5.15E-07	3.09
893	3.8E-05	2.28E-09	0.096153846	2.28E-09	1.99E-07	777.60	15	5.09E-07	3.05
894	3.8E-05	2.28E-09	0.0951417	2.28E-09	1.97E-07	786.62	15	5.03E-07	3.02
895	3.8E-05	2.28E-09	0.094129555	2.28E-09	1.94E-07	795.83	15	4.97E-07	2.98
896	3.7E-05	2.27E-09	0.093117409	2.27E-09	1.92E-07	805.24	15	4.91E-07	2.95
897	3.7E-05	2.27E-09	0.092105263	2.27E-09	1.90E-07	814.86	15	4.86E-07	2.91
898	3.7E-05	2.27E-09	0.091093117	2.27E-09	1.88E-07	824.70	15	4.80E-07	2.88
899	3.7E-05	2.26E-09	0.090080972	2.26E-09	1.85E-07	834.76	15	4.74E-07	2.85
900	3.7E-05	2.26E-09	0.089068826	2.26E-09	1.83E-07	845.06	15	4.69E-07	2.81
901	3.7E-05	2.25E-09	0.088056668	2.25E-09	1.81E-07	855.59	15	4.63E-07	2.78
902	3.7E-05	2.25E-09	0.087044534	2.25E-09	1.79E-07	866.37	15	4.57E-07	2.74
903	3.7E-05	2.25E-09	0.086032389	2.25E-09	1.76E-07	877.41	15	4.51E-07	2.71
904	3.7E-05	2.24E-09	0.085020243	2.24E-09	1.74E-07	888.71	15	4.46E-07	2.67
905	3.7E-05	2.24E-09	0.084008097	2.24E-09	1.72E-07	900.29	15	4.40E-07	2.64
906	3.7E-05	2.24E-09	0.082995951	2.24E-09	1.70E-07	912.15	15	4.34E-07	2.61
907	3.7E-05	2.23E-09	0.081983806	2.23E-09	1.67E-07	924.31	15	4.29E-07	2.57
908	3.7E-05	2.23E-09	0.08097166	2.23E-09	1.65E-07	936.78	15	4.23E-07	2.54
909	3.7E-05	2.22E-09	0.079959514	2.22E-09	1.63E-07	949.57	15	4.17E-07	2.50
910	3.7E-05	2.22E-09	0.078947368	2.22E-09	1.61E-07	962.69	15	4.12E-07	2.47
911	3.7E-05	2.22E-09	0.077935223	2.22E-09	1.59E-07	976.15	15	4.06E-07	2.44
912	3.6E-05	2.21E-09	0.076923077	2.21E-09	1.56E-07	989.97	15	4.01E-07	2.40
913	3.6E-05	2.21E-09	0.075910931	2.21E-09	1.54E-07	1004.17	15	3.95E-07	2.37
914	3.6E-05	2.21E-09	0.074898785	2.21E-09	1.52E-07	1018.76	15	3.89E-07	2.34
915	3.6E-05	2.20E-09	0.07388664	2.20E-09	1.50E-07	1033.75	15	3.84E-07	2.30
916	3.6E-05	2.20E-09	0.072874494	2.20E-09	1.48E-07	1049.16	15	3.78E-07	2.27
917	3.6E-05	2.20E-09	0.071862348	2.20E-09	1.45E-07	1065.01	15	3.72E-07	2.23
918	3.6E-05	2.19E-09	0.070850202	2.19E-09	1.43E-07	1081.32	15	3.67E-07	2.20
919	3.6E-05	2.19E-09	0.069838057	2.19E-09	1.41E-07	1098.12	15	3.61E-07	2.17
920	3.6E-05	2.18E-09	0.068825911	2.18E-09	1.39E-07	1115.41	15	3.56E-07	2.13
921	3.6E-05	2.18E-09	0.067813765	2.18E-09	1.37E-07	1133.23	15	3.50E-07	2.10
922	3.6E-05	2.18E-09	0.066801619	2.18E-09	1.34E-07	1151.59	15	3.45E-07	2.07
923	3.6E-05	2.17E-09	0.065789474	2.17E-09	1.32E-07	1170.53	15	3.39E-07	2.03
924	3.6E-05	2.17E-09	0.064777328	2.17E-09	1.30E-07	1190.07	15	3.34E-07	2.00
925	3.6E-05	2.17E-09	0.063765182	2.17E-09	1.28E-07	1210.24	15	3.28E-07	1.97
926	3.6E-05	2.16E-09	0.062753036	2.16E-09	1.26E-07	1231.07	15	3.23E-07	1.94
927	3.6E-05	2.16E-09	0.061740891	2.16E-09	1.24E-07	1252.59	15	3.17E-07	1.90
928	3.6E-05	2.16E-09	0.060728745	2.16E-09	1.21E-07	1274.85	15	3.12E-07	1.87
929	3.5E-05	2.15E-09	0.059716599	2.15E-09	1.19E-07	1297.87	15	3.06E-07	1.84
930	3.5E-05	2.15E-09	0.058704453	2.15E-09	1.17E-07	1321.70	15	3.01E-07	1.80
931	3.5E-05	2.15E-09	0.057692308	2.15E-09	1.15E-07	1346.38	15	2.95E-07	1.77
932	3.5E-05	2.14E-09	0.056680162	2.14E-09	1.13E-07	1371.96	15	2.90E-07	1.74
933	3.5E-05	2.14E-09	0.055668016	2.14E-09	1.11E-07	1398.48	15	2.84E-07	1.71
934	3.5E-05	2.14E-09	0.05465587	2.14E-09	1.09E-07	1426.01	15	2.79E-07	1.67
935	3.5E-05	2.13E-09	0.053643725	2.13E-09	1.06E-07	1454.59	15	2.73E-07	1.64
936	3.5E-05	2.13E-09	0.052631579	2.13E-09	1.04E-07	1484.29	15	2.68E-07	1.61
937	3.5E-05	2.13E-09	0.051619433	2.13E-09	1.02E-07	1515.19	15	2.62E-07	1.57
938	3.5E-05	2.12E-09	0.050607287	2.12E-09	1.00E-07	1547.34	15	2.57E-07	1.54
939	3.5E-05	2.12E-09	0.049595142	2.12E-09	9.79E-08	1580.83	15	2.52E-07	1.51
940	3.5E-05	2.12E-09	0.048582996	2.12E-09	9.58E-08	1615.75	15	2.46E-07	1.48
941	3.5E-05	2.11E-09	0.04757085	2.11E-09	9.37E-08	1652.18	15	2.41E-07	1.44
942	3.5E-05	2.11E-09	0.046558704	2.11E-09	9.16E-08	1690.24	15	2.35E-07	1.41
943	3.5E-05	2.11E-09	0.045546559	2.11E-09	8.95E-08	1730.02	15	2.30E-07	1.38
944	3.5E-05	2.10E-09	0.044534413	2.10E-09	8.74E-08	1771.66	15	2.25E-07	1.35
945	3.5E-05	2.10E-09	0.043522267	2.10E-09	8.53E-08	1815.27	15	2.19E-07	1.32
946	3.5E-05	2.10E-09	0.042510121	2.10E-09	8.32E-08	1861.02	15	2.14E-07	1.28
947	3.4E-05	2.09E-09	0.041497976	2.09E-09	8.11E-08	1909.05	15	2.08E-07	1.25
948	3.4E-05	2.09E-09	0.04048583	2.09E-09	7.90E-08	1959.54	15	2.03E-07	1.22
949	3.4E-05	2.09E-09	0.039473684	2.09E-09	7.69E-08	2012.69	15	1.98E-07	1.19
950	3.4E-05	2.08E-09	0.038461538	2.08E-09	7.48E-08	2068.72	15	1.92E-07	1.15
951	3.4E-05	2.08E-09	0.037449393	2.08E-09	7.27E-08	2127.85	15	1.87E-07	1.12
952	3.4E-05	2.08E-09	0.036437247	2.08E-09	7.07E-08	2190.37	15	1.82E-07	1.09
953	3.4E-05	2.07E-09	0.035425101	2.07E-09	6.86E-08	2256.56	15	1.76E-07	1.06
954	3.4E-05	2.07E-09	0.034412955	2.07E-09	6.65E-08	2326.76	15	1.71E-07	1.03
955	3.4E-05	2.07E-09	0.03340081	2.07E-09	6.44E-08	2401.35	15	1.66E-07	1.00
956	3.4E-05	2.06E-09	0.032388664	2.06E-09	6.24E-08	2480.75	15	1.61E-07	0.96

### Bilaga 3:3c NV01: Djup: 450m, tunnelarea: 50 m<sup>2</sup>. Sprickor storleksordning 1-61

T-distribution

Borrhål

NV01	N	987	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	H [m]	450.00	Tunnelarea [m <sup>2</sup> ]
11 - 71 m	k	0.667	g [m <sup>2</sup> /s]	9.81	L [m]	60.00	50
			$\mu$ [Pas]	1.30E-03	r <sub>i</sub> [m]	4.00	r <sub>i</sub> [m]
					t [m]	5.00	3.99
					$\xi$	5.00	

Paretosum 2.55

987 = N

Paretodistribution

r	1/r <sup>1/k</sup>	T <sub>r</sub>	p (T<T <sub>r</sub> )	T <sub>uppmatt</sub>	Distribution	T <sub>tot</sub> Residual, T <sub>inj</sub>	T <sub>tot</sub> /T <sub>inj</sub>	q [m <sup>2</sup> /s]	Q [L/min*100m]
1	1	6.07E-05	0.998987854	6.07E-05	6.07E-05	9.41E-05	1.64	6.67E-04	4000.11
2	0.35374	2.15E-05	0.997975709	2.15E-05	2.15E-05	7.26E-05	2.13	6.44E-04	3861.06
3	0.19261	1.17E-05	0.996963563	1.17E-05	1.17E-05	6.10E-05	2.54	6.25E-04	3751.44
4	0.12513	7.59E-06	0.995951417	7.59E-06	7.59E-06	5.34E-05	2.90	6.10E-04	3659.57
5	0.08955	5.43E-06	0.994939271	5.43E-06	5.43E-06	4.79E-05	3.23	5.97E-04	3579.79
6	0.06813	4.13E-06	0.993927126	4.13E-06	4.13E-06	4.38E-05	3.53	5.85E-04	3508.88
7	0.05407	3.28E-06	0.99291498	3.28E-06	3.28E-06	4.05E-05	3.82	5.74E-04	3444.81
8	0.04426	2.69E-06	0.991902834	2.69E-06	2.69E-06	3.78E-05	4.09	5.64E-04	3386.22
9	0.0371	2.25E-06	0.990890688	2.25E-06	2.25E-06	3.56E-05	4.35	5.55E-04	3332.14
10	0.03168	1.92E-06	0.989878543	1.92E-06	1.92E-06	3.37E-05	4.60	5.47E-04	3281.83
11	0.02746	1.67E-06	0.988866397	1.67E-06	1.67E-06	3.20E-05	4.84	5.39E-04	3234.75
12	0.0241	1.46E-06	0.987854251	1.46E-06	1.46E-06	3.05E-05	5.07	5.32E-04	3190.47
13	0.02138	1.30E-06	0.986842105	1.30E-06	1.30E-06	2.92E-05	5.29	5.25E-04	3148.63
14	0.01913	1.16E-06	0.98582996	1.16E-06	1.16E-06	2.81E-05	5.51	5.18E-04	3108.96
15	0.01725	1.05E-06	0.984817814	1.05E-06	1.05E-06	2.70E-05	5.72	5.12E-04	3071.22
16	0.01566	9.50E-07	0.983805668	9.50E-07	9.50E-07	2.61E-05	5.93	5.06E-04	3035.21
17	0.0143	8.67E-07	0.982793522	8.67E-07	8.67E-07	2.52E-05	6.14	5.00E-04	3000.77
18	0.01312	7.96E-07	0.981781377	7.96E-07	7.96E-07	2.44E-05	6.34	4.95E-04	2967.75
19	0.0121	7.34E-07	0.980769231	7.34E-07	7.34E-07	2.37E-05	6.53	4.89E-04	2936.04
20	0.01121	6.80E-07	0.979757085	6.80E-07	6.80E-07	2.30E-05	6.73	4.84E-04	2905.52
21	0.01042	6.32E-07	0.978744939	6.32E-07	6.32E-07	2.24E-05	6.92	4.79E-04	2876.11
22	0.00971	5.89E-07	0.977732794	5.89E-07	5.89E-07	2.18E-05	7.10	4.75E-04	2847.72
23	0.00909	5.51E-07	0.976720648	5.51E-07	5.51E-07	2.12E-05	7.29	4.70E-04	2820.27
24	0.00853	5.17E-07	0.975708502	5.17E-07	5.17E-07	2.07E-05	7.47	4.66E-04	2793.71
25	0.00802	4.86E-07	0.974696356	4.86E-07	4.86E-07	2.02E-05	7.65	4.61E-04	2767.97
26	0.00756	4.59E-07	0.973684211	4.59E-07	4.59E-07	1.98E-05	7.83	4.57E-04	2743.00
27	0.00715	4.33E-07	0.972672065	4.33E-07	4.33E-07	1.93E-05	8.00	4.53E-04	2718.76
28	0.00677	4.10E-07	0.971659919	4.10E-07	4.10E-07	1.89E-05	8.18	4.49E-04	2695.20
29	0.00642	3.89E-07	0.970647773	3.89E-07	3.89E-07	1.85E-05	8.35	4.45E-04	2672.28
30	0.0061	3.70E-07	0.969635628	3.70E-07	3.70E-07	1.82E-05	8.52	4.42E-04	2649.96
31	0.00581	3.52E-07	0.968623482	3.52E-07	3.52E-07	1.78E-05	8.69	4.38E-04	2628.22
32	0.00554	3.36E-07	0.967611336	3.36E-07	3.36E-07	1.75E-05	8.85	4.35E-04	2607.02
33	0.00529	3.21E-07	0.96659919	3.21E-07	3.21E-07	1.72E-05	9.02	4.31E-04	2586.34
34	0.00506	3.07E-07	0.965587045	3.07E-07	3.07E-07	1.69E-05	9.18	4.28E-04	2566.15
35	0.00484	2.94E-07	0.964574899	2.94E-07	2.94E-07	1.66E-05	9.35	4.24E-04	2546.42
36	0.00464	2.82E-07	0.963562753	2.82E-07	2.82E-07	1.63E-05	9.51	4.21E-04	2527.15
37	0.00446	2.70E-07	0.962550607	2.70E-07	2.70E-07	1.60E-05	9.67	4.18E-04	2508.29
38	0.00428	2.60E-07	0.961538462	2.60E-07	2.60E-07	1.57E-05	9.83	4.15E-04	2489.84
39	0.00412	2.50E-07	0.960526316	2.50E-07	2.50E-07	1.55E-05	9.99	4.12E-04	2471.78
40	0.00396	2.40E-07	0.95951417	2.40E-07	2.40E-07	1.53E-05	10.14	4.09E-04	2454.09
41	0.00382	2.32E-07	0.958502024	2.32E-07	2.32E-07	1.50E-05	10.30	4.06E-04	2436.76
42	0.00368	2.23E-07	0.957489879	2.23E-07	2.23E-07	1.48E-05	10.45	4.03E-04	2419.77
43	0.00356	2.16E-07	0.956477733	2.16E-07	2.16E-07	1.46E-05	10.61	4.01E-04	2403.11
44	0.00344	2.08E-07	0.955465587	2.08E-07	2.08E-07	1.44E-05	10.76	3.98E-04	2386.76
45	0.00332	2.02E-07	0.954453441	2.02E-07	2.02E-07	1.42E-05	10.92	3.95E-04	2370.72
46	0.00321	1.95E-07	0.953441296	1.95E-07	1.95E-07	1.40E-05	11.07	3.92E-04	2354.97
47	0.00311	1.89E-07	0.95242915	1.89E-07	1.89E-07	1.38E-05	11.22	3.90E-04	2339.50
48	0.00302	1.83E-07	0.951417004	1.83E-07	1.83E-07	1.36E-05	11.37	3.87E-04	2324.30
49	0.00292	1.77E-07	0.950404858	1.77E-07	1.77E-07	1.34E-05	11.52	3.85E-04	2309.37
50	0.00284	1.72E-07	0.949392713	1.72E-07	1.72E-07	1.33E-05	11.67	3.82E-04	2294.69
51	0.00275	1.67E-07	0.948380567	1.67E-07	1.67E-07	1.31E-05	11.82	3.80E-04	2280.25
52	0.00267	1.62E-07	0.947368421	1.62E-07	1.62E-07	1.29E-05	11.97	3.78E-04	2266.05
53	0.0026	1.58E-07	0.946356275	1.58E-07	1.58E-07	1.28E-05	12.11	3.75E-04	2252.08
54	0.00253	1.53E-07	0.94534413	1.53E-07	1.53E-07	1.26E-05	12.26	3.73E-04	2238.33
55	0.00246	1.49E-07	0.944331984	1.49E-07	1.49E-07	1.25E-05	12.41	3.71E-04	2224.80
56	0.00239	1.45E-07	0.943319838	1.45E-07	1.45E-07	1.23E-05	12.55	3.69E-04	2211.47
57	0.00233	1.41E-07	0.942307692	1.41E-07	1.41E-07	1.22E-05	12.70	3.66E-04	2198.34
58	0.00227	1.38E-07	0.941295547	1.38E-07	1.38E-07	1.20E-05	12.85	3.64E-04	2185.41
59	0.00221	1.34E-07	0.940283401	1.34E-07	1.34E-07	1.19E-05	12.99	3.62E-04	2172.68
60	0.00216	1.31E-07	0.939271255	1.31E-07	1.31E-07	1.18E-05	13.13	3.60E-04	2160.12
61	0.00211	1.28E-07	0.938259109	1.28E-07	1.28E-07	1.17E-05	13.28	3.58E-04	2147.75

## Sprickor storleksordning 915-986

915	3.6E-05	2.20E-09	0.07388664	2.20E-09	1.50E-07	1033.75	15	8.60E-06	51.61
916	3.6E-05	2.20E-09	0.072874494	2.20E-09	1.48E-07	1049.16	15	8.48E-06	50.86
917	3.6E-05	2.20E-09	0.071862348	2.20E-09	1.45E-07	1065.01	15	8.35E-06	50.11
918	3.6E-05	2.19E-09	0.070850202	2.19E-09	1.43E-07	1081.32	15	8.23E-06	49.36
919	3.6E-05	2.19E-09	0.069838057	2.19E-09	1.41E-07	1098.12	15	8.10E-06	48.61
920	3.6E-05	2.18E-09	0.068825911	2.18E-09	1.39E-07	1115.41	15	7.98E-06	47.87
921	3.6E-05	2.18E-09	0.067813765	2.18E-09	1.37E-07	1133.23	15	7.85E-06	47.12
922	3.6E-05	2.18E-09	0.066801619	2.18E-09	1.34E-07	1151.59	15	7.73E-06	46.38
923	3.6E-05	2.17E-09	0.065789474	2.17E-09	1.32E-07	1170.53	15	7.61E-06	45.64
924	3.6E-05	2.17E-09	0.064777328	2.17E-09	1.30E-07	1190.07	15	7.48E-06	44.89
925	3.6E-05	2.17E-09	0.063765182	2.17E-09	1.28E-07	1210.24	15	7.36E-06	44.15
926	3.6E-05	2.16E-09	0.062753036	2.16E-09	1.26E-07	1231.07	15	7.24E-06	43.41
927	3.6E-05	2.16E-09	0.061740891	2.16E-09	1.24E-07	1252.59	15	7.11E-06	42.67
928	3.6E-05	2.16E-09	0.060728745	2.16E-09	1.21E-07	1274.85	15	6.99E-06	41.94
929	3.5E-05	2.15E-09	0.059716599	2.15E-09	1.19E-07	1297.87	15	6.87E-06	41.20
930	3.5E-05	2.15E-09	0.058704453	2.15E-09	1.17E-07	1321.70	15	6.74E-06	40.46
931	3.5E-05	2.15E-09	0.057692308	2.15E-09	1.15E-07	1346.38	15	6.62E-06	39.73
932	3.5E-05	2.14E-09	0.056680162	2.14E-09	1.13E-07	1371.96	15	6.50E-06	38.99
933	3.5E-05	2.14E-09	0.055668016	2.14E-09	1.11E-07	1398.48	15	6.38E-06	38.26
934	3.5E-05	2.14E-09	0.054655587	2.14E-09	1.09E-07	1426.01	15	6.25E-06	37.53
935	3.5E-05	2.13E-09	0.053643725	2.13E-09	1.06E-07	1454.59	15	6.13E-06	36.80
936	3.5E-05	2.13E-09	0.052631579	2.13E-09	1.04E-07	1484.29	15	6.01E-06	36.07
937	3.5E-05	2.13E-09	0.051619433	2.13E-09	1.02E-07	1515.19	15	5.89E-06	35.34
938	3.5E-05	2.12E-09	0.050607287	2.12E-09	1.00E-07	1547.34	15	5.77E-06	34.61
939	3.5E-05	2.12E-09	0.049595142	2.12E-09	9.79E-08	1580.83	15	5.65E-06	33.88
940	3.5E-05	2.12E-09	0.048582996	2.12E-09	9.58E-08	1615.75	15	5.53E-06	33.15
941	3.5E-05	2.11E-09	0.04757085	2.11E-09	9.37E-08	1652.18	15	5.40E-06	32.43
942	3.5E-05	2.11E-09	0.046558704	2.11E-09	9.16E-08	1690.24	15	5.28E-06	31.70
943	3.5E-05	2.11E-09	0.045546559	2.11E-09	8.95E-08	1730.02	15	5.16E-06	30.98
944	3.5E-05	2.10E-09	0.044534413	2.10E-09	8.74E-08	1771.66	15	5.04E-06	30.25
945	3.5E-05	2.10E-09	0.043522267	2.10E-09	8.53E-08	1815.27	15	4.92E-06	29.53
946	3.5E-05	2.10E-09	0.042510121	2.10E-09	8.32E-08	1861.02	15	4.80E-06	28.81
947	3.4E-05	2.09E-09	0.041497976	2.09E-09	8.11E-08	1909.05	15	4.68E-06	28.09
948	3.4E-05	2.09E-09	0.04048583	2.09E-09	7.90E-08	1959.54	15	4.56E-06	27.37
949	3.4E-05	2.09E-09	0.039473684	2.09E-09	7.69E-08	2012.69	15	4.44E-06	26.65
950	3.4E-05	2.08E-09	0.038461538	2.08E-09	7.48E-08	2068.72	15	4.32E-06	25.93
951	3.4E-05	2.08E-09	0.037449393	2.08E-09	7.27E-08	2127.85	15	4.20E-06	25.22
952	3.4E-05	2.08E-09	0.036437247	2.08E-09	7.07E-08	2190.37	15	4.08E-06	24.50
953	3.4E-05	2.07E-09	0.035425101	2.07E-09	6.86E-08	2256.56	15	3.96E-06	23.79
954	3.4E-05	2.07E-09	0.034412955	2.07E-09	6.65E-08	2326.76	15	3.85E-06	23.07
955	3.4E-05	2.07E-09	0.033400081	2.07E-09	6.44E-08	2401.35	15	3.73E-06	22.36
956	3.4E-05	2.06E-09	0.032388664	2.06E-09	6.24E-08	2480.75	15	3.61E-06	21.65
957	3.4E-05	2.06E-09	0.031376518	2.06E-09	6.03E-08	2565.45	15	3.49E-06	20.94
958	3.4E-05	2.06E-09	0.030364372	2.06E-09	5.83E-08	2655.98	15	3.37E-06	20.23
959	3.4E-05	2.05E-09	0.029352227	2.05E-09	5.62E-08	2752.99	15	3.25E-06	19.52
960	3.4E-05	2.05E-09	0.028340081	2.05E-09	5.42E-08	2857.17	15	3.13E-06	18.81
961	3.4E-05	2.05E-09	0.027327935	2.05E-09	5.21E-08	2969.37	15	3.02E-06	18.10
962	3.4E-05	2.04E-09	0.026315789	2.04E-09	5.01E-08	3090.55	15	2.90E-06	17.39
963	3.4E-05	2.04E-09	0.025303644	2.04E-09	4.80E-08	3221.83	15	2.78E-06	16.69
964	3.4E-05	2.04E-09	0.024291498	2.04E-09	4.60E-08	3364.52	15	2.66E-06	15.98
965	3.4E-05	2.03E-09	0.023279352	2.03E-09	4.40E-08	3520.18	15	2.55E-06	15.28
966	3.3E-05	2.03E-09	0.022267206	2.03E-09	4.19E-08	3690.66	15	2.43E-06	14.57
967	3.3E-05	2.03E-09	0.021255061	2.03E-09	3.99E-08	3878.19	15	2.31E-06	13.87
968	3.3E-05	2.02E-09	0.020242915	2.02E-09	3.79E-08	4085.47	15	2.19E-06	13.17
969	3.3E-05	2.02E-09	0.019230769	2.02E-09	3.59E-08	4315.77	15	2.08E-06	12.47
970	3.3E-05	2.02E-09	0.018218623	2.02E-09	3.38E-08	4573.17	15	1.96E-06	11.77
971	3.3E-05	2.02E-09	0.017206478	2.02E-09	3.18E-08	4862.74	15	1.84E-06	11.07
972	3.3E-05	2.01E-09	0.016194332	2.01E-09	2.98E-08	5190.92	15	1.73E-06	10.37
973	3.3E-05	2.01E-09	0.015182186	2.01E-09	2.78E-08	5565.98	15	1.61E-06	9.67
974	3.3E-05	2.01E-09	0.01417004	2.01E-09	2.58E-08	5998.74	15	1.50E-06	8.98
975	3.3E-05	2.00E-09	0.013157895	2.00E-09	2.38E-08	6503.63	15	1.38E-06	8.28
976	3.3E-05	2.00E-09	0.012145749	2.00E-09	2.18E-08	7100.31	15	1.26E-06	7.59
977	3.3E-05	2.00E-09	0.011133603	2.00E-09	1.98E-08	7816.33	15	1.15E-06	6.89
978	3.3E-05	1.99E-09	0.010121457	1.99E-09	1.78E-08	8691.47	15	1.03E-06	6.20
979	3.3E-05	1.99E-09	0.009109312	1.99E-09	1.58E-08	9785.38	15	9.18E-07	5.51
980	3.3E-05	1.99E-09	0.008097166	1.99E-09	1.38E-08	11191.85	15	8.03E-07	4.82
981	3.3E-05	1.98E-09	0.00708502	1.98E-09	1.18E-08	13067.13	15	6.88E-07	4.13
982	3.3E-05	1.98E-09	0.006072874	1.98E-09	9.86E-09	15692.53	15	5.73E-07	3.44
983	3.3E-05	1.98E-09	0.005060729	1.98E-09	7.88E-09	19630.62	15	4.58E-07	2.75
984	3.3E-05	1.98E-09	0.004048583	1.98E-09	5.91E-09	26194.10	15	3.43E-07	2.06
985	3.3E-05	1.97E-09	0.003036437	1.97E-09	3.94E-09	39321.06	15	2.29E-07	1.37
986	3.2E-05	1.97E-09	0.002024291	1.97E-09	1.97E-09	78701.92	15	1.14E-07	0.69

**Bilaga 4      II. Underlag för design av injektering mht ”jacking” och  
”back-flow”: Tillåtna tryckkombinationer ( $p_w$  och  $\Delta p$ ).**

## Bilaga 4.1

Injekteringstid: **20**, (30), 40 respektive 80 min  
 Injekteringsmedel: **B1** och B2 (Bingham)

### Penetration-Jacking-Backflow

Dimensioning hydraulic aperture	b [m]	0.0001	b [µm]	100
Grout properties	$\tau_0$ [Pa]	2		
	$\mu_g$ [Pas]	0.02		
Grouting time	t [min]	20		
Density of overburden	$\gamma_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2650		
Gravity	g	9.81		

### Grouting pressure $P_g = p_w + \Delta p$

$p_w$ [m]	$p_w$ [MPa]	$p_w + \Delta p$	$\Delta p$ [MPa]									
			0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.0	0.10	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
10	0.1	0.20	0.60	1.10	2.10	3.10	4.10	5.10	6.10	8.10	10.10	
20	0.2	0.30	0.70	1.20	2.20	3.20	4.20	5.20	6.20	8.20	10.20	
40	0.4	0.49	0.89	1.39	2.39	3.39	4.39	5.39	6.39	8.39	10.39	
60	0.6	0.69	1.09	1.59	2.59	3.59	4.59	5.59	6.59	8.59	10.59	
80	0.8	0.88	1.28	1.78	2.78	3.78	4.78	5.78	6.78	8.78	10.78	
100	1.0	1.08	1.48	1.98	2.98	3.98	4.98	5.98	6.98	8.98	10.98	
150	1.5	1.57	1.97	2.47	3.47	4.47	5.47	6.47	7.47	9.47	11.47	
200	2.0	2.06	2.46	2.96	3.96	4.96	5.96	6.96	7.96	9.96	11.96	
250	2.5	2.55	2.95	3.45	4.45	5.45	6.45	7.45	8.45	10.45	12.45	
300	2.9	3.04	3.44	3.94	4.94	5.94	6.94	7.94	8.94	10.94	12.94	
350	3.4	3.53	3.93	4.43	5.43	6.43	7.43	8.43	9.43	11.43	13.43	
450	4.4	4.51	4.91	5.41	6.41	7.41	8.41	9.41	10.41	12.41	14.41	

### Jacking

$$P_g \leq 3 \gamma_b g H - 2 p_w$$

H [m]	$p_w$ [MPa]	$3 \gamma_b g H - 2 p_w$	$\Delta p$ [MPa]									
			0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.1	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
20	0.2	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
40	0.4	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
60	0.6	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
80	0.8	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67
100	1.0	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84
150	1.5	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76
200	2.0	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67
250	2.5	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59
300	2.9	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51
350	3.4	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43
450	4.4	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27

### Back-flow

$$t_b > p_w / \Delta p$$

$p_w$ [MPa]	$p_w / \Delta p$	$\Delta p$ [MPa]										
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10	
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.98	0.20	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
0.2	1.96	0.39	0.20	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
0.4	3.92	0.78	0.39	0.20	0.13	0.10	0.08	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04
0.6	5.89	1.18	0.59	0.29	0.20	0.15	0.12	0.10	0.07	0.07	0.06	0.06
0.8	7.85	1.57	0.78	0.39	0.26	0.20	0.16	0.13	0.10	0.10	0.08	0.08
1.0	9.81	1.96	0.98	0.49	0.33	0.25	0.20	0.16	0.12	0.12	0.10	0.10
1.5	14.72	2.94	1.47	0.74	0.49	0.37	0.29	0.25	0.18	0.18	0.15	0.15
2.0	19.62	3.92	1.96	0.98	0.65	0.49	0.39	0.33	0.25	0.25	0.20	0.20
2.5	24.53	4.91	2.45	1.23	0.82	0.61	0.49	0.41	0.31	0.31	0.25	0.25
2.9	29.43	5.89	2.94	1.47	0.98	0.74	0.59	0.49	0.37	0.37	0.29	0.29
3.4	34.34	6.87	3.43	1.72	1.14	0.86	0.69	0.57	0.43	0.43	0.34	0.34
4.4	44.15	8.83	4.41	2.21	1.47	1.10	0.88	0.74	0.55	0.55	0.44	0.44

### Penetration, l [m]

$t_b$ [-]	0.40	0.08	0.04	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
$\phi_{b0}$ [-]	0.06	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_b$ [-]	0.43	0.22	0.16	0.11	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06	0.06	0.05	0.05
$l_{max}$ [m]	2.50	12.50	25.00	50.00	75.00	100.00	125.00	150.00	200.00	250.00		

$p_w$ [MPa]	l [m]	$\Delta p$ [MPa]										
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10	
0.0	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
0.1	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
0.2	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
0.4	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
0.6	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
0.8	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
1.0	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
1.5	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
2.0	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
2.5	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
2.9	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
3.4	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		
4.4	1.07	2.69	3.89	5.59	6.89	7.99	8.95	9.82	11.37	12.74		

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]										
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10	
0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	2.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
350	3.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Considering jacking and back-flow the following combinations of pressures are ok for the chosen fracture aperture and type of grout.

The penetration lengths can be identified above.

## Bilaga 4.2

Injekteringstid: 20, (30), **40** respektive 80 min  
 Injekteringsmedel: **B1** och B2 (Bingham)

### Penetration-Jacking-Backflow

Dimensioning hydraulic aperture	b [m]	0.0001	b [µm]	100
Grout properties	$\tau_0$ [Pa]	2		
	$\mu_g$ [Pas]	0.02		
Grouting time	t [min]	40		
Density of overburden	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2650		
Gravity	g	9.81		

### Grouting pressure $P_g = p_w + \Delta p$

$p_w$ [m]	$p_w$ [MPa]	$p_w + \Delta p$	$\Delta p$ [MPa]									
			0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.0	0.10	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
10	0.1	0.20	0.60	1.10	2.10	3.10	4.10	5.10	6.10	8.10	10.10	
20	0.2	0.30	0.70	1.20	2.20	3.20	4.20	5.20	6.20	8.20	10.20	
40	0.4	0.49	0.89	1.39	2.39	3.39	4.39	5.39	6.39	8.39	10.39	
60	0.6	0.69	1.09	1.59	2.59	3.59	4.59	5.59	6.59	8.59	10.59	
80	0.8	0.88	1.28	1.78	2.78	3.78	4.78	5.78	6.78	8.78	10.78	
100	1.0	1.08	1.48	1.98	2.98	3.98	4.98	5.98	6.98	8.98	10.98	
150	1.5	1.57	1.97	2.47	3.47	4.47	5.47	6.47	7.47	9.47	11.47	
200	2.0	2.06	2.46	2.96	3.96	4.96	5.96	6.96	7.96	9.96	11.96	
250	2.5	2.55	2.95	3.45	4.45	5.45	6.45	7.45	8.45	10.45	12.45	
300	2.9	3.04	3.44	3.94	4.94	5.94	6.94	7.94	8.94	10.94	12.94	
350	3.4	3.53	3.93	4.43	5.43	6.43	7.43	8.43	9.43	11.43	13.43	
450	4.4	4.51	4.91	5.41	6.41	7.41	8.41	9.41	10.41	12.41	14.41	

### Jacking

$$P_g \leq 3 \rho_b g H - 2 p_w$$

H [m]	$p_w$ [MPa]	$3 \rho_b g H - 2 p_w$	$\Delta p$ [MPa]									
			0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.1	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
20	0.2	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
40	0.4	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
60	0.6	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
80	0.8	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67
100	1.0	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84
150	1.5	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76
200	2.0	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67
250	2.5	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59
300	2.9	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51
350	3.4	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43
450	4.4	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27

### Back-flow

$$t_b > p_w / \Delta p$$

$p_w$ [MPa]	$p_w / \Delta p$	$\Delta p$ [MPa]										
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10	
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.98	0.20	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
0.2	1.96	0.39	0.20	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
0.4	3.92	0.78	0.39	0.20	0.13	0.10	0.08	0.07	0.05	0.05	0.04	0.04
0.6	5.89	1.18	0.59	0.29	0.20	0.15	0.12	0.10	0.07	0.07	0.06	0.06
0.8	7.85	1.57	0.78	0.39	0.26	0.20	0.16	0.13	0.10	0.10	0.08	0.08
1.0	9.81	1.96	0.98	0.49	0.33	0.25	0.20	0.16	0.12	0.12	0.10	0.10
1.5	14.72	2.94	1.47	0.74	0.49	0.37	0.29	0.25	0.18	0.18	0.15	0.15
2.0	19.62	3.92	1.96	0.98	0.65	0.49	0.39	0.33	0.25	0.25	0.20	0.20
2.5	24.53	4.91	2.45	1.23	0.82	0.61	0.49	0.41	0.31	0.31	0.25	0.25
2.9	29.43	5.89	2.94	1.47	0.98	0.74	0.59	0.49	0.37	0.37	0.29	0.29
3.4	34.34	6.87	3.43	1.72	1.14	0.86	0.69	0.57	0.43	0.43	0.34	0.34
4.4	44.15	8.83	4.41	2.21	1.47	1.10	0.88	0.74	0.55	0.55	0.44	0.44

### Penetration, l [m]

$t_b$ [-]	0.80	0.16	0.08	0.04	0.03	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
$\phi_b$ [-]	0.11	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$t_b$ [-]	0.55	0.29	0.22	0.16	0.13	0.11	0.10	0.09	0.08	0.07
$l_{max}$ [m]	2.50	12.50	25.00	50.00	75.00	100.00	125.00	150.00	200.00	250.00

$p_w$ [MPa]	l [m]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.0	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
0.1	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
0.2	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
0.4	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
0.6	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
0.8	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
1.0	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
1.5	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
2.0	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
2.5	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
2.9	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
3.4	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	
4.4	1.38	3.67	5.38	7.79	9.63	11.18	12.55	13.78	15.97	17.90	

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]										
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10	
0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	2.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
350	3.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Considering jacking and back-flow the following combinations of pressures are ok for the chosen fracture aperture and type of grout.

The penetration lengths can be identified above.



# Bilaga 4.3

Injekteringstid: 20, (30), 40 respektive **80 min**  
 Injekteringsmedel: **B1** och B2 (Bingham)

### Penetration-Jacking-Backflow

Dimensioning hydraulic aperture	b [m]	0.0001	b [µm]	100
Grout properties	$\tau_0$ [Pa]	2		
	$\mu_0$ [Pas]	0.02		
Grouting time	t [min]	80		
Density of overburden	$\rho_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2650		
Gravity	g	9.81		

### Grouting pressure $P_g = p_w + \Delta p$

$p_w$ [m]	$p_w$ [MPa]	$p_w + \Delta p$	$\Delta p$ [MPa]									
			0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.0	0.10	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
10	0.1	0.20	0.60	1.10	2.10	3.10	4.10	5.10	6.10	8.10	10.10	
20	0.2	0.30	0.70	1.20	2.20	3.20	4.20	5.20	6.20	8.20	10.20	
40	0.4	0.49	0.89	1.39	2.39	3.39	4.39	5.39	6.39	8.39	10.39	
60	0.6	0.69	1.09	1.59	2.59	3.59	4.59	5.59	6.59	8.59	10.59	
80	0.8	0.88	1.28	1.78	2.78	3.78	4.78	5.78	6.78	8.78	10.78	
100	1.0	1.08	1.48	1.98	2.98	3.98	4.98	5.98	6.98	8.98	10.98	
150	1.5	1.57	1.97	2.47	3.47	4.47	5.47	6.47	7.47	9.47	11.47	
200	2.0	2.06	2.46	2.96	3.96	4.96	5.96	6.96	7.96	9.96	11.96	
250	2.5	2.55	2.95	3.45	4.45	5.45	6.45	7.45	8.45	10.45	12.45	
300	2.9	3.04	3.44	3.94	4.94	5.94	6.94	7.94	8.94	10.94	12.94	
350	3.4	3.53	3.93	4.43	5.43	6.43	7.43	8.43	9.43	11.43	13.43	
450	4.4	4.51	4.91	5.41	6.41	7.41	8.41	9.41	10.41	12.41	14.41	

### Jacking

$$P_g \leq 3 \rho_b g H - 2 p_w$$

H [m]	$p_w$ [MPa]	$3 \rho_b g H - 2 p_w$	$\Delta p$ [MPa]									
			0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.1	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
20	0.2	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
40	0.4	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
60	0.6	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
80	0.8	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67
100	1.0	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84
150	1.5	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76
200	2.0	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67
250	2.5	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59
300	2.9	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51
350	3.4	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43
450	4.4	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27

### Back-flow

$$i_b > p_w / \Delta p$$

$p_w$ [MPa]	$p_w / \Delta p$	$\Delta p$ [MPa]										
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10	
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.98	0.20	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
0.2	1.96	0.39	0.20	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02
0.4	3.92	0.78	0.39	0.20	0.13	0.10	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04
0.6	5.89	1.18	0.59	0.29	0.20	0.15	0.12	0.10	0.07	0.06	0.06	0.06
0.8	7.85	1.57	0.78	0.39	0.26	0.20	0.16	0.13	0.10	0.08	0.08	0.08
1.0	9.81	1.96	0.98	0.49	0.33	0.25	0.20	0.16	0.12	0.10	0.10	0.10
1.5	14.72	2.94	1.47	0.74	0.49	0.37	0.29	0.25	0.18	0.15	0.15	0.15
2.0	19.62	3.92	1.96	0.98	0.65	0.49	0.39	0.33	0.25	0.20	0.20	0.20
2.5	24.53	4.91	2.45	1.23	0.82	0.61	0.49	0.41	0.31	0.25	0.25	0.25
2.9	29.43	5.89	2.94	1.47	0.98	0.74	0.59	0.49	0.37	0.29	0.29	0.29
3.4	34.34	6.87	3.43	1.72	1.14	0.86	0.69	0.57	0.43	0.34	0.34	0.34
4.4	44.15	8.83	4.41	2.21	1.47	1.10	0.88	0.74	0.55	0.44	0.44	0.44

### Penetration, l [m]

$t_b$ [-]	1.60	0.32	0.16	0.08	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
$\phi_b$ [-]	0.17	0.05	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
$i_b$ [-]	0.68	0.39	0.29	0.22	0.18	0.16	0.14	0.13	0.11	0.10
$l_{max}$ [m]	2.50	12.50	25.00	50.00	75.00	100.00	125.00	150.00	200.00	250.00

$p_w$ [MPa]	l [m]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.0	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
0.1	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
0.2	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
0.4	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
0.6	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
0.8	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
1.0	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
1.5	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
2.0	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
2.5	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
2.9	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
3.4	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	
4.4	1.70	4.92	7.35	10.77	13.38	15.58	17.51	19.26	22.36	25.10	

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]										
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10	
0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0.2	-	OK	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	1.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
150	1.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
200	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
250	2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
300	2.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
350	3.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
450	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Considering jacking and back-flow the following combinations of pressures are ok for the chosen fracture aperture and type of grout.

The penetration lengths can be identified above.

# Bilaga 4.4

Injekteringstid: 20, (30), 40 respektive 80 min  
 Injekteringsmedel: B1 och B2 (Bingham)

### Penetration-Jacking-Backflow

Dimensioning hydraulic aperture	b [m]	0.0001	b [µm]	100
Grout properties	$\tau_0$ [Pa]	13		
	$\mu_0$ [Pas]	0.01		
Grouting time	t [min]	20		
Density of overburden	$\gamma_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2650		
Gravity	g	9.81		

### Grouting pressure $P_g = p_w + \Delta p$

$p_w$ [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.10	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
10	0.1	0.20	0.60	1.10	2.10	3.10	4.10	5.10	6.10	8.10	10.10
20	0.2	0.30	0.70	1.20	2.20	3.20	4.20	5.20	6.20	8.20	10.20
40	0.4	0.49	0.89	1.39	2.39	3.39	4.39	5.39	6.39	8.39	10.39
60	0.6	0.69	1.09	1.59	2.59	3.59	4.59	5.59	6.59	8.59	10.59
80	0.8	0.88	1.28	1.78	2.78	3.78	4.78	5.78	6.78	8.78	10.78
100	1.0	1.08	1.48	1.98	2.98	3.98	4.98	5.98	6.98	8.98	10.98
150	1.5	1.57	1.97	2.47	3.47	4.47	5.47	6.47	7.47	9.47	11.47
200	2.0	2.06	2.46	2.96	3.96	4.96	5.96	6.96	7.96	9.96	11.96
250	2.5	2.55	2.95	3.45	4.45	5.45	6.45	7.45	8.45	10.45	12.45
300	2.9	3.04	3.44	3.94	4.94	5.94	6.94	7.94	8.94	10.94	12.94
350	3.4	3.53	3.93	4.43	5.43	6.43	7.43	8.43	9.43	11.43	13.43
450	4.4	4.51	4.91	5.41	6.41	7.41	8.41	9.41	10.41	12.41	14.41

### Jacking

$$P_g \leq 3 \gamma_b g H - 2 p_w$$

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.1	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
20	0.2	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
40	0.4	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
60	0.6	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
80	0.8	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67
100	1.0	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84
150	1.5	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76
200	2.0	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67
250	2.5	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59
300	2.9	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51
350	3.4	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43
450	4.4	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27

### Back-flow

$$t_b > p_w / \Delta p$$

$p_w$ [MPa]	$p_w / \Delta p$	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.98	0.20	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
0.2	1.96	0.39	0.20	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
0.4	3.92	0.78	0.39	0.20	0.13	0.10	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04
0.6	5.89	1.18	0.59	0.29	0.20	0.15	0.12	0.10	0.07	0.06	0.06
0.8	7.85	1.57	0.78	0.39	0.26	0.20	0.16	0.13	0.10	0.08	0.08
1.0	9.81	1.96	0.98	0.49	0.33	0.25	0.20	0.16	0.12	0.10	0.10
1.5	14.72	2.94	1.47	0.74	0.49	0.37	0.29	0.25	0.18	0.15	0.15
2.0	19.62	3.92	1.96	0.98	0.65	0.49	0.39	0.33	0.25	0.20	0.20
2.5	24.53	4.91	2.45	1.23	0.82	0.61	0.49	0.41	0.31	0.25	0.25
2.9	29.43	5.89	2.94	1.47	0.98	0.74	0.59	0.49	0.37	0.29	0.29
3.4	34.34	6.87	3.43	1.72	1.14	0.86	0.69	0.57	0.43	0.34	0.34
4.4	44.15	8.83	4.41	2.21	1.47	1.10	0.88	0.74	0.55	0.44	0.44

### Penetration, l [m]

$t_b$ [-]	33.80	6.76	3.38	1.69	1.13	0.85	0.68	0.56	0.42	0.34
$\phi_b$ [-]	0.46	0.35	0.26	0.18	0.14	0.11	0.09	0.08	0.06	0.05
$t_b$ [-]	0.97	0.88	0.80	0.69	0.61	0.56	0.52	0.49	0.44	0.40
$l_{max}$ [m]	0.38	1.92	3.85	7.69	11.54	15.38	19.23	23.08	30.77	38.46

$p_w$ [MPa]	l [m]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.0	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
0.1	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
0.2	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
0.4	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
0.6	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
0.8	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
1.0	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
1.5	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
2.0	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
2.5	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
2.9	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
3.4	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	
4.4	0.37	1.69	3.07	5.29	7.10	8.65	10.03	11.28	13.51	15.47	

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0.2	-	OK	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0.4	-	OK	OK	-	-	-	-	-	-	-
60	0.6	-	-	OK	OK	-	-	-	-	-	-
80	0.8	-	-	OK	OK	OK	-	-	-	-	-
100	1.0	-	-	OK	OK	OK	OK	-	-	-	-
150	1.5	-	-	-	-	OK	OK	OK	-	-	-
200	2.0	-	-	-	-	-	OK	OK	OK	OK	-
250	2.5	-	-	-	-	-	-	OK	OK	OK	OK
300	2.9	-	-	-	-	-	-	-	OK	OK	OK
350	3.4	-	-	-	-	-	-	-	-	OK	OK
450	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Considering jacking and back-flow the following combinations of pressures are ok for the chosen fracture aperture and type of grout.

The penetration lengths can be identified above.

# Bilaga 4.5

Injekteringstid: 20, (30), 40 respektive 80 min  
 Injekteringsmedel: B1 och B2 (Bingham)

## Penetration-Jacking-Backflow

Dimensioning hydraulic aperture	b [m]	0.0001	b [µm]	100
Grout properties	$\tau_0$ [Pa]	13		
	$\mu_0$ [Pas]	0.01		
Grouting time	t [min]	30		
Density of overburden	$\gamma_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2650		
Gravity	g	9.81		

## Grouting pressure $P_g = p_w + \Delta p$

$p_w$ [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.10	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
10	0.1	0.20	0.60	1.10	2.10	3.10	4.10	5.10	6.10	8.10	10.10
20	0.2	0.30	0.70	1.20	2.20	3.20	4.20	5.20	6.20	8.20	10.20
40	0.4	0.49	0.89	1.39	2.39	3.39	4.39	5.39	6.39	8.39	10.39
60	0.6	0.69	1.09	1.59	2.59	3.59	4.59	5.59	6.59	8.59	10.59
80	0.8	0.88	1.28	1.78	2.78	3.78	4.78	5.78	6.78	8.78	10.78
100	1.0	1.08	1.48	1.98	2.98	3.98	4.98	5.98	6.98	8.98	10.98
150	1.5	1.57	1.97	2.47	3.47	4.47	5.47	6.47	7.47	9.47	11.47
200	2.0	2.06	2.46	2.96	3.96	4.96	5.96	6.96	7.96	9.96	11.96
250	2.5	2.55	2.95	3.45	4.45	5.45	6.45	7.45	8.45	10.45	12.45
300	2.9	3.04	3.44	3.94	4.94	5.94	6.94	7.94	8.94	10.94	12.94
350	3.4	3.53	3.93	4.43	5.43	6.43	7.43	8.43	9.43	11.43	13.43
450	4.4	4.51	4.91	5.41	6.41	7.41	8.41	9.41	10.41	12.41	14.41

## Jacking

$$P_g \leq 3 \gamma_b g H - 2 p_w$$

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.1	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
20	0.2	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
40	0.4	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
60	0.6	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
80	0.8	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67
100	1.0	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84
150	1.5	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76
200	2.0	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67
250	2.5	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59
300	2.9	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51
350	3.4	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43
450	4.4	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27

## Back-flow

$$t_b > p_w / \Delta p$$

$p_w$ [MPa]	$p_w / \Delta p$	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.98	0.20	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
0.2	1.96	0.39	0.20	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	0.02	0.02	0.02
0.4	3.92	0.78	0.39	0.20	0.13	0.10	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04
0.6	5.89	1.18	0.59	0.29	0.20	0.15	0.12	0.10	0.07	0.06	0.06
0.8	7.85	1.57	0.78	0.39	0.26	0.20	0.16	0.13	0.10	0.08	0.08
1.0	9.81	1.96	0.98	0.49	0.33	0.25	0.20	0.16	0.12	0.10	0.10
1.5	14.72	2.94	1.47	0.74	0.49	0.37	0.29	0.25	0.18	0.15	0.15
2.0	19.62	3.92	1.96	0.98	0.65	0.49	0.39	0.33	0.25	0.20	0.20
2.5	24.53	4.91	2.45	1.23	0.82	0.61	0.49	0.41	0.31	0.25	0.25
2.9	29.43	5.89	2.94	1.47	0.98	0.74	0.59	0.49	0.37	0.29	0.29
3.4	34.34	6.87	3.43	1.72	1.14	0.86	0.69	0.57	0.43	0.34	0.34
4.4	44.15	8.83	4.41	2.21	1.47	1.10	0.88	0.74	0.55	0.44	0.44

## Penetration, l [m]

$t_b$ [-]	50.70	10.14	5.07	2.54	1.69	1.27	1.01	0.85	0.63	0.51
$\phi_b$ [-]	0.47	0.39	0.31	0.23	0.18	0.15	0.13	0.11	0.09	0.07
$t_b$ [-]	0.98	0.92	0.85	0.76	0.69	0.64	0.60	0.56	0.51	0.47
$l_{max}$ [m]	0.38	1.92	3.85	7.69	11.54	15.38	19.23	23.08	30.77	38.46

$p_w$ [MPa]	l [m]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.0	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
0.1	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
0.2	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
0.4	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
0.6	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
0.8	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
1.0	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
1.5	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
2.0	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
2.5	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
2.9	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
3.4	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09
4.4	0.38	1.76	3.27	5.81	7.93	9.79	11.45	12.97	15.69	18.09	18.09

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0.2	-	OK	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0.4	-	OK	OK	-	-	-	-	-	-	-
60	0.6	-	-	OK	OK	-	-	-	-	-	-
80	0.8	-	-	OK	OK	OK	-	-	-	-	-
100	1.0	-	-	-	OK	OK	OK	-	-	-	-
150	1.5	-	-	-	OK	OK	OK	OK	-	-	-
200	2.0	-	-	-	-	OK	OK	OK	OK	-	-
250	2.5	-	-	-	-	-	OK	OK	OK	OK	-
300	2.9	-	-	-	-	-	-	OK	OK	OK	OK
350	3.4	-	-	-	-	-	-	-	OK	OK	OK
450	4.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	OK

Considering jacking and back-flow the following combinations of pressures are ok for the chosen fracture aperture and type of grout.

The penetration lengths can be identified above.

## Bilaga 4.6

Injekteringstid: 20, (30), **40** respektive 80 min  
 Injekteringsmedel: B1 och **B2** (Bingham)

### Penetration-Jacking-Backflow

Dimensioning hydraulic aperture	b [m]	0.0001	b [µm]	100
Grout properties	$\tau_0$ [Pa]	13		
	$\mu_g$ [Pas]	0.01		
Grouting time	t [min]	40		
Density of overburden	$\gamma_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2650		
Gravity	g	9.81		

### Grouting pressure $P_g = p_w + \Delta p$

$p_w$ [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.10	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
10	0.1	0.20	0.60	1.10	2.10	3.10	4.10	5.10	6.10	8.10	10.10
20	0.2	0.30	0.70	1.20	2.20	3.20	4.20	5.20	6.20	8.20	10.20
40	0.4	0.49	0.89	1.39	2.39	3.39	4.39	5.39	6.39	8.39	10.39
60	0.6	0.69	1.09	1.59	2.59	3.59	4.59	5.59	6.59	8.59	10.59
80	0.8	0.88	1.28	1.78	2.78	3.78	4.78	5.78	6.78	8.78	10.78
100	1.0	1.08	1.48	1.98	2.98	3.98	4.98	5.98	6.98	8.98	10.98
150	1.5	1.57	1.97	2.47	3.47	4.47	5.47	6.47	7.47	9.47	11.47
200	2.0	2.06	2.46	2.96	3.96	4.96	5.96	6.96	7.96	9.96	11.96
250	2.5	2.55	2.95	3.45	4.45	5.45	6.45	7.45	8.45	10.45	12.45
300	2.9	3.04	3.44	3.94	4.94	5.94	6.94	7.94	8.94	10.94	12.94
350	3.4	3.53	3.93	4.43	5.43	6.43	7.43	8.43	9.43	11.43	13.43
450	4.4	4.51	4.91	5.41	6.41	7.41	8.41	9.41	10.41	12.41	14.41

### Jacking

$$P_g \leq 3\gamma_b g H - 2p_w$$

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.1	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
20	0.2	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
40	0.4	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
60	0.6	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
80	0.8	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67
100	1.0	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84
150	1.5	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76
200	2.0	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67
250	2.5	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59
300	2.9	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51
350	3.4	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43
450	4.4	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27

### Back-flow

$$l_b > p_w / \Delta p$$

$p_w$ [MPa]	$p_w / \Delta p$	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.98	0.20	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
0.2	1.96	0.39	0.20	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
0.4	3.92	0.78	0.39	0.20	0.13	0.10	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04
0.6	5.89	1.18	0.59	0.29	0.20	0.15	0.12	0.10	0.07	0.06	0.06
0.8	7.85	1.57	0.78	0.39	0.26	0.20	0.16	0.13	0.10	0.08	0.08
1.0	9.81	1.96	0.98	0.49	0.33	0.25	0.20	0.16	0.12	0.10	0.10
1.5	14.72	2.94	1.47	0.74	0.49	0.37	0.29	0.25	0.18	0.15	0.15
2.0	19.62	3.92	1.96	0.98	0.65	0.49	0.39	0.33	0.25	0.20	0.20
2.5	24.53	4.91	2.45	1.23	0.82	0.61	0.49	0.41	0.31	0.25	0.25
2.9	29.43	5.89	2.94	1.47	0.98	0.74	0.59	0.49	0.37	0.29	0.29
3.4	34.34	6.87	3.43	1.72	1.14	0.86	0.69	0.57	0.43	0.34	0.34
4.4	44.15	8.83	4.41	2.21	1.47	1.10	0.88	0.74	0.55	0.44	0.44

### Penetration, l [m]

$t_b$ [-]	67.60	13.52	6.76	3.38	2.25	1.69	1.35	1.13	0.85	0.68
$\phi_b$ [-]	0.48	0.41	0.35	0.26	0.21	0.18	0.16	0.14	0.11	0.09
$l_b$ [-]	0.99	0.93	0.88	0.80	0.74	0.69	0.65	0.61	0.56	0.52
$l_{max}$ [m]	0.38	1.92	3.85	7.69	11.54	15.38	19.23	23.08	30.77	38.46

$p_w$ [MPa]	l [m]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.0	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
0.1	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
0.2	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
0.4	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
0.6	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
0.8	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
1.0	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
1.5	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
2.0	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
2.5	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
2.9	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
3.4	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06
4.4	0.38	1.80	3.39	6.14	8.50	10.58	12.46	14.19	17.30	20.06	20.06

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.1	OK	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0.2	-	OK	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0.4	-	OK	OK	-	-	-	-	-	-	-
60	0.6	-	OK	OK	OK	-	-	-	-	-	-
80	0.8	-	OK	OK	OK	OK	-	-	-	-	-
100	1.0	-	OK	OK	OK	OK	OK	-	-	-	-
150	1.5	-	OK	OK	OK	OK	OK	OK	-	-	-
200	2.0	-	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	-	-
250	2.5	-	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	-
300	2.9	-	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
350	3.4	-	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK
450	4.4	-	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK

Considering jacking and back-flow the following combinations of pressures are ok for the chosen fracture aperture and type of grout.

The penetration lengths can be identified above.

## Bilaga 4.7

Injekteringstid: 20, (30), 40 respektive **80 min**  
 Injekteringsmedel: B1 och **B2** (Bingham)

### Penetration-Jacking-Backflow

Dimensioning hydraulic aperture	b [m]	0.0001	b [µm]	100
Grout properties	$\tau_0$ [Pa]	13		
	$\mu_0$ [Pas]	0.01		
Grouting time	t [min]	80		
Density of overburden	$\gamma_b$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2650		
Gravity	g	9.81		

### Grouting pressure $P_g = p_w + \Delta p$

$p_w$ [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.10	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	8.00	10.00
10	0.1	0.20	0.60	1.10	2.10	3.10	4.10	5.10	6.10	8.10	10.10
20	0.2	0.30	0.70	1.20	2.20	3.20	4.20	5.20	6.20	8.20	10.20
40	0.4	0.49	0.89	1.39	2.39	3.39	4.39	5.39	6.39	8.39	10.39
60	0.6	0.69	1.09	1.59	2.59	3.59	4.59	5.59	6.59	8.59	10.59
80	0.8	0.88	1.28	1.78	2.78	3.78	4.78	5.78	6.78	8.78	10.78
100	1.0	1.08	1.48	1.98	2.98	3.98	4.98	5.98	6.98	8.98	10.98
150	1.5	1.57	1.97	2.47	3.47	4.47	5.47	6.47	7.47	9.47	11.47
200	2.0	2.06	2.46	2.96	3.96	4.96	5.96	6.96	7.96	9.96	11.96
250	2.5	2.55	2.95	3.45	4.45	5.45	6.45	7.45	8.45	10.45	12.45
300	2.9	3.04	3.44	3.94	4.94	5.94	6.94	7.94	8.94	10.94	12.94
350	3.4	3.53	3.93	4.43	5.43	6.43	7.43	8.43	9.43	11.43	13.43
450	4.4	4.51	4.91	5.41	6.41	7.41	8.41	9.41	10.41	12.41	14.41

### Jacking

$$P_g \leq 3\gamma_b g H - 2p_w$$

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.1	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
20	0.2	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
40	0.4	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33	2.33
60	0.6	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
80	0.8	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67	4.67
100	1.0	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84	5.84
150	1.5	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76	8.76
200	2.0	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67	11.67
250	2.5	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59
300	2.9	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51	17.51
350	3.4	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43	20.43
450	4.4	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27	26.27

### Back-flow

$$l_b > p_w / \Delta p$$

$p_w$ [MPa]	$p_w / \Delta p$	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.1	0.98	0.20	0.10	0.05	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
0.2	1.96	0.39	0.20	0.10	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
0.4	3.92	0.78	0.39	0.20	0.13	0.10	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04
0.6	5.89	1.18	0.59	0.29	0.20	0.15	0.12	0.10	0.07	0.06	0.06
0.8	7.85	1.57	0.78	0.39	0.26	0.20	0.16	0.13	0.10	0.08	0.08
1.0	9.81	1.96	0.98	0.49	0.33	0.25	0.20	0.16	0.12	0.10	0.10
1.5	14.72	2.94	1.47	0.74	0.49	0.37	0.29	0.25	0.18	0.15	0.15
2.0	19.62	3.92	1.96	0.98	0.65	0.49	0.39	0.33	0.25	0.20	0.20
2.5	24.53	4.91	2.45	1.23	0.82	0.61	0.49	0.41	0.31	0.25	0.25
2.9	29.43	5.89	2.94	1.47	0.98	0.74	0.59	0.49	0.37	0.29	0.29
3.4	34.34	6.87	3.43	1.72	1.14	0.86	0.69	0.57	0.43	0.34	0.34
4.4	44.15	8.83	4.41	2.21	1.47	1.10	0.88	0.74	0.55	0.44	0.44

### Penetration, l [m]

$t_0$ [-]	135.20	27.04	13.52	6.76	4.51	3.38	2.70	2.25	1.69	1.35
$\phi_0$ [-]	0.49	0.45	0.41	0.35	0.30	0.26	0.24	0.21	0.18	0.16
$l_b$ [-]	0.99	0.97	0.93	0.88	0.84	0.80	0.77	0.74	0.69	0.65
$l_{max}$ [m]	0.38	1.92	3.85	7.69	11.54	15.38	19.23	23.08	30.77	38.46

$p_w$ [MPa]	l [m]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0.0	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
0.1	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
0.2	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
0.4	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
0.6	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
0.8	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
1.0	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
1.5	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
2.0	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
2.5	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
2.9	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
3.4	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	
4.4	0.38	1.86	3.59	6.77	9.65	12.28	14.71	16.99	21.16	24.93	

H [m]	$p_w$ [MPa]	$\Delta p$ [MPa]									
		0.1	0.5	1	2	3	4	5	6	8	10
0	0.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0.1	OK	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0.2	-	OK	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0.4	-	OK	OK	-	-	-	-	-	-	-
60	0.6	-	-	OK	OK	-	-	-	-	-	-
80	0.8	-	-	OK	OK	OK	-	-	-	-	-
100	1.0	-	-	-	OK	OK	OK	-	-	-	-
150	1.5	-	-	-	OK	OK	OK	OK	-	-	-
200	2.0	-	-	-	-	OK	OK	OK	OK	-	-
250	2.5	-	-	-	-	OK	OK	OK	OK	OK	-
300	2.9	-	-	-	-	-	OK	OK	OK	OK	OK
350	3.4	-	-	-	-	-	-	OK	OK	OK	OK
450	4.4	-	-	-	-	-	-	-	OK	OK	OK

Considering jacking and back-flow the following combinations of pressures are ok for the chosen fracture aperture and type of grout.

The penetration lengths can be identified above.

**Bilaga 5      II. Underlag för design av injektering: Skärmgeometri**

*5.1 KA3376B01*

*5.2 KB971*

*5.3 NV01*

## Bilaga 5.1 KA3376B01

### II: Underlag för design av injektering: Skärmgeometri

Kärnborrhål: KA3376B01

#### Bingham\_B1

Djup (m)	bmin (mm)	bmin (µm)	τ <sub>0</sub> (Pa)	H <sub>g</sub> (Pas)	Injekteringstid (min)	Δp (MPa)	Kommentar	Imax (m)	t <sub>0</sub> (min)	tD (-)	ϕ1D (-)	ϕ2D (-)	ID(1D) (-)	ID(2D) (-)	Tunnelradie		Antal hål
															I (1D) (m)	I (2D) (m)	
b <sub>dim,bing.</sub>	20	0.1	100	2	0.02	20	-	-	-	-	-	-	-	-	4.0	3.0	44.0
	20	0.1	100	2	0.02	40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	20	0.1	100	2	0.02	80	Deform. alt. Aterfl.	12.50	250.00	0.32	0.17	4.82E-02	0.68	0.39	8.5	4.9	9
b <sub>max,ikh</sub>	20	0.128	128	2	0.02	80	> Δp Deform. < Δp Aterfl. som ovan	16.00	250.00	0.32	0.17	4.82E-02	0.68	0.39	10.8	6.3	7
	450	0.1	100	2	0.02	20	Aterflöde	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	450	0.1	100	2	0.02	40	Aterflöde	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	450	0.1	100	2	0.02	80	Aterflöde	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

#### Bingham\_B2

bmin (mm)	bmin (µm)	τ <sub>0</sub> (Pa)	H <sub>g</sub> (Pas)	Injekteringstid (min)	Δp (MPa)	Kommentar	Imax (m)	t <sub>0</sub> (min)	tD (-)	ϕ1D (-)	ϕ2D (-)	ID(1D) (-)	ID(2D) (-)	Tunnelradie		Antal hål	
														I (1D) (m)	I (2D) (m)		
b <sub>dim,bing.</sub>	20	0.1	100	13	0.01	20	> Δp Deform. < Δp Aterfl.	1.92	2.96	6.76	0.46	0.35	0.97	0.88	1.9	1.7	26
	20	0.1	100	13	0.01	40	> Δp Deform. < Δp Aterfl.	1.92	2.96	13.52	0.48	0.41	0.99	0.93	1.9	1.8	24
	20	0.1	100	13	0.01	80	> Δp Deform. < Δp Aterfl.	1.92	2.96	27.04	0.49	0.45	0.99	0.97	1.9	1.9	24
b <sub>max,ikh</sub>	20	0.128	128	13	0.01	20	> Δp Deform. < Δp Aterfl.	2.46	2.96	6.76	0.46	0.35	0.97	0.88	2.4	2.2	20
	450	0.1	100	13	0.01	20	Aterflöde	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	450	0.1	100	13	0.01	30	< Δp Aterfl.	38.46	59.17	0.51	0.23	0.07	0.76	0.47	29.0	18.1	2
	450	0.1	100	13	0.01	40	Δp: 8 & 10 MPa OK	30.77	47.34	0.85	0.29	0.11	0.83	0.56	25.5	17.3	3
	450	0.1	100	13	0.01	40	Δp: 8 & 10 MPa OK	38.46	59.17	0.68	0.26	0.09	0.80	0.52	30.7	20.1	2
	450	0.1	100	13	0.01	80	Δp: 6, 8 & 10 MPa OK	23.08	35.50	2.25	0.39	0.21	0.92	0.74	21.3	17.0	3
b <sub>max,ikh</sub>	450	0.128	128	13	0.01	30	< Δp Aterfl.	49.23	59.17	0.51	0.23	0.07	0.76	0.47	37.2	23.2	2

#### Newton\_N

bmin (mm)	bmin (µm)	Geltid (min)	H <sub>g</sub> (Pas)	Injekteringstid (min)	Δp (MPa)	Kommentar	rw (m)	t <sub>0</sub> (min)	tD (-)	ID-2D (-)	I (2D) (m)	Antal hål
	20	0.041	41	13.3	0.005	20	0.027	8.7	1.53	0.88	2.4	19
b <sub>dim,New.</sub>	450	0.016	16	13.3	0.005	20	0.027	284.8	0.05	0.15	0.4	107
	450	0.016	16	13.3	0.005	20	0.027	57.0	0.23	0.34	0.9	48
	450	0.016	16	13.3	0.005	20	0.027	28.5	0.47	0.48	1.3	34
	450	0.016	16	13.3	0.005	20	0.027	5.7	2.34	1.08	2.9	15
	450	0.016	16	13.3	0.005	20	0.027	3.6	3.74	1.37	3.7	12
b <sub>max,ikh</sub>	450	0.016	16	13.3	0.005	20	0.027	2.8	4.67	1.53	4.1	11

## Bilaga 5.2 KB971

### II: Underlag för design av injektering: Skärmgeometri

Kärnbrädd: KB971

#### Bingham\_B1

Djup (m)	bmin (mm)	τ <sub>0</sub> (Pa)	μ <sub>g</sub> (Pas)	Injekteringstid (min)	Δp (MPa)	Kommentar	Tunnelradie				Antal hål					
							Imax (m)	t0 (min)	tD (-)	θ1D (-)		θ2D (-)	ID(1D) (m)	ID(2D) (m)	I (1D) (m)	I (2D) (m)
b <sub>dim,äng.</sub>	20	0.1	100	20	-		12.50	250.00	0.32	0.17	4.82E-02	0.68	0.39	8.5	4.9	9
b <sub>max,kbh</sub>	20	0.1	100	40	-	Deform. alt. Aterfl.	63.75	250.00	0.32	0.17	4.82E-02	0.68	0.39	43.2	25.1	2
	20	0.1	100	80	0.5	Deform. alt. Aterfl.										
	20	0.1	100	80	0.5	> Δp Deform. < Δp Aterfl. som ovan										
	450	0.1	100	20	-	Aterflöde										
	450	0.1	100	40	-	Aterflöde										
	450	0.1	100	80	-	Aterflöde										

#### Bingham\_B2

Djup (m)	bmin (mm)	τ <sub>0</sub> (Pa)	μ <sub>g</sub> (Pas)	Injekteringstid (min)	Δp (MPa)	Kommentar	Tunnelradie				Antal hål					
							Imax (m)	t0 (min)	tD (-)	θ1D (-)		θ2D (-)	ID(1D) (m)	ID(2D) (m)	I (1D) (m)	I (2D) (m)
b <sub>dim,äng.</sub>	20	0.1	100	20	0.5	> Δp Deform. < Δp Aterfl.	1.92	2.96	6.76	0.46	0.35	0.97	0.88	1.9	1.7	26
	20	0.1	100	40	0.5	> Δp Deform. < Δp Aterfl.	1.92	2.96	13.52	0.48	0.41	0.99	0.93	1.9	1.8	24
	20	0.1	100	80	0.5	> Δp Deform. < Δp Aterfl.	1.92	2.96	27.04	0.49	0.45	0.99	0.97	1.9	1.9	24
b <sub>max,kbh</sub>	20	0.51	510	20	0.5	> Δp Deform. < Δp Aterfl.	9.81	2.96	6.76	0.46	0.35	0.97	0.88	9.5	8.6	5
	450	0.1	100	20	-	Aterflöde										
	450	0.1	100	30	10	< Δp Aterfl.	38.46	59.17	0.51	0.23	0.07	0.76	0.47	29.0	18.1	2
	450	0.1	100	40	8	Δp: 8 & 10 MPa OK	30.77	47.34	0.85	0.29	0.11	0.83	0.56	25.5	17.3	3
	450	0.1	100	40	10	Δp: 8 & 10 MPa OK	38.46	59.17	0.68	0.26	0.09	0.80	0.52	30.7	20.1	2
	450	0.1	100	80	6	Δp: 6, 8 & 10 MPa OK	23.08	35.50	2.25	0.39	0.21	0.92	0.74	21.3	17.0	3
b <sub>max,kbh</sub>	450	0.51	510	30	10	< Δp Aterfl.	196.2	59.17	0.51	0.23	0.07	0.76	0.47	148.1	92.2	0

#### Newton\_N

Djup (m)	bmin (mm)	τ <sub>0</sub> (Pa)	μ <sub>g</sub> (Pas)	Injekteringstid (min)	Δp (MPa)	Kommentar	Tunnelradie				Antal hål						
							rw (m)	t0 (min)	tD (-)	θ1D (-)		θ2D (-)	ID(1D) (m)	ID(2D) (m)	I (1D) (m)	I (2D) (m)	
b <sub>dim,New.</sub>	20	0.013	13	13.3	0.1		0.027	431.4	0.03	0.12	0.3	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	131
	20	0.013	13	13.3	0.5		0.027	86.3	0.15	0.28	0.7	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	59
b <sub>dim,New.</sub>	450	0.005	5	13.3	0.1	> Δp Deform.	0.027	2916.0	0.00	0.05	0.1	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	341
	450	0.005	5	13.3	0.5		0.027	583.2	0.02	0.11	0.3	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	153
	450	0.005	5	13.3	1		0.027	291.6	0.05	0.15	0.4	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	108
	450	0.005	5	13.3	5		0.027	58.3	0.23	0.34	0.9	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	48
	450	0.005	5	13.3	8		0.027	36.5	0.36	0.43	1.2	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	38
b <sub>max,kbh</sub>	450	0.005	5	13.3	10		0.027	29.2	0.46	0.48	1.3	0.027	0.027	0.027	0.027	0.027	34



## Bilaga 5.3 NV01

### II: Underlag för design av injektering: Skärmgeometri

Kärnbränsle: NV01

#### Bingham\_B1

Djup (m)	bmin (mm)	τ <sub>0</sub> (Pa)	μ <sub>g</sub> (Pas)	Injekteringstid (min)	Δp (MPa)	Kommentar	Tunnelradie			Antal hål						
							Imax (m)	t0 (min)	tD (-)		θ1D (-)	θ2D (-)	ID(1D) (-)	ID(2D) (-)	I (1D) (m)	I (2D) (m)
b <sub>dim,bing.</sub>	20	0.1	100	20	-		12.50	250.00	0.32	0.17	4.82E-02	0.68	0.39	8.5	4.9	9
b <sub>max,bing</sub>	20	0.1	100	40	-	Deform. alt. Aterfl.	57.50	250.00	0.32	0.17	4.82E-02	0.68	0.39	39.0	22.6	2

#### Bingham\_B2

Djup (m)	bmin (mm)	τ <sub>0</sub> (Pa)	μ <sub>g</sub> (Pas)	Injekteringstid (min)	Δp (MPa)	Kommentar	Tunnelradie			Antal hål						
							Imax (m)	t0 (min)	tD (-)		θ1D (-)	θ2D (-)	ID(1D) (-)	ID(2D) (-)	I (1D) (m)	I (2D) (m)
b <sub>dim,bing.</sub>	20	0.1	100	20	0.5	>Δp Deform. <Δp Aterfl.	1.92	2.96	6.76	0.46	0.35	0.97	0.88	1.9	1.7	26
b <sub>max,bing</sub>	20	0.1	100	40	0.5	>Δp Deform. <Δp Aterfl.	1.92	2.96	13.52	0.48	0.41	0.99	0.93	1.9	1.8	24
b <sub>dim,bing</sub>	20	0.1	100	80	0.5	>Δp Deform. <Δp Aterfl.	1.92	2.96	27.04	0.49	0.45	0.99	0.97	1.9	1.9	24
b <sub>max,bing</sub>	20	0.1	100	20	0.5	>Δp Deform. <Δp Aterfl.	8.85	2.96	6.76	0.46	0.35	0.97	0.88	8.6	7.8	6
b <sub>dim,bing</sub>	450	0.1	100	20	-	Aterflöde	38.46	59.17	0.51	0.23	0.07	0.76	0.47	29.0	18.1	2
b <sub>max,bing</sub>	450	0.1	100	30	10	<Δp Aterfl.	30.77	47.34	0.85	0.29	0.11	0.83	0.56	25.5	17.3	3
b <sub>dim,bing</sub>	450	0.1	100	40	8	Δp: 8 & 10 MPa OK	38.46	59.17	0.68	0.26	0.09	0.80	0.52	30.7	20.1	2
b <sub>max,bing</sub>	450	0.1	100	40	10	Δp: 8 & 10 MPa OK	23.08	35.50	2.25	0.39	0.21	0.92	0.74	21.3	17.0	3
b <sub>dim,bing</sub>	450	0.1	100	80	6	Δp: 6, 8 & 10 MPa OK	176.9	59.17	0.51	0.23	0.07	0.76	0.47	133.6	83.2	1
b <sub>max,bing</sub>	450	0.1	100	30	10	<Δp Aterfl.										

#### Newton\_N

Djup (m)	bmin (mm)	τ <sub>0</sub> (Pa)	μ <sub>g</sub> (Pas)	Injekteringstid (min)	Δp (MPa)	Kommentar	Tunnelradie			Antal hål						
							Imax (m)	t0 (min)	tD (-)		θ1D (-)	θ2D (-)	ID(1D) (-)	ID(2D) (-)	I (1D) (m)	I (2D) (m)
b <sub>dim,new.</sub>	20	0.015	15	13.3	0.1		0.027	324.0	0.04	0.14	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	114
b <sub>max,new.</sub>	20	0.015	15	13.3	0.5	>Δp Deform.	0.027	64.8	0.21	0.32	0.9	0.4	0.4	0.4	0.4	51
b <sub>dim,new.</sub>	450	0.015	15	13.3	0.1		0.027	324.0	0.04	0.14	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	114
b <sub>max,new.</sub>	450	0.015	15	13.3	0.5	>Δp Deform.	0.027	64.8	0.21	0.32	0.9	0.4	0.4	0.4	0.4	51
b <sub>dim,new.</sub>	450	0.015	15	13.3	1		0.027	32.4	0.41	0.45	1.2	0.9	0.9	0.9	0.9	36
b <sub>max,new.</sub>	450	0.015	15	13.3	5	>Δp Deform.	0.027	6.5	2.05	1.01	2.7	1.2	1.2	1.2	1.2	16
b <sub>dim,new.</sub>	450	0.015	15	13.3	8		0.027	4.1	3.28	1.28	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	13
b <sub>max,new.</sub>	450	0.015	15	13.3	10	>Δp Deform.	0.027	3.2	4.10	1.43	3.9	3.9	3.9	3.9	3.9	11

**Bilaga 6**      **III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient.**

*6.1 KA3376B01*

**Bilaga 6.1a** KA3376B01 (20m)

**Bilaga 6.1b** KA3376B01 (450m)

*6.2 KB971*

**Bilaga 6.2a** KB971 (20m)

**Bilaga 6.2b** KB971 (450m)

*6.3 NV01*

**Bilaga 6.3a** NV01 (20m)

**Bilaga 6.3b** NV01 (450m)

## Bilaga 6.1a KA3376B01 (20m)

III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient

Borrhål KA3376B01

Gradient - Reynolds tal - turbulent flöde  
Bingham- och Newtonvätskor

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{H}{r} \cdot \frac{T_{tot}}{T_{inj}} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + (T_{tot}/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1 + t/r_i) + \xi}$$

Oinjekterad tunnel

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{7r}$$

$$\ln(2H/r_i) \approx 2, \ln(1+t/r_i) \approx 1, \xi \approx 5$$

eller

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + \xi}$$

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{Q_i}{T_i 2\pi r} = \frac{T_i dh}{T_i 2\pi r} = \frac{dh}{2\pi r}$$

en spricka

$$dh = H$$

Tätad tunnel

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow \infty \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r}$$

$$Re = \frac{\rho K \frac{dh}{dL} b}{\mu} = \frac{\rho T dh}{\mu dL}$$

Gradient - Inträngningslängd  
Newtonvätska

$$\frac{dh}{dr} = \alpha$$

$$F = 2\pi x_0 = \frac{\Delta p}{\rho_w g \alpha}$$

H [m]	20	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	$\Delta p_1$ [Pa]	100000
$r_i$ [m]	4	$\mu$ [Pas]	1.30E-03	$\Delta p_2$ [Pa]	500000
$\xi$	5	$g$ [m <sup>2</sup> /s]	9.81		
		$T_{tot}$ [m <sup>2</sup> /s]	3.77E-06		
		$T_{i,max}$ [m <sup>2</sup> /s]	1.31E-06		
		$T_{100\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	6.29E-07		
		$T_{b\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	4.37E-08		

Q < 1L/min för 100m

Oinjekterad tunnel

	dr = a				
	0	1	3	10	15
r	4	5	7	14	19
dh/dr	1	1	0	0	0
Re ( $T_{tot}$ )	2	2	1	0.6	0
$F_1 / 2$ [m]	7.4	9.3	13.0	26.1	35.4
$F_2 / 2$ [m]	37	47	65	130	177

Re < 10

	dr = a				
	0	1	3	10	15
r	4	5	7	14	19
dh/dr	1	1	0	0	0
Re ( $T_{i,max}$ )	1	1	0.4	0	0
$F_1 / 2$ [m]	6.4	8.0	11.5	22.4	30.4
$F_2 / 2$ [m]	32	40	58	112	152

Re < 10

Tätad tunnel

	dr = a				
	0	1	3	10	15
r	4	5	7	14	19
dh/dr	5	4	3	1	1
Re ( $T_{100\mu m}$ )	2	2	1	1	0.5
Re ( $T_{b\mu m}$ )	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0
$F_1 / 2$ [m]	1.02	1.27	1.78	3.57	4.84
$F_2 / 2$ [m]	5.1	6.4	8.9	17.8	24.2

överskattad!

Re < 10

Re < 10

underskattad!

underskattad!

Q < 1L/min för 100m

## Bilaga 6.1b KA3376B01 (450m)

III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient

Borrhål KA3376B01

Gradient - Reynolds tal - turbulent flöde  
Bingham- och Newtonvätskor

$$\frac{dh}{dr} = \frac{H}{r} \cdot \frac{T_{tot}}{T_{inj}} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + (T_{tot}/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1+t/r_i) + \xi}$$

Oinjekterad tunnel

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad \frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{7r}$$

$$\ln(2H/r_i) \approx 2, \ln(1+t/r_i) \approx 1, \xi \approx 5$$

eller

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad \frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + \xi}$$

$$\frac{dh}{dr} = \frac{Q_i}{T_i 2\pi r} = \frac{T_i dh}{T_i 2\pi r} = \frac{dh}{2\pi r}$$

en spricka

$$dh = H$$

Tätad tunnel

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow \infty \quad \frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r}$$

$$Re = \frac{\rho K \frac{dh}{dL} b}{\mu} = \frac{\rho T dh}{\mu dL}$$

Gradient - Inträngningslängd  
Newtonvätska

$$\frac{dh}{dr} = \alpha$$

$$F = 2\pi x_0 = \frac{\Delta p}{\rho_w g \alpha}$$

H [m]	450	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	$\Delta p_1$ [Pa]	100000
$r_i$ [m]	4	$\mu$ [Pas]	1.30E-03	$\Delta p_2$ [Pa]	10000000
$\xi$	5	$g$ [m <sup>2</sup> /s]	9.81		
		$T_{tot}$ [m <sup>2</sup> /s]	3.77E-06		
		$T_{i,max}$ [m <sup>2</sup> /s]	1.31E-06		
		$T_{100\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	6.29E-07		
		$T_{b\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	2.43E-09		

Q < 1L/min för 100m

Oinjekterad tunnel

	dr = a				
	0	1	3	8.5	15
r	4	5	7	12.5	19
dh/dr	11	9	6	3	2
Re (T <sub>tot</sub> )	31	25	18	10.0	7
F <sub>1</sub> / 2 [m]	0.5	0.6	0.8	1.5	2.2
F <sub>2</sub> / 2 [m]	47	59	83	147	224

	dr = a				
	0	1	3.2	10	15
r	4	5	7	14	19
dh/dr	18	14	10	5	4
Re (T <sub>i,max</sub> )	18	14	10.0	5	4
F <sub>1</sub> / 2 [m]	0.3	0.4	0.5	1.0	1.4
F <sub>2</sub> / 2 [m]	28	36	51	100	135

Tätad tunnel

	dr = a				
	0	1	3	10	17.7
r	4	5	7	14	22
dh/dr	113	90	64	32	21
Re (T <sub>100μm</sub> )	54	44	31	16	10.0
Re (T <sub>bμm</sub> )	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0

Q < 1L/min för 100m

överskattad!

Re < 10

F <sub>1</sub> / 2 [m]	0.05	0.06	0.08	0.16	0.25
F <sub>2</sub> / 2 [m]	4.5	5.7	7.9	15.9	24.6

underskattad!  
underskattad!

## Bilaga 6.2a KB971 (20m)

III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient

Borrhål KB971

Gradient - Reynolds tal - turbulent flöde  
Bingham- och Newtonvätskor

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{H}{r} \cdot \frac{T_{tot}}{T_{inj}} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + (T_{tot}/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1+t/r_i) + \xi}$$

Oinjekterad tunnel  $T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{7r}$  eller  $T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r \cdot \ln(2H/r_i) + \xi}$   
 $\ln(2H/r_i) \approx 2, \ln(1+t/r_i) \approx 1, \xi \approx 5$

$-\frac{dh}{dr} = \frac{Q_i}{T_i 2\pi r} = \frac{T_i dh}{T_i 2\pi r} = \frac{dh}{2\pi r}$  en spricka  $dh = H$

Tätad tunnel  $T_{tot}/T_{inj} \rightarrow \infty \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r}$

$$Re = \frac{\rho K \frac{dh}{dL} b}{\mu} = \frac{\rho T dh}{\mu dL}$$

Gradient - Inträngningslängd  
Newtonvätska  $\frac{dh}{dr} = \alpha \quad F = 2\pi x_0 = \frac{\Delta p}{\rho_w g \alpha}$

H [m]	20	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	$\Delta p_1$ [Pa]	100000
$r_i$ [m]	4	$\mu$ [Pas]	1.30E-03	$\Delta p_2$ [Pa]	500000
$\xi$	5	g [m <sup>2</sup> /s]	9.81		
		$T_{tot}$ [m <sup>2</sup> /s]	1.27E-04		
		$T_{i,max}$ [m <sup>2</sup> /s]	8.27E-05		
		$T_{100\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	6.29E-07		
		$T_{b,\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	1.38E-09		

Q < 1L/min för 100m

Oinjekterad tunnel

dr = a					
	0	1	3	10	22.7
r	4	5	7	14	26.7
dh/dr	1	1	0	0	0
Re ( $T_{tot}$ )	67	54	38	19.1	10.0
$F_1 / 2$ [m]	7.4	9.3	13.0	26.1	49.7
$F_2 / 2$ [m]	37	47	65	130	248

dr = a					
	0	1	3	10	16.3
r	4	5	7	14	20.3
dh/dr	1	1	0	0	0
Re ( $T_{i,max}$ )	51	40	28.1	14	10.0
$F_1 / 2$ [m]	6.4	8.0	11.5	22.4	32.5
$F_2 / 2$ [m]	32	40	58	112	163

Tätad tunnel

dr = a					
	0	1	3	10	15
r	4	5	7	14	19
dh/dr	5	4	3	1	1
Re ( $T_{100\mu m}$ )	2	2	1	1	0.5
Re ( $T_{b,\mu m}$ )	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Q < 1L/min för 100m

$F_1 / 2$ [m]	1.02	1.27	1.78	3.57	4.84	överskattad!
$F_2 / 2$ [m]	5.1	6.4	8.9	17.8	24.2	underskattad!

## Bilaga 6.2b KB971 (450m)

III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient

Borrhål KB971

Gradient - Reynolds tal - turbulent flöde  
Bingham- och Newtonvätskor

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{H}{r} \cdot \frac{T_{tot}}{T_{inj}} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + (T_{tot}/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1 + t/r_i) + \xi}$$

Oinjekterad tunnel

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{7r}$$

$$\ln(2H/r_i) \approx 2, \ln(1+t/r_i) \approx 1, \xi \approx 5$$

eller

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + \xi}$$

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{Q_i}{T_i 2\pi r} = \frac{T_i dh}{T_i 2\pi r} = \frac{dh}{2\pi r}$$

en spricka

$$dh = H$$

Tätad tunnel

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow \infty \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r}$$

$$Re = \frac{\rho K \frac{dh}{dL} b}{\mu} = \frac{\rho T dh}{\mu dL}$$

Gradient - Inträngningslängd  
Newtonvätska

$$\frac{dh}{dr} = \alpha$$

$$F = 2\pi x_0 = \frac{\Delta p}{\rho_w g \alpha}$$

H [m]	450	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	$\Delta p_1$ [Pa]	100000
$r_i$ [m]	4	$\mu$ [Pas]	1.30E-03	$\Delta p_2$ [Pa]	10000000
$\xi$	5	$g$ [m <sup>2</sup> /s]	9.81		
		$T_{tot}$ [m <sup>2</sup> /s]	1.27E-04		
		$T_{i,max}$ [m <sup>2</sup> /s]	8.27E-05		
		$T_{100\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	6.29E-07		
		$T_{b\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	6.69E-11		

Q < 1L/min för 100m

Oinjekterad tunnel

	dr = a				
	0	1	3	10	420.0
r	4	5	7	14	424
dh/dr	11	9	6	3	0
Re ( $T_{tot}$ )	1055	844	603	301	10.0
$F_1 / 2$ [m]	0.5	0.6	0.8	1.7	50.0
$F_2 / 2$ [m]	47	59	83	165	5002

	dr = a				
	0	1	3	10	450.0
r	4	5	7	14	454
dh/dr	18	14	10	5	0
Re ( $T_{i,max}$ )	1139	911	651	325	10.0
$F_1 / 2$ [m]	0.3	0.4	0.5	1.0	32.3
$F_2 / 2$ [m]	28	36	50	100	3231

Tätad tunnel

	dr = a				
	0	1	3	10	17.7
r	4	5	7	14	22
dh/dr	113	90	64	32	21
Re ( $T_{100\mu m}$ )	54	44	31	16	10.0
Re ( $T_{b\mu m}$ )	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Q < 1L/min för 100m

$F_1 / 2$ [m]	0.05	0.06	0.08	0.16	0.25	underskattad!
$F_2 / 2$ [m]	4.5	5.7	7.9	15.9	24.6	underskattad!

## Bilaga 6.3a NV01 (20m)

III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient

Borrhål NV01

Gradient - Reynolds tal - turbulent flöde  
Bingham- och Newtonvätskor

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{H}{r} \cdot \frac{T_{tot}}{T_{inj}} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + (T_{tot}/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1+t/r_i) + \xi}$$

Oinjekterad tunnel  $T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \rightarrow -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{7r}$  eller  $T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \rightarrow -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + \xi}$   
 $\ln(2H/r_i) \approx 2, \ln(1+t/r_i) \approx 1, \xi \approx 5$

$-\frac{dh}{dr} = \frac{Q_i}{T_i 2\pi r} = \frac{T_i dh}{T_i 2\pi r} = \frac{dh}{2\pi r}$  en spricka  $dh = H$

Tätad tunnel  $T_{tot}/T_{inj} \rightarrow \infty \rightarrow -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r}$

$$Re = \frac{\rho K \frac{dh}{dL} b}{\mu} = \frac{\rho T dh}{\mu dL}$$

Gradient - Inträngningslängd  
Newtonvätska

$$\frac{dh}{dr} = \alpha \quad F = 2\pi x_0 = \frac{\Delta p}{\rho_w g \alpha}$$

H [m]	20	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	$\Delta p_1$ [Pa]	100000
$r_i$ [m]	4	$\mu$ [Pas]	1.30E-03	$\Delta p_2$ [Pa]	500000
$\xi$	5	g [m <sup>2</sup> /s]	9.81		
		$T_{tot}$ [m <sup>2</sup> /s]	1.55E-04		
		$T_{i,max}$ [m <sup>2</sup> /s]	6.07E-05		
		$T_{100\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	6.29E-07		
		$T_{b\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	2.07E-09		

Q < 1L/min för 100m

Oinjekterad tunnel

	dr = a				
	0	1	3	10	28.7
r	4	5	7	14	32.7
dh/dr	1	1	0	0	0
Re ( $T_{tot}$ )	82	65	47	23.3	10.0
$F_1 / 2$ [m]	7.4	9.3	13.0	26.1	60.9
$F_2 / 2$ [m]	37	47	65	130	304

	dr = a				
	0	1	3	10.9	15
r	4	5	7	14.9	19
dh/dr	1	1	0	0	0
Re ( $T_{i,max}$ )	37	30	20.6	10.0	7.8
$F_1 / 2$ [m]	6.4	8.0	11.5	23.9	30.4
$F_2 / 2$ [m]	32	40	58	119	152

Tätad tunnel

	dr = a				
	0	1	3	10	15
r	4	5	7	14	19
dh/dr	5	4	3	1	1
Re ( $T_{100\mu m}$ )	2	2	1	1	0.5
Re ( $T_{b\mu m}$ )	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Q < 1L/min för 100m

$F_1 / 2$ [m]	1.02	1.27	1.78	3.57	4.84	överskattad!
$F_2 / 2$ [m]	5.1	6.4	8.9	17.8	24.2	underskattad!

## Bilaga 6.3b NV01 (450m)

III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient

Borrhål NV01

Gradient - Reynolds tal - turbulent flöde  
Bingham- och Newtonvätskor

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{H}{r} \cdot \frac{T_{tot}}{T_{inj}} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + (T_{tot}/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1+t/r_i) + \xi}$$

Oinjekterad tunnel

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{7r}$$

$$\ln(2H/r_i) \approx 2, \ln(1+t/r_i) \approx 1, \xi \approx 5$$

eller

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow 1 \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_i) + \xi}$$

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{Q_i}{T_i 2\pi r} = \frac{T_i dh}{T_i 2\pi r} = \frac{dh}{2\pi r}$$

en spricka

$$dh = H$$

Tätad tunnel

$$T_{tot}/T_{inj} \rightarrow \infty \quad -\frac{dh}{dr} \rightarrow \frac{H}{r}$$

$$Re = \frac{\rho K \frac{dh}{dL} b}{\mu} = \frac{\rho T dh}{\mu dL}$$

Gradient - Inträngningslängd  
Newtonvätska

$$\frac{dh}{dr} = \alpha$$

$$F = 2\pi x_0 = \frac{\Delta p}{\rho_w g \alpha}$$

H [m]	450	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1000	$\Delta p_1$ [Pa]	100000
$r_i$ [m]	4	$\mu$ [Pas]	1.30E-03	$\Delta p_2$ [Pa]	10000000
$\xi$	5	g [m <sup>2</sup> /s]	9.81		
		$T_{tot}$ [m <sup>2</sup> /s]	1.55E-04		
		$T_{i,max}$ [m <sup>2</sup> /s]	6.07E-05		
		$T_{100\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	6.29E-07		
		$T_{b\mu m}$ [m <sup>2</sup> /s]	1.97E-09		

Q < 1L/min för 100m

Oinjekterad tunnel

	dr = a				
	0	1	3	10	510.0
r	4	5	7	14	514
dh/dr	11	9	6	3	0
Re ( $T_{tot}$ )	1288	1030	736	368	10.0
$F_1 / 2$ [m]	0.5	0.6	0.8	1.7	60.6
$F_2 / 2$ [m]	47	59	83	165	6064

	dr = a				
	0	1	3	10	330.0
r	4	5	7	14	334
dh/dr	18	14	10	5	0
Re ( $T_{i,max}$ )	836	669	478	239	10.0
$F_1 / 2$ [m]	0.3	0.4	0.5	1.0	23.8
$F_2 / 2$ [m]	28	36	50	100	2377

Tätad tunnel

	dr = a				
	0	1	3	10	17.7
r	4	5	7	14	22
dh/dr	113	90	64	32	21
Re ( $T_{100\mu m}$ )	54	44	31	16	10.0
Re ( $T_{b\mu m}$ )	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0
Q < 1L/min för 100m					
$F_1 / 2$ [m]	0.05	0.06	0.08	0.16	0.25
$F_2 / 2$ [m]	4.5	5.7	7.9	15.9	24.6

överskattad!

Re < 10

underskattad!

underskattad!



SveBeFo

Box 47047  
SE-100 74 Stockholm

Telefon 08-692 22 80 • [info@svebefo.se](mailto:info@svebefo.se)  
Besöksadress: Mejerivägen 4

ISSN 1104 - 1773 • SVEBEFO-R--75--SE

tbk.