

UNDERHÅLLSTÄTNING AV MEDIATUNNEL I GÖTEBORG

- design och utförande av efterinjektering

**Maintenance sealing of an infrastructure hard rock
tunnel in Gothenburg**

- Design and execution of the post-grouting

Thomas Janson, Tyréns

Johan Funehag, Chalmers

Nils Granberg, Tyréns

Henrik Jonsson, Tyréns

Förord

Injekteringsforskning har varit del av BeFos program under 30 år och utgör en viktig del av skandinaviskt bergbyggande. Injektering är ett billigare alternativ än inklädnad med tät lining. Ökade krav på små inläckage har medfört att kostnader för injektering ökar och blir svårare att beräkna. Den helt övervägande injekteringsinsatsen utförs i samband med berguttag. Injekteringsinsatsen har en livslängd som påverkas av bergets grundvatten, eventuella spänningsrörelser och av material och utförande som använts. Samtliga faktorer kan påverkas och det finns krav på ökad förutsägbarhet och bättre ekonomi för injekteringsinsatser. Problem som att injekteringsmedlet inte härdar eller att det rinner tillbaka kan innebära erosion av medlet och kvalitetsförsämring av arbetet. Beständigheten är kopplad till grundvattentryck och skärmgeometri i injekteringsdesignen. Gränserna för hur tätt berget kan göras utan lining ökar stadigt och då situationen kräver förbättringar tillgrips efterinjektering. Föreliggande projekt visar att en efterinjekteringsinsats kan lyckas förutsatt god kännedom om befintliga bergförhållanden, en kvalificerad design och ett systematiskt arbetssätt genom hela processen.

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

Vidare har en referensgrupp medverkat i projektet, bestående av Robert Sturk Skanska, Ann Emmelin Golder Associates, Gunnar Gustafson Chalmers, Lars-Olof Dahlström NCC/LTU, Tommy Ellison Besab, Peter Lundman Trafikverket och Mikael Hellsten BeFo.

Stockholm i december 2010

Mikael Hellsten

Sammanfattning

Efterinjektering, vilket innebär injektering av omkringliggande berg efter berguttag, och förståelse för dess mekanismer har generellt anses som svårt och hopplöst. Under de senaste åren har vissa insatser gjorts för att förstå mekanismerna vid efterinjektering och upprätta en strategi för design och utförande.

Syftet med detta projekt var att implementera och vidareutveckla en designmetod för efterinjektering av befintliga tunnlar. Detta med målet att minska inflödet till tunneln och ge ett tillvägagångssätt för framtida underhållstätningar. En befintlig tunnel från början av 70-talet, under centrala Göteborg, valdes till försöket. Frågeställningarna inför en efterinjektering i en äldre tunnel är bla hur tidigare förinjektering har lyckats och påverkat vattnets väg genom berget med tiden, tunnels begränsade utrymmen och fasta installationer vilket påverkar val av möjlig utrustning, injekteringshålens placering, arbetsmetodik och logistik och slutligen om det går att minska inläckaget baserat på en framtagna design.

Ett ytterligare syfte med projektet var att engagera samtliga inblandade parter i ett tidigt skede och att samtliga deltog aktivt genom hela projektet. Detta för att få samtligas kunskaper inför designen och utförande, kunna göra förändringar under utförandet med bibehållen designstrategi och slutligen att alla delges de vunna erfarenheter från projektet. De inblandade parterna var, förutom tunnelägaren TeliaSonera, Chalmers, Avd för geologi och geoteknik (högskola), Tyréns (konsult) och AB Besab (bergentreprenör).

Genomförandet av hela projektet skedde stegvis enligt följande:

Bakgrundsbeskrivning, där befintlig information och data söktes och samlades in. Arbetet utfördes genom att sammanställa befintliga geologiska beskrivningar, tidigare flödesmätningar i mätvallar, tunnelkartering och relationshandlingar från tunneldrivning, underhållsbesiktningar under åren samt information om närliggande tunnlar.

Beskrivning av designen, dvs upprätta en teoretisk modell av injekteringen med villkor och samband. Beskrivningen gav en redogörelse av de centrala egenskaperna på berget, injekteringstekniken, och injekteringsmedlet som låg till grund för detaljerade undersökningar.

Slutlig lokalisering, dvs baserade på bakgrundsbeskrivningen och den beskrivna designen hitta ett avgränsat tunnelavsnitt som lämpar sig för injekteringsförsöken med de kontroller och uppföljningar som krävdes för att verifiera design och utförandet.

Förundersökningsskede, dvs kompletterande undersökning för att få detaljerande information till designen. Den kompletterande undersökningen var kärnborrning och hydrauliska tester, som gav mer detaljerad information om sprickegenskaper och hydrauliska förhållande.

Upprättande av design, där borrhålgeometri, injekteringsmedel, injekteringstryck, injekteringstider samt manschettlägen bestämdes. Vidare beskrevs vilka specifika injekteringskriterier som skulle gälla samt åtgärder vid möjliga scenarier.

Beskrivning av utförandet och själva utförandet, dvs projekteringen med en kravspecifikation och upprättad arbetsbeskrivning av de olika momenten vid utförandet. I arbetsbeskrivningen beskrevs att bla en injekteringsingenjör skulle finnas med under injekteringen för styrning, beslut om åtgärder och löpande uppföljning. Vidare beskrivs i arbetsbeskrivningen hur rapporteringen av delresultat under utförandet skulle göras och vem mottagaren var. Slutligen att utförandet är indelat i etapper med utvärdering av resultat och vidare beslut om fortsättning innan nästa etapp får starta.

Utvärdering och analys, uppföljning och kontroller, dvs verifiera designen och utförandet. Detta innefattade information från regelbunda mätvallsresultat, visuella observationer under utförande, analys av injekteringsresultat (dvs baserad på hydrauliska tester, flöden och volymer, kontrollhål) samt droppkartering före och efter utförandet. Insamlad data och observationer låg till grund för utvärderingar, både i etappvärderingarna och i denna slutrapport.

Efterinjekteringsförsöken begränsades till en ca 90 m lång tunnelsektion. Inflödet för tunnelsektion var före projektet ca 3,8 l/min, 100 m. Baserat på resultat från kärnborrhålen och analyser bestämdes inläckagemålet till 1 l/min. Med analyser av sprickviddsfördelning från kärnborrhålen samt inläckagekravet innebar det att silica sol behövde användas som huvudsakligt injekteringsmedel och att ett cementbaserat injekteringsmedel användes enbart vid större flöden från borrhålen.

I det genomförda projektet har syftena och målen uppnåtts, såsom genomfört en efterinjektering enligt framtagen strategi och design, uppnått satta delmål och slutligt inläckage till tunneln samt genomfört ett lyckat samarbetsprojekt där beställare, designer, projektör och entreprenör har deltagit aktivt från initiering till avslutning av projektet.

Nyckelord: Underhållstättning, design, bergtunnel, efterinjektering, silica sol

Summary

Post-grouting, i.e. sealing of the surrounding rock after tunnel is excavated, and the understanding of its mechanisms and to predict the result is generally regarded as difficult and hopeless. In recent years, some efforts were made to understand the mechanism of post-grouting and to establish a strategy for the design and execution.

The purpose of the project was to implement and develop a design-method suitable for post-grouting in existing small tunnels. The aim of this was to reduce the inflow in the tunnel and provide a methodology for future maintenance by means of grouting. An existing tunnel from the early 1970th, in central Gothenburg, has been selected for the test. Post-grouting in an older tunnel rise some questions; has the pre-grouting been successful and how has the waterpaths been affected, the small tunnel size in itself, the existing installations and their influence of available equipment, grouting hole placement and work methods and finally if it is possible to reduce the inflow based on a design.

The project did also have the purpose to involve all partners in an early stage; the activeness should be constant high throughout the execution to the end of the project. This was to get the best out of everyone's knowledge from the design to the execution. This activeness was an advantage when changes had to be made in the executions based on design strategy to get no delays as well as to get all the experience from the project. The involved partners were, in addition to tunnel owner TeliaSonera, Chalmers, Dept of Geology and Geotechnical Engineering (University), Tyréns (consultant) and AB Besab (contractor).

The implementation of the project was basically in following chronological order:

Background description, which means a desktop study of the existing information and data, finding the information of such an old tunnel was a challenge. The work was done by compiling existing geological descriptions, earlier flow measurements in weirs, tunnel mapping and related documents from tunnel excavation, maintenance inspections and information about adjacent tunnels.

Description of the design, ie make a theoretical model of the grouting process with conditions and correlations. The description gave an outline of the important properties of the rock mass, grouting technology, and the grout. All these properties gave support for detailed investigations were needed.

Final location, ie based on the background description and the described design a limited tunnel section was determined; which was appropriate for a post-grouting test. The section needed to have necessary controls and monitoring to verify the design and execution.

Pre-investigation stage, ie, additional investigations in which detailed information to the design could be obtained. The additional investigation was core drilling and hydraulic tests, to get more appropriate information about the fracture and hydraulic properties.

Establishment of the design, where the borehole geometry, grout, grouting, and grouting time and final packer location was determined. Furthermore, the specific grouting criterion for the execution and actions for possible scenarios was determined.

Description of the execution and the grouting work, ie make the layout as a detailed design and requirements and establishing work descriptions in various stages correlated to the grouting process. The work description included an engineer that should take part of the grouting work, take decisions following the design and do ongoing evaluations. It also describes how reporting of interim results during the execution shall be made and to whom it should be sent. Finally, the performance was divided into stages with evaluation of each stage for decision analysis to be able to start next stage.

Evaluation and analysis, follow-up and controls, ie the design and execution should be verified. This included information from regularly measurements in weirs, visual observations during the execution, analysis of grouting results (ie, based on hydraulic tests, flows and volumes, control hole) and drip mapping before and after the execution. Collected data and observations are the basis of evaluations, both in the different stages and in this final report.

The post-grouting was limited to an about 90 m long tunnel section, around 30-40 m below groundwater level. The host-rock was gneiss or granitic gneiss with veins of pegmatite. The inflow to the tunnel section, before post-grouting, was around 3.8 l/min, 100 m. The objective of inflow was to reduce inflow to 1 l/min, which means that the silica sol had to be used as the main grout and cement-based grout as a complement grout.

The purposes in the project has been achieved, i.e. implemented a post-grouting based on a strategy and design, achieved milestones and final inflow level, implemented a collaborative project where client, designer, and contractor was involved from initiation to the completion of the project.

Keywords: Maintenance sealing, design, tunnel, hard rock, post-grouting, silica sol

Nomenklatur

Beskrivning	Beteckning	Enhet
Inträngningslängd	I	m
Inträngningslängd max	I_{max}	m
Inträngningslängd relativ	I_D	-
Skattad konduktivitet, oinjekterat	K	m/s
Skattad konduktivitet, injekterat	K_{inj}	m/s
Sektionslängd	L	m
Inflöde	Q	m ³ /s
Transmissivitet, oinjekterad	T	m ² /s
Transmissivitet, för största spricka	T_{max}	m ² /s
Transmissivitet, injekterad	T_{inj}	m ² /s
Transmissivitet, sektionsvis	T_n	m ² /s
Sprickvidd	b	µm
Sprickvidd dimensionerande	b_{dim}	µm
Hydraulisk sprickvidd	b_{hyd}	µm
Bergtäckning	d	m
Jordacceleration	g	m/s ²
Inflöde innan injektering	q	m ³ /s, m
Tunnelradie	r_t	m
Borrhålsradie	r_w	m
Tid, dimensionslös	t_D	-
Tid, relativ injekteringstid	t_0	s
Gelinduktionstid	t_G	s

Tjocklek på injekterad zon	t	m
Hydrauliskt gradient	dh/dr	-
Densitet berg	ρ_b	kg/m ³
Densitet vatten	ρ_w	kg/m ³
Injekteringsövertryck	Δp	Pa
Grundvattentryck	Δh	Pa
Flytgräns injekteringsmedel	τ_0	Pa
Inträngningsanalys parameter	θ	-
Skinfaktor	ξ	-
Viskositet, vatten	μ	Pas
Initiell viskositet silica sol	μ_0	Pas

Innehållsförteckning

1	Allmänt	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och mål	1
1.3	Organisation och finansiering	3
1.4	Genomförandebeskrivning	5
2	Förutsättning	7
2.1	Bakgrundsbeskrivning	7
2.1.1	<i>Tunneldrivning</i>	<i>7</i>
2.1.2	<i>Geologi och hydrogeologi</i>	<i>8</i>
2.1.3	<i>Tunnelgeometri</i>	<i>11</i>
2.2	Preliminär tunnelsektion	12
2.3	Översiktlig efterinjekteringsdesign	13
2.3.1	<i>Allmänt</i>	<i>13</i>
2.3.2	<i>Prognos av inläckage och injekteringsbehov</i>	<i>14</i>
2.3.3	<i>Underlag för design av injektering mht "jacking" och "back-flow"</i>	<i>16</i>
2.3.4	<i>Underlag för design av efterinjektering mht gradient</i>	<i>18</i>
2.4	Preliminär vald tunnelsträcka och översiktlig design	21
2.5	Kompletterande förundersökning	23
2.5.1	<i>Kärnborring</i>	<i>23</i>
2.5.2	<i>Resultat kärnborring</i>	<i>24</i>
2.5.3	<i>Droppkartering</i>	<i>25</i>
2.6	Slutlig lokalisering	27
2.7	Risikanalys	27
3	Basdesign och injekteringsteknik	29
3.1	Basdesign efterinjektering	29

3.1.1	Mål	29
3.1.2	Förutsättningar	29
3.1.3	Design	30
3.2	Injekteringskriterier	41
3.2.1	Allmänt	41
3.2.2	Volymer och geltider för silica sol	41
3.2.3	Kriterier för cement	41
4	Utförande	43
4.1	Generellt	43
4.2	Etablering	43
4.3	Arbetsstapp 1, skärm 1 - 4	45
4.3.1	Utförande	45
4.3.2	Delresultat	51
4.3.3	Vunna erfarenheter inför etapp 2	53
4.4	Arbetsstapp 2, skärm 5 - 8	54
4.4.1	Utförande	54
4.4.2	Delresultat	56
4.4.3	Vunna erfarenheter inför etapp 3	58
4.5	Arbetsstapp 3, skärm 9 - 12	58
4.5.1	Utförande	58
4.5.2	Delresultat	59
4.5.3	Vunna erfarenheter av etapp 3	59
4.6	Avslutning	60
5	Utvärdering och analys	63
5.1	Mätvalsresultat	63
5.2	Droppkartering, efter injektering	64
5.3	Hydrauliska tester	65
5.4	Uppföljning av riskanalysen	67

5.5	Förändringar i arbetsbeskrivningen	68
6	Slutsatser	71
	Referenser	73

Bilageförteckning

Bilaga 1

Bilaga 2

Bilaga 3

Bilaga 4

1 Allmänt

1.1 Bakgrund

Stora forskningsinsatser på injektering har utförts inom Sverige de senaste 20 åren. Forskningen har i huvudsak varit inriktad på nyproduktion av bergtunnlar/bergrum och främst som förinjektering, dvs injektering av berget före berguttaget.

Efterinjektering, vilket innebär injektering av omkringliggande berg efter berguttag, och förståelse för dess mekanismer har generellt ansetts som svårt och hopplöst. Under de senaste åren har forskningsinsatser gjorts på Chalmers (Fransson & Gustafson, 2006 och Fransson & Gustafson, 2008) för att förstå mekanismerna vid efterinjektering och för att upprätta en strategi för design och utförande. Flera praktiska efterinjekteringsförsök (Edrud & Svensson, 2007, Granberg & Knutsson, 2008 och Butron et al, 2008) i samband med nyproduktion av tunnlar har utförts under Chalmers ledning och i en begränsad omfattning.

Telia, som är den största intressenten i detta projekt, har ett stort antal bergtunnlar runt omkring i Sverige. Telias tunnlar i Göteborgsregionen byggdes under 60- och 70 talet. Tunnlar läcker in olika mycket vatten och Telia har ett stort antal grundvattenrör i och runt Göteborgs stad för att kontrollera grundvattennivåerna kring tunnelarna. Flera efterinjekteringsinsatser har gjorts under åren i dessa tunnlar, främst under 80-talet, och en viss minskning av inläckaget har uppnåtts.

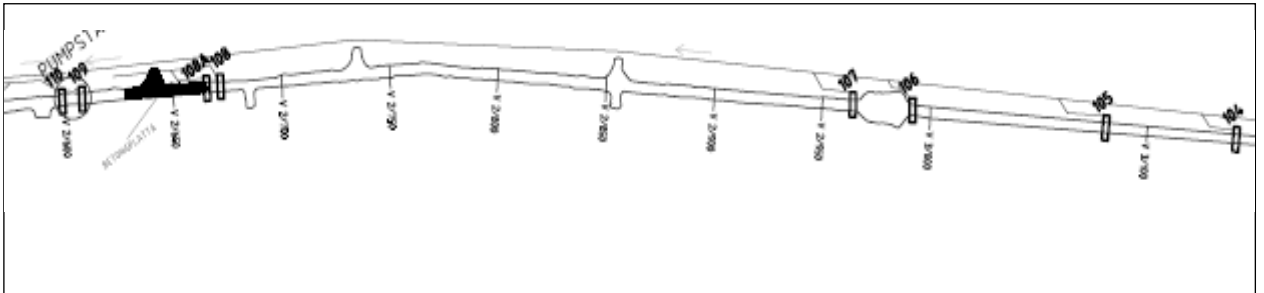
Det kvarvarande inläckaget i befintliga tunnlar relaterar ofta till stora drift- och underhållskostnader. Vidare ställer samhället idag ett allt högre krav på ett minskat bortledande av vatten som ett inläckage till bergrum/tunnlar. Telia som tunnelägare, vill därför utveckla en efterinjekteringsteknik i tunnlar som under kontrollerade former kan minska de befintliga inläckagen.

1.2 Syfte och mål

Syftet med projektet är att implementera och vidareutveckla en designmetod för efterinjektering med syftet att minska inflödet och ge ett tillvägagångssätt för framtida underhållsarbete. Genom att tillämpa en strategi för design av efterinjektering, baserad på konceptuella modeller och vunna erfarenheter från tidigare efterinjekteringsförsök, skulle en utförandemetodik utvecklas som ger ett minskat inläckage och i överensstämmelse med prognos.

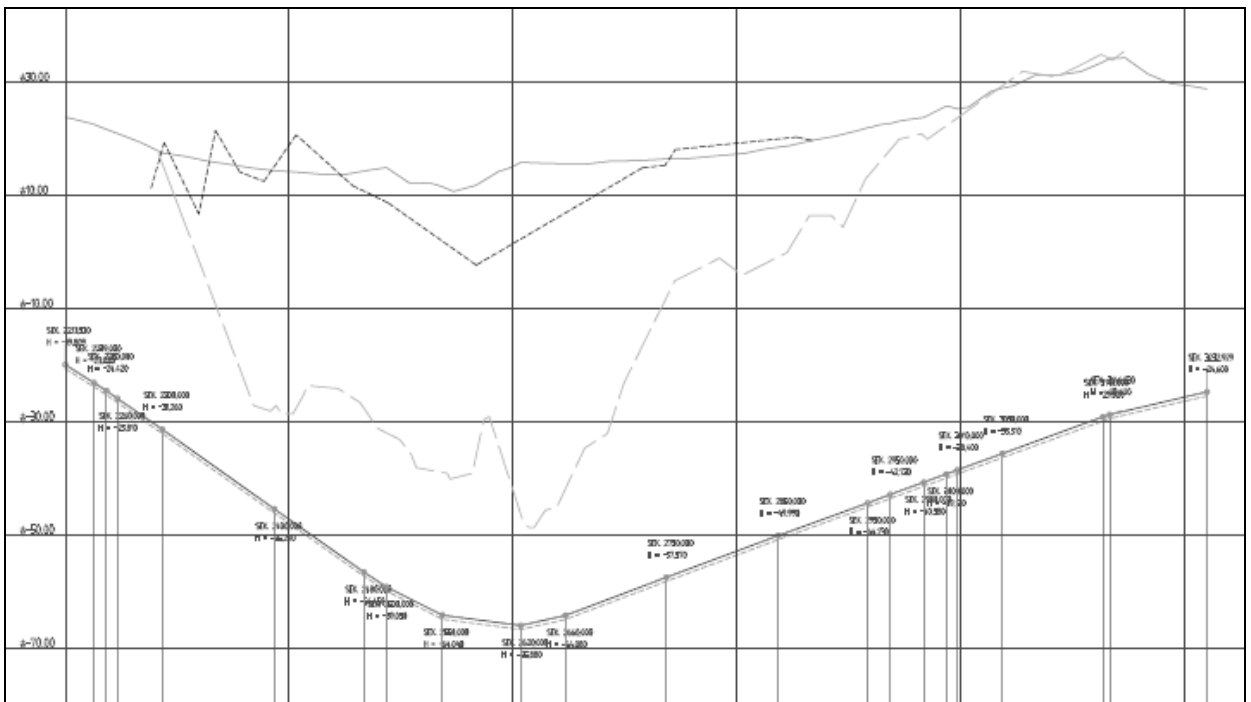
En av Telias tunnlar, ca 1 km lång, under centrala Göteborg har valts till försöket, se figur 1-1 och 1-2. Telias bergtunnlar har dock andra förutsättningar än tidigare gjorda efterinjekteringsförsök under Chalmers ledning. Exempelvis tunnelarnas ålder, vilket påverkar vattenvägarna i spricksystemen men även tunnelutrymmet och fasta

installationer för tele och fjärrvärme. Samtliga påverkar val av möjlig utrustning, injekteringshålens placering samt arbetsmetodik och logistik. Efterinjekteringsförsöket begränsas till en tunnelsektion som valts efter att inledande lokaliseringsarbete genomförts.



Figur 1-1 Aktuell tunnel (plan över mätvallar och pumpstation)

Figure 1-1 Current tunnel (view over measuring weirs and pumping station)



Figur 1-2 Profil över aktuell tunnel

Figure 1-2 Profile of current tunnel

Tidigare gjorda efterinjekteringsarbeten i den utvalda tunneln har uppnått en viss gräns för inläckaget, men eftersom inläckaget överstiger de krav som finns för nya tunnlar behövs nya strategier och arbetsmetodiker för efterinjektering i den befintliga tunneln. Projektets främsta mål är därför att demonstrera och testa nyvunnen kunskap inom efterinjekteringsforskningen samt att dokumentera testat design och utförande.

Frågeställningar inför projektet var:

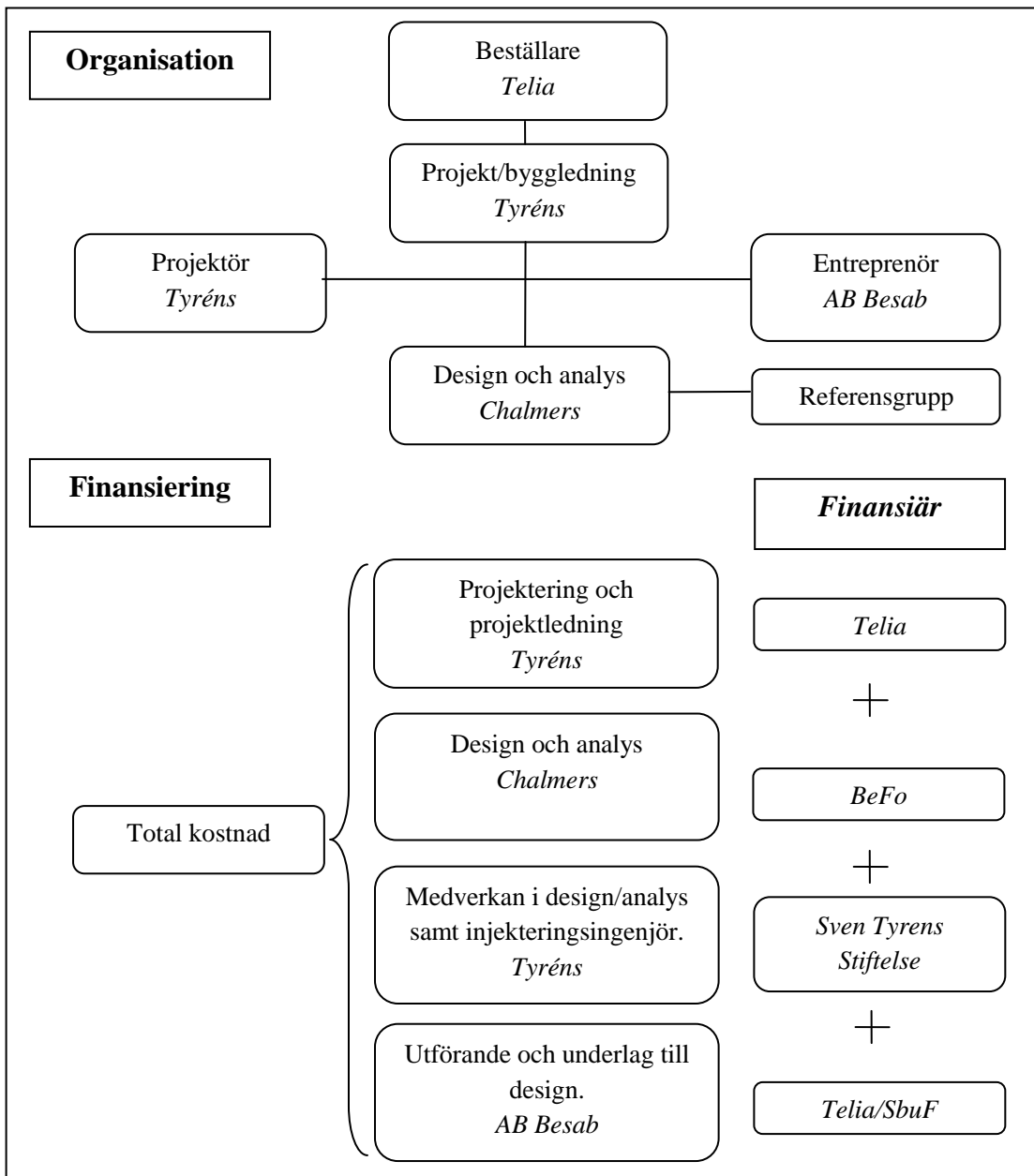
- Kan vi minska inflödet med efterinjektering i enlighet med en designmetod?
- Efterinjekteringen kan antingen göras innanför och/eller utanför tidigare injekterad zon beroende av risk för jacking och återflöde. Kan vi ta hänsyn till detta även här? Kan vi identifiera fördelar/nackdelar med olika placering av manschetter i borrhål? Kan detta kopplas till den geologiska beskrivningen?
- Genom att mäta trycket på olika avstånd från tunnelvägg, kan vi identifiera tryckförändringar som funktion av avstånd från tunnelvägg och som funktion av ökande täthet? Kan vi koppla detta till risken för erosion?

1.3 Organisation och finansiering

Detta projekt är ett samarbetsprojekt mellan Chalmers, avd. för geologi och geoteknik (högskola), Tyréns (konsult) och AB Besab (bergentreprenör). Chalmers roll är att ta fram en design för efterinjekteringen i en avgränsad del av en tunnelsträcka, medverka för att utförandet följer designen och i utvärdering, analys och rapportering. Tyréns roll är att samordna, projektera, byggledda utförandet med en så kallad injekteringsingenjör på plats samt medverka i design, analys och rapport. Besabs roll är att anpassa och utveckla utrustning för det begränsade utrymmet, bistå med praktiska erfarenheter i designen samt att utföra efterinjekteringsarbetet praktiskt så att den framtagna efterinjekteringsdesignen kan testas och bekräftas. Vidare har en referensgrupp medverkat i projektet, bestående av Robert Sturk Skanska, Ann Emmelin Golder Associates, Gunnar Gustafson Chalmers, Lars-Olof Dahlström NCC/LTU, Tommy Ellison Besab, Peter Lundman Trafikverket samt Mikael Hellsten BeFo.

Projektet är i huvudsak finansierat av TeliaSonera i vad som motsvarar ett ordinarie efterinjekteringsarbete samt en viss del av utvecklingskostnaderna. Chalmers insats finansieras av BeFo och Tyréns utökade arbeten vid design och analys samt injekteringsingenjör på plats finansieras av Sven Tyrens stiftelse. Besabs utökade kostnader såsom anpassad utrustning och utökade arbeten jämfört med vid ett ordinarie injekteringsarbete finansieras av SBUF och till viss del av TeliaSonera.

Projektets organisation och finansiering illustreras i figuren nedan.



Figur 1-3 Organisation och finansiering av projektet

Figure 1-3 The project organization and financing

1.4 Genomförandebeskrivning

Inför planeringen av projektet gjordes en kronologisk genomförandebeskrivning, se nedan. Denna beskrivning har följts under projektet och redovisningen i rapporten följer denna struktur.

1) Bakgrundsbeskrivning

Information och data söktes och samlades in. Arbetet utfördes genom att befintliga geologiska beskrivningar/kartor, flödesmätningar i mätvallar, tunnelkartering och relationshandlingar från tunneldrivning, underhållsbesiktningar samt information om intilliggande tunnlar/bergrum gick igenom. Detta gav ett underlag för det fortsatta arbetet. En stor del av insamlad data var ej helt tillämplig för aktuell delsträcka av tunneln. Genomgång av anläggningarna i tunneln gjordes för att få fram ett aktuellt inläckage, vilket gav en första indikation om vilket tunnelavsnitt som fortsatt var intressant för projektet.

2) Beskrivning av tänkt efterinjekteringsdesign

Beskrivning av designen, med villkor och samband, gav en redogörelse av de centrala egenskaperna på berget, injekteringstekniken, och injekteringsmedlet och låg till grund för att kunna utföra efterinjekteringen enligt framtagen metod.

3) Slutlig lokalisering

Platsen som valdes för försöken skulle ha förutsättningarna så att ett reducerat inläckage på delsträckan kunde påvisas. Detta ställde krav på de befintliga mätvallarnas funktionalitet samt delsträckans utformning med bland annat befintliga installationer som inte fick begränsa borrhoring och injektering i sådan omfattning att utförandet blev för långt ifrån föreslagen design. Vidare upprättades designmål för aktuell delsträcka.

4) Förundersökningsskede

Designmetoden är sådan att sprickviddsfördelning och gradientfält är av central betydelse. Därav krävdes att kärnborrhoring utfördes, i aktuell delsträcka av tunneln, för att utvärdera sprickfrekvens samt utföra hydrauliska tester i borrhålen.

5) Upprättande av design

Förundersökningen gav platsspecifika detaljerade egenskaper på berget vilket tillsammans med designkriterium, hydrogeologiska modell samt platsförutsättningar (befintliga installationer) gav en design. I detta skede bestämdes borrhålgeometri, injekteringsmedel, injekteringstryck, injekteringstider samt manschettlägen.

6) Beskrivning av utförandet och själva utförandet

En bygghandling och arbetsbeskrivning upprättades, där angavs bland annat vilka extra resurser som krävdes för utförandet. I arbetsbeskrivningen beskrevs att en injekteringsingenjör skulle finnas med under injekteringen för styrning och löpande uppföljning. Vidare förslag på vilken speciell utrustning som krävs däribland långa manschetter, vaccumpump och anpassad borr- och injekteringsutrustning. Då tunneln innehåller mycket installationer behövdes också ett förtydligande i arbetsbeskrivningen av vilka installationer som skulle flyttas.

Den löpande uppföljningen beskrevs på ett sådant sätt att ingenjören kunde ta beslut på plats om vilken åtgärd som var mest lämplig. Vidare beskrivs i arbetsbeskrivningen hur rapporteringen skulle göras och vem mottagaren var.

7) Utvärdering och analys, uppföljning och kontroller

Denna del innefattar insamling och sammanställning av data via mätvallar, resultat från injekteringen, visuella observationer samt droppkartering. Insamlad data låg till grund för utvärderingar och analyser vilka ingår i erfarenhetsrapport/slutrapport.

Arbetet med bakgrundsbeskrivningen startade i oktober 2009 och därefter gjordes de olika stegen med förundersökningar, design och projektering fram till feburari 2010 då etableringen startade. Efterinjekteringsarbetet i tunneln pågick från mars till juni 2010, med två avstämningar av delresultat och beslut om fortsättning.

2 Förutsättning

2.1 Bakgrundsbeskrivning

Ett omfattande bakgrundsmaterial för den aktuella tunneln finns, allt från bygg- och relationshandlingar från tunneldrivningen till geologiska översiktskartor kring tunneln. Nedan görs en beskrivning från bakgrundsmaterialet.

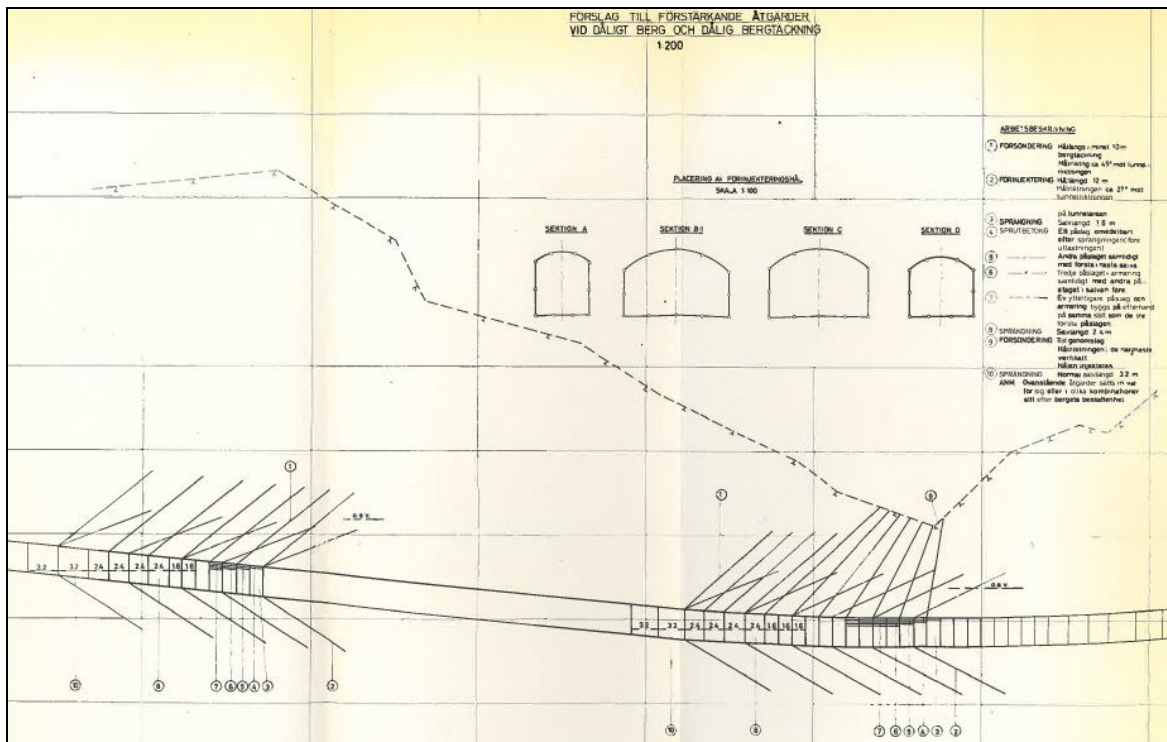
2.1.1 Tunneldrivning

Den aktuella tunneln utreddes och projekterades under slutet av 60-talet. Tunneldrivningen skedde i början av 70-talet (1970 till 1972) genom borrhning och sprängning med konventionell förstärkning, dvs bult och sprutbetong. Vid lågpunkten, se figur 2-1, av tunneln förekom stabilitetsproblem under drivningen, bland annat upptryckning av botten vilket åtgärdades med betongplatta och betongstöttor/bågar.

Beslut om förinjektering skulle ske under drivningen vid ”dåligt berg” och ”dålig bergtäckning” efter sonderingsborrning enligt bygghandlingar, se figur 2-1.

Relationshandlingarna och andra uppgifter redovisar dock ett mer omfattande för- och efterinjekteringsarbete än vad bygghandlingarna anger. Stora delar av tunneln är systematiskt förinjekterad med full skärm eller bottenskärm, dvs endast sulan förinjekterades och ingen förinjektering i väggar och tak. Vidare är flera tunnelavsnitt noterade med en stor mängd borrhål och injekteringsmedel jämfört med vad som uppskattades i bygghandlingarna. Som injekteringsmedel användes i huvudsak ett cementbruk (typ och vct-tal är okänt) med tillsats av Intraplast-A (dvs en expanderande tillsats). Alternativa injekteringsmedel provades i begränsad omfattning, bla enkomponent polyuretan (TACSS) vid lågpunkten.

Förinjekteringen utfördes troligen med långa borrhål och med ett stort stick ut från tunneln, se figur 2-1. Överlappet mellan skärmarna var stort.



Figur 2-1. Exempel på bygghandling som redovisar förinjektering och reducerad tunneldrivning vid svårare passager.

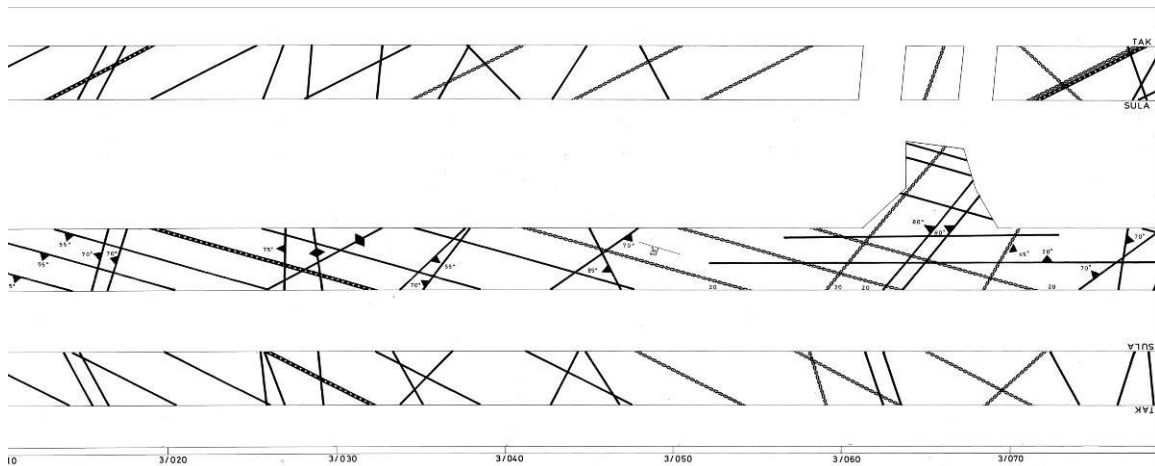
Figure 2-1 An example on construction document as show pre-grouting and reduced tunnel excavation in difficult passages

Vidare kompletterades tunneln med ytterligare efterinjekteringsarbeten i början av 80-talet med syftet att minska inläckaget. Även då användes cement som injekteringsmedel men enligt muntlig information provades även ett talkbaserat medel/slurry med framgång.

2.1.2 Geologi och hydrogeologi

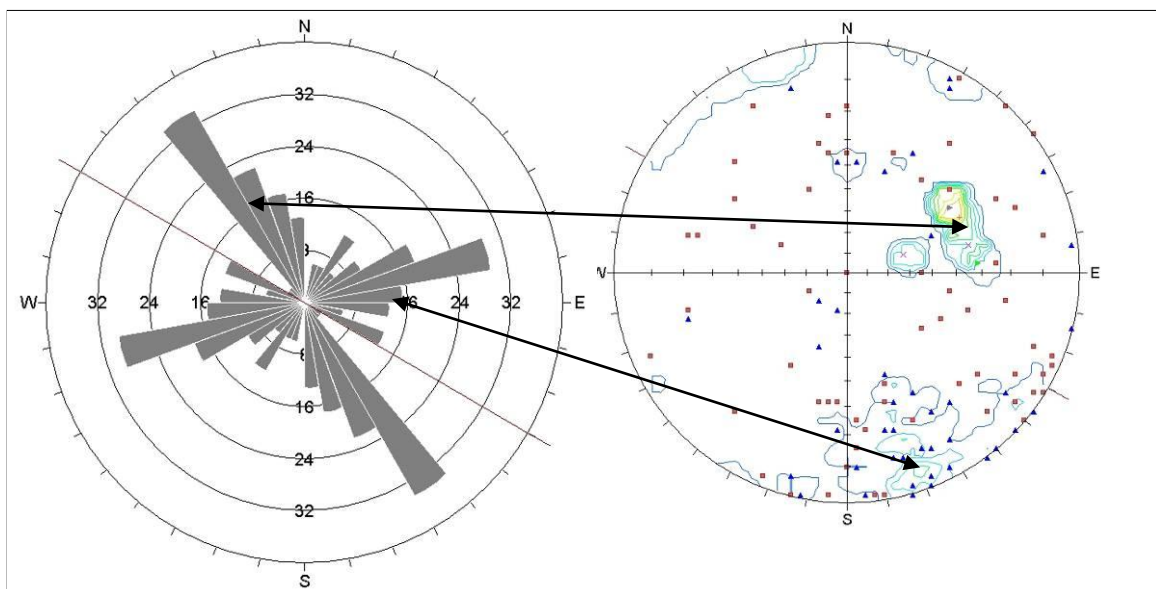
Genomgång av befintliga kartor och tunnelkarteringsmaterial visar på att bergarten kring tunneln domineras av en granitisk till tonalitisk ådergnejs med inslag av amfobolit och dioritisk grönsten samt sparsamt med gångar av pegmatit. Exempel på sprickarteringen från tunneldrivningen under 70-talet visas i figur 2-2.

Sprickarteringen tar enbart upp de större sprickorna som är synliga. Dessa karteringar har bearbetats i en sprickros och steroplott, se figur 2-3, med drivningsriktningen inlagd (ca 128°).



Figur 2-2 Exempel på redovisning från tunnelkarteringen

Figure 2-2 An example on tunnel mapping from the tunnel excavation



Figur 2-3 Sprickkartering från tunneldrivningen på sprickros respektive stereonät, strecket genom sprickrosen motsvarar tunnels riktning. Pilarna visar på vilka sprickgrupper som hör samman.

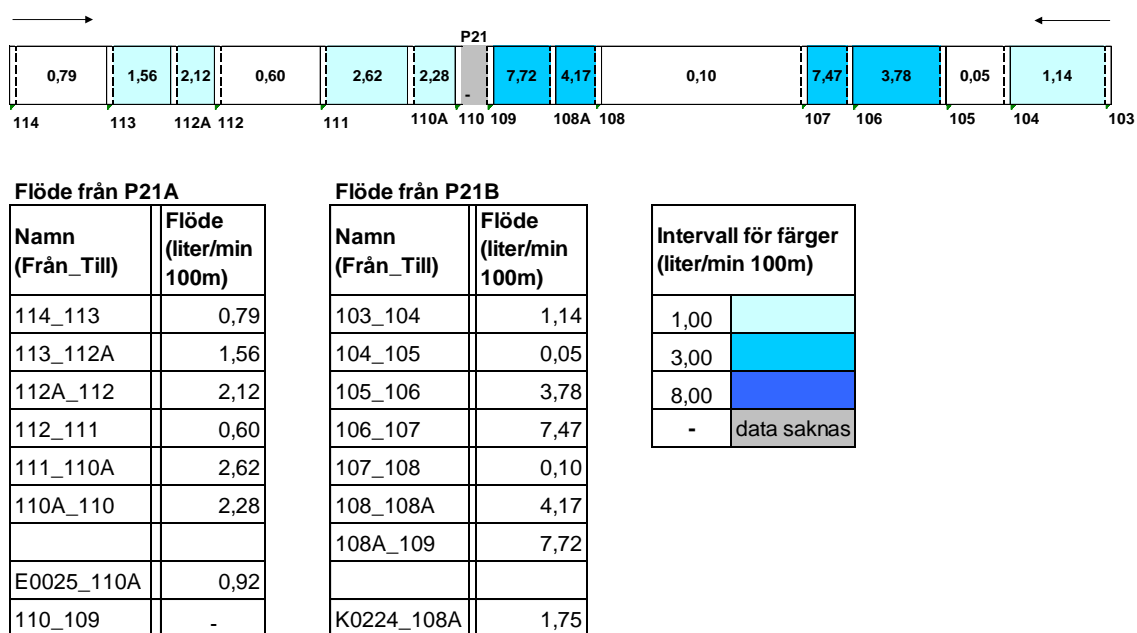
Figure 2-3 A fracture rose and stereo net from the fracture mapping, the dash through the rose correspond with the tunnel direction.

Figur 2-3 visar att tunneln generellt domineras av två till tre sprickgrupper. En grupp stryker ca 150° och med en lutning av ca 55 grader, dvs skevt parallellt med tunneln. De två andra sprickgrupperna stryker båda ca 250° , dvs skevt vinkelrät med tunneln, men den ena lutar ca 55 grader och den andra är brantstående.

Spänningsförhållande för tunneln är inte uppmätta men för en närliggande tunnel finns spänningsmätningar gjorda. Dessa mätningar visar på en största horisontell huvudspänning på ca 10 MPa med en riktning på ca 195° N.

Sedan tunneldrivningen har mätningar gjorts av inläckande vatten i mätvallar och pumpgröpar. Vid inventering av mätmaterial samt besiktning av mätvallar under våren 2009 konstaterades att långa mätserier i olika tunnelsektioner inte kunde erhållas. Detta beror på faktorer såsom omkopplingar mellan mätvallar, mätvallar har satts igen, underhållsarbeten i tunneln utan hänsyn till mätvallarna samt att gammal dokumentation har försvunnit. Från åren efter tunneldrivningen, dvs större delen av 70-talet, finns mätresultat dokumenterad, därefter har förändringar gjorts utan att detta har dokumenterats samt att mätresultat saknas (troligtvis har dokumentationen försvunnit eftersom det finns uppgifter på att mätningar gjorts). Från mitten av 90-talet till i dagläget finns serier med mätresultat, dock finns en del oklarheter kring omkopplingar och benämningar på mätvallar. Exempelvis finns mätresultat från 1998 till 2008 men där vattenledningarna är omkopplad till fyra tunnelsträckor. Under våren 2009 gjordes ett återställande av omkopplingar och igensatta mätvallar rensades så att den ursprungliga indelningen från 70-talet återställdes, se figur 2-4.

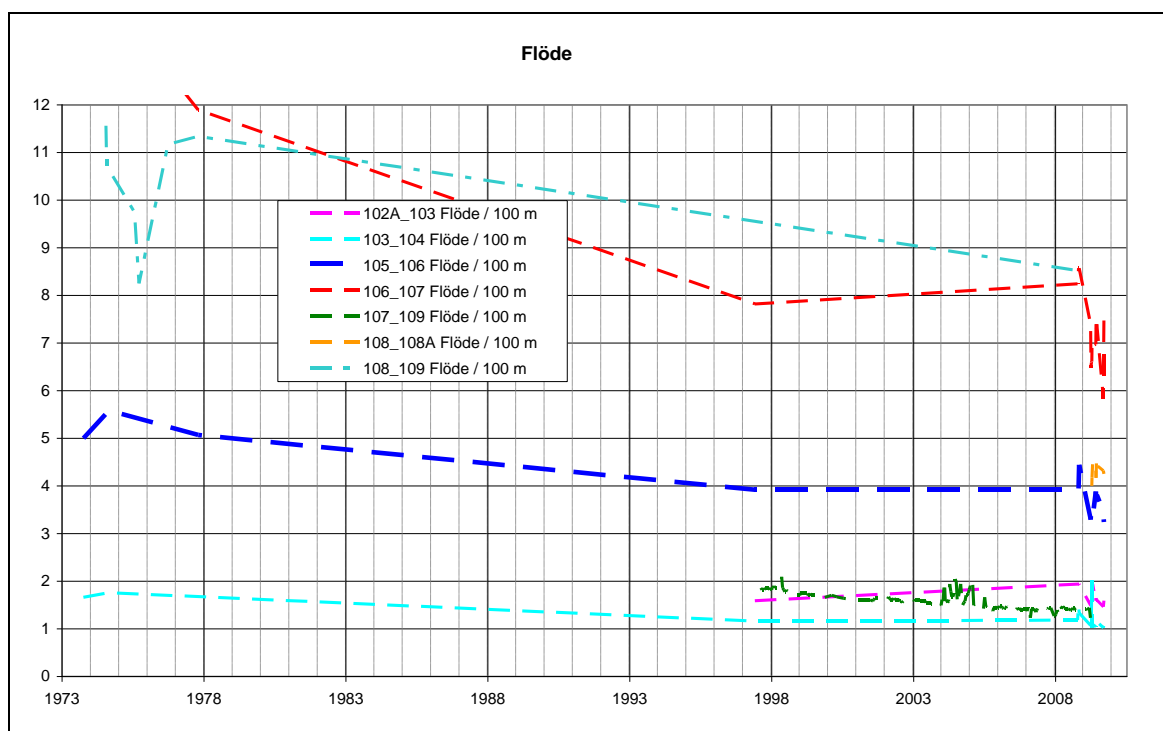
Flöde pumpgröp P21 (liter/minut 100m)
2009-12-03



Figur 2-4 Tunnelsektioner med respektive mätvall och resultat från hösten 2009

Figure 2-4 Tunnel sections with each measuring weir and flow results in autumn 2009

Mätvallsresultat från 1973 fram till hösten 2009 är sammanställt i figur 2-5.



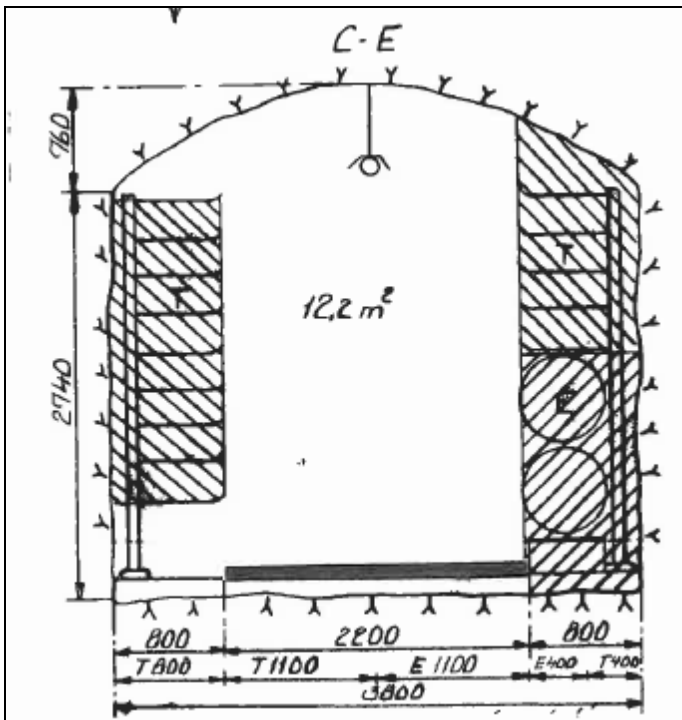
Figur 2-5 Resultat av mätningar i mätvallar från 1973 till hösten 2009.

Figure 2-5 Results of measurements in weirs from 1973 to autumn 2009

2.1.3 Tunnelgeometri

Tunnelns typsektion är ca 12 m², dock är större delen av båda väggarna blockerade med installationer, se figur 2-6. Detta gör att tunnelbredden för utrustning och manskap är ca 2,2 m, vilket var begränsande vid valet av utrustning. Vissa av installationerna, skrafferade och markerade med "T" i figur 2-6, flyttades temporärt så att borrhälen kunde komma åt tunnelväggen och borra enstaka vägghål. Sulan är dessutom asfalterad varför foderrör för att säkerställa öppna borrhål.

Vid upprättandet av injekteringsdesignen togs hänsyn till att lufttemperaturen i tunneln är ca 20°, något mer på vintern och något lägre på sommaren. Den ovanligt höga tunneltemperaturen beror på uppvärmningen från installationerna, främst fjärrvärmerören.



Figur 2-6 Typsektion av tunneln, inklusive installationer

Figure 2-6 Tunnel section, with installations

2.2 Preliminär tunnelsektion

Från mätvallsinventeringen och dess resultat lokaliserades fem tunnelsektioner som kunde vara aktuella för efterinjekteringsförsöken; tre sektioner kring tunnelns lågpunkt och pumpgrop (P21) samt två sektioner, mellan mätvall 105-106 och 106-107, dvs högre upp i tunneln, se figur 2-4.

Den mest lämpliga tunnelsektion bedömdes vara mellan mätvall 105-106, dvs sektion 2/992 till 3/081. Vid tunnelsektionerna kring pumpgropen hade omfattande förstärkning gjorts vid tunneldrivningen, med en kraftig betongplatta i botten och betongstöttor/bågar samt större nischer, och mellan mätvall 106-107 var tunneln utrymd till en ”berghall” med kompletterande installationer.

Inflödet mellan mätvall 105-106 låg mellan 5 till 6 l/min, 100 m under 70-talet. Efter den kompletterande efterinjekteringsinsatsen i början av 80-talet sjönk det till strax under 5 l/min, 100 m och vid mätningen hösten 2009 vara 3,8 l/min, 100m.

2.3 Översiktlig efterinjekteringsdesign

2.3.1 Allmänt

Den grundläggande delen i efterinjekteringsdesignen liknar grunden för design av förinjektering. Av central betydelse är god kunskap om de hydrogeologiska förhållandena och sprickvidder (hydraulisk vidd). Med kunskap om injekteringsmedlets reologiska egenskaper, sprickvidder samt vald injekteringsteknik kan inträngningslängden av injekteringsmedlet i sprickorna beräknas. Inträngningslängden är då dimensionerande för hur injekteringsutförandet skall göras, vilket ger information om borrhålsgeometrier, injekteringstider och injekteringstryck. Det som skiljer en efterinjekteringssituation från en förinjektering är att den hydrauliska gradienten i många fall kan vara avsevärt mycket större. Detta ställer till problem eftersom injekteringsmedlet riskerar att ledas bort av vattnet och därmed inte stanna kvar i sprickorna. Hur kraven på injekteringsmedlet bör ställas för att minska risken för att injekteringsmedlet eroderas är presenterat i Axelsson (2009). De frågeställningar samt processer som är viktiga för en efterinjekteringssituation är:

- Hur ser vi till att inte hydraulisk uppspräckning eller jacking sker?
- Hur får vi injekteringsmedlet att tränga in utan att eroderas?
- Hur får vi injekteringsmedlet att stanna kvar; dvs undvika ”fingering”?
- Hur får vi en tillräcklig inträngning och spridning av injekteringsmedlet; dimensionerande sprickvidd och kontroll av inträngningslängden med hänsyn till gradienten?

För att ta sig igenom frågeställningarna följs metodiken enligt SveBeFo-rapport nr 75 (Fransson och Gustafson, 2006), se tabell 2-1 nedan.

Tabell 2-1 Principfigur över hur de olika nedbrytande processerna i en efterinjektering kan beaktas i en design

Table 2-1 Principle figure for the design step, in a post-grouting process

Huvudsteg	Bestämning av och arbetsgång
I. Prognos av inläckage och injekteringsbehov.	<ul style="list-style-type: none"> - Fördelningen av spricktransmissivitet och vidd - Inflöde innan injektering - Sprickvidd som behöver tätas för att uppnå krav - Injekteringsmedlets förmåga att penetrera minsta sprickvidd, dvs val av injekteringsmedel
II. Underlag för design av injektering mht ”jacking” och ”back-flow”.	<ul style="list-style-type: none"> - Maximalt injekteringsövertryck, dvs undvikande av ”jacking” - Undvikande av ”back-flow” - Optimering av inträngning – hålavstånd - tidsåtgång
III. Underlag för design av efterinjektering mht gradient.	<ul style="list-style-type: none"> - Gradienten och vart eventuellt turbulent flöde fås från tunnelväggen - Anpassa hål- och skärmgeometrin - Kontroll av inträngningslängd map gradienten - Anpassa <u>hålavstånd</u>, <u>tryck</u>, <u>skärmgeometri</u> i II

Från metodiken, enligt tabell 2-1, tas ett basdesignförslag fram. Detta förutsätter ett visst förväntat scenario. Om det förväntade scenariot inte överensstämmer med utfallet måste parametrar i basdesignen ändras, därför skall basdesignen även innehålla vilka förändringar som skall göras beroende på utfallet.

2.3.2 Prognos av inläckage och injekteringsbehov

För att göra en fördelning av spricktransmissivitet och sprickvidd, enligt huvudsteg I i tabell 2-1, behövs hydrauliska data från enskilda sprickor. Detta kan fås genom hydrauliska tester i kärnborrhål, grundvattentrycket och tillhörande kärnkartering av främst sprickfrekvens.

Inför detta projekt planerades kärnborrning med inflödestester i 3-meters sektion. Med antagandet att det är en spricka som står för den huvudsakliga vattenföringen i en sektion kan spricktransmissiviteten, T , bestämmas från inflödestesterna, Q , bestämmas enligt:

$$T = \frac{Q}{2\pi \times \Delta h} \left[1 + \ln \left(\frac{L}{2r_w} \right) \right] \quad (2-1)$$

Där Δh är grundvattentrycket, L sektionlängden och r_w borrhålsradien.

Från transmissiviteten kan den hydrauliska sprickvidden, b_{hyd} bestämmas med den så kallade "cubic law", dvs:

$$b_{hyd} = \sqrt[3]{\frac{12\mu \times T}{g \times \rho_w}} \quad (2-2)$$

där μ är viskositeten, g är jordaccelerationen och ρ_w är vattnets densitet.

De enskilda spricktransmissiviteterna längs borrhålet används som indata för att upprätta en statistisk fördelning avseende sprickor i bergmassan. Enligt Fransson & Gustavson (2006) är den så kallade paretofördelningen lämplig för sprickviddsfördelningar baserad på sektionstransmissiviteter. Metoden att använda paretofördelningen i injekteringsdesign finns beskriven i Gustafson et al (2004). När fördelningen av spricktransmissiviteter är framtagen kan denna direkt proportioneras i en fördelning av hydrauliska sprickvidder genom "cubic law".

Därefter kan en uppskattning av det aktuella inflödet innan injektering, q (m^3/s , m), göras genom sambandet:

$$q = \frac{2\pi \cdot T \cdot \Delta h / L}{\ln(2 \cdot \Delta h / r_t) + \xi} \quad (2-3)$$

där L är längden som transmissiviteten är bestämd från, r_t ekvivalent tunnelradie och ξ skinfaktorn, se Gustafson (2009), här vald till 5.

Med hjälp av det aktuella inflödet innan injektering och sprickviddsfördelning kan den minsta sprickvidd bestämmas som behöver tätas för att uppnå inläckagekravet. Detta genom att för varje individuell spricka som tätas fås ett reducerat inflöde. Utifrån att största sprickan tätas först och så vidare kan den dimensionerande sprickvidden, b_{dim} , bestämmas när inläckagekravet kommer att uppnås.

När den dimensionerande sprickvidden är bestämd kan ett krav sättas på vilken penetrationsförmåga injekteringsmedlet skall ha.

Två huvudtyper av injekteringsmedel planerades för projekt, dels ett cementbaserat och dels ett silikatbaserat (silica sol). I planeringen förväntades det silikatbaserade

injekteringsmedlet att användas i huvudsak och det cementbaserade vid större läckage i injekteringshålen. Kriteriet för när cement skulle användas angavs i basdesignen.

Cementbaserat injekteringsmedel har en begränsad förmåga att penetrera en viss öppningsvidd. Försök har gjorts på laboratorier för att bestämma vid vilken kritisk vidd som olika injekteringsmedel har, se sammanställning av bland annat Draganovic (2009). Försöken resulterar oftast i en kritisk vidd, där huvuddelen av injekteringsmedlen kan tränga in i en spricka på mellan 50 till 100 μm , beroende på bland annat cementsort, recept, blandning och försöksmetod.

Penetreringsförmågan hos silica sol är minst ner till ca 10 μm , vilket är bekräftat i flera försöksprojekt (Funehag, 2007).

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

Jacking, dvs deformationer i sprickplanen, uppstår på grund av för höga injekteringstryck. Injekteringsövertrycket, Δp , kan uppskattas enligt följande (Fransson & Gustafson, 2006), för att undvika jacking:

$$\Delta p \leq 3 \cdot \rho_b \cdot g \cdot d - 2 \cdot \Delta h \quad (2-4)$$

där ρ_b är bergets densitet och d är bergtäckningen.

Ekvation 2-4 förutsätter att totalspänningen över sprickplanet motsvaras av hela bergtäckningen. Detta kan diskuteras eftersom hela bergtäckningen inte är en homogen massa utan består av andra sprickplan som kan deformeras. Därför skall ekvationen användas med försiktighet och som en första uppskattning.

Ett ”back-flow” eller återflöde av injekteringsmedlet kan inträffa på grund av antingen för kort injekteringstid, för lättflytande medel eller för lång härdningstid (Fransson & Gustafson, 2006). Det uttrycket som ingår i villkoret för undvikande av ett bakåtlöde (Axelsson, 2006) innefattar den dimensionslösa inträngningen, I_D , grundvattentrycket, Δh , samt injekteringsövertrycket enligt:

$$I_D > \frac{\Delta h}{\Delta p} \quad (2-5)$$

Med den dimensionslösa inträngningen och tiden kan ett cementbaserat injekteringsmedels inträngning i kombination med en viss injekteringstid bestämmas. Den dimensionslösa inträngningen och tiden beskrivs bla. i Gustafson & Stille (2005) och Eriksson & Stille (2005).

Genom att anta att injekteringen sprider sig ut från borrhålet i två-dimensionella sprickplan kan det silikatbaserade injekteringsmedlets gelinduktionstid, t_G , bestämmas i kombination med lämplig inträngningslängd, $I_{max, 2D}$, i en bestämd sprickvidd genom optimering av följande samband (Gustafson & Funehag, 2008a):

$$I_{max, 2D} = 0.45 \cdot b_{hyd} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p \cdot t_G}{6\mu_0}} \quad (2-6)$$

där b_{hyd} är den hydrauliska sprickvidden och μ_0 är den initiella viskositeten hos silica sol.

Vid gelinduktionstiden har den initiella viskositeten fördubblats, och gelningen sker därefter mycket snabbt vilket innebär att också inträngningen praktiskt sett upphör, dvs I_{max} nås vid ungefär halva geltiden. Geltiden är ungefär tre gånger gelinduktionstiden (Funehag, 2007).

Motsvarande bestämning av injekteringstid mot inträngning kan göras för cementbaserade injekteringsmedel, se Gustafson & Funehag (2008a och 2008b):

$$I = I_D \cdot I_{max} \quad (2-7)$$

$$\text{där } I_{max} = \frac{\Delta p}{2 \cdot \tau_0} \cdot b_{dim} \text{ och } I_D = \sqrt{\theta^2 + 4\theta} - \theta$$

och där formparametern $\theta = \frac{t_D}{2(3 + t_D)}$ som bestäms genom att ansätta en injekteringstid:

$$t = t_D \cdot t_0 \quad (2-8)$$

$$\text{där } t_0 = \frac{6 \cdot \Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2}$$

Av ovanstående fås en teoretisk inträngningslängd, i ett sprickplan, efter en viss tid men enligt tidigare resonemang behövs ett överlapp (av inträngningslängd) mellan borrhålen för att kompensera för sprickorientering och att sprickorna inte heller är helt planparallella. Överlappens storlek väljs schablonmässigt som en procentuell andel av borrhålsavståndet med viss hänsyn tagen till aktuell sprickgeometri. Detta ger erforderlig inträngning för olika borrhålsavstånd.

2.3.4 Underlag för design av efterinjektering mht gradient

Grundvattentrycket runt en tunnel skapar en gradient in mot tunneln. Gradienten mäts som trycket över en viss längd, m/m och är ett mått på energiförlusterna då vattnet flödar in mot tunneln.

Vid rent hydrostatiskt grundvattentryck, alltså helt ostörda förhållanden, så är gradienten 1 m/m. I och med att en tunnel, ett hålrum med atmosfärstryck, finns i bergmassan vill vattnet flöda mot tunneln. Gradienten blir då i närheten av tunneln alltid större än 1. Genom injekteringen skapas ett större flödesmotstånd, vilket är syftet, men samtidigt ökar alltid gradienten.

Gradienten från tunnelkonturen och ut i bergmassan skall bestämmas vid upprättande av injekteringsdesign. Detta kan göras med hydrauliska tester i kärnborrhål eller uppskattas teoretiskt genom att anta en tätad zon där huvuddelen av trycket sänks ökande in mot tunnel. En mindre del av tryckförlusten fås från den tätade zonen kant och ut i bergmassan. Med hjälp av gradienten kan manschettplacering och borrhållängder på en efterinjektering också bestämmas.

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

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

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

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) = \frac{\Delta h}{r_t} \cdot \frac{T}{T_{inj}} \cdot \frac{1}{\ln(2\Delta h / r_t) + (T / T_{inj} - 1) \cdot \ln(1 + t / r_t) + \xi} \quad (2-9)$$

Direkt utanför den tätade zonen kan gradienten beräknas till:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t + t) = \frac{\Delta h}{r_t + t} \cdot \frac{1}{\ln(2\Delta h / r_t) + (T / T_{inj} - 1) \cdot \ln(1 + t / r_t) + \xi} \quad (2-10)$$

Där t är tjockleken på den tätade zonen.

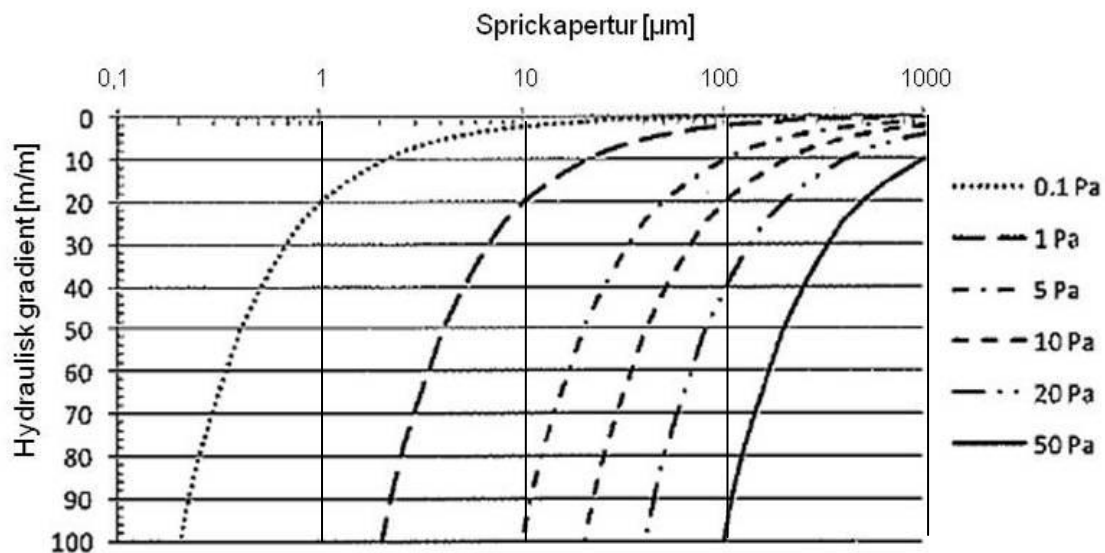
Förhållandet i tätningseffekt mellan oinjekterat och injekterat berg bör vara att det injekterade berget är en faktor 100 gånger tätare än det oinjekterade berget ($K_{inj}/K=0,01$). Detta innebär att en god tätningseffekt ger en avsevärd större gradient i den tätade zonen.

Gradienten är en faktor som påverkar erosionen. Vattnet utgör en eroderande kraft på injekteringsmedlet som bryts ned av vattnet. Den kraft som bildas beror på sprickvidden och gradienten och den motverkande kraften från injekteringsmedlet beror av injekteringsmedlets flytgräns enligt (Axelsson, 2009):

$$-\frac{dh}{dr} \cdot b < \frac{2\tau_0}{\rho g} \quad (2-11)$$

där b sprickvidden och τ_0 flytgränsen hos det färska injekteringsbruket.

I figur 2-7 visas hur flytgränsen beror av sprickvidden och grundvattengradienten.



Figur 2-7 Erforderlig flytgräns för att undvika erosion av bruket som funktion av sprickvidd och hydraulisk gradient (Axelsson 2009).

Figure 2-7 Required yield stress to avoid erosion of the grout, as a function of fracture aperture and hydraulic gradient (Axelsson, 2009)

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

Sammantaget kan sägas att flytgränsen kan bestämmas för att minimera risken för erosion om gradienten är känd. Detta minimerar således att ”fingering” bildas och att bruket späds ut med hållfasthetssänkning som följd.

Ytterligare en faktor att beakta är att hela injekteringsmedlet måste stanna kvar i sprickan utan att ett ”bakåtlöde” fås. Med en enkel jämviktsekvation mellan pådrivande vattentryck och mothållande mobiliserade skjuvspänningar. Ur ekvationen kan den minsta nödvändiga inträngningslängden beräknas. Det uttryck som ingår i villkoret är inte den faktiska inträngningslängden som uttrycks i meter, utan den så kallade dimensionslösa inträngningen $I_{D, 2-D}$. Den dimensionslösa inträngningslängden ska vara större än kvoten mellan grundvattentrycket och injekteringsövertrycket.

$$I_{D, 2-D} > \Delta h / \Delta p \quad (2-12)$$

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

Genom att göra en jämviktsbetraktelse av pådrivande grundvattentryck vilket återspeglas i gradienten mot den uppbyggda inneboende spänningen i injekteringsmedlet erhålls följande uttryck för nödvändig flytgräns i injekteringsmedlet (Axelsson, 2009):

$$\tau \geq \frac{\rho_w g b}{2} \cdot \frac{\Delta h}{I} \quad (2-13)$$

Där I är inträngningslängden. Observera att här antas att allt grundvattentryck tas upp av inträngningslängden till skillnad mot gradienten beskriven ovan.

Turbulens gör att utspädning av injekteringsmedlet riskeras. Att injektera i ett turbulent flöde rekommenderas inte (Axelsson, 2006). Axelsson beskriver en zon där turbulent flöde kan uppkomma nämligen för Reynolds tal över 10-300. Mellan dessa Reynolds tal beskrivs det som en övergångszon och över 300 är det turbulent. Reynolds tal beror till stor del på gradienten. För att räkna ut Reynolds tal används ekvationen (Fransson och Gustafson, 2006):

$$Re = \frac{\rho \cdot T}{\mu} \cdot \frac{dh}{dr} \quad (2-14)$$

Hål- och skärmgeometrin skall anpassas så att de troliga vattenförande sprickstrukturerna träffas med bästa möjliga vinkel, dvs vinkelrätt mot sprickplanen. Det är en vanlig rekommendation att utföra efterinjekteringens skärmar mot förinjekteringens skärmar. Detta för att ”täcka upp” den eventuella sprickstrukturen som missades under förinjekteringen. Vidare skall injekteringshålens längd anpassas så att

injekteringen undviker de turbulenta zonerna utanför tunnelkonturen. Detta kan göras eventuellt i flera steg med olika typer av injekteringsmedel och/eller sektioninjektering.

Som kontroll att inträngningslängden skapar ett överlapp av injekteringsmedel, mellan borrhålen, så ställs den beräknade inträngningslängden mot gradienten. Gradienten påverkar flödet som vill trycka tillbaka injekteringsmedlet mot tunneln och på så sätt begränsa utbredningen av inträngningen. Den del av inträngningen som är påverkad av gradienten är F och sätts i relation till den beräknade inträngningslängden, I , enligt (Fransson och Gustafson, 2006) vilket beskriver flödet för en lutande akvifer:

$$F/2 > I \quad (2-15)$$

F är således en vidd med enheten meter.

2.4 Preliminär vald tunnelsträcka och översiktlig design

I detta skede av projektet fanns begränsad information för att kunna följa principerna i tabell 2-1. Den information som huvudsakligen fanns var sprickorienteringar, baserade på tunnelkartering från drivningen, samt tunneldjup och mätningar i mätvallar. Den information som saknades var i huvudsak sprickviddsfördelning och grundvatten förhållandena. Vidare ställdes följande frågeställningar:

- Har vi nytta av tidigare förinjektering (gammal), risken för erosion är påtaglig i den tätade zonen beroende på kvalitén på kvarvarande injekteringsbruk?
- Vilken utrustning får plats i förhållande till nödvändiga utrustningskapaciteter?
- Vad händer bergmekaniskt under efterinjektering, jacking etc?

I detta skede av projektet antogs en måluppfyllelse att klara 2 l/min, 100 m. I huvudsak baserades detta mål på tidigare erfarenheter från andra projekt. Vidare antogs att ett fintättningsmedel, dvs silica sol, behövdes för att uppfylla detta och att beredskap skulle finnas för ett cementbaserat injekteringsmedel och ett enkomponent polyuretan.

Vidare gjordes en första uppskattning av gradienterna för aktuellt tunneltvårsnitt baserat på ekvationerna 2-9 och 2-10, se tabell 2-2 nedan.

Tabell 2-2 Preliminär uppskattning av gradienten direkt innanför tunnelvägg och direkt utanför tunnelvägg

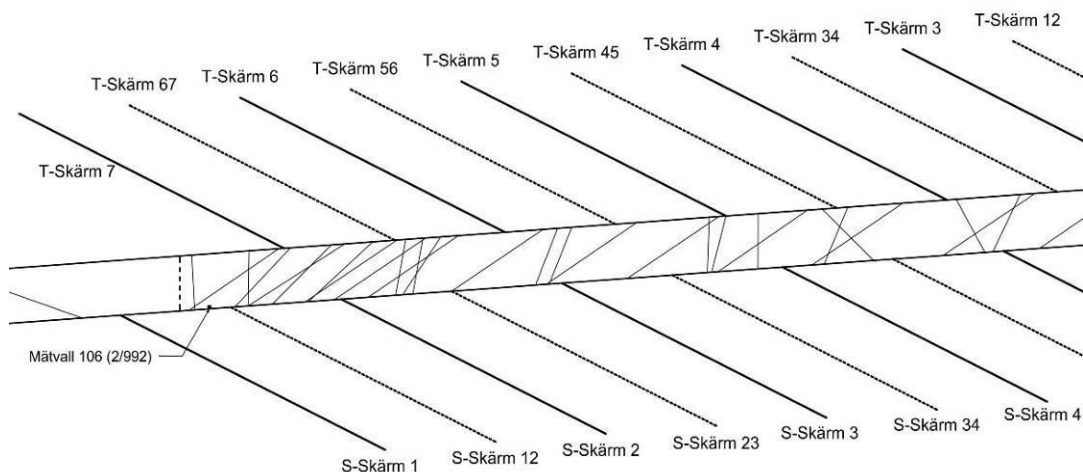
Table 2-2 Preliminary estimation of the hydraulic gradient directly inside the tunnel wall and directly outside the tunnel wall

Placering	dh [m]	r_t [m]	t [m]	K_{inj}/K [-]	dh/dr [-]
Direkt innanför tunnelvägg (ekvation 2-10)	50	2,5	--	--	12
Direkt utanför injekterad zon (ekvation 2-11)	50		10	0,01*	0,02

* önskvärt förhållande

Direkt innanför tunnelvägg ser man att gradienten kan vara väldigt stor. Den mest osäkra parametern här är tjockleken på den tätade zonen.

Med hjälp av stereonätet gjordes en första ansats avseende skärmgeometri. För att korsa den huvudsakliga sprickorienteringen skulle takhålen gå mot tunneldrivningen och sulhålen med drivningsriktningen, se figur 2-8. Vidare skulle hålen borras i ett ”split-spacing” förfarande, dvs mellan två skärmar borras alltid en mellanliggande skärm. För att få plats med borrhålsborrustning antogs det att vinkeln mellan tunnelvägg och borrhål kan vara ca max 30° och därmed behöver borrhålen vara ca 20 meter långa. Med denna geometri når borrhålen ut ca 10 meter från tunnelvägg där det antas att gradienten är måttlig, dvs utanför befintlig förinjekterad zon.



Figur 2-8 Ansatt skärmgeometri i profil i den översiktliga designen.

Figure 2-8 The grouting fan, in profile, for the preliminary design

För att verifiera den första ansatsen av målen och preliminära skärmgeometrin behövdes minst två kärnborrhål borrar. Målet med kärnborrhålens placering var att de skulle skära huvudsprickstrukturen samt nå utanför den injekterade zonen.

Övriga designparametrar, såsom injekteringstryck – och tid samt hålavstånd, bestämdes inte i detta skede utan skulle erhållas som ett resultat av kärnbörningen.

En kravspecifikation upprättades och som koordinerades i samråd med bergentreprenören inför slutlig design, se bilaga 1.

2.5 Kompletterande förundersökning

2.5.1 Kärnbörning

Syftet med kärnbörningen var att få underlag till basdesignen såsom sprickviddsfördelning och sprickfrekvens, inflödesprognos samt att verifiera den tätade zon och dess gradient.

I den preliminärt valda sektionen planerades och borrades två kärnborrhål med främsta syfte att finna den befintliga tätade zonens yttre ”kant” genom att mäta inflödet och grundvattentrycket i delsektioner längs hålet. Vidare var målet att verifiera den tolkade sprickstrukturen samt finna eventuella spår av injekteringsbruk i sprickorna.

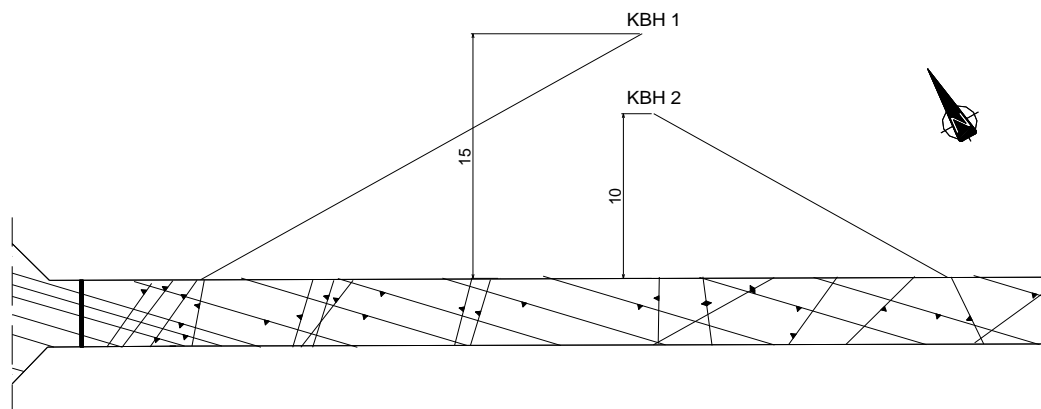
Kärnborrhålen planerades i ett första skede att gå 30 grader med tunnelriktningen, dvs samma riktning som förinjekteringen. Placeringen var på vänster sida där borrhål nr 1 (KBH1) planerades till ca 28 m och borrhål nr 2 (KBH2) till ca 10 m. Det längre borrhålet skulle påvisa var den injekterade zonens yttre gräns låg medan det kortare borrhålet skulle bedöma inläckaget.

Då de hydrauliska testerna, som utfördes löpande under börningen, för det första hålet (KBH1) visade på en tät bergmassa förlängdes börningen vartefter tills mätbara inflöden erhöles. KBH1 blev slutligen ca 33 m långt, först då kunde bergmassan tolkas som otätad (vissa inflöden och slut på spår av injekteringsbruk i sprickorna). Efter att KBH1 var borrat ändrades riktning och placeringen av KBH2 till att gå 30 grader mot längdökningen/tunneldrivningen, se figur 2-9. Orsaken till förändringen var att på så vis kunna träffa på fler sprickor som ej blivit tätade tidigare. Riktningen skulle nu även gå tvärtemot förinjekteringen. Även detta borrhål förlängdes några meter jämfört med den ursprungliga längden på 10 m.

De hydrauliska testerna utfördes sektionsvis om 3 meters längder:

- Grundvattentryck
- Inflödesmätning
- Vattenförlust

Slutligen gjordes även ett tryckupbyggnadstest på hela borrhålslängden.



Figur 2-9 Plan över en del av aktuell tunnelsträcka med kartering och kärnborrhål KBH1 och KBH2.

Figure 2-9 View of the current tunnel section, with mapped fracture and core holes KBH1 and KBH2

Ytterligare ett kortare kärnborrhål, ca 5 m, borrades nära och parallellt med KBH2 för ett sidoprojekt, dvs ett examensarbete på Chalmers angående spricköppning vid pålagt tryck i befintliga sprickor, dvs ”jacking”, se examensrapport (Runslätt & Thörn, 2010).

2.5.2 Resultat kärnbörning

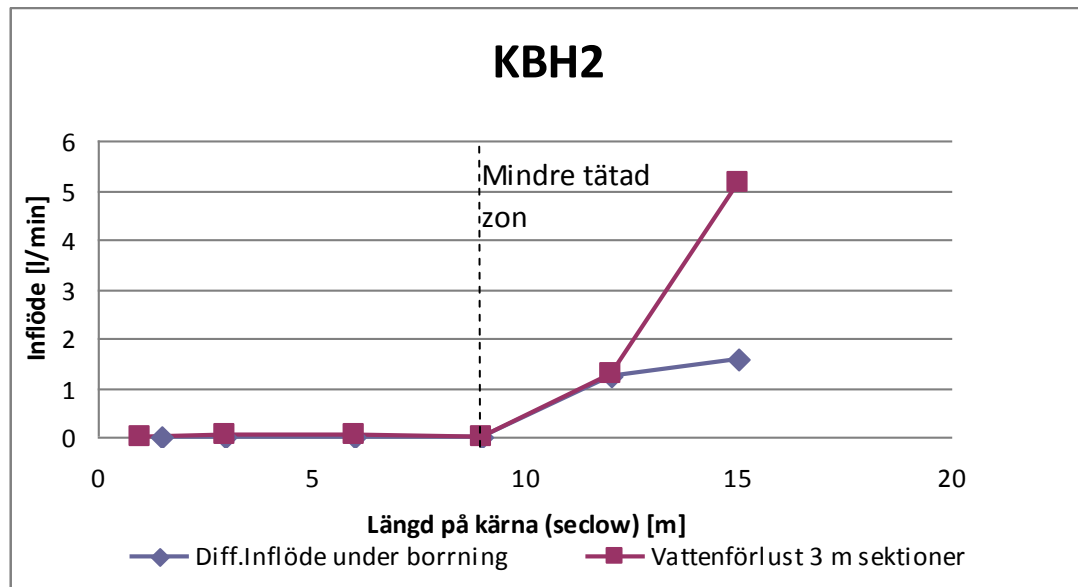
Utvärderingen av KBH1 påvisade inga eller små mängder vatten vilket kan tyda på att förinjekteringen på sträckan gett ett gott resultat. Denna tolkning styrks också av att injekteringsbruk påträffades i sprickorna vid kärnkarteringen, se figur 2-10. Detta innebar att någon analys av spricktransmissiviteten längs hålet inte var möjlig.



Figur 2-10 Exempel på injekteringsbruk i sprickorna, till vänster cement och till höger talk.

Figure 2-10 Two examples of identified grouts in fracture from core mapping.

Resultatet från KBH2 visar på en tät bergmassa vinkelrätt ut från tunneln på ca 5 m (borrhålslängd 9 till 10 m) och ett antal läckande strukturer längre ut, se figur 2-11.



Figur 2-11 Uppmätt inflöde i KBH2.

Figure 2-11 Measured inflow in KBH2

Från de två kärnborrhålen gjordes en tolkning av att de sprickstrukturer som skär förinjekteringskärmarna relativt vinkelrätt till stor del är injekterade och fyllda med injekteringsbruk, ca 12 till 15 m ut från tunnelkontur. Sprickstrukturen som i huvudsak går parallellt med förinjekteringskärmarna har inte injekterats lika väl och når inte lika långt ut i bergmassan runtomkring.

Vattentrycket mättes i KBH 2 den första sektionen, dvs från tunnelväggen fram till ca 3 m in i borrhålet, till nära noll. Vid nästa mätning, mellan ca 3 meter fram till ca 6 m, mättes 3,2 bar. Därefter erhöles ungefär samma mätvärde vid varje efterföljande sektion, vilket kan betecknas som ett konstant vattentryck. För borrhål KBH1 gjordes motsvarande mätningar, men där ett stigande tryck uppmättes vartefter och det slutliga trycket mättes till ca 4,4 bar, dvs 15 m utanför tunnelkontur och utanför den tätade zonen.

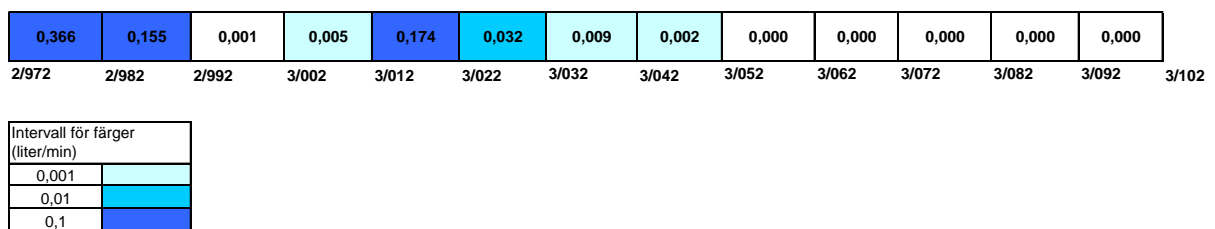
2.5.3 Droppkartering

Syftet med droppkarteringen var att få ett underlag till basdesignen för att utröna om det fanns stora variationer i inläckage längs den valda tunnelsträckan, samt att ge en jämförelse av droppsituationen före respektive efter injekteringsutförandet.

Droppkarteringen av den valda sträckan gjordes i två omgångar inför designen och utförandet. Den första droppkarteringen av dessa karteringar gjordes i slutet av oktober 2009, inför val av slutlig plats, och den andra i mitten av januari 2010, inför etablering av arbetet. Droppkarteringen redovisas i 10 meters intervall, se figur 2-12 respektive 2-13. Två delområden har identifierats som mest droppande, dels mellan sektion 2/972 till 2/292 och dels 3/012 till 3/022, vidare är en stor andel av tunneln näst intill droppfri, speciellt mellan sektion 3/052 till 3/102.

2009-10-27
Droppkartering Citytunneln, 2/972-3/102

Anmärkning: Ett flertal områden med fukt har identifierats. Till skillnad från i september har en vattenvolym specificerats även från fuktområdena.

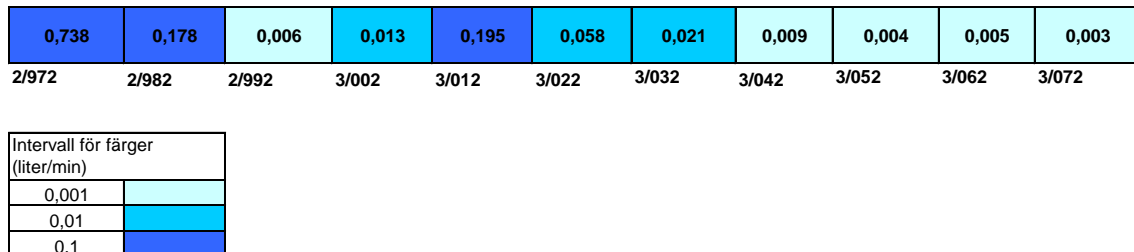


Figur 2-12 Redovisning av droppkartering, september 2009

Figure 2-12 Drip mapping, september 2009

2010-01-01
Droppkartering, 2/972-3/102

Anmärkning: Ett flertal områden med fukt har identifierats. Till skillnad från i september har en vattenvolym specificerats även från fuktområdena.



Figur 2-13 Redovisning av droppkartering, januari 2010

Figure 2-13 Drip mapping, january 2010

En liten variation finns mellan mätperioderna, dock finns en viss felmarginal i mätmetoden, men det totala droppet över hela sträckan är ungefär detsamma, dvs 0,79 l/min respektive 0,80 l/min.

Vidare kan det konstateras att ca en sjättedel av inläckaget på sträckan, sett utifrån mätvallsresultat, kommer från tak och väggar. Detta kan betecknas som lågt då tidigare erfarenheter har visat på ungefär en tredjedel. Orsaken till det lägre värdet kan vara

svårigheten att identifiera all dropp bakom installationer samt att den högre tunneltemperaturen torkar upp vattnet något mer än vid lägre tunneltemperaturer.

2.6 Slutlig lokalisering

Efter resultaten från de kompletterande förundersökningarna, kärnborrning, hydrauliska tester och droppkartering, beslutades inom projektgruppen, representanter för Telia, Besab, Chalmers och Tyréns, att den preliminärt valda tunnelsträckan var lämplig för försöket.

Kärnborrningarna gav att de vattenförande sprickorna som var möjliga att injektera i huvudsak låg parallellt med förinjekteringsskärmarna. Genom kärnborrhål KBH1, som låg parallellt med förinjekteringen, uppskattades den tätade zonen. Kärnborrhål KBH2 borrades inne i den tätade zonen och mot förinjekterings riktning, därmed kunde detta kärnborrhål användas för att bedöma ett representativt inläckage till tunnelavsnittet.

Tidigare data visade på att förinjekteringen kan ha utförts med långa borrhål (10 m vinkelrätt ut i bergmassan) och med ett stort överlapp mellan skärmarna. Den tidigare förinjekteringen kunde då utnyttjas vid metodiken för efterinjektering.

Kärnborrningen visade också att det var möjligt att borra med större vinkel än 30 grader. Slutligen visade sidoprojektet angående ”jacking” att det inte kunde uppnå sprickutvidgning, med tillgänglig utrustning. Droppkartering visade att fokus på tätningssatsen skulle göras i ena delen av tunnelsträckan, från mätvallen och stigande med längdmätningen.

2.7 Riskanalys

Inför designen och utförande gjordes en riskanalys för projektet. Samtliga inblandade i projektet, beställare, entreprenör, forskare och projektörer, samlades för att identifiera risker, allt från administrativa till rent tekniska. Totalt 121 risker identifierades och grupperades i 5 områden; teknik, styrning, personal, arbetsmiljö och miljö.

Därefter kvantifierades riskerna genom att konsekvens och sannolikhet bestämdes utifrån en 5-gradig skala. Sannolikheten och konsekvensen multiplicerades för att få fram risken. Risken kan alltså vara mellan 1 och 25. Riskerna som identifierades låg på mellan 1 och 16. Åtgärdsförslag med ansvarig, där det var möjligt, upprättades och genomfördes. Bland de risker som fick högst värde, dvs 12 eller mer, var:

- ”långa arbetspass”
- ”osäkert antal personer i tunneln”
- ”utrustning/material klarar inte de tekniska/fysiska kraven/specifikationerna alt kvalitetskraven”

- ”bristande underhåll av ex maskiner”
- ”kostnaden ökar (för någon part)”
- ”dålig ekonomiuppföljning pga 3 delfinansiärer”
- ”budgeten/kostnaderna överskrids/underskrids”
- ”svårkalkylerbart, svåravgränsbart”
- ”slutdatum får inte överskridas”
- ”oklart vad som ger kvalitet i projektet”
- ”rutin för avvikelshantering saknas”
- ”olika besked/motstridiga uppgifter”
- ”många agerar projektledare”
- ”oklar beslutsgång under injekteringsarbetet, Chalmers, Besab, Tyréns”
- ”PL har brist på tid för uppdraget”
- ”övertro på den egna kompetensen”
- ”tar för givet att alla vet vad man pratar om”
- ”kommunikationsproblem/samarbetssvårigheter/”hemligt”/sitter inte gemensamt”

3 Basdesign och injekteringsteknik

3.1 Basdesign efterinjektering

3.1.1 Mål

Baserat på resultat från kärnborrningen ändrades inläckagemålet från ca 2 l/min och 100 m till ca 1 l/min och 100 m för aktuell sträcka (sektion 2/992-3/081). Förändringen grundar sig på den nya kännedomen om sprickviddsfördelningen, från kärnborrhål KBH2, i kombination med minsta sprickvidd som kan injekteras med silica sol, se avsnitt 3.1.3 (steg I).

Basdesignen, enligt nedan, visar vilka injekteringsparametrar, såsom borrhålsgeometri, tryck och tid, som skulle användas under injekteringen. Under utförandet planerades det att göras etappanalyser av utförd efterinjektering. Beroende resultaten från dessa kunde basdesignen komma att justeras inför nästkommande etapp.

3.1.2 Förutsättningar

Grundläggande förutsättning för basdesignen är resultaten från kärnborrningen och de hydrauliska testerna, se avsnitt 2.5.2. Till grund för designen ligger även tidigare material och data.

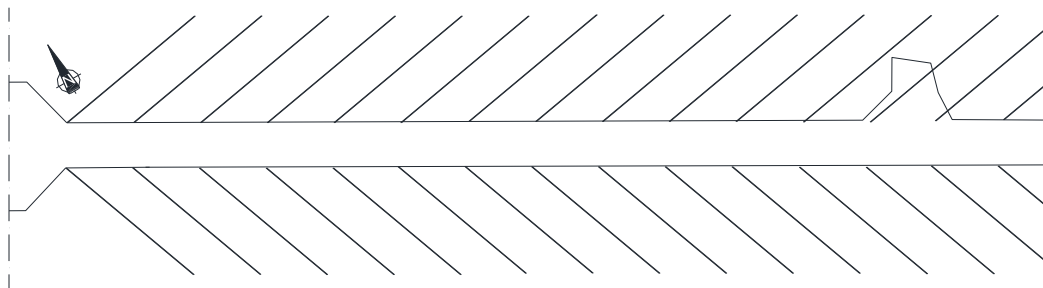
Vidare utgjorde inläckagemätningar i mätvallar en viktig förutsättning, dels för att verifiera inläckageprognoser mot verkligt utfall och dels för att följa upp injekteringsresultaten löpande vid etappanalyserna. Mätningarna i mätvallarna har utförts periodvis längs hela tunnelsträckan sedan tunneldrivningens slut. Fyra efterföljande mätvallsmätningar påbörjades i september 2009 och utfördes även i december 2009 efter kärnborrningen. Syftet med dessa mätningar var att erhålla jämförbara data innan utförandet startade samt att analysera en eventuell ökande eller minskande trend. I mars 2010 utfördes mätvallsmätningar parallellt med utförandet, ca 1 gång per vecka (måndag morgon) tills arbetet avslutades under juli 2010. Därefter fortgår uppföljningar under hösten 2010 av mätvallsresultat.

I tabell 3-1 redovisas mätningar från december 2009 i mätvall 105_106, som är aktuell för vald tunnelsektion, och sätts som referensvärden under och efter tätningsinsatsen.

Tabell 3-1 Mätresultat i mätvall 105_106**Table 3-1** Measureing inflow from weir 105_106

Datum för mätning	Flöde i sektion [l/min, 100 m]
2009-11-30	3,88
2009-12-03	3,78
2009-12-07	3,76
2009-12-14	3,81

Den ursprungliga förinjekteringen har med stor sannolikhet penetrerat de större planen, som går skevt vinkelrät mot injekteringshålen, på vänster sida. Dock ej lika väl på höger sida, se figur 3-1, där förinjekteringshålen blir skevt parallella med ena sprickstrukturen. Stupningen på de båda planen är ca 50-60 grader. De sprickor som stryker vinkelrätt tunneln är högst sannolikt träffade.

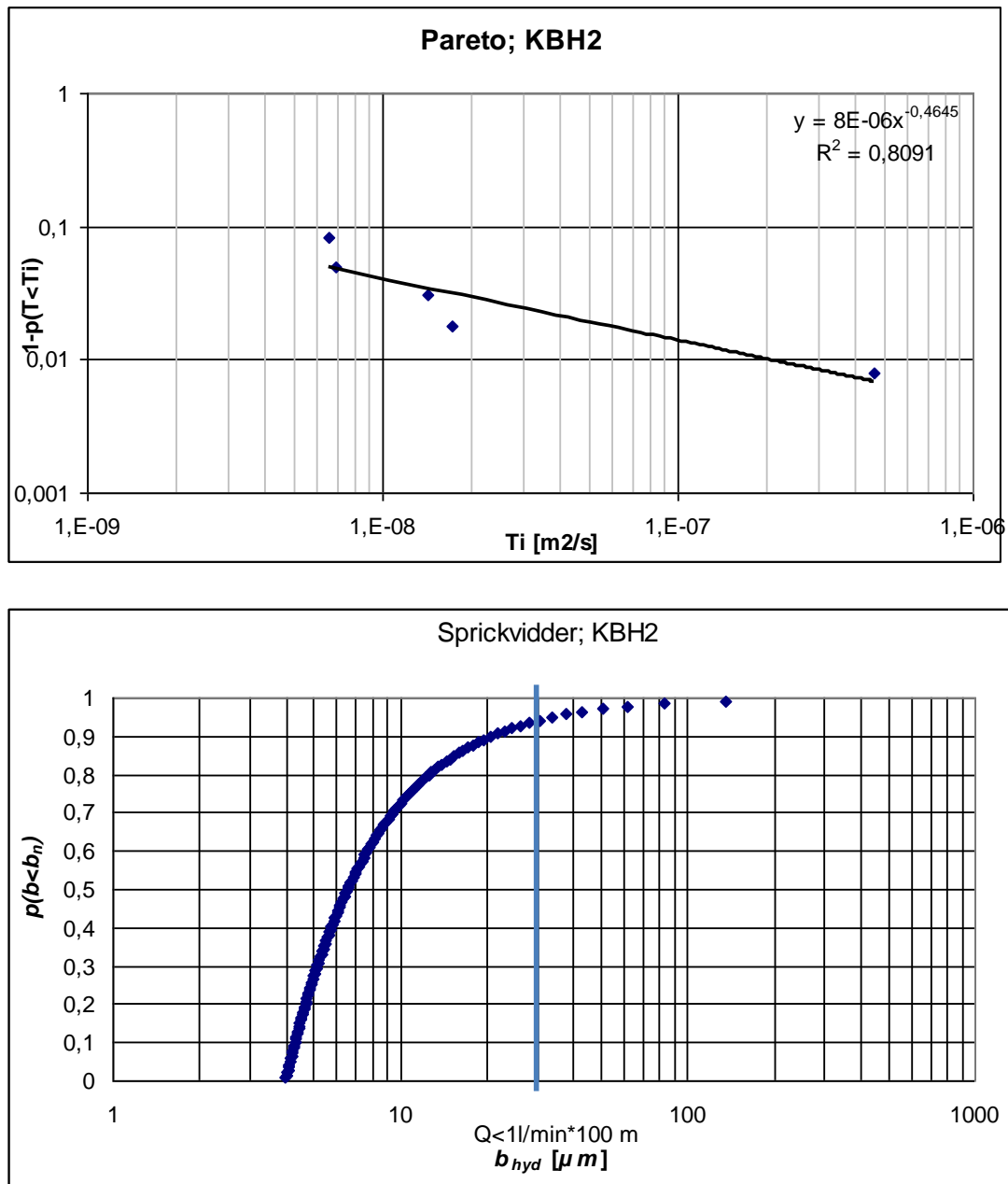
**Figur 3-1** Plan med sprickstrukturer och troliga positioner på förinjekterings-skärmar.**Figure 3-1** View with fractures in the tunnel and estimated places for pre-grouting fans.

En specifik projektförutsättning var att tunneltemperaturen, som visade på ca 20° C, var högre än temperaturen i omkringliggande berg, på ca 8°C. Denna skillnad påverkar framförallt gelningen av injekteringsmedlen.

3.1.3 Design

Steg I: Prognos av inläckage och val av injekteringsmedel

Baserat på resultat från KBH2 gjordes en efterinjekteringsdesign enligt beskrivning i avsnitt 2.2.1. Figur 3-2 nedan visar Pareto-fördelningen av spricktransmissiviteten och tillhörande sprickviddsfördelning.



Figur 3-2 Paretofördelning av spricktransmissivitet och tillhörande sprickviddfördelning för KBH2.

Figure 3-2 Pareto distribution of fracture transmissivity (upper figure) and fracture aperture (lower figure), based on KBH2.

Den karterade borrhölan antas gå igenom en representativ sprickfördelning för sträckan, med både mindre och större sprickor.

I nedanstående tabell sammanfattas vilka sprickvidder som måste tätas för att erhålla ett inläckage på 1 l/min och 100 m. Beräkningarna är baserade på inläckaget utan

injektering, enligt ekvation 2-3, och vilken reducering av flödet som fås vart efter sprickorna tätas enligt sprickviddsfördelningen i figur 3-2.

Tabell 3-2 Beräkning av inläckaget beroende på minsta tätad spricka.

Table 3-2 Calculated inflow dependent on grouted minimum fracture.

$H=35, L=100$ m, $r_t=2,5$ m, $\xi = 5, k=0,47, N=136$ sprickor			
Minsta tätad spricka, b_{min} [μm]	Beräknat inläckage, q [l/min 100 m]	T_{inj} [m^2/s]	Kommentar
Ingen	3,8	$2,4 \cdot 10^{-6}$	Utan injektering, dvs ekvation 2-3
136	2,9	$8,2 \cdot 10^{-7}$	Största spricka tätad
34	1,0	$1,3 \cdot 10^{-7}$	Kritisk dimensionerad sprickvidd

Tabell 3-2 och raden ”Ingen” med beräknat inläckage på 3,8 l/min 100 m verifierar att KBH2 med dess sprickviddsfördelningen är representativ för tunnelsträckan. Inläckaget 3,8 l/min 100 m är förvånansvärt exakt vad som uppmätts i mätvallen för tunnelsträckan, se tabell 3-1.

Eftersom kärnboringen visade på en fullgod tätad zon med cement runt tunneln, speciellt i sprickstrukturer vinkelrätt till förinjekteringsskärmarna, kom efterinjekteringen att fokusera på sprickstrukturerna parallellt förinjekteringsskärmarna och ”inne” i den förinjekterade zonen.

KBH2 är borrarad mot förinjekteringsskärmarna och kan därför anses som representativ för den parallella sprickstrukturen. Den dimensionerande sprickvidden, baserad på hydrauliska test i KBH2, bestämdes till ca 30 μm , för att komma ner i ett inläckage på ca 1 l/min. Baserat på den dimensionerade sprickvidden valdes i basdesignen att använda silica sol som huvudsakligt injekteringsmedel.

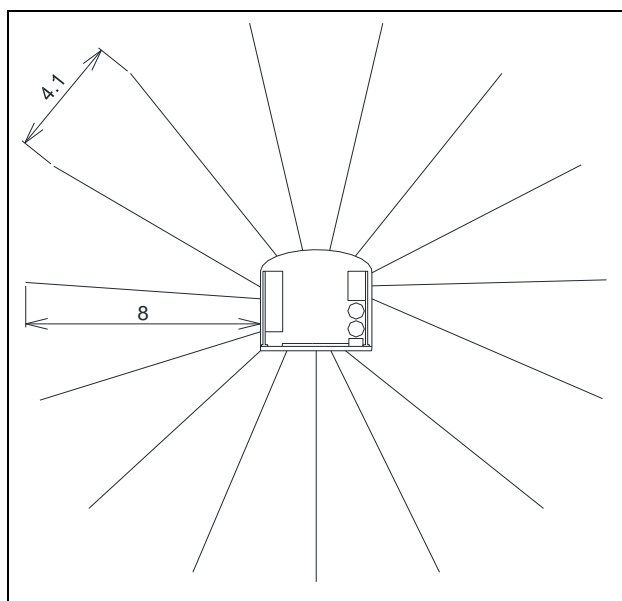
Den maximala sprickvidden enligt figur 3-2 är ca 150 μm , dvs ett cementbaserat injekteringsmedel skulle även finnas i beredskap för de större inflödena i injekteringshålen. De kriterier som ställdes på det cementbaserade injekteringsmedlet var främst att flytgränsen, τ_0 , skulle vara ca 2 till 5 Pa för att klara gradienten i den tätade zonen. Vidare var en marshcone tid på ca 35 s önskvärd för att få en relativ hög inträngningshastighet.

Steg II och III: Bestämning av injekteringstryck och inträngningslängd samt kontroll mot gradientproblem

Innan design av injekteringstryck och inträngningslängd bestämdes, gjordes en preliminär design av skärmgeometrin samt avståndet mellan skärmarna.

För att optimera borrhningen och efter diskussioner med entreprenören, vinklades borrhålen 40° ut från tunnelkontur. Samtliga borrhål i skärmen skulle därmed borras mot förinjekteringsskärmarna. På detta sätt blev hålen kortare, jämfört med den översiktliga designen (se avsnitt 2.4), och borrhning av tak och sula skulle göras vid samma borretablering. Vidare ansattes borrhållslängden till 12,5 m, vilket når ca 8 m vinkelrät ut från tunnelkontur. Efterinjekteringen planerades därmed att i huvudsak ske i den förinjekterade zonen.

Antal borrhål och ansättningspunkter i skärmen baserades främst på möjliga lägen i tunneln. Frihetsgraderna för ansättningen av borrhålen var begränsade då installationer, framförallt fjärrvärmerören ej gick att flytta. Tack vare en del omflyttande av kablar kunde en relativt heltäckande skärm, med ett avstånd mellan hålbottarna på ca 4,1 m, planeras tvärs tunneltvärsnittet, se figur 3-3.

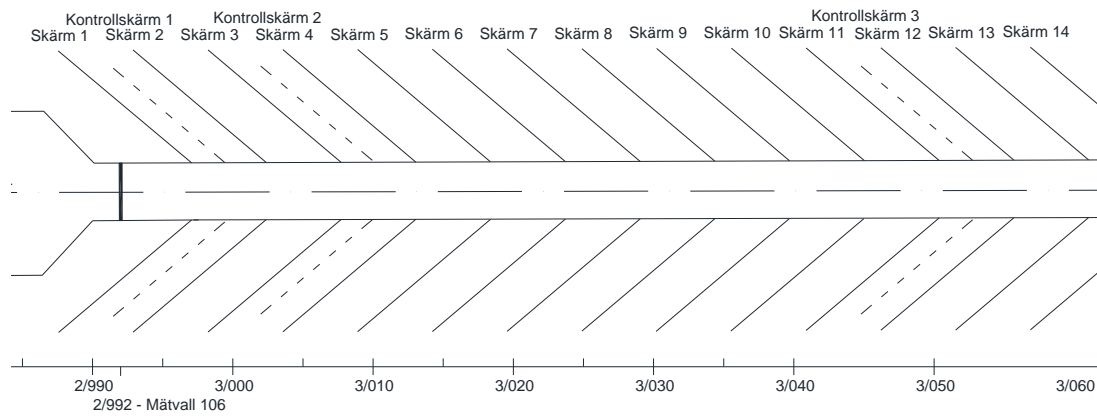


Figur 3-3 Skärmgeometri, där ansättningspunkterna har flyttats med hänsyn till installationer.

Figure 3-3 Fan geometry, where the location of the boreholes have been moved depending on the tunnel installations

Med ett karakteristiskt avstånd på ca 3,5 m mellan varje injekteringshål fås en kritisk inträngningslängd på ca 2,6 m, dvs ett 50 % överlapp i inträngning mellan varje hål. För

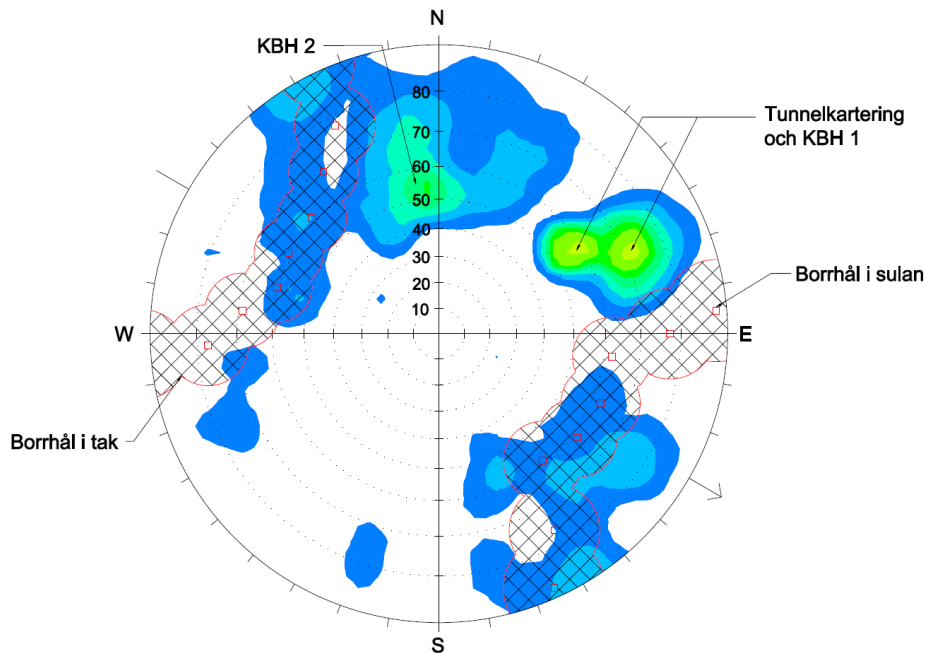
att hålen mellan skärmarna skall uppfylla motsvarande överlapp blir ansättningsavståndet mellan skärmarna ca 5,5 m. Den slutliga layouten för injekteringsskärmarna redovisas i figur 3-4 nedan.



Figur 3-4 Slutlig layout på efterinjekteringsskärmarna.

Figure 3-4 Definitive layout of the post-grouting fans.

För att ge en visuell uppfattning om vilka sprickor som injekteringsskärmen skulle träffa lades tunnelkarteringen och kärnborkarteringen in i en stereoplot tillsammans med polpunkterna för varje enskilt injekteringsborrhål. I figur 3-5 visas polpunkterna ± 10 grader för borrhålen som en skrafferad yta.



Figur 3-5 Stereoplot med tunnelkartering och kärnborrhartering samt en träffbild av injekteringsborrhålen, med 40 graders vinkling ut från tunnelvägg ± 10 grader.

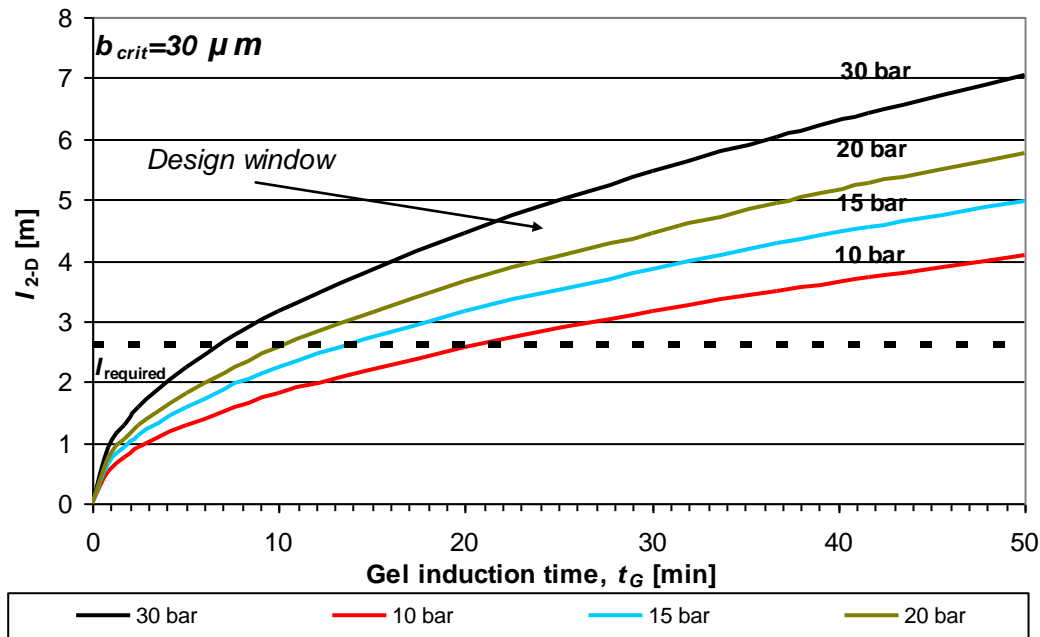
Figure 3-5 Stereo plot with mapped fractures, drilled core holes (KBH1 and KBH2) and the hit rate of the planed grouting holes

I figuren ovan ses att de karterade sprickorna med hög koncentration (gul-grön) ligger i nära anslutning till borrhålen och därmed finns det en stor sannolikhet att dessa skulle komma att bli tätade vid injekteringen.

Inför de specifika egenskaperna för respektive injekteringsmedel behövs injekteringsstrycket uppskattas. Med ett grundvattentryck på ca 0,5 MPa och bergtäckning på ca 50 m fås ett maximalt injekteringsstryck, totaltryck, på 3 MPa och injekteringsövertryck på 2 MPa.

- Injekteringsteknik för silica sol

Med sambandet för inträngningslängd ($I_{max, 2D}$) i avsnitt 2.3.3 fås ett förhållande mellan injekteringsövertryck och gelinduktionstid (t_G) vid en bestämd sprickvidd och inträngningslängd. I figur 3-6 redovisas de olika utfallen vid den dimensionerande sprickvidden 30 μm .



Figur 3-6 Designfönster för att bestämma gelinduktionstiden, baserat på tryck och inträngningskrav.

Figure 3-6 Design window to determining the gel induction time, based on pressure and penetration length.

Med en erforderlig inträngningslängd på 2,6 m och ett injekteringsövertryck på 2 MPa (20 bar) fås en gelinduktionstid på 10 min, se figur 3-6. Detta ger en geltid på 30 min.

Vid ytligt förlagda tunnlar och där risken för erosion är liten kan pumptiden sättas till $\frac{1}{2}$ geltiden (Funehag, 2007). Vid denna tid erhålls full inträngningslängd och medlet har uppnått tillräcklig hållfasthet för att klara vattentrycket i sprickorna. Vid risk för erosion tex. återflöde eller fingering måste pumptiden vara längre. För detta projekt bedömdes risken för erosion vara liten eftersom sprickvidderna i den tätade zonen är små. De större sprickvidderna antas vara tätade i samband med förinjekteringen, vilket också bekräftades vid kärnbörningen. Om, trots allt, större flöden skulle påträffas skall dessa flöden injekteras med ett cementbaserat medel.

Hänsyn måste vidare tas till skillnaden i temperatur mellan i luften tunneln och i omkringliggande berg. Vid blandningen av injekteringsmedlet, dvs i tunneln, kommer silica solen att ha en temperatur på 20 grader men när medlet tränger in i sprickorna kylas medlet snabbt ner till bergets temperatur, dvs ca 8 grader. För att få rätt gelinduktionstid, enligt designen, och utan att montera en kylanläggning på blandningsutrustningen, väljs pumptiden som korrigeringsparameter. Med en pumptid

på 2/3 av geltiden, för en injekteringsblandning på 20 grader, fås samma gelinduktionstid som för halva geltiden för en blandningen på 8 grader.

I Axelsson (2009) finns en angivelse på att silica sol skulle kunna uppnå en hållfasthet på 2 Pa, vid halva geltiden. Det angivna värdet är dock ett indirekt värde som är baserad på en linjär exponation från en gelad silica sol, eftersom det är svårt att mäta hållfastheten på en vätska. Hållfastheten antas ökar drastiskt efter halva geltiden såsom viskositeten. En hållfasthet på 2 Pa för silica solen, efter halva geltid, är tillräckligt i detta projekt.

De observationer som skall göras under injekteringen för att upptäcka eventuell erosion är:

- Större ytläckage på tunnelytan
- Ofullständigt tätade borrhål, dvs läckande borrhål
- Icke fullt utbildad borrhålsplugg när manschetterna tas bort.

Vid ytläckage, där tryck och tid inte kunnat uppnås enligt designen, skall injekteringshålet pumpas med kortare geltid eller byta injekteringsmedel till ett cementbaserat.

Första åtgärd vid läckande borrhål är att injektera med silica sol men med manschetten placerad mer ytligt, i detta projekt ca 0,5 m in i hålet. Vidare ska en blandning med kortare geltid användas samt att pumpa medlet till dess att 4/5 av geltiden uppnåtts. Som andra åtgärd, om inte första lyckas, är att plugga borrhålet med ett tjockt cementbruk. Slutligen och som tredje åtgärd, om inte de två föregående har lyckats, manschetteras borrhålet och vidare åtgärder avvaktas.

Vid eventuellt icke fullt utbildad borrhålsplugg och inget läckage görs endast notering om detta.

Basdesignen för silica sol:

- | | |
|--------------------------------|------------------|
| - Grundvattentryck, Δh | 5 bar (0,5 MPa) |
| - Maximalt injekteringsstryck | 30 bar (3 MPa) |
| - Gelinduktionstid, t_G | 10 min |
| - Viskositet, μ_0 | 0,0055 Pas |
| - Minsta sprickvidd, b_{dim} | 30 μm |
| - Designtryck, ΔP | 20 bar (2 MPa) |

- Injekteringsteknik cement

Varje borrhål som hade en vattenförlust större än 10 l/min vid ett övertryck på 3 bar skulle injekteras med cement. Detta motsvarar en hydraulisk sprickvidd på 200 μm om enbart en spricka skulle stå för vattenförlusten i borrhålet. För denna storlek på sprickvidd finns osäkerheter på silica solens funktion som injekteringsmedel.

Förhållandet mellan flöde och hydraulisk sprickvidd baseras på att ca 80 % av flödet kommer från den största sprickan vilket gör att den hydrauliska sprickvidden blir 160 μm . Detta blev därför den dimensionerande sprickvidden för cement.

Den blandningen som valdes var INJ30, vct 0,8+2% setcontrol II, med kända bruksegenskaper från tidigare labbprovning. Blandningens bruksegenskaper mättes även med en fältblandare på Chalmers. I tabellen nedan anges resultat från fältblandaren och tidigare labbförsök.

Tabell 3-3 Resultat från labb och fältblandning av cementbruk INJ30.

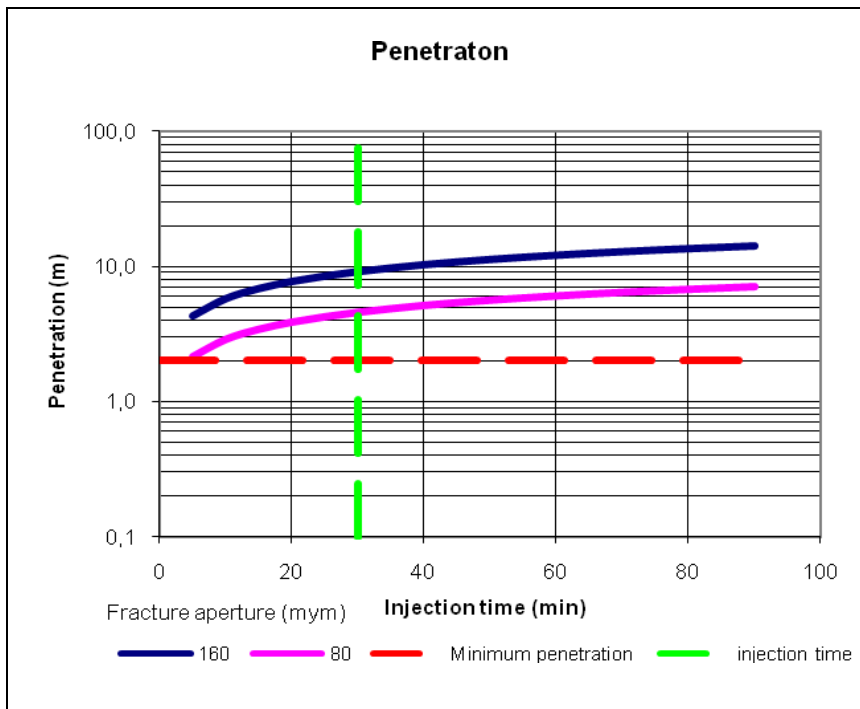
Table 3-3 Result from selected grout, based on laboratory and field equipment tests

	vct/ tillsats	Mudbalance [kg/m ³]	Marshcone [s]	Flytgräns från Yield stick [Pa]
Injekterings- plattform, Häny	0,8/2 %	1530 (efter 30 min 1550)	33 (efter 30 min 36)	2 Pa (efter 30 min 5 Pa)
Labb, desoimixer	0,8/2 %	1570	45	0,5 - 1,5

Det dimensionerande injekteringsövertryck valdes till 15 Bar (1,5 MPa) och följande bruksegenskaper har användes vid dimensioneringen:

- Flytgräns (τ_0) = 3 Pa
- Viskositet (μ_0) = 25 mPas

Med dessa data och sambanden för cementinträngning, enligt avsnitt 2.3.3, fås figur 3-7 med sprickvidderna 80 och 160 μm . Där den mindre vidden bedömdes vara minsta spricköppning cementblandningen kan penetrera fullt till 100 % och den största sprickvidden motsvarar den största bedömda spricköppningen i den tätade zonen.

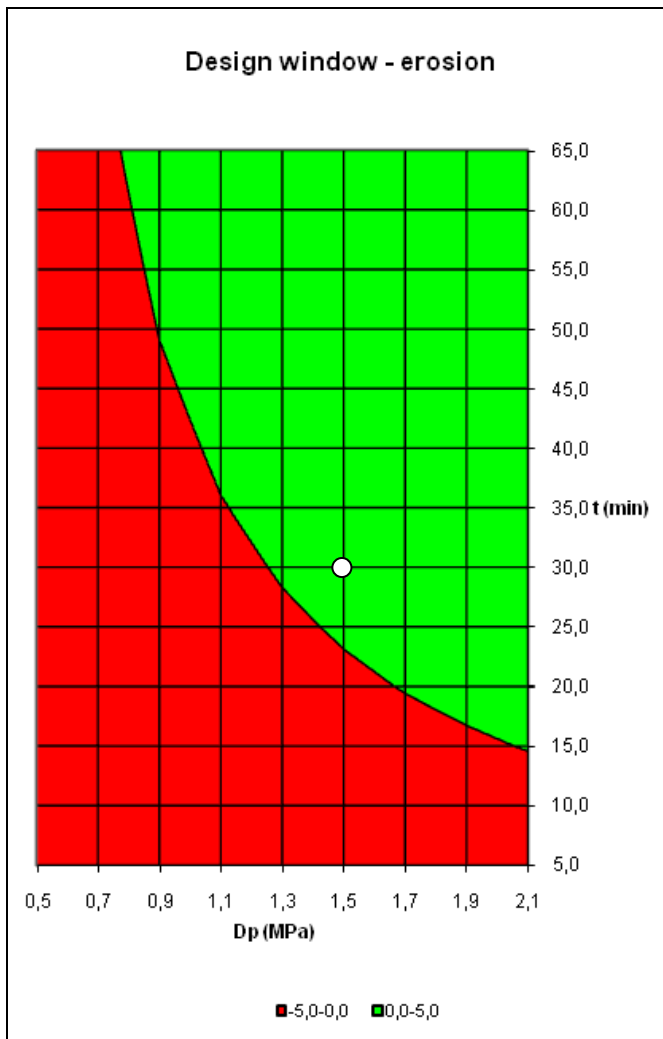


Figur 3-7 Beräknad inträngning i sprickvidderna 80 och 160 μm

Figure 3-7 Calculated penetration, based on the apertures 80 and 160 μm

Med en injekteringstid på 30 min, med fullt injekteringsövertryck på 15 bar, fås en inträngningslängd på ca 10 m i 160 μm sprickan samtidigt som cementet kommer att tränga in i sprickor ner till antagna 80 μm där inträngningslängden är 4 m. I samtliga fall är inträngningslängden längre än halva avståndet mellan borrhålen i skärmen och ett överlapp fås.

Vidare gjordes en kontroll med avseende på erosion/"back-flow" utifrån injekteringsövertryck och injekteringstid. Resultatet av detta visas i figur 3-8, där risk för "back-flow" föreligger inom det röda området. Punkten i diagrammet visar var designen hamnar med det valda trycket och tiden enligt ovan, dvs ingen risk för erosion/"back-flow".



Figur 3-8 Kontroll av erosion/"back-flow" för valt cementbruk, område där risk (rött) och ingen risk (grönt) föreligger. Vit punkt är den valda injekteringstekniken; injekteringsövertryck = 1,5 MPa, injekteringstid = 30 min.

Figure 3-8 Control of erosion/back-flow of the selected grout, area for erosion (in red) and not (in green). White point is the chosen grout technique, with grout pressure = 1.5 MPa and time = 30 min.

Vattentrycket i KBH2 var nästan konstant från någon meter in i hålet och till botten av hålet. Detta innebär att gradienten är obetydlig och sprickvidderna i huvudsak små, vilket innebär att någon kontroll avseende turbulent flöde och påverkan på inträngningen med avseende på gradienten inte var aktuellt, enligt avsnitt 2.3.4.

Ovanstående gäller under förutsättning att injekteringen i borrhålen börjar minst en meter in från tunnelvägg, dvs manschettplaceringen är ca 1,5 m in i borrhålet. Vid stora ytläckage kan manschettplaceringen bli djupare men bestäms på plats.

3.2 Injekteringskriterier

3.2.1 Allmänt

Baserat på basdesignen togs specifika injekteringskriterier fram för projektet såsom blandningsförhållande beroende på temperaturskillnaderna i tunneln och berget samt projektets stoppkriterier.

Under utförandet planerades det att göras kontroller och uppföljningar av blandning och utförande. Beroende på observationer och resultaten från uppföljningen kunde kriterierna komma att justeras vartefter.

3.2.2 Volym och geltider för silica sol

Enligt basdesignen skulle en geltid på 30 minuter vid 10°C användas. Pumptiden är 20 minuter för en sådan geltid. Se bilaga 2 för olika geltider (GT) beroende på volymförhållande.

Batchvolym

Volymen för batchvis blandning kopplades mot vattenförlusten. En stor vattenförlust kräver en större blandning. En standardsats antogs vara 126,7 l för en geltid på 30 min vid 10°C.

Stoppkriterier, silica sol

1. Injekteringen fortgår till full tid vid givet designtryck, ca 30 bar.
2. När en batch är slut blandas en ny och pumpas till 2/3 av geltiden
3. Vid en total inpumpad volym på 400 liter blandas en ny snabb sats (halva geltiden mot den tidigare) och pumpas 2/3 av geltiden.
4. Vid total volym på mer än 500 liter avbryts injekteringen med silica sol och borrhålet injekteras med cement.

3.2.3 Kriterier för cement

Blandningen av cement görs kontinuerligt. En normal blandningsmängd för cement injekteringen är 50 kg cement, INJ30, och 32 liter vatten samt 1 kg Setcontrol II (recept vct 0,8 + 2 % SP).

Stoppkriterier, cement

1. Pumpa vid angivet tryck= 15 bar övertryck (ΔP) under angiven tid=30 min
2. Vid inpumpad volym på 400 l blandas en sats med vct 0,6 och pumpas vid 15 bar och 30 min.
3. Vid mer än 500 l avbryts injekteringen och designer kontaktas.

4 Utförande

4.1 Generellt

Baserad på handling och basdesign upprättades en arbetsbeskrivning, se bilaga 3, i samråd mellan beställare (TeliaSonera), forskare (Chalmers), projektör (Tyréns) och entreprenör (Besab). Vidare upprättades ett PM Design med framförallt blandningsinstruktioner såsom blandningsförhållande och kriterier, baserat på avsnitt 3.2.

Under arbetets gång följde en så kallade injekteringsingenjör arbetet. Injekteringsingenjörens uppgift var att förtydliga eventuella frågetecken i designen, följa och observera injekteringsförloppet, följa upp injekteringsresultaten samt att vara länken till forskaren om eventuella oväntade händelser inträffade och då besluta om eventuella åtgärder direkt på plats.

För att hantera praktiska frågeställningar kring försöken hölls regelbundna byggmöten mellan entreprenör, beställarens representant och injekteringsingenjör samt vid behov även designansvarig.

4.2 Etablering

- Förprovning:

Förprovning utfördes först på labb och därefter i fält med fältblandare. Förprovningen från fältblandaren uppnådde jämförbara resultat med labbprovning, se tabell 3-3, trots lägre temperaturer i tunneln än planerat. I figur 4-1 visas fältblandaren som användes.



Figur 4-1 Injekteringsblandare - Häny

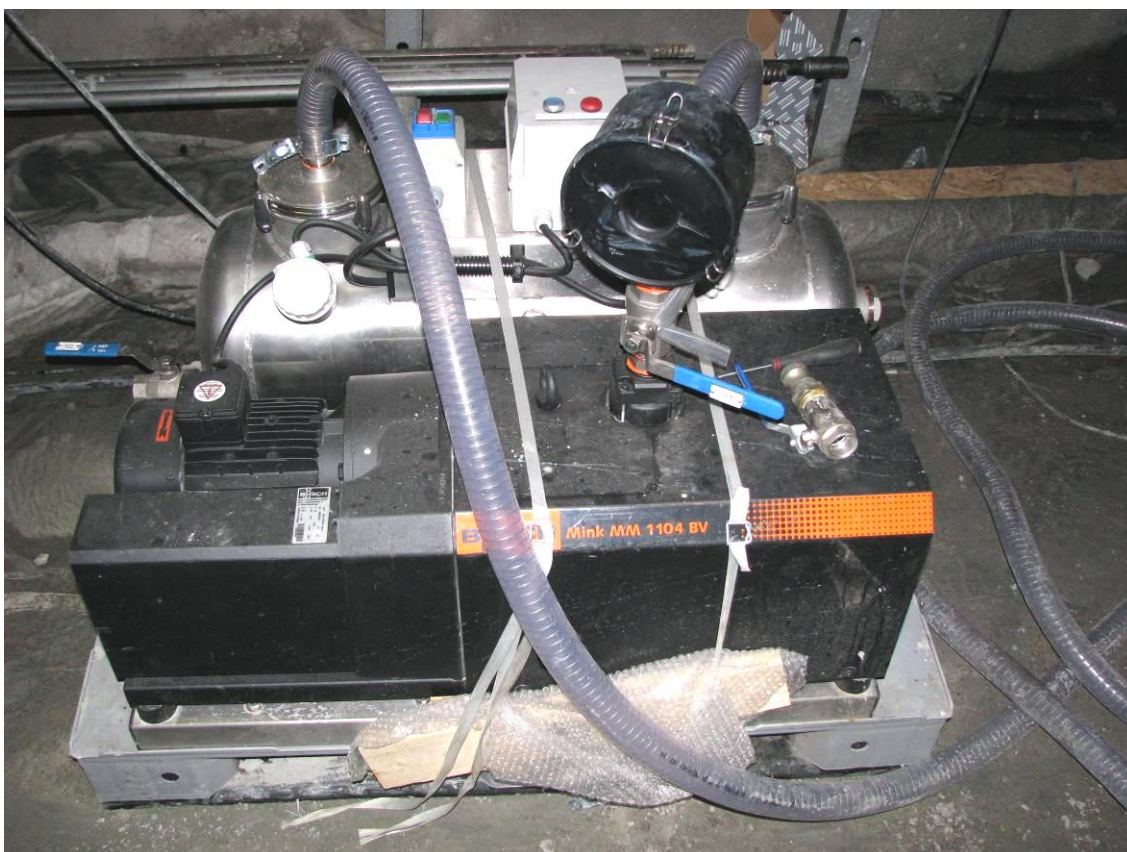
Figure 4-1 Grout mixer -Häny

- Erfarenheter från etablering av bla bormaskin

Det största problemet vid etableringen var att hitta ”rätt” borrhög som klarade både kravspecifikationen och det begränsade tunnelutrymmet. Den ursprungliga planerade borrhögen klarade inte kraven enligt kravspecifikationen och den efterföljande kom inte ner till aktuellt tunnelavsnitt, dvs fastnade på vägen ner trots kabelflytt och andra åtgärder. Slutligen hittades en borrhög som gick att transportera ner och som skulle uppfylla kraven. Detta och vissa småfel på den slutliga borrhögen innebar en del förseningar jämfört med tidplanen.

- Testning av vakuumpump och registreringsutrustning

Genomgång och testning av vakuumpump och registreringsutrustning genomfördes utan problem, se figur 4-2 av vakuumpumpen.



Figur 4-2 Vakuumpump.

Figure 4-2 Vacuum pump.

- Uppstartsmöte

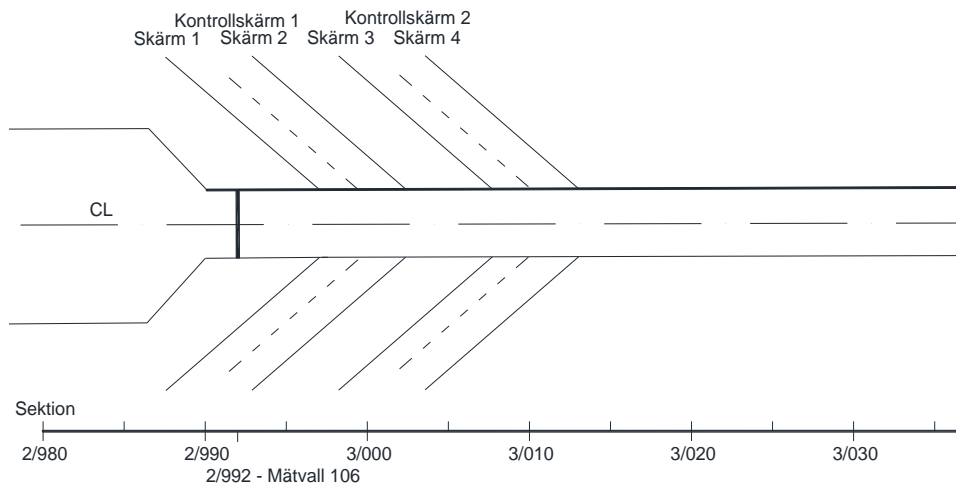
Inför starten av arbetsetapp 1 genomfördes ett uppstartsmöte med alla inblandade i utförandet, dvs designansvarig (Chalmers), projektör och injekteringsingenjör (Tyréns) samt utförare (Besab). Syftet med mötet var i huvudsak att gå igenom arbetsinstruktionen i detalj. Mindre kommentarer i instruktionen noterades och gällde i huvudsak otydligheter. Instruktionen förtydligades innan etapp 1 påbörjades.

4.3 Arbetsetapp 1, skärm 1 - 4

4.3.1 Utförande

Syftet med etapp 1 var dels att testa designen och den föreslagna arbetsgången, inkl utrustning, och dels att skapa en tätare zon runt tunneln som nästföljande etapp skulle tätades emot. Etapp 1 planerades till skärm 1 och 2, inklusive kontrollhål, men utökades under arbetet med skärm 3 och 4. Detta för att få fler injekterings-skärmar/hål samt kontrollhål i etappen.

Etapp 1 omfattade sektion 2/992 till 3/012, se figur 4-3, som enligt droppkartering var relativ torr. Detta innebar att det förväntade inläckaget, dvs mätvällsvärdena, inte skulle minska nämnvärt. Däremot förväntades att kontrollhålerna mellan injekteringskärmarna skulle visa att injekteringen i injekteringshålerna har trängt in i berget och tätat i närområdet.



Figur 4-3 Tunneln i plan med skärm 1-4 och kontrollskärm 1-2.

Figure 4-3 View of the tunnel with grouting fan 1-4 and control fan 1-2.

Den beskrivna arbetsgången, med hydrauliska tester, blandning, injektering och avslut, följdes utan större problem.

Det största praktiska utförandeproblemet var den långsamma borrhningen, vilket orsakade stora tidsförseningar. Detta var kopplat till en för svag bormaskin för en håldiameter på 63 mm, det begränsade arbetsutrymmet samt med avseende på arbetsmiljön.

Håldimensionen var vald till 63 mm för att få plats med manschett/packers där genomgående avluftningsslang och tätning skulle rymmas. Med det begränsade arbetsutrymmet kunde inte en tillräckligt kraftfull bormaskin få plats för att borra 63 mm hål inom en rimlig tid. Enligt tillverkaren skulle bormaskinen klara kravspecifikationen på 20 m i timmen men detta var under förutsättning att endast lufttryck användes vid borrhning. Ur arbetsmiljösynpunkt var detta ej acceptabelt varför borrhningen i stället till en början skedde med vattenspolning, som ger en långsammare borrhning.

Ytterligare faktor som påverka tiden var att injekteringshålerna i sulan borrades med foderrör, genom tunnelns asfalterade yta och dess uppbyggnad, som göts in ca 0,5 m i berget.

Efter 2 skärmar ändrades håldimensionen till 51 mm men med 63 mm hål de första 2 metrarna, för att få plats med manschett/packers från vakuumpumpen. Vidare inskaffades en separat dammsugare med stoftavskiljare som kunde förbättra arbetsmiljön, se figur 4-4 nedan. För att ytterligare påskynda borrhningen och bättre kunna ta tillvara borrhinformation till injekteringsutförande togs den externa borrarren bort och Besab infördes 2-skift.



Figur 4-4 Dammsugare med stoftavskiljare som kopplas till bormaskinen.

Figure 4-4 Vacuum cleaner with dust collectors that are connected to the drilling equipment

För skärm 2 kontrollerades samtliga injekteringshål avseende ansättningspunkterna och borrhvikelse. Enligt specifikationen var kraven:

- Längd på borrhål = 12,5 m
- Rakhet = 5 % per borrhåslängd
- Ansättningspunkt = inom en radie på 0,25 m

Resultaten av kontrollmätningen visade bla att ansättningspunkterna för ett antal av injekteringshålen kring kabelstegar och fjärrvärmerör avvek från teoretiska läget med

upp till ca 0,5 m. Denna avvikelse accepterades av praktiska skäl och att då samtliga borrhål ändå uppfyllde avvikelsekravet i hålbotten. Rakhet och borrhålslängd låg väl inom kraven.

Injekteringsordningen var mittenhålet i botten först och därefter zick-zack upp i skärmen (minst ett borrhål mellan två efterföljande injekteringar). Rutinen inför injekteringen följde enligt nedan:

1. Vakuumpump i hålet under ett antal minuter
2. Stängd ventil på manschett
3. Fylld injekteringsslang vid monteringen
4. Öppna ventil/starta pumpningen parallellt

Förfarandet fungerade utan problem. Se figur 4-5 nedan med pågående injektering och vakuumpumpning.



Figur 4-5 Fotot visar injektering i det nedre borrhålet medan vakuumpumpen tömmer det övre borrhålet.

Figure 4-5 Photo showing grouting in the lower borehole meanwhile the vacuum pump empties air and drill cutting in the upper hole.

Samtliga hål injekterades med silica sol eftersom inget hål överskred kriteriet; > 10 l/min och med ett övertryck på 3 bar. Samtliga batcher kontrollerades genom kopptest och generellt låg geltiden lite under 20 min och därmed även pumptiden eftersom injekteringen per batch avslutades när geltiden var uppnådd.

När en batch började ta slut förbereddes nästa i blandaren. När nästintill allt var åtgånget stoppades pumpningen och omröraren spolades ur. När detta var gjort tömdes vattnet ut och nästa batch hälldes i. Ett problem som uppstod var att geltiderna blev mycket längre och detta pga att det fanns vatten kvar i omröraren. Problemet löstes genom att omröraren fortsättningsvis spolades med silica istället för vatten och batchen tillfördes något högre mängd salt.

Vid hålsamband noterades vanligtvis först ett ökat vatteninflöde och därefter ett inflöde av injekteringsmedel, då manschettventilen i sambandshålet stängdes. Innan injekteringen påbörjades i sambandshålet rensades hålet (både mekaniskt och med vattenspolning) från injekteringsmedel och därefter påbörjades blandningen och injekteringen av hålet. Vid ytläckage och bibehållet injekteringstryck fortsatte injekteringen enligt plan. Vid större ytläckage, där injekteringstrycket sjönk och åtgången uppnådde ca 350 – 400 liter blandades en ”snabb/stopp” sats med halva gelningstiden.

Injekteringsresultat kontrollerades med kontrollhål. Kontrollhålen var antingen så kallade ”split-spacing” hål, som borrades i injekteringsskärmen och mellan/intill injekteringshål, eller hål i kontrollskärm, som borrades mellan två injekteringsskärmar. I kontrollhålen utfördes först hydrauliska tester och därefter injektering på motsvarande sätt som i injekteringshålen. Kriterierna för kontrollhålen bestämdes under arbetet och innebar att split-spacing hål skulle borraras vid injekteringshål med mätbara inflöden. Kontrollskärmen kunde reduceras till del av en injekteringsskärm, dvs ett begränsat antal hål, och skulle utföras mellan skärmar med vissa injekteringsmängder och vid partier (botten/vägg/tak) med eventuella samband.

Vidare skulle handskrivna injekteringsprotokoll alltid föras eftersom risken alltid finns att registreringen och/eller datakort på riggen krånglar/avbryts/försvinner.



Figur 4-6 Handskrivna protokoll vid sidan av injekteringsloggen.

Figure 4-6 Handwritten minutes at the side of grout log

I arbetsinstruktionen angavs bara ”pluggning av hål”. Under arbetet med pluggning uppkom flera frågor såsom:

- Injekteringsmedel, cement eller silica sol, samt vilken geltid för silica solen?
- Manschettläge?
- Injekteringstryck?
- Pluggning i etapper?

I designen, se avsnitt 3.1.3, anges åtgärder för läckande borrhål. Dessa åtgärder genomfördes i princip, dvs ytinjektering inleddes med att justera manschettläget från ca 1,5 m in i hålet till ca 0,7 m. Därefter injekterades hålsektionen med en silica sol blandning med en geltid på 10 – 12 min med fullt tryck på 15 bar i 7 – 10 min. Efter detta noterades hål som fortfarande läckte och rapporterades till injekteringsingenjör.

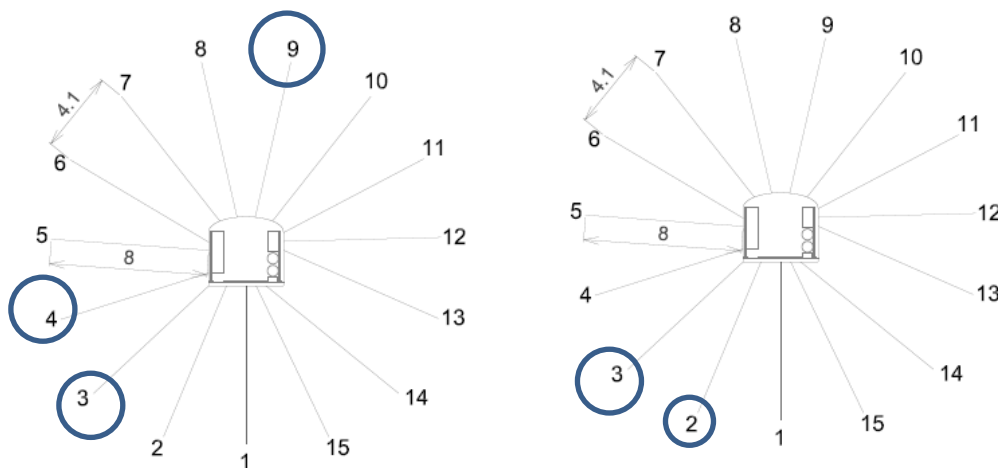
När etapp 1 var genomfört gjordes en uppföljning och utvärdering. Under uppföljningen var tätningsarbetet stoppat, endast mindre arbeten som iordningsställande,

utrustningsarbeten samt förberedelsearbeten utfördes. Uppföljningen presenterades inom projektgruppen innan beslut om etapp 2 togs.

4.3.2 Delresultat

Hydrauliska tester

I skärm 1 och 2 erhöles mätbara inflöden i 3 respektive 2 hål, se figur 4-7, och 5 respektive 2 hål med vattenförluster ($> 0,005$ l/min, hål). I skärm 3 och 4 erhöles inga mätbara inflöden men 1 respektive 5 hål med vattenförluster. Inflödena i hålen varierade mellan 0,005 till 0,68 l/min, hål och vattenförlustmätningarna mellan 0,05 till 3,4 l/min, hål.

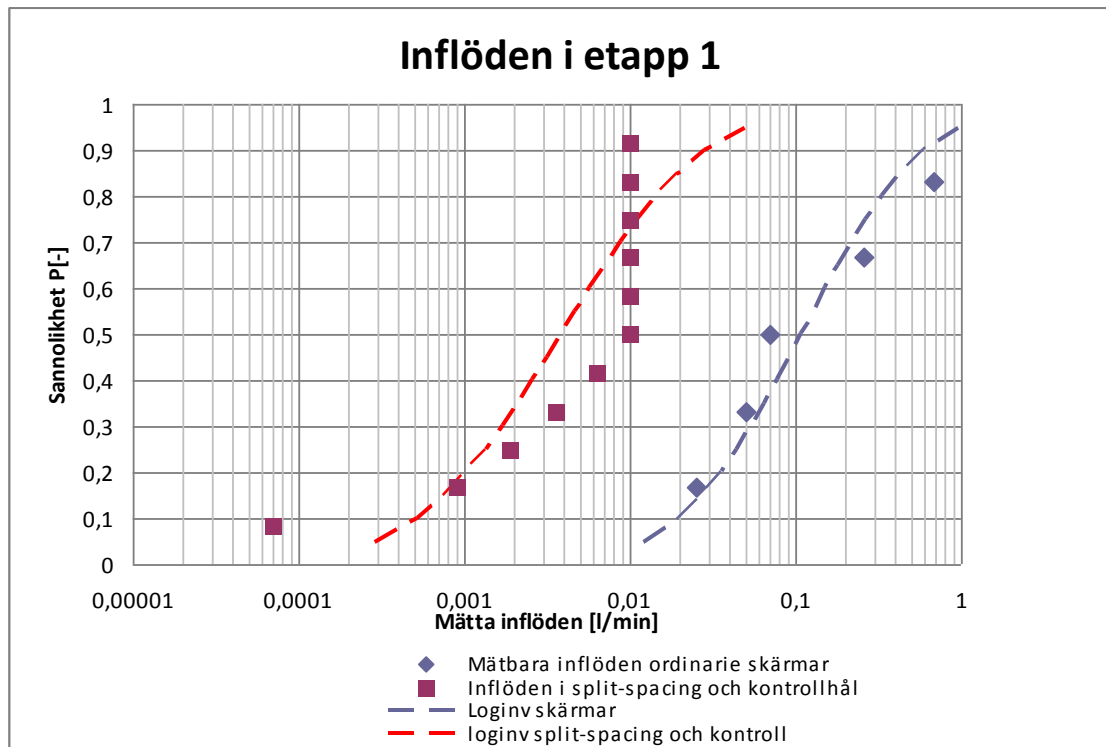


Figur 4-7 Hål med mätbara inflöden i skärm 1 respektive 2, inga mätbara inflöden i skärm 3 och 4 erhöles.

Figure 4-7 Boreholes with measureable inflows in fan 1 and 2, no measurable inflows could be obtained in fan 3 and 4.

6 st split-spacing hål i skärm 1 och 2, med tre hål i vardera skärm, och två reducerade kontrollskärmar (K1 respektive K2) borrades mellan skärm 1 och 2 respektive skärm 3 och 4, med fem hål i vardera skärm, som kontrollhål. Hålen i båda kontrollskärmarna var placerade i väggen på "kabelsidan", dvs vänster sida i figur 4-7. På denna sida fanns i huvudsak hål med vattenförluster och större åtgång injekteringsmedel samt flera exempel på hålsamband.

I figur 4-8 jämförs de mätbara inflödena med inflödesmätningarna i kontrollhålen.



Figur 4-8 Inflöden och anpassade log-normalkurvor från etapp 1

Figure 4-8 Measured inflows from stage 1

Enligt figur 4-8 erhöles en tätningsfaktor på ca 25, baserat på den 50-procentiga sannolikheten för ordinarieskärmar och split-spacing/kontrollhål enligt figur 4-2.

Volymåtgång och injekteringsflöden

I hela etapp 1 injekterades 1444 liter silica sol, exklusive hålfyllnad. Fördelningen mellan skärmarna redovisas i tabell 4-1 nedan.

Tabell 4-1 Sammanställning av injekterade mängder silica sol i etapp 1.

Table 4-1 Summary of the grouted volumes, with silica sol in stage 1

Injekteringshål Skärm 1	Injekteringshål Skärm 2	Injekteringshål Skärm 3	Injekteringshål Skärm 4	Splitspacing	K1	K2
543	360	105	224	139	54	19

*Samtliga mängder i liter och exklusive hålfyllnad

Störst åtgång, ca 320 liter exklusive hålfyllnad, erhöles i injekteringshål nr 3 i skärm 1. En stor andel av injekteringshålen, ca 30 %, hade en åtgång motsvarande ca en halvolymp eller mindre. Motsvarande andel hål med en åtgång på halvolymp till ca dubbla halvolympen var 55 %.

Totalt 8 injekteringshål (ca 15 %) erhöll dubbla hålvolymer eller mer. Medianåtgången med silica sol i dessa hål var 85 liter, men där ett hål hade en betydligt större åtgång (320 liter). Noterbart är att 3 av dessa 8 hål var så kallade ”nollhål”, dvs inga mätbara inflöden eller vattenförluster, innan injektering.

De injekteringshål med stor åtgång var placerade på kabel/vänstra sidan av tunneln, förutom ett som var placerad i taket, och där även huvudsaken av split-spacing hålen och de båda reducerade kontrollskärmarna var placerade. Detta innebär att större delen av de totala injekteringsåtgången i etapp 1 injekterades på en sida, dvs kabel/vänstra sidan.

Mätvallsresultat

Efter det att etapp 1 hade slutförts, dvs månadsskiftet mars-april 2010, låg inflödet över sektionen (mätvall 105_106) på ca 3,3 l/min, 100 m. Detta kan jämföras med mätningarna i mitten av jan 2010, dvs innan etableringen och etapp 1 påbörjade, då mätningarna låg på ca 3,8 l/min, 100 m.

4.3.3 Vunna erfarenheter inför etapp 2

Inför etapp 2 presenterades bl.a. följande erfarenhetspunkter för projektgruppen:

- ”- Injekteringen i etapp 1 ger effekt! Fortsätt med etapp 2 på samma sätt som etapp 1
- Fortsätt borra 2 m med 63 mm borrhål och därefter 9 m med 51 mm och ökad borrhastighet (fler skärmar borrar innan injektering)”

Vidare diskuterades noggrannheten i inflödesmätningarna och vattenförlustmätningarna. För att få en bättre utvärdering av resultaten behöver droppen från de borrhålen och läckande borrhål mätas.

Arbetsinstruktionen för ytinjekteringen/pluggningen behövde förbättras. Följande steg föreslogs och accepterades inför etapp 2:

- Notera inflöde i injekterade borrhål
- Notera vilka som ”pluggats”
- Vänta 4 dagar och åter notera flödande borrhål
- Åtgärda flödande borrhål enligt följande:
 - Rensa ut minst 3 m av borrhålet
 - Sätt manschett ytligt, minst 50 cm innanför bergsvägg
 - Tryck med 15 minuters sats
 - Låt vänta minst 6 timmar
 - Ta ut manschett, notera (och uppskatta) kvarvarande flöde

Vid stor åtgång silica sol, dvs > 400 liter, skulle enligt injekteringskriterierna geltiden kortas ner till ca hälften jämfört med inledande geltider. Under utförandet, och i andra pågående projekt med silica sol, uppstod en osäkerhet avseende korta geltider för silica solen. Vid korta geltider med en annan variant av silica sol indikerade uppföljningar att strukturen inte skulle bli stabil. Därför beslutades att korta geltider inte skulle användas i etapp 2. När 400 liter uppnås avslutas injekteringen i hålet.

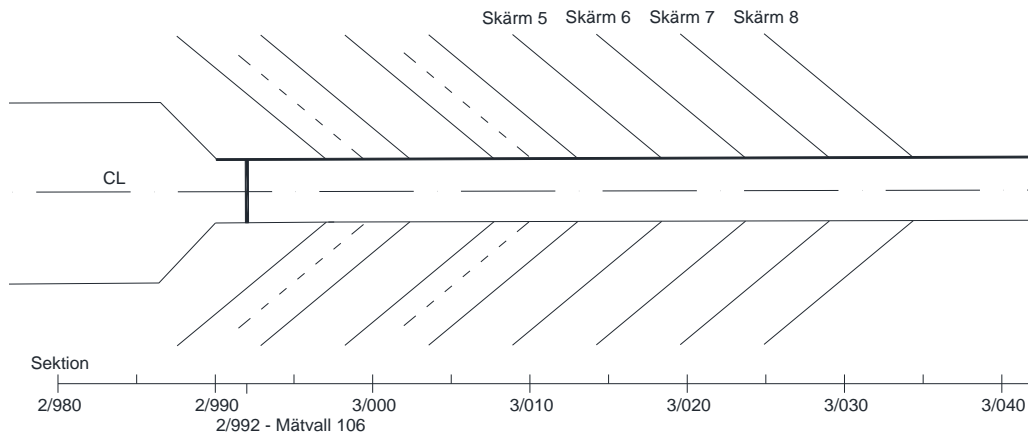
De flesta injekteringshålerna var täta vid de hydrauliska testerna och även åtgången motsvarade en hålfyllnadsvolym eller mindre, dock inte alla. För att snabba upp injekteringsprocessen beslutades att täta hål och hål där ett nollflöde erhöles efter hålfyllnadsvolymen, skulle injekteringen avslutas efter ca halva pumptiden, dvs efter 12 min.

4.4 Arbetsetapp 2, skärm 5 - 8

4.4.1 Utförande

Syftet med etapp 2 var att minska inläckaget i tunneln så att projektmålet 1 l/min, 100 m skulle kunna uppnås. Eftersom utvärderingen från etapp 1 bekräftade att den beskrivna designen uppnådde tätning mellan injekteringshålerna skulle etapp 2 göras med samma design, enligt avsnitt 3, samt med de praktiska utförandeaspekterna som observerades under etapp 1.

Etapp 2 utfördes mellan sektion ca 3/012 och 3/038, dvs skärm 5 till 8, se figur 4-9. Ursprungligen skulle 7 st skärmar ingå i etappen men eftersom tunnelläckaget, baserat på droppkarteringen, drastiskt minskade efter skärm 8 och löpande mätningar från mätvall och kontrollhål verifierade att designen och utförandet lyckades ändrades angreppssättet avseende beslut om injektering. Därmed avgränsades etappen till skärm 5 tom 8.



Figur 4-9 Tunneln i plan med skärm 5-8

Figure 4-9 View of the tunnel with grouting fans 5-8.

Den aktuella sektionen hade ett markant ytläckage, se droppkartering, och därmed förväntades det att injekteringen skulle uppnå en viss minskning av tunnelinläckaget, mätt i mätvall 105_106.

Etapp 2 genomfördes på samma sätt som etapp 1, förutom de förändringar som beskrivs i ”vunna erfarenheter inför etapp 2”. För att öka upp arbetstakten beslutades att flera än två injekteringsskärmar kunde borras utan att avstanna borrhningen och invänta injekteringen i dessa skärmar, såsom beskrivs i arbetsbeskrivning.

Vid ytinjekteringen gjordes nu den föreslagna förändringen att läckande hål skulle rensas ur ca 3 m in och manschetteras på ca 0,5 m djup. Hålen "injekterades" med ett tryck på 15 bar i 7-10 min. Hål som efter detta fortfarande läckte manschetterades slutligen med en engångsmanschett så ytligt som möjligt. Därefter pluggades hålen med ett sk. pluggbruk, dvs en cementblandning med vct ca 0,5.

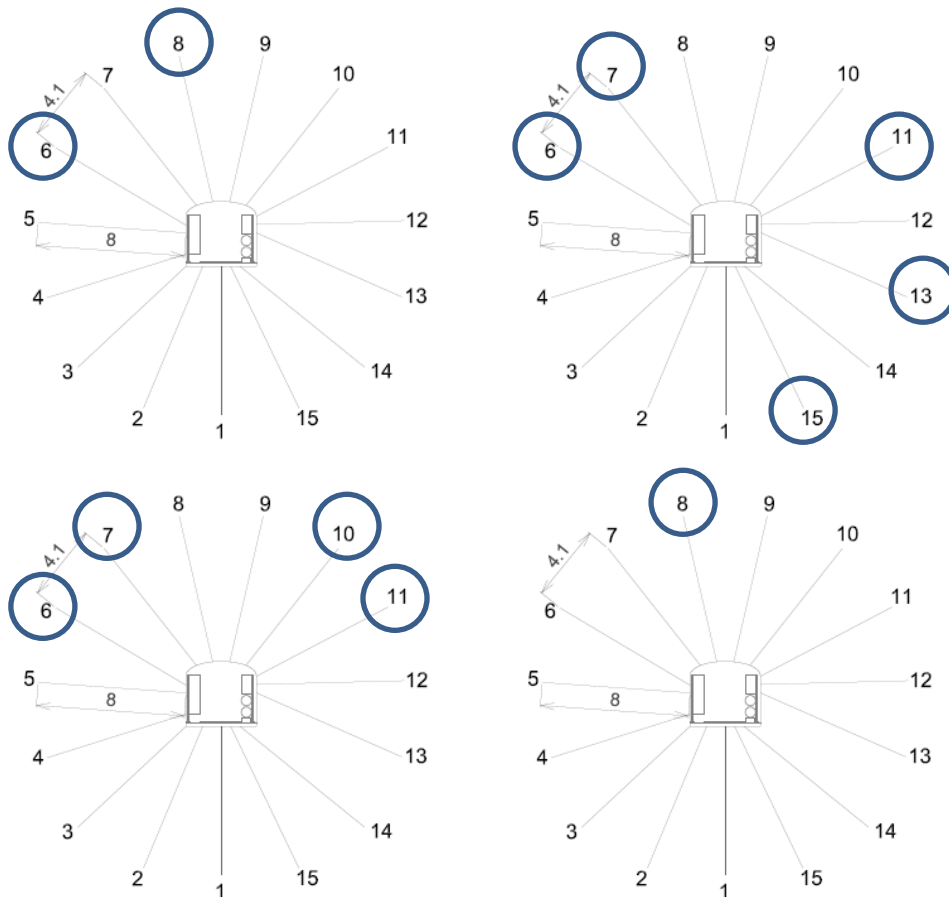
Utöver detta uppstod det inga nya problem eller förändringar under etapp 2, jämfört med dem som observerades och åtgärdades under och efter etapp 1.

När skärm 5 till 8 var genomförd gjordes en uppföljning av delresultaten. Under denna uppföljning var inte tätningsarbetet stoppade, borrhning av skärm 9 pågick, eftersom planen var att etappen skulle fortgå. Uppföljningen presenterades inom projektgruppen och baserad på denna uppföljning beslutades att etapp 2 skulle avslutas och etapp 3 skulle påbörjas.

4.4.2 Delresultat

Hydrauliska tester

Totalt erhöles 12 injekteringshål med mätbara inflöden, se figur 4-10. Inflödena i hålen varierade mellan 0,07 till 3,0 l/min, hål. Lika många hål med vattenförluster noterades, men delvis från andra hål än inflödesmätningarna, bla erhöles ingen vattenförlust i något hål i skärm 7.

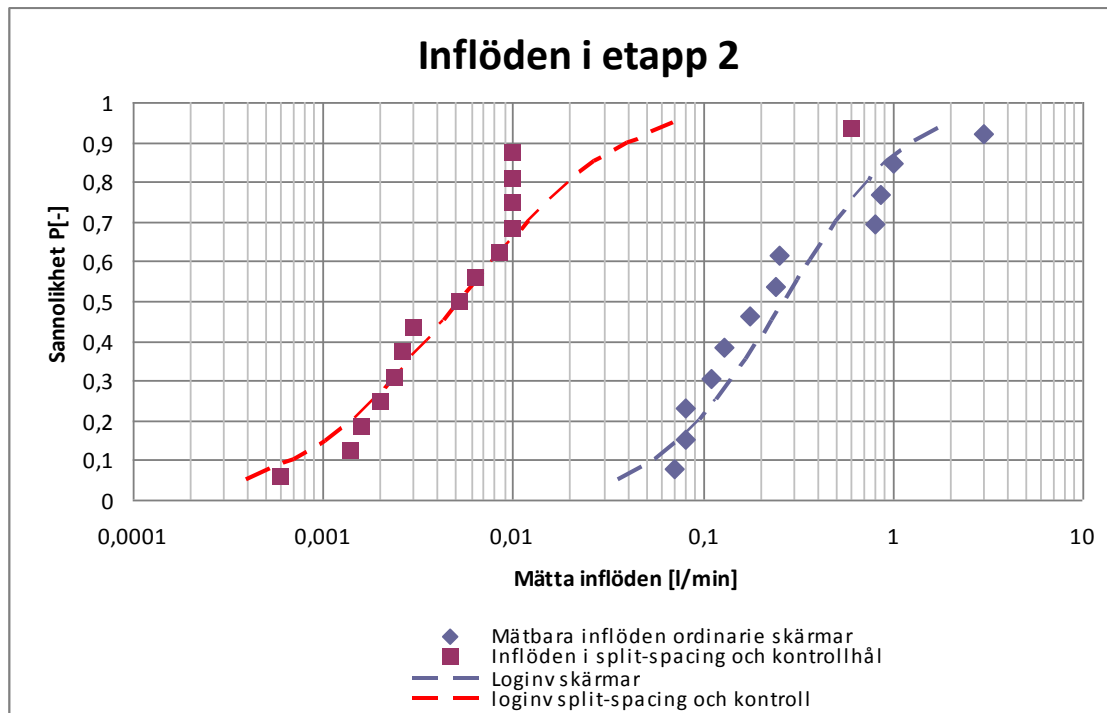


Figur 4-10 Hål med mätbara inflöden i etapp 2

Figure 4-10 Boreholes with measureable inflow in stage 2

6 st split-spacing hål i skärm 5, 6 och 8, med två hål i vardera skärm, och två reducerade kontrollskärmar (K3 respektive K4) borrades mellan skärm 5 och 6 respektive skärm 7 och 8, med fyra hål i vardera skärm, som kontrollhål. Hålen i båda kontrollskärmarna var placerade i väggen på "kabelsidan", dvs vänster sida i figur 4-10. På denna sida fanns i huvudsak hål med vattenförluster och större åtgång injekteringsmedel samt flera exempel på hålsamband.

I figur 4-11 jämförs de mätbara inflödena med inflödesmätningarna i kontrollhålen.



Figur 4-11 Inflöden och anpassade log-normalkurvor från etapp 2

Figure 4-11 Measured inflows from stage 2

Enligt figur 4-11 erhöles en tätningsfaktor på ca 60, baserat på den 50-procentiga sannolikheten för ordinarie skärmar och split-spacing/kontrollhål.

Volymåtgång och injekteringsflöden

I hela etapp 2 injekterades 1562 liter silica sol, exklusive hålfyllnad. Fördelningen mellan skärmarna redovisas i tabellen nedan.

Tabell 4-2 Sammanställning av injekterade mängder silica sol i etapp 2.

Table 4-2 Summary of the grouted volumes, with silica sol in stage 2

Injekteringshål, Skärm 5	Injekteringshål, Skärm 6	Injekteringshål, Skärm 7	Injekteringshål, Skärm 8	Split- spacing	K3, K4
600	488	129	199	146	**

* Samtliga mängder i liter och exklusive hålfyllnad

** Åtgången injekteringsmedel i samtliga kontrollhål, dvs 4 st/skärm, motsvarade ca hålfyllnadsvolymer

Störst åtgång, ca 365 liter exklusive hålfyllnad, erhöles i injekteringshål nr 15 i skärm 6. En stor andel av injekteringshålen, dvs ca 55 %, hade en åtgång motsvarande en

hålvolum eller mindre. Motsvarande andel hål med en åtgång på hålvolymer till ca dubbla hålvolymer var 25 %.

Totalt 10 injekteringshål (ca 20 %) erhöll en stor injekteringsvolym, dvs dubbla hålvolymer eller mer. Medianåtgången med silica sol i dessa hål var 70 liter, men där 3 enstaka hål hade ett betydligt större åtgång (230 till 360 liter). Noterbart är att 7 av dessa 10 hål var så kallade ”nollhål” vid vattenförlustmätningen.

I etapp 2 var dessa injekteringshål med stor åtgång placerade mer spritt i injekterings-skärmen jämfört med etapp 1. Men de allra största åtgångarna var fortfarande placerade på kabel/vänstra sidan av tunneln.

Mätvallsresultat

Efter det att etapp 2 hade slutförts, dvs mitten av juni 2010, låg inflödet över sektionen (mätvall 105_106) på ca 1,3 l/min, 100 m. Detta kan jämföras med mätningarna i mitten av jan 2010 då de låg på ca 3,8 l/min, 100 m och i månadsskiftet mars-april 2010 då mätningarna låg på ca 3,3 l/min, 100 m.

4.4.3 Vunna erfarenheter inför etapp 3

Utförd injektering i etapp 2 visade på att injekteringen gav effekt med avseende på kontrollhål och mätvallsresultat. Både etapp 1 och 2 visar att många injekteringshål är täta, därför finns ett önskemål i etapp 3 att effektivisera antalet injekteringshål.

Att göra en cementplugg i borrhålen för att klara problemet med läckande borrhål tycktes vara effektivt och beslut togs att samtliga läckande borrhål skulle tätas på detta sätt, även de i etapp 1.

4.5 Arbetsetapp 3, skärm 9 - 12

4.5.1 Utförande

Resultaten från etapp 1 och 2 visade att designen och utförandet hade gett ett bra tätningsresultat. Vidare fanns för etapp 3, dvs från sektion ca 3/038 och ökande längdmätning, ett litet inläckage, enligt droppkartering, och erfarenheterna från etapp 1 och 2 var att många borrarade injekteringshål var täta. Därför beslutade projektet att syftet med etapp 3 var att testa en metod för att effektivisera antalet injekterings-skärmar och injekteringshål.

En metodik användes för beslut om injektering skulle ske eller ej. Metodiken baseras på vattenförlustmätningar i sonderingshål, dvs ett antal begränsade injekteringshål som borrar upp och vattenförlustmäts. Genom ett statistiskt angreppssätt fås ett beslut om injektering behövs eller ej. Det statistiska angreppssättet, inkl metodiken och sambandet, finns allmänt beskriven i Gustafson et al (2010). Med användandet av

angreppssättet erhöjls att fyra sonderingshål per skärm skulle borraras och vattenförlustmätas (se Bilaga 4). Om ett hål översteg en vattenförlust på 0,16 l/min skulle hela skärmen borraras upp och injekteras.

Detta innebar en viss förändring i arbetsbeskrivningen. Istället för borrarng av samtliga hål i en injekteringsskärm borrhades endast de 4 st så kallade sonderingshål först. I sonderingshålen gjordes vattenförlustmätningar, som utgör grund för beslut på plats om injektering eller ej. Vid beslut om injektering skulle samma utförande som i etapp 2 göras.

Injekteringsskärm 9 hade redan påbörjats när beslut om förändring av arbetsbeskrivningen beslutades och blev därför borrhad fullt ut, dvs med 15 st sonderingshål. Därefter utfördes vattenförlustmätning i samtliga 15 borrhade hål och kriteriet på 0,16 l/min per hål gällde som beslut och injektering eller ej. Injekteringsskärm 10 till 12 borrhades enligt plan, dvs med 4 st så kallade sonderingshål.

4.5.2 Delresultat

Samtliga sonderingshål visade på vattenförluster lägre än det satta kriteriet. Efter vattenförlustmätning injekterades samtliga hål med silica sol. Eftersom ingen åtgång noterades under den inledande injekteringen avslutades injekteringen efter halva ursprungliga pumptiden, se avsnitt 4.3.3. Därefter sattes ytliga engångsmanschetter och hålen pluggades med hålfyllnadsbruket. Detta innebär att inga mätbara vattenförluster och volymåtgångar injekteringsmedel finns att redovisa för etapp 3.

Mätvallsmätningarna pågick kontinuerligt under etappen och redovisas nedan.

Mätvallsresultat

Efter det att etapp 3 hade slutförts, dvs i början av juli 2010, låg inflödet (mätvall 105_106) på ca 1,3 l/min, 100 m. Vilket är samma som efter etapp 2, dvs sonderingshålen hade varken minskat eller ökat inläckaget.

4.5.3 Vunna erfarenheter av etapp 3

Frågan är om några ”vunna erfarenheter” har erhållits i etapp 3 då ingen injektering utfördes utan bara borrarng och vattenförlustmätningar i sonderingshål. Vidare noterades inga skillnader i mätvallsvärdena under och efter etapp 3.

Om tunnelavsnittet var ”tätt” var metodiken effektiv eftersom etapp 3 slutfördes på en kort tid jämfört med etapp 1 och 2. Dock har visst dropp noterats vid droppkartering både före och efter utförandet av etapp 3.

4.6 Avslutning

Hålläckage

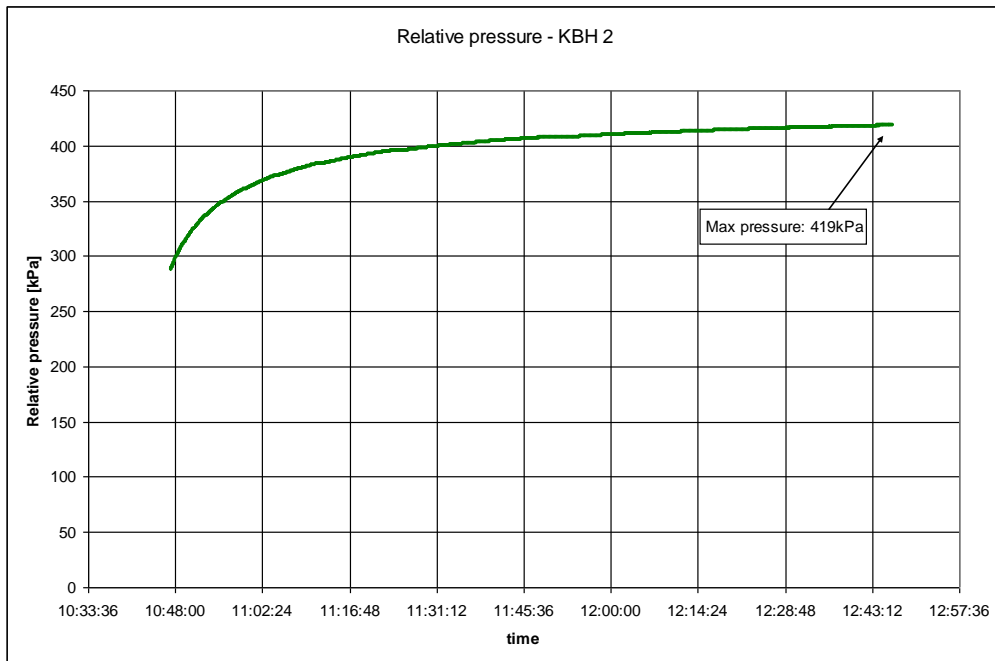
Ett problem som tidigt i projektet påpekades var att många borrhål fortsatte att läcka efter injekteringen. Trots två eller tre omgångar ytinjektering och pluggning har fukt och mindre dropp noterats i ett flertal injekteringshål.

Ett injekteringshål, dvs nedåtlutande hål 13 i skärm 6, har observerats med ett läckage på ca 0,23 l/min. Läckaget kom igenom engångsmanschetten och från cementpluggen bakom manschett. Det kan noteras att hålet har kommenterats i injekteringsprotokollet som ett ”problemhål”, dvs med samband till närliggande injekteringshål samt ytläckage

I detta hål har engångsmanschetten monterats bort och en flergångsmanschett har satts på plats istället. Efter montering av flergångsmanschett, i okt -10, slutade läckaget och endast fukt kring hålet har observerats.

Kärnborrhål

Som avslutning ingick även att avsluta kärnborrhålen. Först gjordes ett tryckuppbyggnadstest i kärnborrhål KBH2 för att jämföra trycket i hålet före och efter all injektering. Inget test gjordes i KBH1 eftersom hålet i princip var tätt. Före injekteringen i tunnelavsnittet var trycket i KBH2 var ca 3,5 bar och inflödet ca 2,5 m²/s, dvs ca $1,4 \cdot 10^{-7}$ m²/s. Nedan redovisas det tryckuppbyggnadstest som utfördes, som helhålstest, efter injektering.



Figur 4-12 Tryckuppbyggnadstest av kärnbrorrhål KBH2, efter injektering av tunnelavsnittet.

Figure 4-12 Pressure building test on drill core holes KBH2, after grouting has been done.

Det högsta trycket som uppmättes, innan testet avbröts, var 419 kPa (4,2 bar). Vilket kan jämföras med trycket 3,5 bar som uppmättes före injekteringsinsatserna, dvs trycket i kärnbrorrhålet har stigit efter injekteringen. Detta är en indikation på att zonen närmast tunneln har blivit tätare och trycket utanför den tätade zonen stigit.

Därefter injekterades kärnbrorrhålen med föreslagen injekteringsdesign för cement, se avsnitt 3.2.3. Totalt erhöles en injekteringsvolym på 186 liter, exkl hålvolym, i KBH2 och endast hålfyllnadsvolym i KBH1.

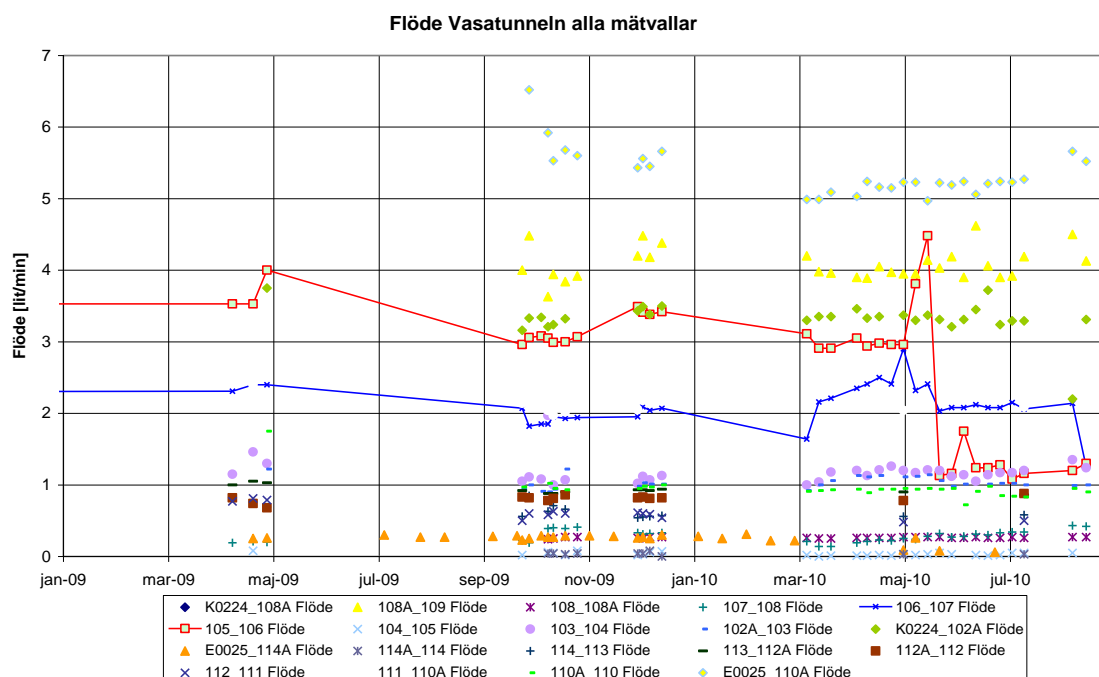
5 Utvärdering och analys

Utvärderingen och analys av resultaten från projektet har gjorts med avseende på:

- Mätvallsresultat, före, under och efter injektering, se avsnitt 5.1
- Droppkartering, för och efter injektering, se avsnitt 5.2
- Hydrauliska tester, jämförelse mellan de hydrauliska metoderna (inflöde och vattenförlust), resultat mellan hydrauliska tester och injekteringsåtgång och slutligen tätningseffekten genom jämförelse mellan inflöden i kontrollhål och närliggande injekteringshål, se avsnitt 5.3
- Uppföljning av riskanalysen, se 5.4
- Förändringar i arbetsutförandet, se avsnitt 5.5

5.1 Mätvallsresultat

I figur 5-1 redovisas resultat från mätvallsmätningarna från jan -09, dvs strax innan arbetena påbörjades, till aug -09, dvs efter etapp 3 och avetablering.



Figur 5-1 Mätningar i närliggande mätvallar före, under och efter injektering. Mätvall 105_106 motsvara aktuellt tunnelavsnitt och 106_107 är tunnelavsnitt som närmast angränsar injekteringsområdet.

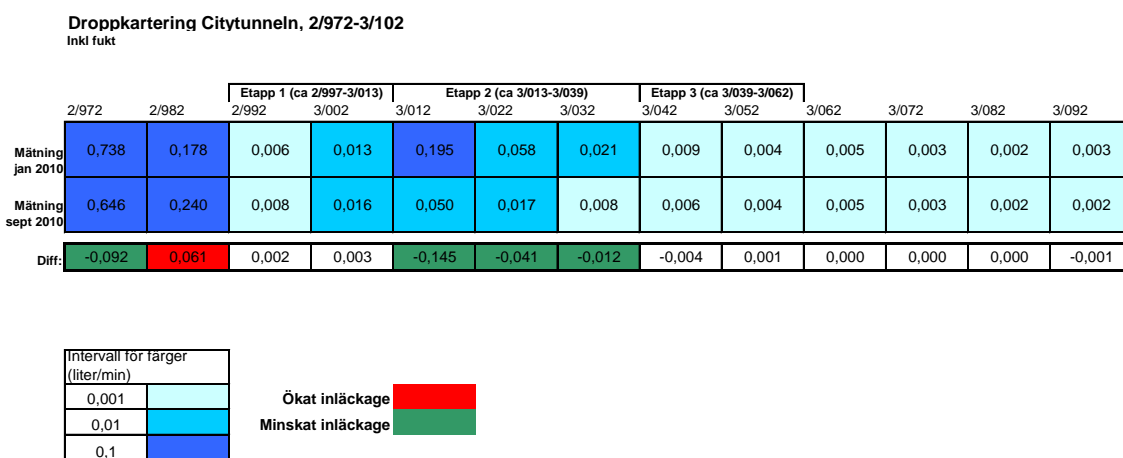
Figure 5-1 Result from the weirs in the tunnel. The results are from before, during and after grouting. Weir 105_106 correspond to the current tunnel section and 106_107 is the section above the current tunnel section.

För etapp 1, som genomfördes feb - mars, kan noteras en mindre sänkning av flödet vid aktuellt tunnelavsnitt (105_106). Medan en ökning av flödet erhöles i det direkt intilliggande tunnelavsnittet (106_107).

Det ökande flödet för mätvall 105_106 i början av maj skedde under borringen av etapp 2, därefter, i mitten – slutet av maj, inträffade en markant minskning av flödet som sammanfaller med injekteringen av etapp 2. Under och efter etapp 3 skedde inga förändringar av flödet.

5.2 Droppkartering, efter injektering

I figur 5-2 redovisas droppkartering före och efter injekteringsutförandet för projektet.



Figur 5-2 Droppkartering före och efter injektering (januari respektive september). Mätningarna är sammanställda i 10 m sektioner för väggar och tak. Röda fält visar på ökade flöden medan gröna visar på minskade flöden. Obs: mellan sektion 3/022 och 3/032, mätning september 2010, är ett hålläckage på ca 0,23 l/min exkluderat.

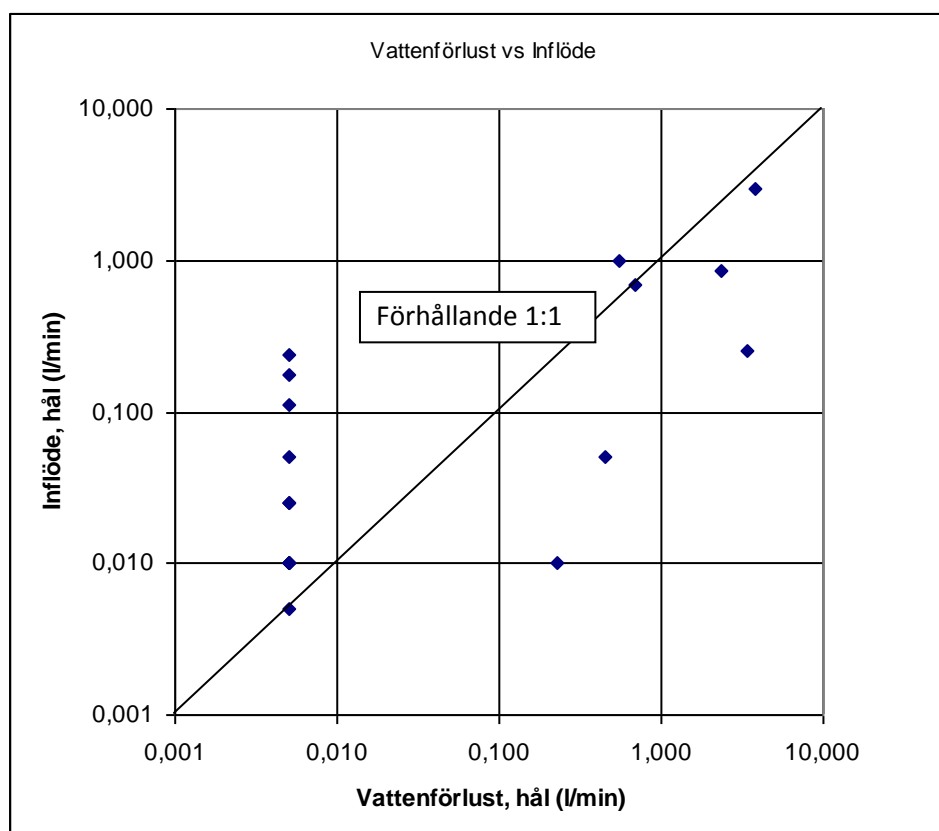
Figure 5-2 Drip mapping, before and after post- grouting (January and September). The measurements are divided into 10 m sections. Red bar shows the increased flows while green indicates reduced flows. Note: the section 3/022 and 3/032, measuring September 2010, excludes the hole leakage of about 0.23 lit/min.

I sektionen där injekteringen har utförts har droppflödet minskat, framför allt i etapp 2.

Det kan noteras att en sektion, se röd markering i figur 5-2, uppvisar ett högre droppflöde efter injekteringsinsatserna än före. Det ligger precis utanför/framför etapp 1, dvs inte i aktuellt tunnelavsnitt, och tyder på att en del av vattnet i bergmassan har flyttat på sig.

5.3 Hydrauliska tester

Två olika typer av hydrauliska tester har gjorts i samtliga borrhål, dels inflödesmätningar och dels vattenförlustmätningar. I figur 5-3 är de olika testerna i samma borrhål jämförda med varandra.

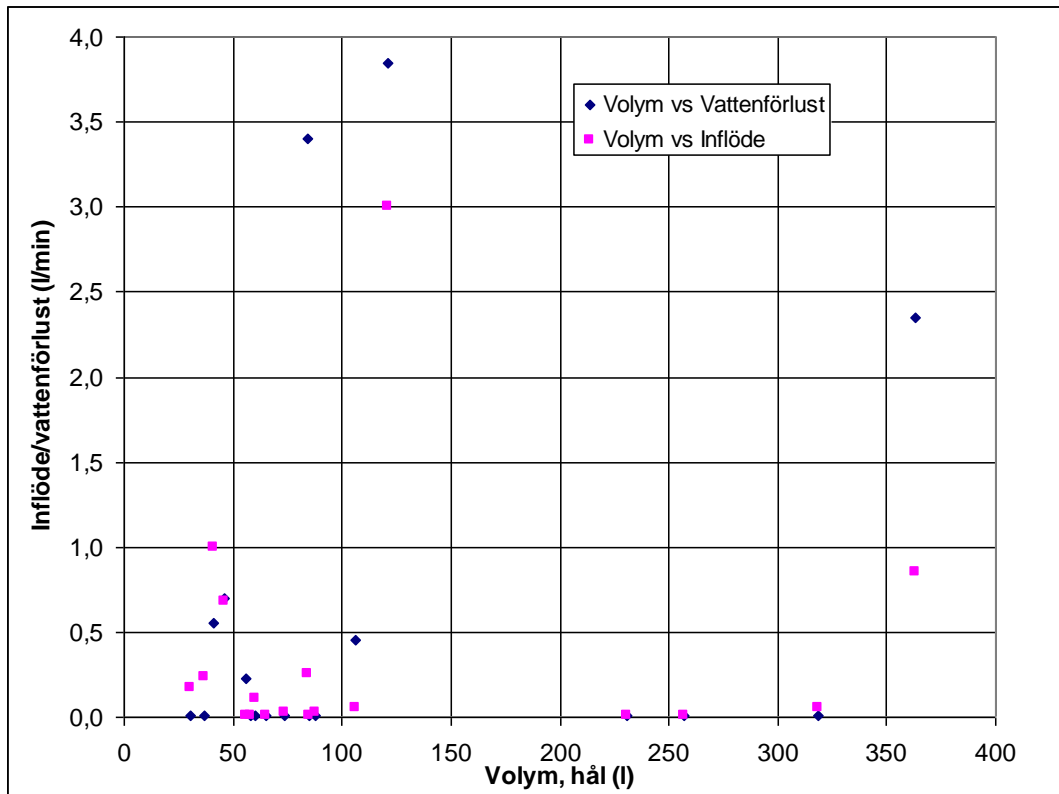


Figur 5-3 Jämförelser, sk Cross-plot, mellan inflödestester och vattenförlustmätningar i samma injekteringshål.

Figure 5-3 Cross-plot for the inflow tests and water loss measurements in the grouting holes.

Enligt figur 5-3 ovan finns dels en grupp med hål där mätbara inflöden har erhållits men dessa är "täta" vid vattenförlustmätningen (definition på tät vid hydrauliska tester $\leq 0,005$ l/min) och dels en grupp med svagt samband mellan de hydrauliska testerna. Dock är antalet mätningar för få för att kunna urskilja samband eller ej.

Vidare har en jämförelse gjorts mellan de hydrauliska testerna och åtgången injekteringsmedel gjorts i figur 5-4.



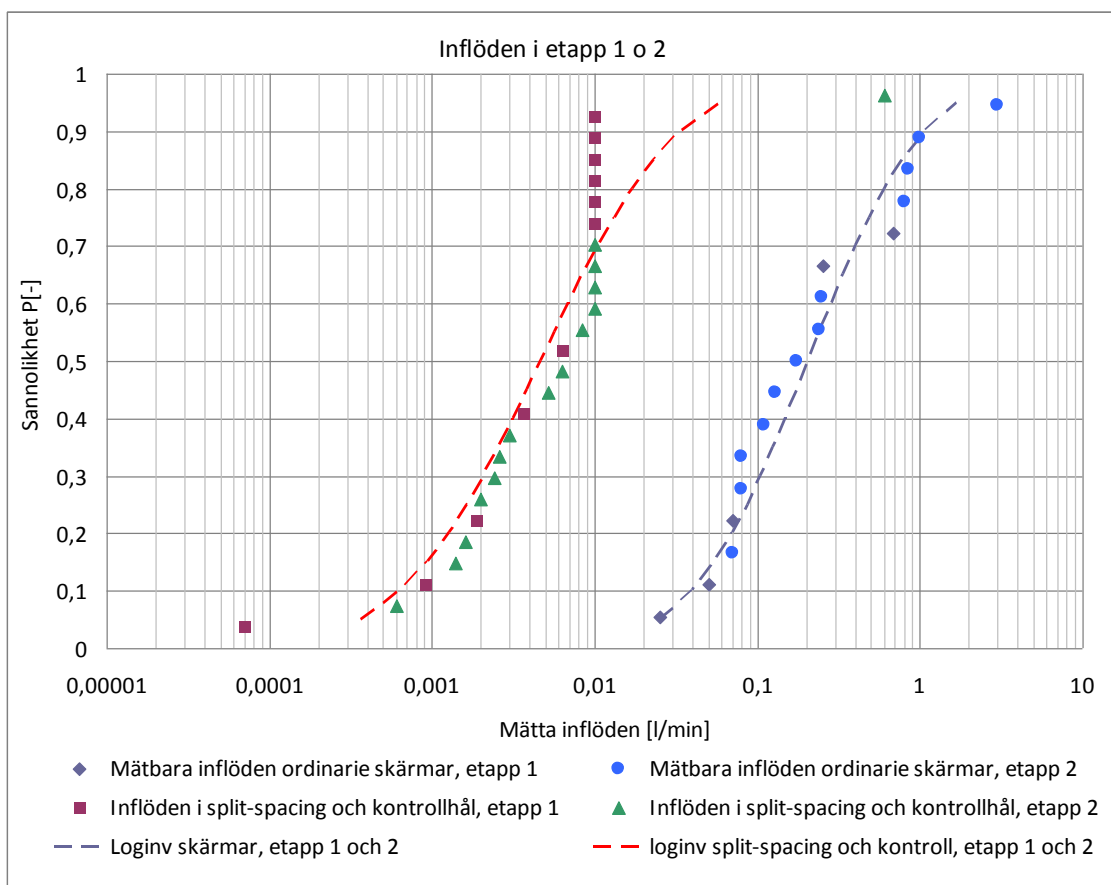
Figur 5-4 Jämförelse mellan resultat från hydrauliska test (vattenförlust eller inflöde) och injekteringsvolym i hål med ”stor åtgång”.

Figure 5-4 Comparison of results between hydraulic tests (water loss measurement and inflow measurement) and grout volume in with “large consumption”.

Enligt figur 5-4 ovan saknas ett samband mellan resultaten från de hydrauliska testerna och volymen silica sol i samma hål. I figuren ovan finns många så kallade ”nollhål” med stor åtgång silica sol. Att beakta är att vattenförlusten gjordes vid enbart 3 bars övertryck samt under en kort tidsperiod, 2 min. Vidare att nollhål kan utskiljas vid vattenförlust är avhängigt noggrannheten på utrustningen och i detta projekt är antagen till ca 0,5 l/min. Slutligen att nollhål vid inflödesmätningar mycket väl kan få samband och ytläckage vid injekteringen med stor åtgång som följd.

Figuren visar också på att det är ännu svårare att prognostisera volymsåtgången, baserat på hydrauliska tester, i en efterinjektering än vid en förinjektering.

I figur 5-5 redovisas samtliga, dvs etapp 1 och 2, mätbara inflödena i kontrollhål och närliggande injekteringshål.



Figur 5-5 Samtliga inflödesmätningar, dvs hopslaget från etapp 1 och 2.

Figure 5-5 All inflow measurements from stages 1 and 2

En sammanslagen täthetsfaktor för etapp 1 och 2, dvs inflöde före injektering genom inflöde efter injektering, på ca 45 kan noteras.

5.4 Uppföljning av riskanalysen

Bland de identifierade riskerna som värderades högt kunde följande bekräftas eller avfärdas under arbetets gång:

- ”långa arbetspass” – ja, kopplat till enstaka utförandemissar vid borrning
- ”osäkert antal personer i tunneln” – eventuellt ja men inget som påverkat något
- ”utrustning/material klarar inte de tekniska/fysiska kraven/specifikationerna alt kvalitetskraven” – ja, förseningar och förändringar pga detta
- ”bristande underhåll av ex maskiner” – vet ej, inga tydliga exempel
- ”kostnaden ökar (för någon part)” - ja

- ”dålig ekonomiuppföljning pga 3 delfinansiärer” - *nej*
- ”budgeten/kostnaderna överskrids/underskrids” – *ja pga förseningar och mer mätningar och undersökningar*
- ”svårkalkylerbart, svåravgränsbart” – *ja, osäkerheter kring avgränsningar mellan parter samt vissa justeringar under utförandet*
- ”slutdatum får inte överskridas” - *jo*
- ”oklart vad som ger kvalitet i projektet” – *spontant ja, vad skall fokus ligga på*
- ”rutin för avvikelshantering saknas” - *nej*
- ”olika besked/motstridiga uppgifter” - *nej*
- ”många agerar projektledare” – *nej i överlag*
- ”oklar beslutsgång under injekteringsarbetet, Chalmers, Besab, Tyréns” – *nej i överlag*
- ”projektledare har brist på tid för uppdraget” – *nej i överlag*
- ”övertro på den egna kompetensen” – *nej i överlag*
- ”tar för givet att alla vet vad man pratar om” – *ja men i detaljer*
- ”kommunikationsproblem/samarbetssvårigheter/”hemligt”/sitter inte gemensamt” – *nej i överlag*

5.5 Förändringar i arbetsbeskrivningen

Vissa förändringar har gjorts från den ursprungliga arbetsbeskrivningen. Dessa kommenteras i kursiv nedan, direkt efter de olika stegen i den ursprungliga arbetsinstruktionen

Arbetsgång – exempel från etapp 1

1. PM för etappen levereras av injekteringsansvarig och gås gemensamt igenom med entreprenör. - *ok*
2. Utsättning av borrhål. - *ok*
3. Borrning av skärm 1 och 2. – *möjligt att borra fler skärmar än 2 st, i etapp 2 borrades 4 st på en gång. Vidare ändrades håldimensionen för att klara borrhålets kapaciteten*
4. Kontroll av ansättning, riktning samt rakhetsmätning i samtliga hål utförs i skärm 1. – *gjordes för skärm 2 av praktiska skäl men ok*

5. Samtliga borrhål renspolas från borrhax, samtidigt som vattenförlustmätning utförs. – *ok, men vid vakuumsugningen efteråt kunde det noteras kax i nedåtlutande borrhål*
6. Manschettering. Manschetten monteras 1,5 meter in i borrhålet. - *ok*
7. Hydrauliska tester: Naturligt inflöde mäts i samtliga borrhål, i de hål som inläckaget är >2 l/min ska även grundvattentryck mätas. – *ok, men även dropp behöver noteras*
8. Resultat av testerna lämnas till injekteringsansvarig för utvärdering. – *ok, men vid förväntade resultat kan detta moment utgå efter inledande injektering*
9. Design justeras och går igenom med entreprenör. – *ok, men vid förväntade resultat från de hydrauliska testerna kan detta moment utgå efter inledande injektering*
10. Borrhål som ska injekteras vakuumpumpas, nedåtriktade hål med avluftnings slang förd till botten, uppåtriktade utan. – *ok, ansågs effektivt, vakuumsugning görs i nästkommande injekteringshål och tills injekteringen skall starta för att få bästa effekt*
11. Skärm 1 injekteras först och sedan skärm 2. Injektering påbörjas i sulan och fortsätter uppåt per skärm. *ok, vid täta hål och inga injekteringsflöden efter hålfyllnad ändrades pumptiden till ca hälften, silica sol blandningar med korta geltider (under ca 15 min) tillåts inte utan injektering avslutades vid ca 400 liter per hål.*
12. Väntetid efter injektering i avslutad skärm innan manschetter demonteras vid:
 - silica sol: minst 3 timmar, *ok*
 - cement: minst 6 timmar
13. Protokollförda resultat från injekteringen levereras till injekteringsansvarig. – *ok men behöver skötas smidigare då de tenderar att försvinna*
14. Mellanliggande kortare kontrollskärm och eventuellt ”split-spacing” skärm borrar. – *ok, beslut om vilka skärmar och kontrollhål som skall borrar skall anges enligt kriterier som kan baseras på resultat från injekteringsprotokollen*
15. Samtliga borrhål renspolas från borrhax, samtidigt som vattenförlustmätning utförs. – *ok, se moment 5*
16. Manschettering. Manschetten monteras 1,5 meter in i borrhålet. - *ok*
17. Hydrauliska tester: Naturligt inflöde mäts i samtliga borrhål, i de hål som inläckaget är >2 l/min ska även grundvattentryck mätas. – *ok, även dropp skall noteras*
18. Resultat av testerna lämnas till injekteringsansvarig för utvärdering. - *ok*
19. Väntetid för eventuell uppdatering av aktuellt PM, 1 dag – *ok, men vid förväntade resultat från de hydrauliska testerna kan detta moment utgå efter inledande injektering*

20. PM för uppdaterad injekteringsteknik av kontrollhål levereras från injekteringsansvarig och går igenom tillsammans med entreprenör. – *ok, men vid förväntade resultat från de hydrauliska testerna kan detta moment utgå efter inledande injektering*
21. Injektering påbörjas i sulan och fortsätter uppåt. – *ok, se steg 11*
22. Väntetid efter injektering i avslutad skärm innan manschetter demonteras vid:
 - silica sol: minst 3 timmar, *ok*
 - cement: minst 6 timmar
23. Protokollförda resultat från injekteringen levereras till injekteringsansvarig. - *ok*
24. Pluggning av samtliga borrhål med cementbruk. – *saknas en bättre beskrivning av ytinjektering och/hålpluggning med kriterier som manschett och dess placering, injekteringsmedel, tryck och tider*

6 Slutsatser

Det genomförda projektet har uppnått de satta syftena och målen, dvs:

- Implementerat och vidareutveckla en designmetodik för efterinjektering av befintliga tunnlar. Metodiken skall ge predicerbara resultat gällande inläckaget samt uppskatta både resurser och tidsåtgång.
- Genomfört efterinjekteringsinsatser av befintlig tunnel enligt en framtagen design och strategi. Mindre förändringar av utförandet har baserats på designen med korrigeringar för gjorda observationer.
- Uppnått satta delmål under genomförandet och slutmål för inläckagemängden.
- Genomfört ett samarbetsprojekt där beställare, designutvecklare, projektör och entreprenör har deltagit aktivt från initieringen till avslutning av projektet.

Ett antal olika faktor måste (och har) fungera och samverka för att kunna uppnå ovanstående punkter. Nedan följer de viktigaste av dessa.

Grund för designen var en teoretisk modell som metodiken baserades på men för att den skulle kunna tillämpas krävdes en god kännedom och befintliga förutsättningar.

Förutsättningarna från befintligt material gav stor information om tidigare injekteringsarbeten, de geologiska förhållandena samt inläckagesituationen i tunneln. Designen krävde mer detaljerade förutsättningar, därför var kärnborrningen med tillhörande kartering och hydrauliska tester nödvändiga. Analyserna från mätningar vid kärnborrningen kunde verifieras mot tunnelns inläckagemätningar, vilket gjorde att det slutliga inläckagemålet och designen kunde anses som rimligt.

Ett viktigt moment i projektet var de praktiska förberedelserna, såsom val och test av injekteringsmedel och övrig injekteringsutrustning, och med hänsyn till de begränsade tunnelutrymmena. Detta utfördes, dvs eventuella problem löstes direkt, förutom bormaskin och dess kapacitet som inte kunde lösas förrän flera alternativ hade testas, såsom byte av maskin och kompletteringar samt förändrad håldimension.

Med det begränsade tunnelutrymmet och långa transportsträckor ställdes krav på en bra logistik av utrustning och injekteringsmaterial samt resurser för transporter.

Injekteringsutförandet kunde genomföras enligt designen. Förväntade scenarier och förlopp stämde bra överens med observationer och iakttagelser under injekteringen.

Batchblandningen och injekteringen med silica sol genomfördes utan problem mycket tack vare entreprenör med tidigare erfarenhet av silica sol och direkta kommunikationer på plats mellan entreprenör och designer/projektör via injekteringsingenjör. Vidare hölls täta möten under utförandet mellan beställare, designer/projektör och entreprenör, dels för att lösa mer praktiska frågeställningar och dels för att redovisa etappresultaten samt diskutera och besluta om nästkommande etapp.

Indelningen i etapper där avstämningar gjordes av resultat och utförande var viktig för projektet. Där den inledande etapp 1 klargjorde att vissa praktiska förändringar behövdes men att designen gav resultat. Etapp 2 visade att inläckagemålen kunde uppnås och utförandet fungerade bra. Den slutliga etapp 3 var ett försök att få en effektivare utförandeprocess, vilket uppnåddes men ingen ytterligare tätning av bergmassan gjordes.

Både i detta projekt och även dokumenterat i andra projekt är läckande borrhål ett problem. Trots flera omgångar med injektering och pluggning av den yttersta metern av borrhålen kvarstår i vissa hål ett visst läckage, från fukt till dropp. Förståelsen för detta saknas ännu men flera hypoteser finns. En av den mest troliga hypotesen är den höga tryckgradienten, som skapas just innanför tunnelkonturen vid en effektiv tätning av bergmassan, varav medlet eroderar vid de yttersta meterna i injekteringshålet.

Slutligen uppnåddes nivån för inläckaget, dvs inläckaget sänktes från ca 3,8 till 1,3 l/min och 100 m. Vid dessa måttliga inläckage på ca 3,8 l/min är de uppnådda inläckaget normalt väldigt svårt att erhålla, inga tidigare dokumenterade efterinjekteringsprojekt har kunnat visa samma resultat.

Rekommendationer inför liknade framtida efterinjekteringsprojekt är:

- en grundlig undersökning av befintliga förhållanden, inkl praktiska förhållande
- kompletterande riktade undersökningar mot designen för att få mer detaljerad information
- genomgång av vilken utrustningen som kan användas i förhållande till kravspecifikation samt transporter och logistik
- design som baseras på de tre ovanstående punkterna och som innehåller observationer med tydliga åtgärder för olika möjliga situationer
- minst en avstämning görs inledningsvis för att verifiera design och utförande
- och slutligen att alla parter är så tidigt som möjligt är engagerade i projektet

Referenser

- Axelsson, M. 2006. Strength Criteria on Grouting Agents for Hard Rock. Laboratory studies performed on gelling liquid and cementitious grout. Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Axelsson, M. 2009. Prevention of Erosion of Fresh Grout in Hard Rock. Doktorsavhandling. Ny serie. 2915. Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
- Butron, C. Gustafson, G. Funehag, J. 2008. Grouting in Nygård tunnel – Pre-grouting design for drip sealing and evaluation. Report 2008:2. Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola.
- Draganovic, A. 2009. Bleeding and filtration of cement-based grout. Doctoral Thesis. Institutionen för Jord- och Bergmekanik, KTH.
- Edrud, P. Svensson, H. 2007. Design och uppföljning av injektering i berg. En fältstudie av dropptätning i två större järnvägstunnlar. Examensarbete 2007:4, Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers
- Eriksson, M, Stille, H. 2005. Cementinjektering i hårt berg. SveBeFo Rapport K22.
- Fransson, Å. Gustafson, G. 2006. Efterinjektering: Inläckageprognos och design – förslag till analys. SveBeFo Nr 75.
- Fransson, Å. Gustafson, G. 2008. Efterinjektering - Sammanställning och kompletterande analys för efterinjekteringsarbeten i Hallandsås och Nygårdstunneln. SvBeFo rapport Nr 90.
- Funehag, J. 2007. Grouting of Fractured Rock with Silica Sol Grouting design based on penetration length. Dissertation, Doktorsavhandling. Ny serie 2560. Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola.
- Granberg, N. Knutsson, S. 2008. Kvalitetssäkring av efterinjektering. En fältstudie i Nygårdstunneln. Examensarbete 2008:19. Institutionen 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. Stockholm
- Gustafson, G. Stille, H. 2005. Stop criteria for cement grouting. Felsbau rock and soil engineering, no 3, pp 62-68.

Gustafson, G. Funehag, J. 2008a. Design of grouting with silica sol in hard rock - New methods for calculation of penetration length, Part I. Tunneling and underground space technology, 23 (2008) (1) s 1-8.

Gustafson, G. Funehag, J. 2008b. Design of grouting with silica sol in hard rock - New design criteria tested in the field, Part II. Tunneling and underground space technology, 23 (2008) (1) s 9-17.

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

Gustafson, G. Hernqvist, L. Funehag, J. 2010. The use of proxy parameters in pre-investigation, Design and construction of tunnels with application to grouting. Bergmekanikk I Norden 2010, p 123 – 132. Oslo.

Runslätt, E. Thörn, J. 2010. Fracture deformation when grouting in hard rock, In situ measurements in tunnels under Gothenburg and Hallandsås. Examensrapport 2010:87. Geologiska institutionen, Chalmers tekniska högskola, Göteborg

Bilagor

- Bilaga 1 Kravspecifikation, baserad på översiktlig design
- Bilaga 2 Omvandlingstabeller för blandning av silica sol
- Bilaga 3 Arbetsbeskrivning inför utförandet
- Bilaga 4 Beslutsmetodik av sonderingshål

Bilaga 1

Kravspecifikation

Injekteringsbörning

- Håldimension = 63 mm \pm 1
- Längd på injekteringshål = 12,5 m
- Längd på kontrollhål = 11 m
- Vinkel mot tunnelvägg = 40 grader \pm 2 grader
- Rakhet = \pm 1 m i hålspets (Kontrolleras i skärm 1)
- Ansättningspunkt= inom en radie på 0,25 m (Kontrolleras i skärm 1)

Injekteringsutrustning

- Blandare med invägning av delmaterial
- 2 omrörare med invägning av delmaterial
- 2 st fatpumpar, inklusive digital flödesgivare, med kapacitet på minst 50 l/min och flödesgivare
- 2 st pumpar med kapacitet på minst 50 l/min och tryck för 10 MPa
- Digital registreringslogger, per pump, för tid, tryck och flöde

Injekteringsmaterial

- Cement, Injektering 30 + flytmedel och accelerator
- Silica sol, Meyco MP320
- Polyurethane

Provning

Förprovning av bruksparametrar

Silica sol

- Gel tid
- Rheologi; Viskositetsutveckling

Cement

- Härdningstid
- Rheologi; viskositet samt flytgräns
- Densitet, mudbalance
- Inträngningsegenskaper; filterpump, penetracone

Bruksprovning i fält

Silica sol

- Koproov; geltiden på samtliga batcher
- Temperaturmätningar på batcher/behållare av silica sol

Cement

- Densitet; mudbalance
- Flytgräns; yield stick

Bilaga 2

Nedanstående omvandlingstabeller från vikt till volym och olika mängder kan användas för att kunna finna lämplig strategi vid blandning.

Ratio i volymförhållande ($\rho=1,2$)			Per 100 liter sol	
Vikt ratio	Volymratio	GT (10°C)	liter sol	liter salt
4:1	3,3:1	22,5 min	100	30
4.5:1	3,75:1	30 min	100	26,7
5:1	4,2:1	38 min	100	24

Ratio i volymförhållande ($\rho=1,2$)			Vikt mängder			
Vikt ratio	Volymratio	GT (10°C)	kg sol	kg salt	per kg sol	kg salt
4:1	3,3:1	22,5 min	100	25	1	0,25
4.5:1	3,75:1	30 min	102,6	22,8	1	0,22
5:1	4,2:1	38 min	105	21	1	0,2

Ratio i volymförhållande ($\rho=1,2$)			Volymsmängder			
Vikt ratio	Volymratio	GT (10°C)	liter sol	liter salt	per liter sol	liter salt
4:1	3,3:1	22,5 min	83,3	25	1	0,3
4.5:1	3,75:1	30 min	85,5	22,8	1	0,27
5:1	4,2:1	38 min	87,5	21	1	0,24

Bilaga 3

Arbetsbeskrivning

Följande text baseras på dokument TB AMA 07 kap CDD

Sammanfattning

Injekteringen kommer att utföras i etapper enligt följande.

Etapp 1 Skärm 1 och 2 samt mellanliggande kontrollskärm.

Etapp 2 Skärm 3-10 samt en mellanliggande kontrollskärm.

Etapp 3 Skärm 11-17 samt en mellanliggande kontrollskärm.

Samtliga skärmar är planerade att gå 40 grader mot sektionmätningen i tunneln. Ansättningsavståndet mellan varje skärm ska vara 5,3m där Skärm 1 ansätts i sektion ca 2/997. Skärm 2 ansätts således i sektion 3/002,3 osv. Injekteringskärmarna är anpassade till befintliga installationer i tunneln enligt dokument Kabelflytt daterat 2009-12-10. För detaljerad borrhålsgeometri se ritning 217255H-01-01.

Efterinjektering – etapp 1

Etapp 1 omfattar 2 st efterinjekteringskärmarna samt 1 mellanliggande kontrollskärm.

Under hela efterinjekteringen ska grundvattentrycket mätas i KBH 1 och KBH 2. Trycket ska avläsas före och efter borrhning och injektering av varje skärm. Efter injektering ska manschett i KBH 1 och KBH 2 öppnas och en kontroll utföras på att borrhålen ej är fyllda med injekteringsmedel. Kärnborrhålen spolas efter varje injekterad skärm.

Arbetsgång - etapp 1

1. PM för etappen levereras av injekteringsansvarig och går gemensamt igenom med entreprenör.
2. Utsättning av borrhål.
3. Borrhning av skärm 1 och 2.
4. Kontroll av ansättning, riktning samt rakhetsmätning i samtliga hål utförs i skärm 1.
5. Samtliga borrhål rensolas från borrhax, samtidigt som vattenförlustmätning utförs.
6. Manschettering. Manschetten monteras 1,5 meter in i borrhålet.
7. Hydrauliska tester: Naturligt inflöde mäts i samtliga borrhål, i de hål som inläckaget är >2 l/min ska även grundvattentryck mätas.
8. Resultat av testerna lämnas till injekteringsansvarig för utvärdering.

9. Design justeras och går igenom med entreprenör.
10. Borrhål som ska injekteras vacuumumpas, nedåtriktade hål med avluftningslang förd till botten, uppåtriktade utan.
11. Skärm 1 injekteras först och sedan skärm 2. Injektering påbörjas i sulan och fortsätter uppåt per skärm.
12. Väntetid efter injektering i avslutad skärm innan manschetter demonteras vid:
 - silica sol: minst 3 timmar
 - cement: minst 6 timmar
13. Protokollförda resultat från injekteringen levereras till injekteringsansvarig.
14. Mellanliggande kortare kontrollskärm och eventuellt ”split-spacing” skärm borras.
15. Samtliga borrhål rensas från borrkax, samtidigt som vattenförlustmätning utförs.
16. Manschettering. Manschetten monteras 1,5 meter in i borrhålet.
17. Hydrauliska tester: Naturligt inflöde mäts i samtliga borrhål, i de hål som inläckaget är >2 l/min ska även grundvattentryck mätas.
18. Resultat av testerna lämnas till injekteringsansvarig för utvärdering.
19. Väntetid för eventuell uppdatering av aktuellt PM, 1 dag
20. PM för uppdaterad injekteringsteknik av kontrollhål levereras från injekteringsansvarig och går igenom tillsammans med entreprenör.
21. Injektering påbörjas i sulan och fortsätter uppåt.
22. Väntetid efter injektering i avslutad skärm innan manschetter demonteras vid:
 - silica sol: minst 3 timmar
 - cement: minst 6 timmar
23. Protokollförda resultat från injekteringen levereras till injekteringsansvarig.
24. Pluggning av samtliga borrhål med cementbruk.

Ovanstående arbetsgång kan uppdateras efter de hydrauliska testerna där Anpassningar och ändringar beslutas av beställaren i samråd med entreprenören.

Efterinjektering – etapp 2

Etapp 2 är planerat att innehålla totalt 8 st efterinjekteringsskärmar samt en kortare kontrollskärm. Placering av kontrollskärmen bestäms av beställarens injekteringsansvarige och meddelas till entreprenören när detta blir aktuellt. Arbetet förväntas att påbörjas ca 5 arbetsdagar efter det att etapp 1 är färdiginjekterad.

Om beställarens injekteringsansvarige anser det nödvändigt ska grundvattentrycket mätas i KBH 1 och KBH 2 enligt kap 1.4.

Arbetsgång – etapp 2

1. Borrning av skärm 3 och 4.
 - Manschettering. Manschetten monteras 1,5 meter in i borrhålet.
 - Samtliga borrhål renspolas från borrhåx, samtidigt som vattenförlustmätning utförs.
 - Hydrauliska tester: Naturligt inflöde mäts i samtliga borrhål, i de hål som inläckaget är >2 l/min ska även grundvattentryck mätas.
2. Resultat av testerna lämnas till injekteringsansvarig för utvärdering.
3. Skärm 3 injekteras först och sedan skärm 4. Injektering påbörjas i sulan och fortsätter uppåt per skärm. Injekteringsdesign, såsom medel, tryck och tid ska följa aktuell PM.
4. Väntetid efter avslutad injektering i samtliga hål, minst 3 timmar.
Protokollförda resultat från injekteringen levereras till injekteringsansvarig.
5. Borrning av skärm 5 och 6 enligt punkt 1-7.
6. Uppreppning av skärm 7 och 8 respektive 9 och 10, enligt punkt 1-7 ovan.
7. Samtliga borrhål pluggas.

Ovanstående grundmodell/arbetsflöde av injekteringsmetodiken kan komma att justeras beroende på föregående injekteringskärms resultat. Beslut om detta tas av beställarens injekteringsansvarige.

Efter utförd injektering av etapp 2 och innan etapp 3 påbörjas görs en uppföljning och utvärdering av tätningsresultaten och erfarenheterna från etapp 2. Beställarens injekteringsansvarige ansvarar för utvärderingen, som planeras att ta 5 arbetsdagar. Direkt efter utvärderingen görs en redovisning av denna och en detaljbeskrivning av etapp 3.

Efterinjektering – etapp 3

Etapp 3 är planerat att innehålla totalt 7 st efterinjekteringskärmar samt en kortare kontrollskärm. Placering av kontrollskärmen bestäms av beställarens injekteringsansvarige och meddelas i god tid till entreprenören. Arbetet förväntas att påbörjas ca 5 arbetsdagar efter det att etapp 2 är färdig.

Om beställarens injekteringsansvarige anser det nödvändigt ska grundvattentrycket mätas i KBH 1 och KBH 2.

Proceduren för skärm 11 till 17 samt kontrollskärm följer stegen i etapp 2 och avslutas med pluggning efter hela etappen.

Ovanstående grundmodell/arbetsflöde av injekteringsmetodiken kan komma att justeras beroende på föregående injekteringskärms resultat. Beslut om detta tas av beställarens injekteringsansvarige.

Bilaga 4

Resultatet som kan erhållas från en vattenförlustmätning i ett borrhål uttrycks som transmissiviten (T), som antas vara lika med specifika kapaciteten, dvs:

$$T = \frac{Q}{dh}$$

Genom att transmissiviteten från flera oberoende borrhål som vanligtvis antas som lognormalfördelade kan en binomialfördelning användas för att teoretiskt bestämma sannolikheten om bergmassan behöver injekteras eller ej. Detta görs genom att utvärdera sannolikheten för att medianvärdet från flera håltransmissiviteter är lägre än den kritiska transmissiviteten (T_{krit}), som motsvarar inläckagekravet (q_{krit}) och kan uttryckas enligt nedan:

$$T_{krit} = \frac{q_{krit} \cdot L}{2\pi \cdot dh}$$

där L är aktuellt tunnelavsnitt som skall tätas.

För att bedöma med vilken sannolikhet bergmassan klarar inläckagekravet utan injektering, dvs. medianvärdet från flera vattenförlustmätningar understiger den kritiska transmissiviteten, används antalet hål vars resultat skall understiga den kritiska transmissiviteten och binomialfördelningens konfidensnivå, se Gustafson et al (2010) för en utförligare beskrivning.

Vid val av lämplig konfidensnivå eller sannolikhet skall det även beaktas att ett visst läckage i en skärm kan tillåtas om de övriga skärmarna är täta. Samma teoretiska princip kan användas för att bestämma samtliga sonderingshål i exempelvis tre injekteringskärrmar, dvs. motsvarande inläckagekravets sträcka. Då fås generellt högre konfidensnivåer, dvs. finns en viss marginal om en sonderingsgrupp i en skärm missbedöms.

Med ett grundvattentryck på 30 m, tunnellängd för etapp 3 på ca 40 m och inläckagekrav över tunnellängden på $4,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ ($1/40/1000/60$) fås ett T_{krit} på $8,8 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, vilket motsvarar en vattenförlust på 0,16 l/min.

Om fyra sonderingshål borrar i en skärm och ett av hålen överstiger den kritiska vattenförlusten är konfidens 0,69, dvs 69 % sannolikhet att hela skärmen är tät. Motsvarande för att inget hål överstiger den kritiska konfidensen är 0,94, dvs 94%. För etapp 3 beslutades en konfidens på > 90% i en skärm.

Avstånden mellan sonderingshålen bör vara så att de är oberoende av varandra. Tidigare analyser av detta har gjorts genom den geostatiska metoden ”Kriging”. Resultat från utförda analyser i normalt hårt berg visar att vid ett avstånd på normalt 3 till 4 m fås ett oberoende mellan borrhål, dvs. sonderingshålen skall ha ett avstånd på minst 3 till 4 m för att vara oberoende av varandra. Med fyra sonderingshål i den använda skärmen uppnås detta kriterium.