

EFTERINJEKTERING - SAMMANSTÄLLNING OCH KOMPLETTERANDE ANALYS FÖR EFTERINJEKTERINGSARBETEN I HALLANDSÅS OCH NYGÅRDSTUNNELN

Åsa Fransson

Gunnar Gustafson

**Efterinjektering -
Sammanställning och kompletterande
analys för efterinjekteringsarbeten i
Hallandsås och Nygårdstunneln**

**Postexcavation grouting -
Compilation and complementary analyses of the
postexcavation grouting performed at Hallandsås
and the Nygård Tunnel**

Åsa Fransson
Gunnar Gustafson
Chalmers Tekniska Högskola

SveBeFo rapport 90

Stockholm 2008

ISSN 1104 – 1773

ISRN SVEBEFO-R—90—SE

FÖRORD

Dagens tunnlar utförs regelmässigt med förinjektering i samband med utbrytningen av berget. Syftet är att uppfylla täthetskrav som kan avse att begränsa eventuell grundvattensänkning eller gälla tunnelns funktion i bruksskedet. Kraven är ofta högt ställda och förinjekteringen lyckas inte alltid fullt ut. Att komplettera med efterinjektering är en möjlighet men ofta förknippat med svårigheter eller stora kostnader. I en tidigare förstudie har författarna redovisat prognosteknik med förslag till analys och design av sådana arbeten. Föreliggande arbete bygger på förstudien och demonstrerar en möjlig tillämpning av metodiken genom uppföljning av några delsträckor på Hallandsåstunneln och Nygårdstunneln. Goda resultat har uppnåtts på dessa avsnitt och utifrån dessa erfarenheter redovisar rapporten förslag till fortsatt utvecklingsarbete, som lämpligen genomförs vid ett tunnelarbete där man kan göra mer omfattande fältförsök.

Stockholm i september 2008

Tomas Franzén

Sammanfattning

Titeln på denna rapport är *Efterinjektering: Sammanställning och kompletterande analys för efterinjekteringsarbeten i Hallandsås och Nygårdstunneln*. Rapporten tillämpar de idéer som presenterades i SveBeFo Rapport 75 *Efterinjektering: Inläckageprognos och design – förslag till analys* (Fransson och Gustafson, 2006). Fransson och Gustafson (2006) hade som mål att inför en efterinjektering ge en redovisning av närbergets hydrogeologiska egenskaper efter förinjektering samt att ge en analys av spridning och tätningsförmåga hos fintätningsmedel i förinjekterat berg. För att åstadkomma detta presenterades en arbetsgång med tre punkter: (1) Prognos av inläckage och injekteringsbehov; (2) Underlag för design av injektering mht ”jacking” och ”back-flow”; och (3) Underlag för design av efterinjektering mht gradient.

Sedan färdigställandet av Fransson och Gustafson (2006) har nya erfarenheter gjorts och syftet med detta arbete är att sammanställa resultaten från en efterinjektering av ett delavsnitt av tunneln i Hallandsås (Bergh och Ekström, 2007) och en för- och en efterinjektering för två delavsnitt av Nygårdstunneln (Butrón et al., 2008 och Granberg och Knutsson, 2008). Vid sidan av sammanställningen görs kompletterande analyser som är i linje med beskrivningen i Fransson och Gustafson (2006). Genom att utgå från de två fallstudierna Hallandsås och Nygårdstunneln kan man konkret beskriva och ge exempel på tillvägagångssätt men även tydliggöra och identifiera frågeställningar av betydelse vid efterinjektering. Då design och slutligt utförande inte alltid följs åt är tanken att detta arbete skall förmedla de huvudsakliga idéerna och ge en ungefärlig bild av hur injekteringen genomfördes.

Sammanställningen tyder på att efterinjekteringen på Hallandsås har fungerat väl då man har en mätt minskning av inflödet till tunneln på 60 - 70% (Rosell, 2007) och verkar nå inläckagekravet över en längre sträcka. En identifierad risk för erosion (på grund av den höga gradienten) motiverar den design som använts med borrhål som når *utanför* tidigare injekterad zon. I enlighet med detta borde även att ”backa” framtida injekteringar (se Figur 16) och/eller flytta in injekteringsmanschetterna i borrhålen kunna förbättra resultatet. Även för Nygårdstunneln verkar efterinjekteringen i taket ha fungerat väl då minskningen av flödet för droppkarteringen är ungefär 80% (se Granberg och Knutsson, 2008). Kompletterande analyser visar att gradienten är liten vilket motiverar den design som använts med borrhål *innanför* tidigare injekterad zon.

Arbetet avslutas med rekommendationer för det fortsatta utvecklingsarbetet. Intressant vore att implementera och vidareutveckla tankarna genom ett fältförsök.

Summary

The title of this report is *Postexcavation grouting: Compilation and complementary analyses of the postexcavation grouting performed at Hallandsås and the Nygård Tunnel*. The report applies the ideas presented in SveBeFo report 75 *Postexcavation grouting: Inflow prognosis and design – suggested analysis* (Fransson and Gustafson, 2006). The objectives of Fransson and Gustafson (2006) were 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. To achieve this Fransson and Gustafson (2006) presented a method for analyses including three steps: (1) Prognosis of tunnel inflow and need for grouting; (2) Suggestion of / input for grouting design considering “jacking” and “back-flow” and; (3) Suggestion of / input for postexcavation grouting design considering hydraulic gradient. Since the completion of the report new experiences have been made and the objective of this report is to compile the results from a postexcavation grouting of a section of the tunnel in Hallandsås (Bergh och Ekström, 2007) and a pre- and postexcavation grouting of two sections of the Nygård Tunnel (Butrón et al., 2008 and Granberg and Knutsson, 2008). In addition to the compilation, complementary analyses are made according to the descriptions in Fransson and Gustafson (2006). Using Hallandsås and the Nygård tunnel as case studies, it is possible to describe and give examples of the method in a concrete way and also point out and identify questions of importance to postexcavation grouting. Since design and final performance may differ the main aim is to convey the general ideas and give a general picture of how the grouting was performed.

The compilation indicates that the postexcavation grouting at Hallandsås has been successful since the measured inflow to the tunnel has decreased with 60 - 70% (Rosell, 2007) and the leakage demand seems to be attainable over a longer section of the tunnel. The design using boreholes drilled *beyond* the pregrouted zone seems motivated due to the identified risk for erosion of the grout due to the large hydraulic gradients around the tunnel. In accordance with this, performing future grouting “back-wards” (see Figure 16) and/or moving packers further into the boreholes is likely to improve the result. The postexcavation grouting performed in the roof of the Nygård tunnel also seem to have worked well since there is a decreased inflow of approximately 80% based on mapping of the drips (Granberg and Knutsson, 2008). The complementary analyses motivate the design with the grouting boreholes drilled *within* the pregrouted zone.

Finally, recommendations concerning further development are given. It would be interesting to implement and elaborate on presented thoughts through a field experiment.

Nomenklatur

$a_{Re \leq 10}$	avstånd från tunnelvägg där $Re \leq 10$ [m]
A	tunnelarea [m^2]
b	sprickvidd, hydraulisk [m]
F	total bredd, utbredning av injekteringsmedel vid gradient [m]
g	gravitation [m/s^2]
G	kraft [$Pa \cdot m^2$]
h	vattentryck [m]
dh/dL	gradient [-]
dh/dr	gradient [-]
H	djup [m]
I	inträngning injekteringsmedel [m]
I_D	relativ inträngning injekteringsmedel [-]
I_{max}	maximal inträngning injekteringsmedel [m]
k	formparameter Paretofördelning
K	hydraulisk konduktivitet [m/s]
L	längd [m]
p	tryck [Pa]
p_g	injekteringstryck [Pa]
p_w	vattentryck [Pa]
dp/dr	tryckgradient [Pa/m]
Δp	injekteringsövertryck [Pa]
q_{inj}	inflöde till injekterad tunnel [m^2/s]
Q	flöde [m^3/s]
$Q_{gr.bh.}$	flöde, borrhål [m^3/s , liter/min]
$Q_{lim.}$	gränsvärde flöde, borrhål [m^3/s , liter/min]
Q_i	flöde, enskild spricka [m^3/s]
Q/dh	specifik kapacitet [m^2/s]
r	radie [m]
r_t	radie, tunnel [m]
Re	Reynolds tal [-]
t	tjocklek injekterad zon [m]
t_{gel}	total geltid [s, min]
$t_{gr.}$	injekteringstid [s, min]
t_D	relativ injekteringstid [-]
T	transmissivitet [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 μm [m^2/s]

T_{inj}	transmissivitet när vissa sprickor tätats [m^2/s]
T_{tot}	total transmissivitet [m^2/s]
μ	viskositet [Pas]
μ_g	viskositet, injekteringsmedel [Pas]
ρ	densitet [kg/m^3]
ρ_b	densitet, bergmassa [kg/m^3]
σ_r	radiell bergsspänning [Pa]
τ_0	flytgräns [Pa]
ξ	skinfaktor [-]
Θ	parameter för variabelsubstitution, analys av inträngning [-]

Innehållsförteckning

Inledning.....	1
Metod.....	1
Design baserad på data från kärnborrhål	1
Design baserad på data från injekteringsskärm (kontrollhål)	2
Kompletterande analys och sammanställning.....	3
Designfönster	3
Utförande i tunnel	4
Fallstudier: Hallandsås och Nygårdstunneln	6
Hallandsås	7
Design efterinjektering.....	7
Test designfönster	9
Utförande i tunnel: modell geologi, hydrogeologi, geomekanik	11
Nygårdstunneln.....	13
Design förinjektering	14
Design efterinjektering.....	15
Test designfönster	17
Utförande i tunnel: modell geologi, hydrogeologi, geomekanik	19
Slutsatser.....	22
Hallandsås	22
Nygårdstunneln.....	22
Rekommendationer fortsatt utvecklingsarbete	24
Referenser.....	27
Bilagor	28

Inledning

Titeln på denna rapport är *Efterinjektering: Sammanställning och kompletterande analys för efterinjekteringsarbeten i Hallandsås och Nygårdstunneln*. Rapporten tillämpar de idéer som presenterades i SveBeFo Rapport 75 *Efterinjektering: Inläckageprognos och design – förslag till analys* (Fransson och Gustafson, 2006). Fransson och Gustafson (2006) hade som mål att inför en efterinjektering ge en redovisning av närbergets hydrogeologiska egenskaper efter förinjektering samt att ge en analys av spridning och tätningsförmåga hos fintätningsmedel i förinjekterat berg. För att åstadkomma detta presenterades en arbetsgång med tre punkter: (1) Prognos av inläckage och injekteringsbehov; (2) Underlag för design av injektering mht ”jacking” och ”back-flow”; och (3) Underlag för design av efterinjektering mht gradient.

Sedan färdigställandet av Fransson och Gustafson (2006) har nya erfarenheter gjorts och syftet med detta arbete är att sammanställa resultaten från en efterinjektering av ett delavsnitt av tunneln i Hallandsås (Bergh och Ekström, 2007) och en för- och en efterinjektering för två delavsnitt av Nygårdstunneln (Butrón et al., 2008 och Granberg och Knutsson, 2008). Vid sidan av sammanställningen görs kompletterande analyser som är i linje med beskrivningen i Fransson och Gustafson (2006). Genom att utgå från de två fallstudierna Hallandsås och Nygårdstunneln kan man konkret beskriva och ge exempel på tillvägagångssätt men även tydliggöra och identifiera frågeställningar av betydelse vid efterinjektering. Då design och slutligt utförande inte alltid följs åt är tanken att detta arbete skall förmedla de huvudsakliga idéerna och ge en ungefärlig bild av hur injekteringen genomfördes.

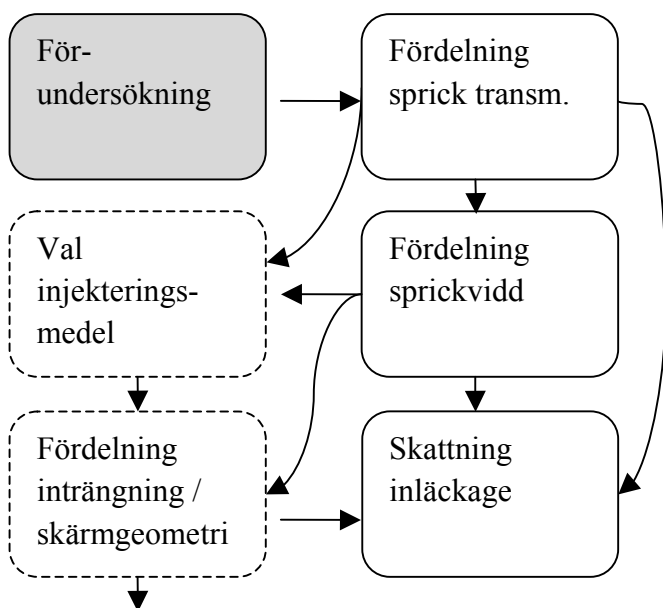
Metod

Den metod som använts i de två projekten beskrivs med hjälp av ett antal flödesscheman. För Nygårdstunneln användes Figur 1: Flödesschema för design baserad på data från kärnborrhål och Figur 4: Flödesschema för utförande i tunnel. För Nygårdstunneln görs även ett jämförande exempel med design av en förinjektering. För Hallandsås användes Figur 2: Flödesschema för design baserad på data från injekteringskärm och Figur 4: Flödesschema för utförande i tunnel. Vidare används ett så kallat designfönster som avgränsar mer lämpliga injekteringsstryck från mindre lämpliga, se exempel i Figur 3. Detta kan göras i övergången mellan flödesschemat för design och flödesschemat för utförande i tunnel. Detta gjordes inte i samband med projektens genomförande utan är en del av den kompletterande analysen för att bättre förstå systemet och förklara hur injekteringen har fungerat.

Design baserad på data från kärnborrhål

Flödesschemat i Figur 1 syftar till att göra en prognos av inläckage och injekteringsbehov. Indata för att skatta en fördelning på spricktransmissiviteten är

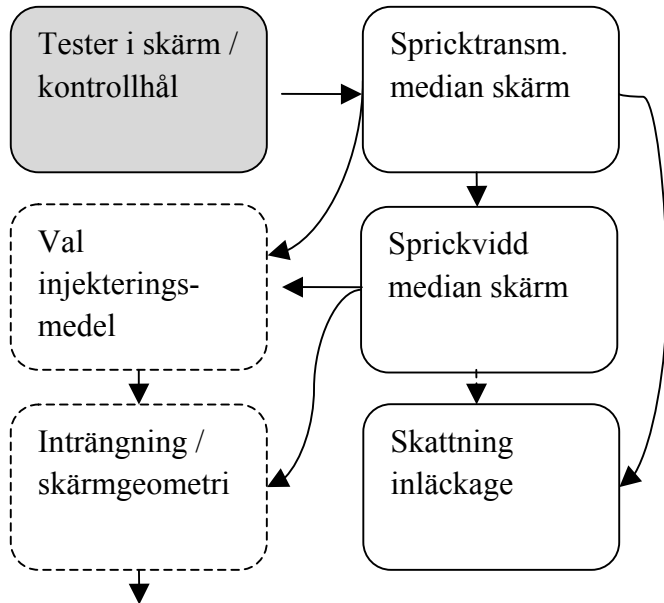
sektionsvisa mätningar av transmissivitet och antal sprickor längs ett kärnborrhål. Grå rutor beskriver undersökning och vita rutor beskriver analyser. Rutorna med streckad kontur kan vidareutvecklas med hjälp av ett designfönster, se exempel i Figur 3. Principerna beskrivs i Fransson och Gustafson (2006). Analyserna skall utgöra underlag för en arbetshandling.



Figur 1 Flödesschema för design baserad på data från kärnborrhål (efter Gustafson et al., 2004). Skall resultera i en arbetshandling.

Design baserad på data från injekteringskärm (kontrollhål)

Flödesschemat i Figur 2 syftar till att göra en prognos av inläckage och injekteringsbehov. Indata för beräkningarna är medianvärdena för varje injekteringskärm (från förinjektering). Grå rutor beskriver undersökning och vita rutor beskriver analyser. Rutorna med streckad kontur kan vidareutvecklas med hjälp av ett designfönster, se exempel i Figur 3. Principerna beskrivs i Fransson och Gustafson (2006). Analyserna skall utgöra underlag för en arbetshandling.



Figur 2 Flödesschema för design baserad på data från injekterings-skärm. Skall resultera i en arbetshandling.

Kompletterande analys och sammanställning

Designfönster

Enligt den konceptuella modellen och metodkapitlet i Fransson och Gustafson (2006) tar designfönstret hänsyn till injekteringsmedlets inträngning, deformation ("jacking") och risk för återflöde av injekteringsmedlet till borrhålet ("back-flow"). Ekvationer för detta beskrivs i Fransson och Gustafson (2006). Deformation eller "jacking" berör främst ytliga tunnlar och de ekvationer som används utgår ifrån den vertikalspänning som fås på grund av ovanliggande last. Eventuella deformationer orsakade av spänningstillståndet runt tunneln ingår så långt inte i analysen men är intressant med avseende på fortsatt utvecklingsarbete. Deformation och injekteringsmedlets inträngning och eventuella återflöde till borrhålet är viktiga både vid för- och efterinjektering. Resultatet presenteras med hjälp av ett så kallat designfönster, se exempel i Figur 3. Designfönstret används för att sammanställa och presentera analyserna och identifierar ett område inom vilket man minskar risken för problem. I exemplet används injekteringsövertrycket, Δp , och vattentrycket, p_w (kan även räknas om till djup). Övriga indata är sprickvidd, bruksegenskaper, injekteringstid och densitet för bergmassan. Utifrån Figur 3 skulle exempelvis ett injekteringsövertryck på 0.5 MPa fungera på djup mellan 20 – 40 m (p_w : 0.2 – 0.4 MPa). Totaltrycket för injekteringen, p_g , skulle då vara 0.7 till 0.9 MPa ($p_w + \Delta p$). Designfönstret i Bilaga 1 visar även vilka inträngningslängder man får vid olika tryck.

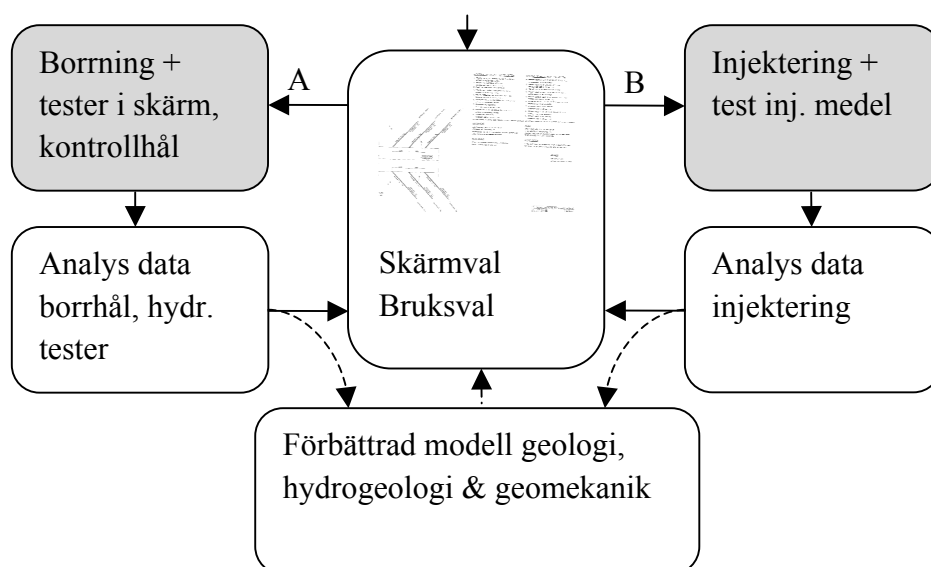
H [m]	p _w [MPa]	Δp [MPa] 0.1	0.5	1.0	2.0	3.0
0	0	-	-	-	-	-
10	0.1	-	-	-	-	-
20	0.2	-	OK	-	-	-
40	0.4	-	OK	OK	-	-
60	0.6	-	-	OK	OK	-

Figur 3 Exempel på designfönster med avseende på injekteringsövertryck och vattentryck (kan även räknas om till djup, H).

När tunneln är utsprängd tillkommer ytterligare faktorer, ett exempel är den ökade gradienten som kan påverka designen av efterinjekteringen. En större gradient kan leda till turbulent flöde och ökad risk för erosion av injekteringsmedlet, detta påverkar injektering med både Bingham- och Newtonvätskor. I Fransson och Gustafson (2006) beskrivs även den maximala inträngningen som kan förväntas vid injektering med en Newtonvätska i ett gradientfält.

Utförande i tunnel

Figur 4 visar ett flödesschema för utförande i tunnel. Även här beskriver grå rutor undersökningar eller praktiskt utförande och vita rutor beskriver analyser.



Figur 4 Flödesschema för utförande i tunnel. Utgår ifrån arbetshandling.

Centralt i figuren återfinns arbetshandlingen. Denna ger riktlinjer för val av exempelvis skärmtyp och injekteringsmedel. Inledningsvis följs pil A. Borrning av skärm och tester

i injekteringshål utförs. Baserat på exempelvis inflöde görs skärm- och bruksval. Efter detta följs pil B. Denna beskriver test av injekteringsmedel och utförande av injektering. Eventuell analys av injekteringsdata följs av en återgång till pil A för borrning och mätning i kontrollhål. Kompletterande analyser utförs sedan för att förbättra beskrivningen av geologi mm för att bättre förklara resultaten (Förbättrad modell geologi, hydrogeologi och geomekanik).

Fallstudier: Hallandsås och Nygårdstunneln

Tabell 1 Sammanställer information om Hallandsås och Nygårdstunneln.

Tabell 1 Sammanställning Hallandsås och Nygårdstunneln

	Hallandsås (133 m)	Nygårdstunneln (86+60 m)
<i>Injekteringssituation</i>	Efterinjektering	För- och efterinjektering
<i>Syfte</i>	Tätning för generell minskning av inflöde till tunnel. Nå inläckagekrav.	Droptätning tak och generell tätning av tunnel. Nå inläckagekrav.
<i>Inläckagekrav</i>	3.5 liter/s/1000 m tunnel: 21 liter/min/100 m tunnel (två tunnelrör)	4 - 9 liter/min/100 m tunnel (byggskedet). 2 - 5 liter/min/100 m tunnel (driftsskedet).
<i>Tunneldjup</i>	Ca 100 m	Ca 50 m
<i>Bergarter</i>	Gnejs med inslag av amfibolit. Delavsnitt med amfibolit som dominerande bergart.	Gnejs (rödgrå – grå) med inneslutningar av grönsten (amfibolit).
<i>Underlag för design</i>	Data från injekteringsskärmar (kontrollhål)	Data från kärnborrhål
<i>Kärnborrhål</i>		KBH 4
<i>Sprickfrekvens</i>		Ca 4 / m
<i>Paretofördelning, k</i>		k: 0.42
<i>Skattat inläckage (b > 100 µm tätade)</i>		9 liter/min/100 m tunnel
<i>Borrhål injekteringsskärm / kontrollhål (median)</i>	190+943 – 190+977: Inj.skärm: 8.5 – 25 liter/min Kontrollhål: 0 – 3.5 liter/min	
<i>Skattat inläckage</i>	50 liter/min/100 m tunnel (1 rör)	
<i>Generell beskrivning: geologi, hydrogeologi, geomekanik</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Sprickor med både ”stor” och liten vidd. • Anisotropi: genomsläppliga strukturer sub-parallellt med tunnel. • Lägre K (T) nära tunnel pga förinjektering. • ”Stor” gradient pga vattentrycket (djupet). • Bergsspänning pga vikt berg, p_{gH}: ca 2.6 MPa. • Spänningsomlagring runt tunneln kan påverka. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sprickor med liten vidd (99% < 100 µm). • Anisotropi: ej identifierad. • Transmissivitet: Paretofördelning. • Lägre K (T) nära tunnel pga förinjektering. • Ej så stor gradient pga vattentrycket (djupet). • Bergsspänning pga vikt berg, p_{gH}: ca 1.3 MPa. • Spänningsomlagring runt tunneln kan påverka.

Hallandsås

Design efterinjektering

Sektion: 190/850-983, 133 m.

Inläckagekrav: 3.5 liter/s/1000 m tunnel (två tunnelrör) eller 21 liter/min/100 m tunnel.

Syfte: Tätning för generell minskning av inflöde till tunnel. Nå inläckagekrav.

Arbetet följer flödesschemat i Figur 2.

Tester i skärm / kontrollhål

Data för skärmarna från förinjekteringen användes (skärmar NÖ57:1 – NÖ61:2, 190/943-977). Värdena för varje skärm (inklusive eventuella nollvärden) storleksordades och mittenvärdet (medianen) användes för att skatta en specifik kapacitet och en transmissivitet ($Q/dh \approx T$). Medianvärdena för de fem skärmarna på sträckan 190+943 – 190+977 var 15, 8.5, 10, 13.5 och 25 liter/min. Trycket antogs vara 75 meter. Medianvärdena för kontrollhålen för de fem skärmarna var 0.3, 3.5, 0.4, 0 och 0.3 liter/min.

Spricktransmissivitet median skärm och Sprickvidd median skärm

Transmissiviteten är proportionell mot sprickvidden i kubik ($T = \rho g b^3 / 12 \mu$). För flödena mellan 8.5 och 25 liter/min och trycket ovan fås sprickvidder mellan 150 – 200 μm . Detta ger en bild av det oinjekterade berget. Efter injektering hade kontrollhålen medianvärden på 0 – 3.5 liter/min eller vidder på upp till ca 110 μm .

Skattning av inläckage

Skattning av inläckage till tunneln:

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

se t.ex. Fransson och Gustafson (2006), gjordes genom att addera medianvärdena för de fem skärmarna före (15+8.5+10+13.5+25=72 liter/min) och efter injektering (0.3+3.5+0.4+0+0.3=4.5 liter/min). Med ett antaget vattentryck på 75 meter blir transmissiviteten före, T_{tot} : $1.6 \cdot 10^{-5}$ ($T \approx Q/dh = 72/60/1000/75$) och efter injektering, T_{inj} : $1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. Längden, L, där de fem skärmarna ingår är ungefär 46 meter (190+943 – 190+977 + ytterligare ca 12 m för sista skärmen: 190+989), tunnelradien, r_t , och tjockleken på den injekterade zonen, t, antas vara ungefär 4 respektive 5 meter. Skinfaktorn har satts till värdet 5.

$$q_{inj} = \frac{2\pi \cdot 1.6 \cdot 10^{-5} \cdot 75 / 46}{\ln(2 \cdot 75 / 4) + (1.6 \cdot 10^{-5} / 1.0 \cdot 10^{-6} - 1) \cdot \ln(1 + 5 / 4) + 5} = 8.2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

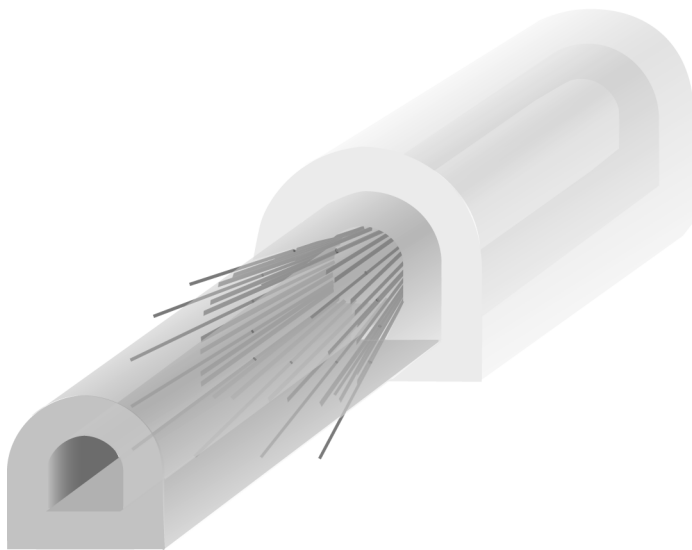
Detta skulle motsvara ungefär 50 liter/min/100 m vilket är större än inläckagekravet på 21 liter/min/100 m tunnel (för två tunnelrör). Analysen identifierar alltså ett injekteringsbehov.

Val av injekteringsmedel

Tätning av fina sprickor behövs men en kompletterande cementinjektering (sprickor > 100 μm) kan också förbättra resultatet. Därför väljs två olika injekteringsmedel: silica sol och ett cementbaserat medel.

Inträngning / skärmgeometri: underlag arbetshandling

När injekteringsbehovet identifierats och de principiella bruksvalen gjorts skattades inträngningslängder för de olika injekteringsmedlen. Designen som presenteras i Tabell 2 och Figur 5 utfördes i samarbete mellan Skanska, Banverket och Chalmers.



Figur 5 Hallandsås: Efterinjektering för generell minskning av inflöde till tunnel. Långa borrhål (totalt 18.5 m) borrhades först till 7 m (Primär 1, P1) och förlängdes sedan (Primär 2, P2). Sekundär (S) och Tertiär (T) är 12 meter och placerade på tredjedelspunkterna mellan de långa hålen.

Målsättningen med designen var följande:

- Uppå en kompletterande tätning:
 - Fullängdshålen syftar till att nå utanför tidigare injekterad zon för att bättre nyttja cementbrukets kapacitet.

- Mätning av inflödet avsåg identifiera tjockleken på tidigare injekterad zon.
- Färre omgångar med borrhål för att öka produktiviteten (relativt ursprungsförslag).
- Antalet hål med silica sol ökas för att öka sannlikheten för tätning av fina / korta sprickor. De görs kortare för att göra en kompletterande tätning och för att inte förlora onödigt mycket bruk.
- Kontroll av inträngningen av cement och silica sol genom split-spacing som underlag för slutlig design.

Tabell 2 sammanställer injekteringsparametrar för efterinjekteringen. Ett antal extraskärmar utfördes längs sträckan (se Bergh och Ekström, 2007).

Tabell 2 Injekteringsparametrar efterinjektering Hallandsås.

	Hallandsås (östra) 190/850-983, 133 m		
	c/c skärm ca 6 m		
<i>Tunneldimension</i>	60 m ²		
<i>Antal injekteringsomg.</i>	4: Primär 1 (P1) 7 m; Primär 2 (P2) samma läge men förlängda till 18.5 m; Sekundär (S) 12 m; Tertiär (T) 12 m. S och T på tredjedelspunkt.		
<i>Namn</i>	P1: kort, P2: lång	Sekundär (S)	Tertiär (T)
<i>Injekteringsmtrl.</i>	cement	Silica sol	Silica sol
<i>Beslutsparameter</i>	$Q_{gr.bh.} > Q_{lim.}$: 10 L/min	$Q_{gr.bh.} < Q_{lim.}$: 10 L/min	$Q_{gr.bh.} < Q_{lim.}$: 10 L/min
p_g	2 MPa och 4 MPa	2 MPa	2 MPa
$t_{gr.}$	60 min	60 min	60 min
<i>Antal inj. hål</i>	12	12	12
<i>Längd</i>	7 och 18.5 m	12 m	12 m
<i>Vinkel</i>	40°	40°	40°

Test designfönster

Analysen utgör underlag för design av injektering med hänsyn till ”jacking” och ”back-flow” samt underlag för design av efterinjektering mht gradient (se Fransson och Gustafson, (2006). Resultatet presenteras i Figur 6, Figur 7 och Bilaga 2 mha designfönster. Analysen har gjorts för en sprickvidd på 100 µm. Designfönstret, se Figur 6, identifierar ett område inom vilket man minskar risken för problem mht jacking (grön färg). I detta fall återfinns djup och vattentryck på ena axeln (antas överensstämma) och injekteringsöverttryck, $\Delta p = p_g - p_w$, på andra axeln.

När djupet ökar kan alltså ett högre injekteringstryck accepteras. I Figur 7 visas motsvarande designfönster med hänsyn till back-flow. En lösning kan vara att använda högre tryck för att nå längre inträngning och minska risken för att bruket kommer tillbaka. Med ett totaltryck på 2 - 4 MPa (Δp ca 1 - 3 MPa när p_w 1 MPa) skulle efterinjekteringen (ei) alltså vara ok med avseende på jacking men inte back-flow.

H [m]	p_w [MPa]	Δp [MPa]						
		0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0	0.0							
10	0.1							
20	0.2							
30	0.3							
40	0.4							
50	0.5							
60	0.6							
70	0.7							
80	0.8							
90	0.9							
100	1.0			<i>ei</i>	<i>ei</i>	<i>ei</i>	<i>ei</i>	<i>ei</i>
110	1.1							
120	1.2							

Figur 6 Designfönster med hänsyn till ”jacking”. Grönt, ok kombinationer av Δp och H (p_w). Använda tryck för Hallandsås vid efterinjektering (*ei*).

H [m]	p_w [MPa]	Δp [MPa]						
		0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0	0.0							
10	0.1							
20	0.2							
30	0.3							
40	0.4							
50	0.5							
60	0.6							
70	0.7							
80	0.8							
90	0.9							
100	1.0			<i>ei</i>	<i>ei</i>	<i>ei</i>	<i>ei</i>	<i>ei</i>
110	1.1							
120	1.2							

Figur 7 Designfönster med hänsyn till ”back-flow”. Grönt, ok kombinationer av Δp och H (p_w). Använda tryck för Hallandsås vid efterinjektering (*ei*).

Det injekteringsmedel som har använts har en låg flytgräns (Rheocem 650) och även om man antar en flytgräns på 1.0 Pa riskerar man att få ”back-flow” till borrhålen.

”Jacking” pga för liten ovanliggande last är inte ett problem. Man kan däremot inte utesluta deformationer pga låga spänningar runt tunneln. Gradienterna är stora och Reynolds tal är större än 10 nära tunnelvägg (se Bilaga 3). Beräkningarna i Bilaga 3 är gjorda baserat på medianvärdena för skärm 1-6, för oinjekterad tunnel (T_{tot} : $1.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), tätad tunnel (T_{inj} : $1.0 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) och för det högsta medianvärdet ($T_{i,max} \approx Q/dh = 25/60/1000/75 = 5.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Sammanfattning:

Jacking: stort djup, liten risk.

Back-flow: ja, liten skjuvgräns på använt bruk. Ändra injekteringsmedlets egenskaper.

Gradient: hög, risk för erosion. Flytta ut borrhål och/eller manschett.

Utförande i tunnel: modell geologi, hydrogeologi, geomekanik

Fyra omgångar injekteringshål har generellt borrats, se Figur 5 och Figur 8. Primär 1 (P1) är 7 meter långa. Dessa har sedan förlängts till ungefär 18 meter: primär 2, P2. Slutligen har två (eller tre) omgångar med 12 meter långa hål borrats. I borrhålen har naturligt inflöde, Q , mätts och för vissa av hålen har även vattentrycket, p_w , mätts.

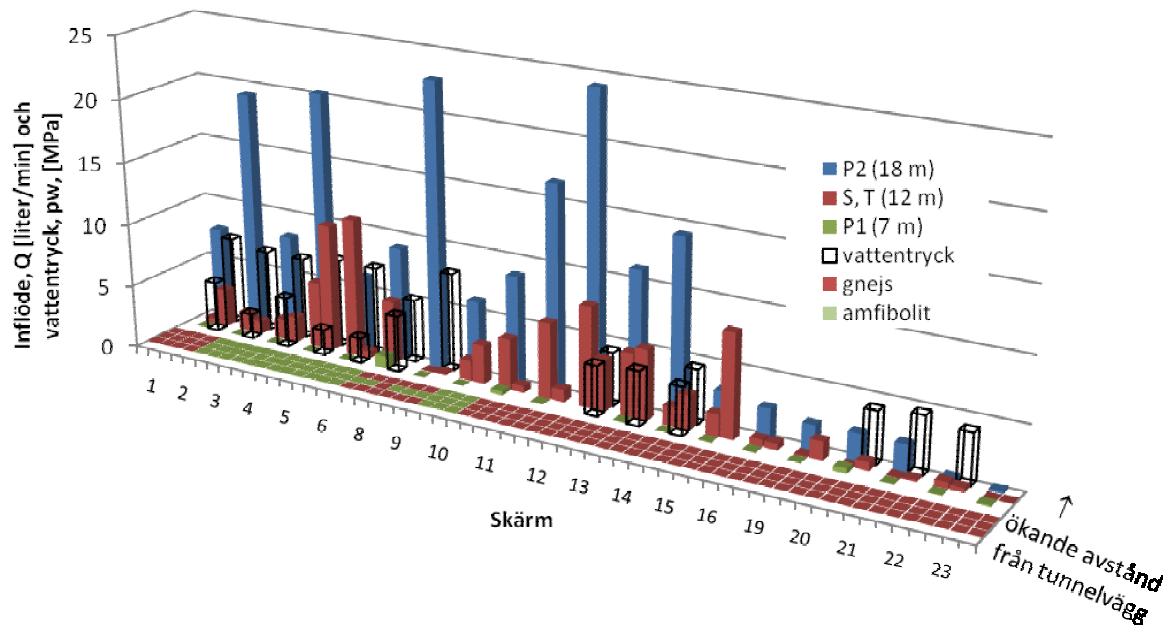
Lokalt flöde och sprickvidder

Baserat på första omgångens hål (primär 1, P1, 7 m) är inflödena och de skattade sprickvidderna små. För delen med amfibolit (ungefär skärm 2 till 10) är mediansprickvidder mellan 2 och 80 μm . Generellt är värdena låga och de högre värdena återfinns i skärm 2, 6 och 10 i kontakter mellan amfibolit och gnejs. För området med gnejs (skärm 11 – 23) är mediansprickvidderna 8 - 55 μm , merparten runt 30 μm och alltså generellt högre än för amfiboliten. De små vidderna bekräftar att det främst rör sig om ett behov av fintätning. Primär 1 har förlängts (till 18.5 meter). Dessa visar ett stort inflöde (blå i Figur 8) vilket tyder på att man nått utanför tidigare tätad zon. Slutligen har två (eller tre) omgångar med 12 meter långa hål borrats. Dessa uppvisar ett flöde mellan de korta (P1) och förlängda (P2) borrhålen. RQD-värdena varierar mellan 25 och 70 med ett medelvärde på 46. Sträckan med skärmarna 2 till 13 har generellt lägre RQD. Detta är den del där det finns kontakter amfibolit-gnejs.

Primär 2: Mediansprickvidder mellan 40 och 220 μm . Sekundär: Mediansprickvidder mellan 2 och 170 μm . Åtta skärmar över 100 μm . Gnejsdelen generellt mindre vidder. Tertiär: Mediansprickvidder mellan 30 och 150 μm . Fem skärmar över 100 μm . En av dessa enbart injekterad med cement. Övriga blandat cement och silica sol.

Flödesdimension

Analys av flödesdimension (Bergh och Ekström, 2007) visar på ett kanalflöde (1D). Detta är i linje med de små sprickvidderna konstaterade ovan och det faktum att det rör sig om en efterinjektering. Man kan föreställa sig att eventuellt mer genomsläppliga (vidare) delarna av sprickorna har fyllts redan vid förinjekteringen.



Figur 8 Geologi (dominerande bergarter), medianinflöden och vattentryck för skärmar 1-23 (ca 190+977 till 190+851), Hallandsås. Hålen är olika långa och staplarna visar därför inflöde och vattentryck med ökande avstånd från tunnelvägg.

Gradient

Amfiboliten (skärm 2 till 10) har generellt låg genomsläplighet och små sprickvidder jämfört med gnejsen. De vattentryck som mätts i de kortare hålen (primär 1, P1, 7 m) är betydligt lägre än de uppmätta i de långa hålen (primär 2, P2, 18.5 m): stor gradient. För gnejsen, som inte är lika tät, är gradienten mindre. För den mer genomsläppliga skärm 6 (kontakt amfibolit – gnejs) med större vidd är gradienten också mindre.

Skattat inflöde till tunnel

Medianvärdena för respektive skärm (samtliga hål) adderas och antas beskriva transmissiviteten för hela sträckningen före och efter respektive injekteringsomgång.

För Primär 1 (P1) som befinner sig innanför tidigare tätad zon blir det skattade inflödet $3.1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ för hela sträckan vilket skulle motsvara 19 liter/min/100 m tunnel. Detta kan jämföras med kravet på 21 liter/min/100 m tunnel för två tunnelrör (egentligen 3.5 liter/s/1000 m tunnel). För skattningen används summan av mediantransmissiviteterna på hela sträckan (133 meter där T_{inj} : $8.1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, se data i Bergh och Ekström, 2007). Eftersom Primär 2 (långa hål) verkar ha nått utanför injekterad zon används summan av mediantransmissiviteterna på hela sträckan för dessa för att beskriva det oinjekterade berget (T_{tot} : $5.0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$). För den delsträcka som användes för designen (skärm 1 – 6)

fås här ett skattat inflöde på 32 L/min/100m vilket är mindre än värdet för designen (50 liter/min/100 m).

Primär 2 som förlängdes med avsikt att nå utanför injekterad zon har för skärm 1- 6 ungefär samma transmissivitet, $T: 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ som beräknat utifrån förinjekteringen ($T_{\text{tot}}: 1.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$). Den injekterade zonen kan alltså mycket riktigt ha en tjocklek på ca 5 meter för de 13 meter långa förinjekteringshålerna (vinkel 20°).

Övriga skärmar (S, T) är 12 meter långa och återfinns därför delvis utanför tidigare förinjekterad zon vilket kan vara en förklaring till att de skattade inflödena ökar för dessa (90 liter/min/100 m). Detta speglar alltså inte nödvändigtvis hur tät tunneln är närmare tunnelvägg som ju hade ett beräknat inläckage på 19 liter/min/100 m tunnel.

Mätningar och observationer av inflöde

Enligt Rosell (2007) utfördes mätningar på en 36 meter lång sträcka mha av en mätvall (Thompsonöverfall) mellan sektion 190+950 och 190+986. Innan efterinjekteringsarbetena startade var vattenläckaget på teststräckan 2.4 l/s. När arbetet avslutats var flödet 0.6 l/s. Mätningarna hade utförts vid olika årstider och efter en kompensation för detta skattades flödet till ca 1 l/s. Som en jämförelse skulle detta för en sträcka på 100 meter innebära en förändring av inflöde från 400 liter/min/100 m till ca 170 liter/min/100 m. Minskningen av läckaget pga efterinjekteringen var alltså 1.4 l/s eller ca 60%. Ungefär samma reduktion (ca 70%) fås för en längre sträcka (190+850 – 190+986) med mätdata från 2004 och 2007 (Rosell, 2007).

Mätningar i det östra tunnelröret utförda april till juli 2007 och under april 2008 av en sträcka på 1139 meter (östra: 190+595 – 191+734) ger värden mellan $1.2 \cdot 10^{-6}$ och $1.9 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (motsvarar 7 – 12 liter/min/100 m) vilket pekar på att man kan nå kravet på 21 liter/min/100 m tunnel för de två tunnelrören (motsvarar inläckagekravet 3.5 liter/s/1000 m tunnel).

Jämförelse prognos och mätning

Prognosen på inflöde före injektering var baserad på fem skärmar, 190+943 – 190+989 (inklusive ca 12 m för sista skärmen) ca 50 liter/min/100 m. Det uppmätta inläckaget till tunneln före injektering på sträckan 190+950 - 190+986 var motsvarande 400 liter/min/100 m. Prognosen underskattar inflödet. Ett spricksystem som är väl kopplat kan vara en orsak.

Nygårdstunneln

Vid Nygårdstunneln har två olika delsträckor studerats. I det ena fallet en förinjektering (436/637-723, 86 m, se Figur 9) och i det andra en efterinjektering (435/690-750, 60 m). Materialet kommer främst från Butrón et al. (2008) och Granberg och Knutsson (2008). För att värdera effekten av en injektering använde Granberg och Knutsson (2008) en

metod där dropp ifrån taket karterades och mättes eller räknades. Mätningar utfördes före och efter efterinjekteringen.

Design förinjektering

Sektion: 436/637-723, 86 m.

Inläckagekrav: 2 - 5 liter/min/100 m tunnel (driftsskedet).

Syfte: Dropptätning tak och generell tätning av tunnel. Nå inläckagekrav.

Arbetet följde flödesschemat i Figur 1.

Förundersökning, fördelning transmissivitet och sprickvidd

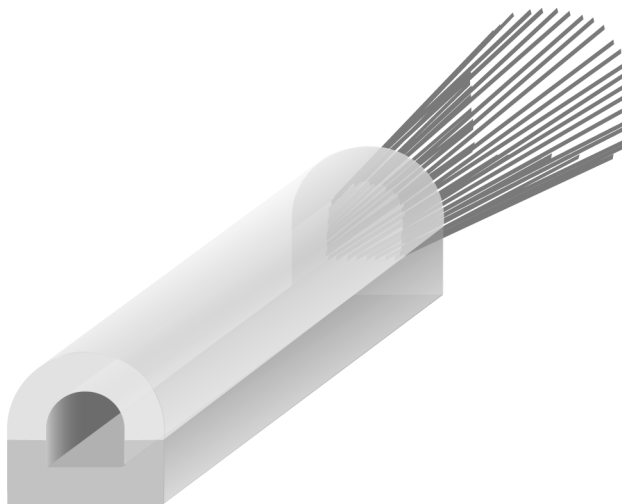
Sektionsvisa tester för inflöde och antal sprickor användes för att skatta en transmissivitet- och sprickviddsfördelning, se Butrón et al. (2008) och parametrar i Tabell 1.

Skattning inläckage

Genom att anta att alla sprickor i fördelningen större än 100 µm kan tätas med ett cementbaserat injekteringsmedel skattades inläckaget till 9 liter/min/100 m, se Butrón et al. (2008). Under antagandet att man tätar sprickor ner till 14 µm blir inflödesprognosen 2.3 liter/min/100 m. Inläckagekravet i driftsskedet var mellan 2 – 5 liter/min/100 m.

Val injekteringsmedel

Det skattade inläckaget var 9 liter/min/100 m om enbart cementbruk användes. Det lägre inläckagekravet i kombination med ett önskemål om dropptätning i tak gjorde att en tätning även av fina sprickor var nödvändig.



Figur 9 Nygårdstunneln: Förinjektering för dropptätning tak och generell tätning av tunnel.

Fördelning inträngning / skärmgeometri: underlag arbetshandling

En design med fintätning (silica sol) i tak och cementinjektering i sula valdes. Tanken var att det skulle fungera som ett paraply med bäst tätning i tak (se ljus färg i Figur 9) och tillräcklig tätning i övrigt (mörk färg). Injekteringsparametrarna presenteras i Tabell 3. Beräkningar av inträngning som underlag för skärmgeometri återfinns i Bútron et al. (2008).

Tabell 3 Injekteringsparametrar förinjektering Nygårdstunneln.

	Nygårdstunneln 436/637-723, 86 m	
<i>Tunneldimension</i>	140 m ² (10.2 m × 13.5 m)	c/c skärm ca 15 m
<i>Antal injekteringsomgångar</i>	2: Sula och Tak	
<i>Namn</i>	Sula	Tak
<i>Injekteringsmaterial</i>	Cement, $\tau_0 > 1.5$ Pa	Silica sol, t_{gel} : 40 min
<i>Beslutsparameter</i>	Placering: sula	Placering: tak
p_g	2.5-3 MPa	2.5-3 MPa
t_{gr}	25 min	21 min
<i>Antal inj. hål</i>	20	20
<i>Längd</i>	24 m	24 m
<i>Vinkel (stick)</i>	12° (5 m)	10° (4 m)
<i>Hålavstånd (spets)</i>	2.0 m	1.5 m

Design efterinjektering

Sektion: 435/690-750, 60 m.

Inläckagekrav: 2 - 5 liter/min/100 m tunnel (driftsskedet). Ett dropp per minut per droppunkt från tunneltaket (Banverkets funktionskrav).

Syfte: Dropptätning tak. Tunnel tidigare injekterad med cement. Nå inläckagekrav.

Arbetet följde flödesschemat i Figur 1 och överensstämmer i princip med designen för förinjekteringen ovan.

Förundersökning, fördelning transmissivitet och sprickvidd

Sektionsvisa tester för inflöde och antal sprickor användes för att skatta en transmissivitet- och sprickviddsfördelning, se Butrón et al. (2008) och parametrar i Tabell 1. För efterinjekteringsdesignen antog man att alla sprickor större än 100 μ m var injekterade.

Skattning inläckage

Genom att anta att alla sprickor i fördelningen större än 100 μ m tätats under förinjekteringen skattades inläckaget till 9 liter/min/100 m (Butrón et al., 2008). Under

antagandet att man tätar sprickor ner till 14 μm blir inflödesprognosen 2.3 liter/min/100 m. Inläckagekravet i driftskedet var mellan 2 – 5 liter/min/100 m.

Val injekteringsmedel

Det skattade inläckaget på 9 liter/min/100 m, det lägre inläckagekravet i kombination med ett önskemål om dropptätning i tak gjorde att en tätning även av fina sprickor var nödvändig. Silica sol användes.

Inträngning / skärmgeometri: underlag arbetshandling

En efterinjekterings-skärm för silica sol designades av Butrón och Funehag (2007). Arbetet utfördes inte som en systematisk efterinjektering utan läckande områden valdes ut, se exempel Figur 10. Borrhålen borrades vinkelrätt mot tunnelvägg eftersom taket var bultat. Om möjligt hade en mindre vinkel varit att föredra för att öka chansen att korsa återstående sprickor. När injekteringsbehovet identifierats och val av medel gjorts skattades inträngningslängder för injekteringsmedlet. Injekteringsparametrar presenteras i Tabell 4.



Figur 10 Efterinjektering Nygårdstunneln (foto: Christian Butrón).

Tabell 4 Injekteringsparametrar efterinjektering Nygårdstunneln.

	Nygårdstunneln 435/690-750, 60 m c/c ”skärm” ca 1.4 m
<i>Tunneldimension</i>	140 m ² (10.2 m × 13.5 m)
<i>Antal injekteringsomgångar</i>	Ej systematisk, läckande områden valdes ut, se Figur 9.
<i>Namn</i>	Tak
<i>Injekteringsmaterial</i>	Silica sol, t_{gel} : 21 min
<i>Beslutsparameter</i>	Placering: tak
p_g	1-1.5 MPa
t_{gr}	17 min
<i>Antal inj. hål, Längd</i>	Varierade, \approx 4 m (inom injekterad zon)
<i>Vinkel</i>	90° (påverkat av bultarna)

Test designfönster

Analysen utgör underlag för design av injektering med hänsyn till ”jacking” och ”back-flow” samt underlag för design av efterinjektering med hänsyn till gradient (se Fransson och Gustafson, (2006). Resultatet presenteras i Figur 11, Figur 12 och Bilaga 4 med hjälp av designfönster. Analysen har gjorts för en sprickvidd på 100 μm . Designfönstret identifierar ett område inom vilket man minskar risken för problem med hänsyn till jacking, Figur 11 (grön färg). I detta fall återfinns djup och vattentryck på ena axeln (antas överensstämma) och injekteringsövertryck, $\Delta p = p_g - p_w$, på andra axeln. När djupet ökar kan alltså ett högre injekteringstryck accepteras. I Figur 12 visas motsvarande designfönster med hänsyn till back-flow. Här kan en lösning vara att använda högre tryck för att nå längre inträngning. Om trycket inte kan ökas på grund av jacking bör man istället anpassa injekteringsmedlets egenskaper.

Analysen har gjorts för en sprickvidd på 100 μm . Med ett antagande om flytgräns på 1.4 Pa riskerar man att få ”back-flow” till borrhålen. Med ett totaltryck på 1-1.5 MPa (Δp ca 0.5-1 MPa när p_w 0.5 MPa) vid efterinjektering (ei) och 2.5 MPa (Δp ca 2 MPa när p_w 0.5 MPa) vid förinjektering (fi) skulle injekteringen alltså vara ok med avseende på jacking men inte back-flow.

Gradienterna är små och Reynolds tal är mindre än 10 nära tunnelvägg (se Bilaga 5). Beräkningarna i Bilaga 5 är gjorda baserat på värden från de inledande läckageberäkningen, se Butrón et al (2008). T_{tot} och $T_{i,max}$ är satt till $6.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (antar att allt flöde går i en spricka). När man tätat sprickor ner till 100 respektive 14 μm fås $T_{100\mu\text{m}}$: $4.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ och $T_{14\mu\text{m}}$: $7.6 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

		Δp [MPa]						
H [m]	p_w [MPa]	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0	0.0							
10	0.1							
20	0.2							
30	0.3							
40	0.4							
50	0.5			ei	ei	fi		
60	0.6							
70	0.7							
80	0.8							
90	0.9							
100	1.0							
110	1.1							
120	1.2							

Figur 11 Designfönster med hänsyn till "jacking". Grönt, ok kombinationer av Δp och H (p_w). Använda tryck för Nygårdstunneln vid efterinjektering (ei) och förinjektering (fi).

		Δp [MPa]						
H [m]	p_w [MPa]	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
0	0.0							
10	0.1							
20	0.2							
30	0.3							
40	0.4							
50	0.5			ei	ei	fi		
60	0.6							
70	0.7							
80	0.8							
90	0.9							
100	1.0							
110	1.1							
120	1.2							

Figur 12 Designfönster med hänsyn till "back-flow". Grönt, ok kombinationer av Δp och H (p_w). Använda tryck för Nygårdstunneln vid efterinjektering (ei) och förinjektering (fi).

Sammanfattning:

Förinjektering (högre injekteringstryck än efterinjektering)

Jacking: gränsfall, sänk injekteringstrycket.

Back-flow: ej ok. Ändra injekteringsmedlets egenskaper.

Efterinjektering

Jacking: ok.

Back-flow: ej ok, öka injekteringstiden. Ändra injekteringsmedlets egenskaper.

Gradient: låg, liten risk erosion. Möjligen ökande bekymmer under tätningens gång.

Utförande i tunnel: modell geologi, hydrogeologi, geomekanik

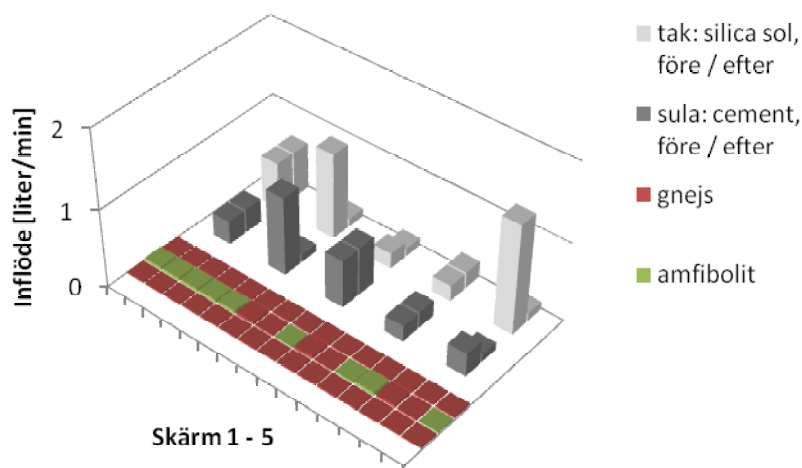
Förinjektering (436/637-723, 86 m)

En omgång injekteringshål har gjorts i varje skärmläge (1-5). Borrhålen i taket har injekterats med silica sol och borrhålen i sulan har injekterats med cement.

Vattenförlustmätningar har utförts med ett totaltryck av 1.6 MPa, vilket antas vara ca 1.1 MPa över vattentrycket på ca 0.5 MPa. Figur 13 visar inflöde i tak (ljusgrå) och sula (mörkare grå) före och efter injektering.

Lokalt flöde och sprickvidder

Enligt Paretoanalysen är 99 % av sprickorna mindre än 100 µm. De sprickor som är större än 100 µm står dock för ca 60 % av inflödet (Butron et al. 2008). Avsnitt med mest kontakter amfibolit - gnejs (skärm 1 och 2) visar exempel på både god tätning (minskning av inflöde efter injektering) och i princip ingen tätning (samma inflöde före och efter). I detta avsnitt återfinns de lägsta RQD-värdena (ca 70), många sprickor bör ge större variation i sprickvidd. Avsnittet för skärm 5 med enbart lite kontakter amfibolit – gnejs har högst RQD (80-90). För de fem skärmarna kan man se att det är de stora flödena som minskar mest vilket är i linje med att stora, öppna sprickor skulle vara lätta att täta emedan små är besvärligt. Det höga RQD värdet för skärm 5 och den stora minskningen i flöde tyder på enstaka öppna sprickor.



Figur 13 Geologi och medianinflöden skärmar 1-5 (från vänster, 436+723 till 436+637), Nygårdstunneln. Vattentryck ca 0.5 MPa (totaltryck vattenförlustmätning 1.6 MPa). Bergartsfördelning i grönt och rött. Inflöde före och efter cementinjektering i golv (mörkgrå) och silicasolinjektering i tak (ljusgrå).

Flödesdimension

Analys av flödesdimension baserat på injekteringsdata tyder på endimensionellt (kanal-) flöde för skärm 1. Detta gör det besvärligt att träffa de vattenförande delarna av sprickan. För skärm 5, där flödet reducerats väsentligt, tyder dimensionsanalysen på ett flöde i två (radiellt) eller tre (sfäriskt) dimensioner. Detta har rimligen underlättat träff av sprickor och spridning av injekteringsmedel. I skärm 1 finns en större andel kontakt mellan gnejs och amfibolit än i skärm 5. Skillnader i mekaniska egenskaper och eventuell vittring borde göra kontaktarna särskilt besvärliga. I detta fall rör det sig om en förinjektering vilket gör att eventuellt mer genomsläppliga (vidare) delar av sprickorna fortfarande borde vara injekterbara. Injekteringen är gjord med sådant tryck att det radiella eller sfäriska flödet i skärm 5 kan bero på deformation (gränsfall jacking).

Gradient

Mätningar av vattentryck har inte gjorts. Vattentrycket har antagits motsvara djupet för tunneln.

Skattat inflöde till tunnel

Medianvärdena för respektive skärm (samtliga hål) adderas och antas beskriva transmissiviteten för hela sträckningen före ($T_{\text{tot}}: 4.2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) och efter injektering ($T_{\text{inj}}: 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$). Det skattade inflödet blir $1.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ för sträckan vilket skulle motsvara 1.0 liter/min/100 m tunnel, se Ekvation 1. H antas vara 50 meter. Längden, L, är 86 meter, tunnelradien och tjockleken på den injekterade zonen, t, antas vara ungefär 5 meter. Skinfaktorn har satts till värdet 5. Detta kan jämföras med kravet under driftsskedet på 2 - 5 liter/min/100 m tunnel. Uppskattningen vid en tätning av sprickor större än 100 μm var 9 liter/min/100 m tunnel.

Mätningar och observationer av inflöde

Få läckageområden och dräner enbart nödvändigt på liten del av sträckan.

Efterinjektering (435/690-750, 60 m)

Arbetet utfördes inte som en systematisk efterinjektering utan läckande områden valdes ut, se exempel Figur 10. Efterinjekteringen utfördes med Silica sol.

Mätningar och observationer av inflöde

Mätningarna gjordes mha droppkartering (svagt dropp, kraftigt dropp, kraftigt rinnande vatten) och mätvall. På den efterinjekterade sträckan konstaterades att antalet dropppunkter minskade med 43% (63 till 36) och det totala inflödet för dessa minskade med 83% (från 0.25 till 0.04 liter/min på 66 meter, Granberg och Knutsson, 2008). Variationer observerades vilket sannolikt beror på förändringar i grundvattentryck som

följd av nederbörd . Inflödet för droppkarteringen på sträckan (435/695-729) uppmättes före efterinjektering till mellan 0.1 och 0.25 liter/min och efter efterinjektering till 0.04 liter/min. Det senare skulle motsvara inflöden på mindre än 0.1 liter/min/100 m (för taket).

Jämförelse prognos och mätning

Under antagandet att man tätar sprickor ner till 14 μm blir inflödesprognosen 2.3 liter/min/100 m (Butrón et al., 2008). Prognosen på inflöde efter injektering baserad på data för de fem skärmarna (436/637-723, 86 m, Figure 13) skulle motsvara 1.0 liter/min/100 m tunnel. Inflödet för droppkarteringen på sträckan (435/695-729) uppmättes efter efterinjektering till 0.04 liter/min. Det senare skulle motsvara inflöden på mindre än 0.1 liter/min/100 m. I detta ingår dock inte flödet längs sulan.

Slutsatser

Slutsatserna bygger på en sammanställning av arbeten utförda av Bergh och Ekström (2007), Butrón et al. (2008) och Granberg och Knutsson (2008) samt kompletterande analyser. Resultatet sammanfattas i Tabell 5. Några slutsatser och rekommendationer för de två tunnlarna beskrivs nedan.

Hallandsås

Sammanställningen tyder på att efterinjekteringen har fungerat väl då man har en mätt minskning av inflödet till tunneln på 60 - 70% (Rosell, 2007) och verkar nå inläckagekravet över en längre sträcka. En identifierad risk för erosion (pga den höga gradienten) motiverar den design som använts med borrhål som når *utanför* tidigare injekterad zon. I enlighet med detta borde även att ”backa” framtida injekteringar (se Figur 16) och/eller flytta in injekteringsmanschetterna i borrhålen kunna förbättra resultatet. Det avsnitt som varit svårast att täta (kontakt gnejs – amfibolit) har förhållandevis ”stora” återstående flöden, många sprickor (låg RQD) och små vidder. Flödesdimensionen tyder på kanalflöde. För att möjliggöra en förbättrad tätning är det alltså viktigt att använda fintättningsmedel i de senare omgångarna (sekundär och tertiär) trots att det totala inflödet är ”stort”. Många små sprickor kan tillsammans föra mycket vatten. Ett tätare borrhålmönster borde också kunna förbättra resultatet. Flytgränsen för det använda cementbruket är låg, att använda ett bruk med högre flytgräns vore en fördel. På samma sätt kan en kortare geltid för silica sol förbättra resultatet.

Nygårdstunneln

Även för Nygårdstunneln tyder sammanställningen på att efterinjekteringen i taket har fungerat väl då vi har en minskning av flödet för droppkarteringen med 83% (se Granberg och Knutsson, 2008). Resultatet pekar på ett inflöde för taket på sträckan som skulle motsvara inflöden på mindre än 0.1 liter/min/100 m. I detta ingår dock inte flödet längs sulan. Kompletterande analyser visar att gradienten är liten vilket motiverar en design med borrhål *innanför* tidigare injekterad zon. Det finns möjligen en risk för återflöde av bruk till borrhål (back-flow) och deformation (jacking) vilket kan ha påverkat inflödet av bruk till tunneln under injekteringen. Svårigheter med detta blev mer påtagligt vid efterinjekteringen jämfört med förinjekteringen. Att utföra en efterinjektering i en sektion som var bultad visade sig vara besvärligt. Problem med flöde i bulthål och närliggande manschetthål gjorde även att injekteringstiden inte hölls med begränsad inträngning som följd (Granberg och Knutsson, 2008). Detta hade man kunnat förbättra med hjälp av tidigare gelning. En efterinjekteringsdesign som tar hänsyn till de missade sprickorna är viktig. Detta märktes speciellt på horisontella sprickor där ett bra resultat fås med borrhål vinkelrätt mot tunnelväggen. Att ”backa” injekteringen och/eller flytta in injekteringsmanschetterna borde även här kunna förbättra resultatet.

Tabell 5 Sammanställning av resultat.

	Hallandsås	Nygårdstunneln
<i>Inläckagekrav, mätt inflöde, observationer</i>	Mätvall på teststräcka (36 m): Minskning av flödet med ca 60%. 2.4 l/s innan arbetena startade och ett läckage av 0.6 l/s efter det att arbetena avslutades (ungefär 1.0 l/s med hänsyn till skillnader i grundvattentryck). Verkar nå inläckagekrav på längre sträcka.	<u>Förinjektering:</u> Få läckageområden och dräner enbart nödvändigt på liten del av sträckan. <u>Efterinjektering:</u> Antalet dropppunkter minskade med 43% (63 till 36) och det totala inflödet för dessa minskade med 83% (från 0.25 till 0.04 liter/min på 66 meter). Minskning av behovet av dräner.
<i>Val av injekteringsmedel</i>	Cement och Silica sol. Vid antagande om <u>en</u> spricka: P1: mindre än 100 µm. P2: större än 100 µm. S och T: runt 100 µm RQD: 25 – 70, därför sannolikt många sprickor med mindre vidd. Liten möjlighet att förbättra injekteringen med enbart cementbruk.	<u>Förinjektering:</u> Cement och Silica sol. <u>Efterinjektering:</u> Silica sol. 99% av sprickorna mindre än 100 µm. Silica sol gav ökad täthet. RQD: lägst 70.
<i>Inträngning, skärmgeometri</i> <i>Jacking</i> <i>Back-flow</i> <i>(återflöde)</i> <i>Gradient</i>	<i>Jacking:</i> stort djup, liten risk. <i>Back-flow:</i> ja, liten skjuvgräns på använt bruk. Ändra injekteringsmedlets egenskaper. <i>Gradient:</i> hög, risk för erosion. Flytta ut borrhål och/eller manschett. Med avseende på gradient och backflow verkar det riktigt att injektera med längre hål som når utanför förinjekterad zon. Tyder på kanalflöde (1D). Ingen större förändring från omgång S till T, borra tätare.	<u>Förinjektering:</u> (högre injekteringstryck) <i>Jacking:</i> gränsfall, sänk injekteringstrycket. <i>Back-flow:</i> ej ok. Ändra injekteringsmedlets egenskaper. <u>Efterinjektering:</u> <i>Jacking:</i> ok. <i>Back-flow:</i> ej ok, öka injekteringstiden. Ändra injekteringsmedlets egenskaper. <i>Gradient:</i> låg, liten risk erosion. Möjligen ökande bekymmer under tätningens gång. Både 2D och 1D flöde. Små sprickvidder. Vid en förinjektering är det mer troligt att större, mer öppna delar av sprickorna finns kvar (2D flöde).
<i>Kommentar geologi-hydrogeologi-injektering</i>	Kontakter amfibolit-gnejs: sträckan med skärmarna 2 till 13 har generellt lägre RQD. Enligt omgång P1, amfiboliten generellt tätare än gnejsen.	Kontakt gnejs – amfibolit, lägst RQD och stor alt. ingen ändring i inflöde före och efter injektering. Många sprickor bör ge större variation i sprickvidd. De med stor vidd tätas.

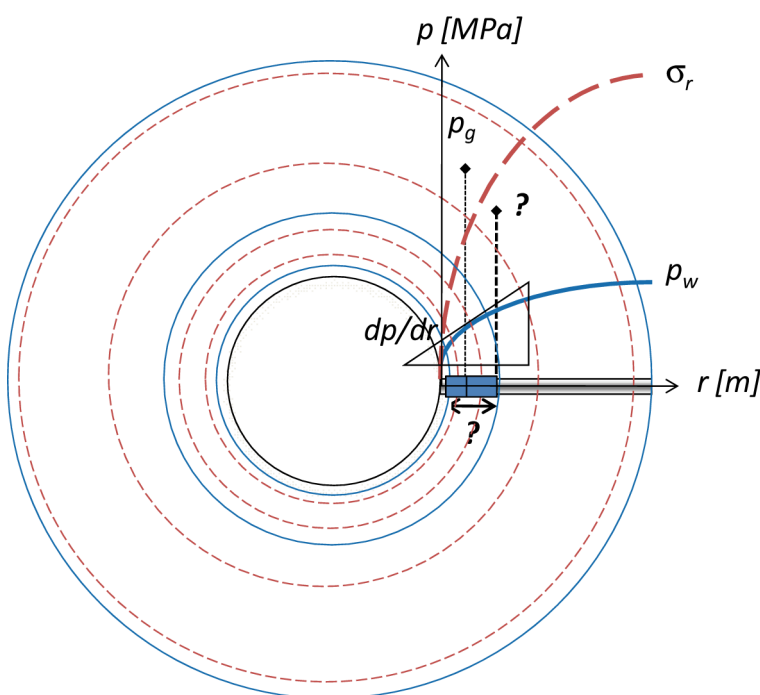
Rekommendationer fortsatt utvecklingsarbete

För det fortsatta utvecklingsarbetet vore ett fältförsök intressant. Detta skall förslagsvis fokusera på tre saker:

- Identifiera, tydliggöra och särskilja olika mekanismer / processer.
- Visa ett tydligt, repeterbart tillvägagångssätt.
- Utveckla en modell (geologi, hydrogeologi & geomekanik) för den specifika platsen som demonstrerar en förståelse för injekteringsrelaterade problem.

Identifiera, tydliggöra och särskilja olika mekanismer / processer

Ett problem vid injektering är att injekteringsmedlet kommer tillbaka till tunneln. För att veta hur detta skall åtgärdas bör man rimligen ta reda på hur problemet uppkommit. Figur 14 visar en principiell skiss som beskriver ökning av vattentryck, p_w (blå linje) och radiell bergspänning, σ_r (brun, streckad linje) runt en tunnel och längs ett borrhål i tunnelvägg. En stor hydraulisk gradient, dp/dr , kan leda till erosion. Ett högt injekteringstryck, p_g , kan leda till en lång inträngning men troligtvis även deformation då bergsspänningarna i anslutning till tunneln kan vara låga.



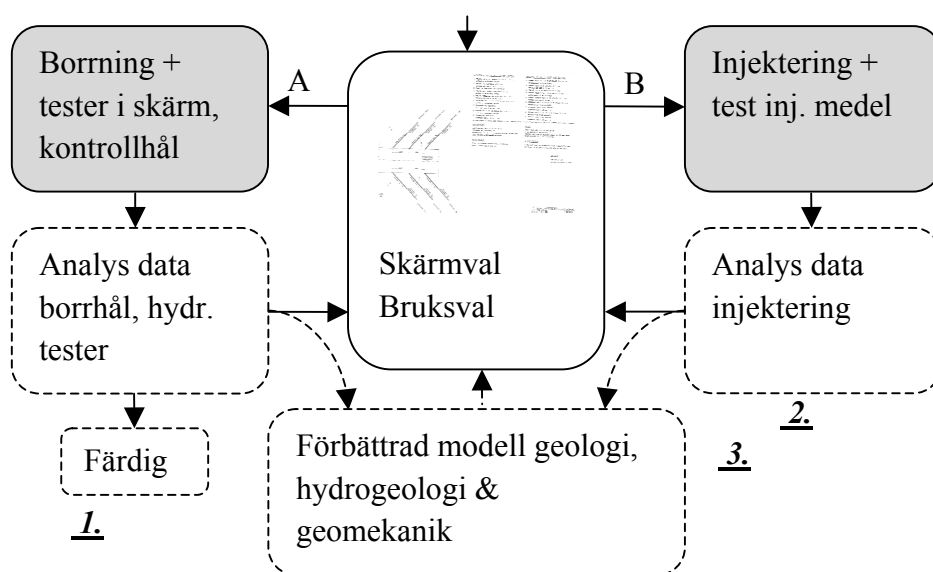
Figur 14 Principiell skiss som beskriver ökning av vattentryck, p_w (blå linje) och radiell bergspänning, σ_r (brun, streckad linje) runt en tunnel och längs ett borrhål i tunnelvägg. En stor hydraulisk gradient, dp/dr , kan leda till erosion. Ett högt injekteringstryck, p_g , kan leda till en lång inträngning men även deformation.

Frågan är alltså:

Vilken / vilka mekanism(er) leder till problem och hur kan man variera manschettplacering, borrhålslängd och injekteringstryck för att minska risken för problem?

Utveckling av tillvägagångssätt och bergmodell

Designen påbörjas i enlighet med Figur 1 eller Figur 2. Denna kan sedan vidareutvecklas med hjälp av ett designfönster, Figur 3. I tunneln utförs injektering och analys enligt Figur 15 (utvecklad Figur 4). Särskilt fokus bör ligga på rutorna med streckad ram (1 – 3).



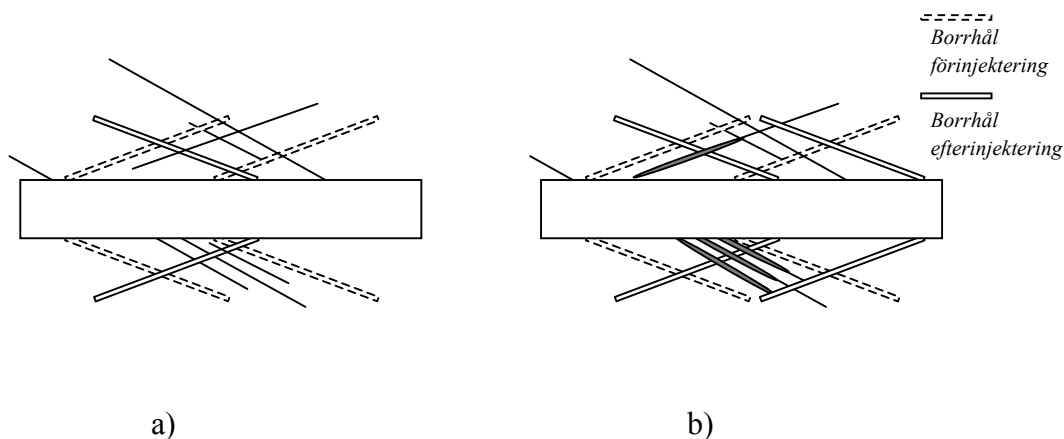
Figur 15 Flödesschema för utförande i tunnel samt analyser. Grå rutor utförande i tunnel, övriga analys eller val. Skärmval, bruksval beskrivs i arbetshandling (mitten). Särskilt fokus bör ligga på rutorna med streckad ram (1 – 3).

Rutan ”Färdig” (1) har inte behandlats i denna rapport men tanken är att vidareutveckla en analys som baserat på hydrauliska mätningar i injekteringshål och kontrollhål ger en indikation om huruvida man klarar inläckagekraven för färdig tunnel. Vidare kan analys av data från själva injekteringen (2) sannolikt räta ut en del frågeställningar angående vilka mekanismer som ligger bakom injekteringsresultatet. Flödesdimensionen är en viktig fråga. Utvecklingen av en konceptuell modell och en bergmodell (3) syftar till att demonstrera en förståelse för de mekanismer som styr injekteringen vilket i sin tur kan användas för att uppdatera arbetshandlingarna om nödvändigt.

Praktiska rekommendationer

Följande punkter vore intressanta för det fortsatta arbetet:

- Diskussion med entreprenör och beställare angående varför och hur injekteringen skall utföras med syfte att gemensamt komma fram till en design. Förslag görs baserat på presenterade flödesschema och identifierade frågeställningar. Seminarium med injekterare för att diskutera varför och hur. Beskriva vad som händer runt en tunnel.
- Använd uppmätt flöde och tryck för att skatta sprickvidder ($Q/dh \approx T = \rho g b^3 / 12 \mu$). Om sprickvidden för värden för ett borrhål är mindre än 100 μm så bör fintättningsmedel användas.
- Om man behöver täta större strukturer, använd ett bruk med tillräcklig skjuvgräns. Detta minskar omfattningen av bruksflöde in till tunneln.
- Testa mätning av skjuvgräns med hjälp av en ”yield stick” för att få värden för kontrollberäkningar (Axelsson och Gustafson, 2006).
- Prova att flytta in manschetten, borra längre borrhål och backa injekteringen (se Figur 16) för att bättre ta hänsyn till den gradient och spänningsförändring som fås runt tunneln och minska flödet av injekteringsmedel till tunneln.
- Det vore intressant och tidsbesparande att använda den metod för evakuering av vatten och luft ur injekteringsborrhål som utvecklas på Chalmers.



Figur 16 a) Borrhålen för efterinjekteringen borras i motsatt riktning för att öka chansen att träffa sprickor som förinjekteringen missat. b) Borrhålen injekteras. Nästa efterinjekteringskärm placeras utanför den föregående (man backar). Injekteringen i föregående skärm fungerar som mothåll och minskar omfattningen av bruksinflöde till tunneln.

Referenser

- Axelsson, M, Gustafson, G, 2006. A robust method to determine the shear strength of cement-based injection grouts in the field. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 21, Issue 5, p. 499-503.
- Bergh, Å, A-J, Ekström, 2007. Efterinjektering i Hallandsåstunneln Analys av data från efterinjektering med cement och silica sol i den oinklädda delen av tunneln. Examensarbete 2007:133, Avdelningen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Butrón, C, Gustafson, G, Funehag, J, 2008. Grouting in the Nygård Tunnel: Pre-grouting Design for Drip Sealing and Evaluation. Rapport, Avdelningen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Butrón, C, Funehag, J, 2007. Nygård tunnel post-grouting for drop sealing – perpendicular boreholes (vertically inclined) design section 435+690 – 435+750. Concept 2007-06-26. Avdelningen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Fransson, Å, Gustafson, G, 2006. Postexcavation grouting: Inflow prognosis and design – suggested analyses (In Swedish), Report 75, SveBeFo Swedish Rock Engineering Research, Stockholm.
- Granberg, N, Knutsson, S, 2008. Kvalitetssäkring av efterinjektering En fältstudie i Nygårdstunneln. Examensarbete 2008:19, Avdelningen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Gustafson, G, Fransson, Å, Funehag, J, Axelsson, M, 2004. Ett nytt angreppssätt för bergbeskrivning och analysprocess för injektering. *Väg och vattenbyggaren*, nr 4: 10-15.
- Rosell, K, 2007. PM Projekt Hallandsås, Utvärdering av efterinjektering i östra tunneln norr om TT1.

Bilagor

Bilaga 1: Underlag för design mht jacking och back-flow: Hallandsås

Inträngning-Jacking-Backflow

Hydraulisk sprickvidd	b [m]	0,0001	b [µm] 100
Egenskaper inj. medel	ρ_0 [Pa]	0,1	
	μ_0 [Pas]	0,01	
Injektionsstid	t [min]	60	
Densitet bergmassa	ρ_b [kg/m ³]	2650	
Gravitation	g	9,81	

Injektionsstryck $P_g = p_w + \Delta p$

p_w [MPa]	$p_w + \Delta p$	Δp [MPa]									
		0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	6	8	10
0	0,0	0,10	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	6,00	8,00	10,00
10	0,1	0,20	0,60	1,10	1,60	2,10	2,60	3,10	6,10	8,10	10,10
20	0,2	0,30	0,70	1,20	1,70	2,20	2,70	3,20	6,20	8,20	10,20
30	0,3	0,39	0,79	1,29	1,79	2,29	2,79	3,29	6,29	8,29	10,29
40	0,4	0,49	0,89	1,39	1,89	2,39	2,89	3,39	6,39	8,39	10,39
50	0,5	0,59	0,99	1,49	1,99	2,49	2,99	3,49	6,49	8,49	10,49
60	0,6	0,69	1,09	1,59	2,09	2,59	3,09	3,59	6,59	8,59	10,59
70	0,7	0,79	1,19	1,69	2,19	2,69	3,19	3,69	6,69	8,69	10,69
80	0,8	0,88	1,28	1,78	2,28	2,78	3,28	3,78	6,78	8,78	10,78
90	0,9	0,98	1,38	1,88	2,38	2,88	3,38	3,88	6,88	8,88	10,88
100	1,0	1,08	1,48	1,98	2,48	2,98	3,48	3,98	6,98	8,98	10,98
110	1,1	1,18	1,58	2,08	2,58	3,08	3,58	4,08	7,08	9,08	11,08
120	1,2	1,28	1,68	2,18	2,68	3,18	3,68	4,18	7,18	9,18	11,18

Jacking

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

H [m]	p_w [MPa]	$3\rho_b g H - 2p_w$	Δp [MPa]									
			0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	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	
30	0,3	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	
40	0,4	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	
50	0,5	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	
60	0,6	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	
70	0,7	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	
80	0,8	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	
90	0,9	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	
100	1,0	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	
110	1,1	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	
120	1,2	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	

Back-flow

$i_b > p_w / \Delta p$

p_w [MPa]	$p_w / \Delta p$	Δp [MPa]									
		0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	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	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
0,2	1,96	0,39	0,20	0,13	0,10	0,08	0,07	0,03	0,02	0,02	0,02
0,3	2,94	0,59	0,29	0,20	0,15	0,12	0,10	0,05	0,04	0,03	0,03
0,4	3,92	0,78	0,39	0,26	0,20	0,16	0,13	0,07	0,05	0,04	0,04
0,5	4,91	0,98	0,49	0,33	0,25	0,20	0,16	0,08	0,06	0,05	0,05
0,6	5,89	1,18	0,59	0,39	0,29	0,24	0,20	0,10	0,07	0,06	0,06
0,7	6,87	1,37	0,69	0,46	0,34	0,27	0,23	0,11	0,09	0,07	0,07
0,8	7,85	1,57	0,78	0,52	0,39	0,31	0,26	0,13	0,10	0,08	0,08
0,9	8,83	1,77	0,88	0,59	0,44	0,35	0,29	0,15	0,11	0,09	0,09
1,0	9,81	1,96	0,98	0,65	0,49	0,39	0,33	0,16	0,12	0,10	0,10
1,1	10,79	2,16	1,08	0,72	0,54	0,43	0,36	0,18	0,13	0,11	0,11
1,2	11,77	2,35	1,18	0,78	0,59	0,47	0,39	0,20	0,15	0,12	0,12

Inträngning

i_b [-]	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ϕ_b [-]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
i_b [-]	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
l_{max} [m]	50,00	250,00	500,00	750,00	1000,00	1250,00	1500,00	3000,00	4000,00	5000,00

p_w [MPa]	l [m]	Δp [MPa]									
		0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	6	8	10
0,0	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
0,1	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
0,2	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
0,3	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
0,4	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
0,5	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
0,6	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
0,7	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
0,8	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
0,9	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
1,0	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
1,1	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57
1,2	3,11	7,02	9,95	12,20	14,09	15,76	17,27	24,44	28,23	31,57	31,57

H [m]	p_w [MPa]	Δp [MPa]									
		0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	6	8	10
0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110	1,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Bilaga 2: Underlag för design mht jacking och back-flow: Hallandsås

Inträngning-Jacking-Backflow

Hydraulisk sprickvidd	b [m]	0,0001	b [µm] 100
Egenskaper inj. medel	ρ_0 [Pa]	1	
	μ_0 [Pas]	0,01	
Injekteringstid	t [min]	60	
Densitet bergmassa	ρ_b [kg/m ³]	2650	
Gravitation	g	9,81	

Injekteringsstryck $P_g = p_w + \Delta p$

p_w [m]	p_w [MPa]	$p_w + \Delta p$	Δp [MPa]									
			0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	6	8	10
0	0,0	0,10	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	6,00	8,00	10,00	
10	0,1	0,20	0,60	1,10	1,60	2,10	2,60	3,10	6,10	8,10	10,10	
20	0,2	0,30	0,70	1,20	1,70	2,20	2,70	3,20	6,20	8,20	10,20	
30	0,3	0,39	0,79	1,29	1,79	2,29	2,79	3,29	6,29	8,29	10,29	
40	0,4	0,49	0,89	1,39	1,89	2,39	2,89	3,39	6,39	8,39	10,39	
50	0,5	0,59	0,99	1,49	1,99	2,49	2,99	3,49	6,49	8,49	10,49	
60	0,6	0,69	1,09	1,59	2,09	2,59	3,09	3,59	6,59	8,59	10,59	
70	0,7	0,79	1,19	1,69	2,19	2,69	3,19	3,69	6,69	8,69	10,69	
80	0,8	0,88	1,28	1,78	2,28	2,78	3,28	3,78	6,78	8,78	10,78	
90	0,9	0,98	1,38	1,88	2,38	2,88	3,38	3,88	6,88	8,88	10,88	
100	1,0	1,08	1,48	1,98	2,48	2,98	3,48	3,98	6,98	8,98	10,98	
110	1,1	1,18	1,58	2,08	2,58	3,08	3,58	4,08	7,08	9,08	11,08	
120	1,2	1,28	1,68	2,18	2,68	3,18	3,68	4,18	7,18	9,18	11,18	

Jacking

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

H [m]	p_w [MPa]	$3\rho_b g H - 2p_w$	Δp [MPa]									
			0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	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	
30	0,3	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	
40	0,4	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	
50	0,5	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	
60	0,6	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	3,50	
70	0,7	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	
80	0,8	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	4,67	
90	0,9	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	
100	1,0	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	5,84	
110	1,1	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	
120	1,2	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	

Back-flow

$$l_b > p_w / \Delta p$$

p_w [MPa]	$p_w / \Delta p$	Δp [MPa]									
		0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	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	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
0,2	1,96	0,39	0,20	0,13	0,10	0,08	0,07	0,03	0,02	0,02	0,02
0,3	2,94	0,59	0,29	0,20	0,15	0,12	0,10	0,05	0,04	0,04	0,03
0,4	3,92	0,78	0,39	0,26	0,20	0,16	0,13	0,07	0,05	0,05	0,04
0,5	4,91	0,98	0,49	0,33	0,25	0,20	0,16	0,08	0,06	0,05	0,05
0,6	5,89	1,18	0,59	0,39	0,29	0,24	0,20	0,10	0,07	0,06	0,06
0,7	6,87	1,37	0,69	0,46	0,34	0,27	0,23	0,11	0,09	0,07	0,07
0,8	7,85	1,57	0,78	0,52	0,39	0,31	0,26	0,13	0,10	0,08	0,08
0,9	8,83	1,77	0,88	0,59	0,44	0,35	0,29	0,15	0,11	0,09	0,09
1,0	9,81	1,96	0,98	0,65	0,49	0,39	0,33	0,16	0,12	0,10	0,10
1,1	10,79	2,16	1,08	0,72	0,54	0,43	0,36	0,18	0,13	0,11	0,11
1,2	11,77	2,35	1,18	0,78	0,59	0,47	0,39	0,20	0,15	0,12	0,12

Inträngning

l_b [-]	0,60	0,12	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
θ_b [-]	0,08	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
l_b [-]	0,50	0,26	0,19	0,16	0,14	0,12	0,11	0,08	0,07	0,06
l_{max} [m]	5,00	25,00	50,00	75,00	100,00	125,00	150,00	300,00	400,00	500,00

p_w [MPa]	l [m]	Δp [MPa]									
		0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	6	8	10
0,0	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
0,1	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
0,2	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
0,3	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
0,4	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
0,5	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
0,6	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
0,7	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
0,8	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
0,9	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
1,0	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
1,1	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10
1,2	2,50	6,47	9,42	11,68	13,59	15,26	16,77	23,96	27,75	31,10	31,10

H [m]	p_w [MPa]	Δp [MPa]									
		0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	6	8	10
0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110	1,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Bilaga 3: Underlag för design mht gradient : Hallandsås

Borrhål Hallandsås

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

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

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

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

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

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

H [m]	75	ρ [kg/m ³]	1000	Δp_1 [Pa]	1,00E+06
r_t [m]	4,4	μ [Pas]	1,30E-03	Δp_2 [Pa]	4,00E+06
ξ	5	g [m ² /s]	9,81		
		T_{tot} [m ² /s]	1,60E-05		
		$T_{i,max}$ [m ² /s]	5,50E-06		
		T_{inj} [m ² /s]	1,00E-06	efter injektering	

Oinjekterad
tunnel

dr = a

	0,0	1,0	3,0	6,4	15,0	
r	4,4	5,4	7,4	10,8	19,4	
dh/dr	2	2	1	1	0	
Re (T _{tot})	25	20	15	10,0	6	Re < 10
F ₁ / 2 [m]	25	31	43	62	112	
F ₂ / 2 [m]	101	125	171	250	449	

dr = a

	0,0	1,0	3,0	6,4	15,0	
r	4,4	5,4	7,4	10,8	19,4	
dh/dr	3	2	2	1	1	
Re (T _{i,max})	12	9	6,9	5	3	Re < 10
F ₁ / 2 [m]	19	23	31	46	83	
F ₂ / 2 [m]	75	92	126	184	331	

Tätad
tunnel

dr = a

	0,0	1,0	3,0	6,4	15,0	
r	4,4	5,4	7,4	10,8	19,4	
dh/dr	17	14	10	7	4	överskattad!
Re (T _{inj})	13	11	8	5	3,0	Re < 10
F ₁ / 2 [m]	3,0	3,6	5,0	7,3	13,2	underskattad!
F ₂ / 2 [m]	11,9	14,6	20,0	29,3	52,7	underskattad!

Bilaga 4: Underlag för design mht jacking och back-flow: Nygårdstunneln

Inträning-Jacking-Backflow

Hydraulisk sprickvidd	b [m]	0,0001	b [µm] 100
Egenskaper inj. medel	ρ_0 [Pa]	1,4	
	μ_0 [Pas]	0,02	
Injekteringstid	t [min]	25	
Densitet bergmassa	ρ_b [kg/m ³]	2650	
Gravitation	g	9,81	

Injekteringstryck $P_g = p_w + \Delta p$

p_w [m]	p_w [MPa]	$p_w + \Delta p$	Δp [MPa]									
			0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	6	8	10
0	0,0	0,0	0,10	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	6,00	8,00	10,00
10	0,1	0,20	0,60	1,10	1,60	2,10	2,60	3,10	6,10	8,10	10,10	
20	0,2	0,30	0,70	1,20	1,70	2,20	2,70	3,20	6,20	8,20	10,20	
30	0,3	0,39	0,79	1,29	1,79	2,29	2,79	3,29	6,29	8,29	10,29	
40	0,4	0,49	0,89	1,39	1,89	2,39	2,89	3,39	6,39	8,39	10,39	
50	0,5	0,59	0,99	1,49	1,99	2,49	2,99	3,49	6,49	8,49	10,49	
60	0,6	0,69	1,09	1,59	2,09	2,59	3,09	3,59	6,59	8,59	10,59	
70	0,7	0,79	1,19	1,69	2,19	2,69	3,19	3,69	6,69	8,69	10,69	
80	0,8	0,88	1,28	1,78	2,28	2,78	3,28	3,78	6,78	8,78	10,78	
90	0,9	0,98	1,38	1,88	2,38	2,88	3,38	3,88	6,88	8,88	10,88	
100	1,0	1,08	1,48	1,98	2,48	2,98	3,48	3,98	6,98	8,98	10,98	
110	1,1	1,18	1,58	2,08	2,58	3,08	3,58	4,08	7,08	9,08	11,08	
120	1,2	1,28	1,68	2,18	2,68	3,18	3,68	4,18	7,18	9,18	11,18	

Jacking

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

H [m]	p_w [MPa]	$3\rho_b g H - 2p_w$	Δp [MPa]									
			0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	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
30	0,3	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
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
50	0,5	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92	2,92
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
70	0,7	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09	4,09
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
90	0,9	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25	5,25
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
110	1,1	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42	6,42
120	1,2	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00

Back-flow

$I_D > p_w / \Delta p$

p_w [MPa]	$p_w / \Delta p$	Δp [MPa]										
		0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	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	0,07	0,05	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
0,2	1,96	0,39	0,20	0,13	0,10	0,08	0,07	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02
0,3	2,94	0,59	0,29	0,20	0,15	0,12	0,10	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03
0,4	3,92	0,78	0,39	0,26	0,20	0,16	0,13	0,07	0,05	0,04	0,04	0,04
0,5	4,91	0,98	0,49	0,33	0,25	0,20	0,16	0,08	0,06	0,05	0,05	0,05
0,6	5,89	1,18	0,59	0,39	0,29	0,24	0,20	0,10	0,07	0,06	0,06	0,06
0,7	6,87	1,37	0,69	0,46	0,34	0,27	0,23	0,11	0,09	0,07	0,07	0,07
0,8	7,85	1,57	0,78	0,52	0,39	0,31	0,26	0,13	0,10	0,08	0,08	0,08
0,9	8,83	1,77	0,88	0,59	0,44	0,35	0,29	0,15	0,11	0,09	0,09	0,09
1,0	9,81	1,96	0,98	0,65	0,49	0,39	0,33	0,16	0,12	0,10	0,10	0,10
1,1	10,79	2,16	1,08	0,72	0,54	0,43	0,36	0,18	0,13	0,11	0,11	0,11
1,2	11,77	2,35	1,18	0,78	0,59	0,47	0,39	0,20	0,15	0,12	0,12	0,12

Inträning

I_D [-]	0,25	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
ϕ_D [-]	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
I_D [-]	0,35	0,17	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,05	0,04	0,04
I_{max} [m]	3,57	17,86	35,71	53,57	71,43	89,29	107,14	214,29	285,71	357,14

p_w [MPa]	l [m]	Δp [MPa]									
		0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	6	8	10
0,0	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
0,1	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
0,2	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
0,3	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
0,4	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
0,5	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
0,6	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
0,7	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
0,8	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
0,9	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
1,0	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
1,1	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	
1,2	1,26	3,06	4,40	5,43	6,30	7,06	7,75	11,03	12,76	14,28	

H [m]	p_w [MPa]	Δp [MPa]										
		0,1	0,5	1	1,5	2	2,5	3	6	8	10	
0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	0,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	0,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	0,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	0,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	1,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
110	1,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Bilaga 5: Underlag för design mht gradient: Nygårdstunneln

Borrhål Nygårdstunneln

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

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

$$F = 2\pi r_0 = \frac{\Delta p}{\rho_w g \alpha}$$

H [m]	50	ρ [kg/m ³]	1000	Δp_1 [Pa]	2,50E+06
r_i [m]	6,7	μ [Pas]	1,30E-03	Δp_2 [Pa]	2,50E+06
ξ	5	g [m ² /s]	9,81		
		T_{tot} [m ² /s]	6,40E-06		
		$T_{i,max}$ [m ² /s]	6,40E-06		
		$T_{100\mu m}$ [m ² /s]	4,30E-06		
		$T_{14\mu m}$ [m ² /s]	7,60E-08		

Q < 2,3L/min för 100m

Oinjekterad
tunnel

dr = a

	0,0	1,0	3,0	6,4	15,0	
r	6,7	7,7	9,7	13,1	21,7	
dh/dr	1	1	1	0	0	
Re (T _{tot})	5	4	3	2,4	1	Re < 10
F ₁ / 2 [m]	131	151	190	257	426	
F ₂ / 2 [m]	131	151	190	257	426	

dr = a

	0,0	1,0	3,0	6,4	15,0	
r	6,7	7,7	9,7	13,1	21,7	
dh/dr	1	1	1	1	0	
Re (T _{i,max})	6	5	4,0	3	2	Re < 10
F ₁ / 2 [m]	107	123	155	209	347	
F ₂ / 2 [m]	107	123	155	209	347	

Tätad
tunnel

dr = a

	0,0	1,0	3,0	6,4	15,0	
r	6,7	7,7	9,7	13,1	21,7	
dh/dr	7	7	5	4	2	överskattad!
Re (T _{100μm})	25	22	17	13	7,6	Re < 10
Re (T _{14μm})	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	Re < 10
F ₁ / 2 [m]	17,0	19,6	24,7	33,3	55,2	underskattad!
F ₂ / 2 [m]	17,0	19,6	24,7	33,3	55,2	underskattad!

SveBeFo

Box 5501
SE-114 85 Stockholm

Telefon 08-762 62 20 • info@svebefo.se
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 1104 - 1773 • SVEBEFO-R--90--SE

tblk.