

Injekteringen av TASS-tunneln

Design, genomförande och resultat från förinjekteringen

Johan Funehag, Chalmers tekniska högskola

Ann Emmelin, Golder Associates

June 2011

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



ISSN 1402-3091

SKB R-10-39

Injekteringen av TASS-tunneln

Design, genomförande och resultat från förinjekteringen

Johan Funehag, Chalmers tekniska högskola

Ann Emmelin, Golder Associates

June 2011

Denna rapport har gjorts på uppdrag av SKB. Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna. SKB kan dra andra slutsatser, baserade på flera litteraturkällor och/eller expertsynpunkter.

En pdf-version av rapporten kan laddas ner från www.skb.se.

Förord

TASS-tunneln, en kortare tunnel med tvärsnitt ungefär som en deponeringstunnel, byggdes på 450 m djup i SKB:s Äspölaboratorium med huvudsyftet att visa att det med injektering är möjligt att uppnå den täthet som förutses krävas för slutförvaret för använt kärnbränsle. Projektet kallades Fintättningsprojektet och är en del i SKB:s utveckling av injekteringsteknik. Vid tätningen av TASS-tunneln användes de injekteringsmaterial som SKB särskilt utvecklat respektive undersökt för tätningen av slutförvaret, liksom den designmetodik som utvecklats under senare tid och för vilken SKB varit en av finansörerna.

Författare till rapporten är Johan Funehag, Chalmers tekniska högskola, som var delprojektledare för injektering och Ann Emmelin som under utförandet var representant för beställaren SKB och ansvarig för organisationens injekteringsutveckling. Projektledare var Martin Bergström, Tyréns, Göteborg, och entreprenör var Bergteamet.

Injekteringen i TASS-tunneln utgjordes av förinjektering av hela tunneln och efterinjektering av mittpartiet av tunneln. Denna rapport redovisar förinjekteringen. Resultat av delar av förinjekteringen har tidigare redovisats i SKB:s rapport R-08-23 som utgör en begärd delredovisning till SKB:s arbete med ansökan att få bygga slutförvaret. För att få en samlad redovisning av förinjekteringen innefattar föreliggande rapport även det arbete och resultat som redovisades i R-08-23. Materialet har till vissa delar vidareutvecklats.

Stockholm i april månad 2011

Anders Sjöland, Beställare

Abstract

The Swedish repository facility for spent nuclear fuel will be placed in crystalline rock at a depth of 400–500 m. In order to limit groundwater inflow to the facility, grouting is planned. To comply with the stringent material, execution and inflow restrictions, a series of research and development projects concerned with rock characterization for grouting, grouting materials and grouting design have been carried out by the Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB). The understanding and methods developed were tested in the sealing project carried out at Äspö Hard Rock Laboratory (Äspö HRL), Sweden, and presented in this report.

The project consisted of the construction of a short tunnel at 450 m depth, the TASS-tunnel. Grouting was conducted as pre-grouting using ordinary grouting fans outside the planned tunnel contour, as well as with grout holes entirely within the planned contour. A cement-based low-pH grout and a silica based grouting agent, silica sol, were used.

The methodology used included determination of the fracture transmissivity distribution; identification of the smallest hydraulic aperture that needs to be sealed; grout selection based on fracture aperture and grout penetrability; design of grout hole geometry, grouting pressure and time in order to achieve the penetration length required; and monitoring of the actual execution based on inflow in control holes with subsequent design revision. Special concern was given to equipment and execution due to the high groundwater pressures, 3.5 MPa.

Before starting the construction, inflow to core drilled holes along the tunnel position amounted to 45–90 liters/minute. The project showed that it was possible to limit the inflow to the target value 1 liter/minute per 60 m tunnel.

Sammanfattning

Den svenska anläggningen för slutförvaring av använt kärnbränsle planeras att förläggas på 400–500 m djup i urberget. För att tät bergmassan mot inläckande grundvatten planeras injektering. Höga krav kommer att ställas på den resulterande tätheten, och särskilda krav gäller för val av tätningsmaterial och för utförandet. SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, har därför utfört en serie forsknings- och utvecklingsprojekt om bergkarakterisering för injektering, injekteringsmedel och injekteringsdesign. Den förståelse och de metoder som därmed utvecklats har tillämpats i fält i fintättningsprojektet. Projektet utfördes i SKB:s berglaboratorium på Äspö där en kort tunnel, TASS-tunneln, byggdes på 450 m djup.

Injektering utfördes som förinjektering med skärmar utanför kontur, d v s vanliga förinjekterings-skärmar med injekteringshål borrade snett utåt och framåt från tunnelfronten, och med ”skärmar innanför kontur” där borrhålen borras helt innanför den blivande tunnelns periferi. Ett cementbaserat låg-pH bruk och ett kiselbaserat injekteringsmedel, silica sol, användes.

Den använda metodiken innehöll följande moment: bestämning av sprickornas transmissivitetsfördelning; identifiering av den minsta hydrauliska sprickvidd som behöver tätas; val av injekteringsmedel baserat på hydraulisk sprickvidd och inträngningsförmåga; val av skärmgeometri, injekteringstryck och injekteringstid så att erforderlig inträngningslängd uppnås; samt kontroll av bergmassans ökande täthet med hydrauliska tester i kontrollhål och därpå följande anpassning av nästa injekteringsomgång under utförandet. Med hänsyn till de höga grundvattentrycken, upp mot 3,5 MPa, krävdes särskild uppmärksamhet på utrustningen och utförandet.

Innan entreprenadarbetena startade, mättes inflödet i kärnborrhål längs tunnelsträckningen till 45–90 liter per minut. Projektet visade att det var möjligt att begränsa inflödet till projektmålet 1 liter per minut och 60 m tunnel.

Innehåll

1	Inledning	11
2	Mål och projektbeskrivning	13
2.1	Mål och omfattning	13
2.2	Organisation	14
2.3	Projektgenomförande	15
2.4	Redovisning av projektets resultat	18
3	Teori och metoder	19
3.1	Använda begrepp	19
3.2	Beskrivning av iterativt arbetssätt	20
3.3	Undersökningsmetoder	21
3.3.1	Undersökningsmetoder för geohydrologisk prognos	21
3.3.2	Kontroll av grundvattenkemi	24
3.4	Teori och metod för injekteringsdesign	24
3.4.1	Beskrivning av metod för injekteringsdesign	24
3.4.2	Fördelning av spricktransmissivitet och hydraulisk sprickvidd	26
3.4.3	Skattning av inflöde och bestämning av sprickvidder som ska tätas	27
3.4.4	Val av injekteringsmedelstyper	27
3.4.5	Sprickorientering och skärmgeometri	27
3.4.6	Val av skärmgeometri och injekteringsteknik för silica sol	30
3.4.7	Val av injekteringsteknik för cementbaserat bruk	32
3.4.8	Design med kontroller och åtgärder	34
3.5	Metoder för kontroll av inflöde till tunneln	35
3.5.1	Mätvallar	35
3.5.2	Dropp- och flödeskaraktisering	35
4	Platsval och geohydrologisk prognos	37
4.1	Prognos i flera steg	37
4.2	Befintliga data och preliminärt platsval	37
4.3	Förundersökningar	40
4.3.1	Omfattning och genomförande	40
4.4	Utvärdering och definitivt platsval	41
4.4.1	Utvärdering	41
4.4.2	Jämförelse med platskraven och definitivt platsval	46
4.5	Fördjupad analys av förundersökningen	46
4.5.1	Fördelning av spricktransmissiviteter och hydrauliska sprickvidder	46
4.5.2	Skattning av inflöde	48
4.6	Sammanfattande geohydrologisk prognos	49
5	Material och utrustning	51
5.1	Injekteringsmedel	51
5.1.1	Silica sol	51
5.1.2	Cementbaserat injekteringsmedel med lågt pH	53
5.1.3	Omhändertagande av spill	55
5.2	Utrustning	56
5.2.1	Injekteringsutrustning	56
5.2.2	Injekteringsmanschetter	56
5.2.3	Pump för avluftning av borrhål	57
5.2.4	Borrutrustning	57
6	Design och styrning av injekteringen i fintättningsprojektet	59
6.1	Särskilda förutsättningar	59
6.2	Basdesign	59
6.2.1	Tillåtet inläckage och övriga utgångspunkter	59
6.2.2	Erforderlig reduktion av inflödet	60
6.2.3	Val av injekteringsmedelstyper	60

6.2.4	Sprickorientering, preliminär skärmgeometri och den tätade zonens utbredning	61
6.2.5	Val av skärmgeometri och injekteringsteknik för silica sol	62
6.2.6	Val av injekteringsteknik för cementbaserat bruk	64
6.2.7	Design med kontroller och åtgärder	67
6.3	Utförande med anpassning av design och övriga åtgärder	70
6.3.1	Resultterande arbetscykel	70
6.3.2	Särskilda observationer	70
6.3.3	Styrning av injekteringen vid tunnelfronten	71
7	Ettappbeskrivningar med resultat och observationer	73
7.1	Ettappöversikt	73
7.2	Arbetsettapp 1, korset och skärm 1	73
7.2.1	Ettappmål och förutsättningar	73
7.2.2	Korset	73
7.2.3	Skärm 1	80
7.2.4	Ettappresultat och erfarenheter inför ettapp 2	83
7.3	Arbetsettapp 2, traditionella förinjekteringskärmar	84
7.3.1	Ettappmål och förutsättningar	84
7.3.2	Skärm 2	85
7.3.3	Skärm 3	91
7.3.4	Ettappresultat och erfarenheter inför ettapp 3	95
7.4	Arbetsettapp 3, kärmar innanför kontur	97
7.4.1	Ettappmål och förutsättningar	97
7.4.2	Skärm 4	98
7.4.3	Skärm 5	101
7.4.4	Skärm 6	105
7.4.5	Ettappresultat och erfarenheter inför ettapp 4	109
7.5	Arbetsettapp 4, avslutning av tunneldrivning	110
7.5.1	Ettappmål och förutsättningar	110
7.5.2	Avslutning	111
7.6	Resultterande inflöde	112
7.7	Övriga observationer och resultat	113
7.7.1	Borrhålsavvikelse	113
7.8	Geokemi	116
8	Diskussion	117
8.1	Det tätade berget	117
8.2	Förundersökningen och den geohydrologiska prognosen	122
8.2.1	Undersökningsmetoderna	122
8.2.2	Prognosmetoderna	122
8.2.3	Förundersökningens omfattning och prognosen	123
8.3	Designmetoden och designen	125
8.4	Styrningen under injektering	128
8.4.1	Styrning med kontrollhål	128
8.4.2	Alternativa täthetsmått	129
8.4.3	Tolkning och styrning baserat på övriga observationer	129
8.4.4	Inflödesbestämning	129
8.5	Skärmtyp	130
8.6	Utrustning och material	132
8.6.1	Utrustningen	132
8.6.2	Silica solen	132
8.6.3	Det cementbaserade bruket	132
8.6.4	Hantering av ej förbrukat material	132
8.7	Övriga genomförandefrågor	133
8.7.1	Arbetsutförandet och resultatet	133
8.7.2	Arbetsmiljö	134
8.7.3	Produktionseffektivitet	134

9	Slutsatser	137
9.1	Har målen uppnåtts?	137
9.2	Övriga observationer och slutsatser	139
9.3	Rekommendationer för fortsatt arbete	139
	Referenser	141
Bilaga 1	Gradienter kring oinjekterade och injekterade tunnlrar	143
Bilaga 2	Utdrag ur ”Arbetsinstruktion injektering skärm 3”	151
Bilaga 3	Protokoll från utförandet av injekteringsskärmar	155
Bilaga 4	Brukstester under cementinjektering av skärm 1–5	248
Bilaga 5	Droppkaraktisering	249
	Dripping characterisation results of section 10–33 m	249
	Dripping characterisation results of section 33–50 m	254
	Update dripping characterisation 32–52 m	258
	Dripping characterisation results of sections 50 to 76.5 m and 76.5 to 80.5 m	260

1 Inledning

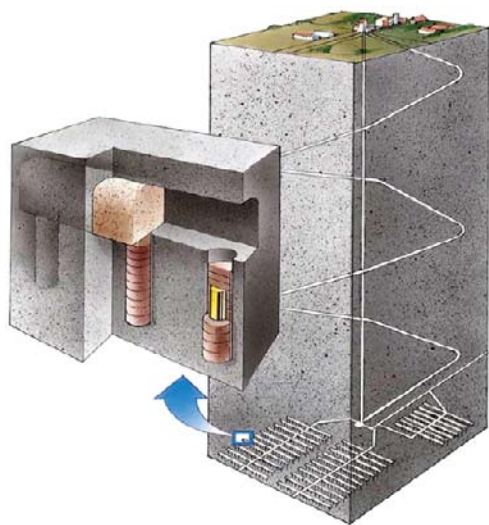
SKB, Svensk Kärnbränslehantering AB, har ett betydande åtagande; att bygga ett säkert förvar för använt kärnbränsle. SKB har därför utvecklat det så kallade KBS-3-konceptet som innebär att det använda bränslet innesluts i tätta kopparkapslar och deponeras i kristallin bergmassa omgivna av en buffert av svällande bentonitlera på 400–700 m djup, se figur 1-1. Den anläggning som ska byggas omfattar förutom själva deponeringstunnlarna även berghallar för bland annat verkstäder och omlastning, ramp och schakt från markytan ner till deponeringsnivån, samt tunnlar som binder ihop de övriga anläggningsdelarna. När deponeringen är klar ska samtliga öppningar i berget fyllas igen.

Kravet på ett begränsat inläckage av grundvatten till anläggningen kommer att vara höga och är betingade dels av den yttre miljön och behovet att inte påverka grundvattnets trycknivå, dels av den inre miljön och anläggningens funktion. För deponeringstunnlarna gäller särskilt att inläckaget måste begränsas med hänsyn till den långsiktiga säkerheten; inläckaget måste vara så pass litet att bentoniten i buffert och återfyllning i deponeringstunnlarna kan svälla kontrollerat utan skadlig erosion på grund av inläckande grundvatten.

Det arbete som redovisas i denna rapport är den förinjektering som har utförts i Fintättningsprojektet och arbetet har särskild bäring på bergets täthet runt deponeringstunnlarna. När fintättningsprojektet initierades hade SKB ännu inte valt den plats som ansökan för att bygga slutförvaret avser. Det hade emellertid stått klart sedan länge att själva deponeringstunnlarna måste förläggas i relativt sprickfritt berg med begränsad vattenföring och att – trots det redan relativt täta berget – tätning av berget kommer att vara oundvikligt och att denna tätning lämpligast görs genom injektering.

I fintättningsprojektet byggdes en knappt 80 m lång tunnel på 450 m djup i SKB:s berglaboratorium Äspö, se figur 1-2. Tunneln gavs namnet TASS (Tunnel Äspö Site, tunnel id S). Projektets främsta syfte var att under kontrollerade former och på stort djup pröva den designmetodik samt den övriga kunskap och förståelse om metoder och material för injektering som resulterat ur de senaste decenniernas teknikutveckling för injektering. Projektet var således ett utvecklingsprojekt med huvudsaklig fokus på förståelse och inte på effektiv produktionsteknik.

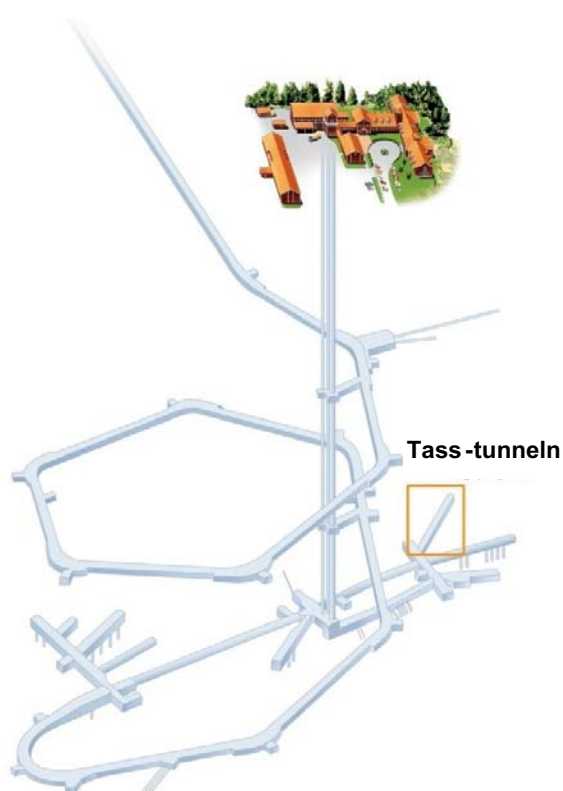
De täthetsmål samt övriga mål och restriktioner som sattes upp för injekteringen i fintättningsprojektet kan direkt relateras till de preliminära krav som avser slutförvarsanläggningens deponeringstunnlar. Vidare valdes sträckningen för tunneln så att den skulle förläggas i en bergmassa som liknar förvarsberg.



Figur 1-1. KBS-3-konceptet, vertikalt alternativ. Deponeringstunnlar byggs i kristallin bergmassa och deponeringshål borras i tunnarnas botten. Det använda bränslet kapslas in i tätta lastupptagande kapslar som deponeras i deponeringshålen och omges av en buffert av svällande bentonitlera. Bufferten förhindrar grundvattenflöde och skyddar kapslarna. Deponeringstunnlarna återfylls.

Med hänsyn till de stränga täthetskraven och de höga vattentrycken på förvarsdjup behövs för slutförvaret teknik för att tätta mycket fina sprickor. Från långsiktig säkerhetssynpunkt finns ett starkt uttryckt önskemål att använda ett injekteringsmedel vars lakvatten har pH lägre än 11. Lågt pH är önskvärt eftersom bentoniten i buffert och återfyllning annars riskerar att få försämrade svällförmåga. Vanligt cementbaserat injekteringsbruk penetrerar inte såpass fina sprickor som behöver kunna tätas och det genererar dessutom ett lakvatten med pH 13–14. SKB har därför tidigare genomfört studier av silica sol, som är ett medel som klarar att tränga in i fina sprickor och har lågt pH, samt tillsammans med Posiva utvecklat ett cementbaserat bruk med lågt pH för de större sprickor som behöver tätas /Bodén och Sievänen 2005/. I nämnda studie gjordes litteratursökningar och utreddes tänkbara sammansättningar av injekteringsmedel med hänsyn till såväl tätningseffektivitet, hanterbarhet, miljö- och hälsoaspekter som ekonomi. Resultatet vad gäller nya medel var dock magert och de nu valda injekteringsmedelstyperna var de enda som, med hänsyn främst till tänkt funktion, bedömdes motiverade att utveckla/undersöka vidare. Effekterna på miljö och hälsa för de valda medlen bedömdes också som acceptabla.

Delar av det arbete som redovisas i denna rapport har tidigare presenterats i en SKB R-rapport med titeln ”Injekteringen av TASS-tunneln, Delresultat t o m september 2008” /Funehag 2008/.



Figur 1-2. TASS-tunneln är belägen på 450 m nivån i SKB:s Äspöanläggning.

2 Mål och projektbeskrivning

2.1 Mål och omfattning

Projektet var ett utvecklingsprojekt och som grundförutsättning gällde att i princip alla data och observationer skulle dokumenteras; dels för att svara på de frågor som uttryckts explicit i projektmål, dels för att möjliggöra möjlighet till vidare teknikutveckling.

Projektets mål härleddes från det vid projektstarten gällande preliminära tillåtna inläckaget för en deponeringstunnel. Då tillåtet inläckage var mycket lågt var det givet att fintättningsmedel skulle behövas. Initieellt låg därför projektfokus på silica sol, också eftersom erfarenhet av silica sol injektering på aktuell djup helt saknades, men projektets mål kom även att omfatta det tidigare framtagna cementbaserade injekteringsmedlet med lågt pH.

I det av SKB utvecklade KBS-3-konceptet för slutförvar utgör bergmassan en barriär för migration av eventuella radionuklider och bergmassan ska därför hållas så intakt som möjligt. Det betyder att spridningen av och mängden injekteringsmedel ska hållas begränsad och att hål i den kvarstående bergmassan efter berguttag helst ska undvikas. Man beslöt därför att i projektet testa ett koncept där injekteringshålen skulle borraras helt innanför den planerade tunnelkonturen. Eftersom konceptet med injekterings-skärmar innanför kontur var helt nytt skulle först ordinära injekterings-skärmar utföras.

Som förutsättning gällde också att tunnelsektionen skulle vara så lik referensutförningen för en deponeringstunnel som möjligt. Vidare att de mellan skärmarna planerade berguttagen skulle utnyttjas för att utvärdera och förbättra en skonsam teknik för berguttag.

Projektet gavs följande prioriterade mål så som de dokumenterades i den ursprungliga projektplanen:

1. Bekräftelse av silica sols användbarhet vid det vattentryck som är aktuellt för deponeringstunnlar i slutförvaret.
2. Bekräftelse att det på slutförvarsdjup är möjligt att uppnå en täthet motsvarande ett maximalt inläckage på 1 l/min och 60 m tunnel med för slutförvaret tillämpbara injekteringsmedel.

Projektet gavs följande delmål som relaterade till de prioriterade målen:

- I. Bekräfta modeller för inträngning och att ökad täthet erhålls.
- II. Visa att täthet kan erhållas med injekterings-skärmar utanför konturen.
- III. Visa att täthet kan erhållas med injekterings-skärmar innanför konturen.
- IV. Visa att efterinjektering ger ökad täthet.
- V. Visa att dropp kan tätas bort med efterinjektering.
- VI. Identifiera gränserna för silica sols användbarhet vad gäller hydrauliska sprickvidder vid det grundvattentryck som är aktuellt för deponeringstunnlar i slutförvaret.
- VII. Identifiera de särskilda krav på genomförande och utrustning som krävs för att silica sol ska vara användbart.
- VIII. Erhålla övriga erfarenheter, bl a om genomförande och handhavande, som krävs för ett kontrollerat och effektivt utförande.

Under projektets genomförande gjordes en prioriteringsordning bland målen utifrån en närmare analys av slutförvarsprojektets behov. Vidare tillkom ett injekteringsrelaterat mål, att testa en särskild stufattning av tunnelns slutgavel, kallad ortavslut. Detta kom emellertid ej till utförande. Tunneln kom också att utnyttjas för mer ingående studier av den kvarstående bergväggen än vad som ursprungligen var planerat. Studierna innebar ett omfattande ingrepp i ena tunnelväggen men genomfördes som ett separat projekt.

Utgående från projektmålen formulerades krav på försöksplats. Dessa relaterade till hydrogeologi, sprickfrekvens och tillgänglighet, men även till övrig verksamhet på Äspö.

De potentiella försöksplatserna utvärderades enligt följande med punkt 1 som starkaste krav:

- 1) Längden på försöksplatsen bör vara minst 100 m. Ingen av de vattenförande sprickzonerna (NE-1, EW-1) på Äspölaboratoriet skall finnas inom 150 m från påslaget av tunneln.
- 2) Bergmassan skall ha sprickor enligt rangordningen:
 - a) Sprickorna skall gå så vinkelrätt som möjligt mot den planerade tunneln, 70–90 grader.
 - b) Försöksplatsen skall ha i medeltal fler än två sprickor per meter.
 - c) Sprickorna skall ha varierande hydraulisk sprickvidd men vara inom den nedre delen av intervallet 10–300 μm .
- 3) 25 meter in i berget bör trycket uppgå till minst 3,5 MPa.

2.2 Organisation

Fintättningsprojektet initierades inom ramen för den teknikutveckling för injektering som genomfördes av SKB:s dåvarande enhet för anläggningsutformning. Ett projekt sattes upp med beställarombud och beställarhandläggare från denna SKB-enhet och en extern projektledare från Tyréns.

Projektet delades upp i fem delprojekt med fem delprojektledare. Delprojekten var Förundersökning/ Bergkaraktisering, Projektering, Injektering, Berguttag samt Bygg. Delprojektledare från Chalmers fick ansvar för injektering och de injekteringsrelaterade målen. Delprojekt Förundersökning/ Bergkaraktisering var ansvarigt för genomförandet av den förundersökning med geohydrologisk prognos som låg till grund för slutligt platsval och den basdesign för injekteringen som upprättades före entreprenadarbetenas början, samt var vidare ansvarigt för tunnelkarteringen under drivningen. Delprojektet genomfördes med delprojektledare från Äspö/SwedPower och resurser från Chalmers. De hydrauliska undersökningar som gjordes under drivningen för anpassning av designen genomfördes inom ramen för delprojekt injektering. Delprojekt projektering med delprojektledare från Tyréns upprättade den övergripande bygghandlingen samt gav tekniskt stöd vid avrop från delprojekten. Delprojektledare berguttag, delprojektledare bygg samt stödfunktioner bemannades med resurser från Äspö. Delprojekt berguttag hade som mål att utveckla och visa på en process som skulle leda till en slät bergkontur med minimala skador. Detta delprojekt hade härvid ansvar för borrh- och sprängplaner. Delprojekt Bygg hade som huvuduppgift att leda entreprenören och samordna utförandet av de aktiviteter som specificerades av Berguttag respektive Injektering.

Beställarorganisationen kompletterades med en styrgrupp. Medlemmarna i gruppen representerade projektets forskningsmål, Äspöanläggningen, erfarenhet från komplexa anläggningsprojekt samt bergbyggnadskompetens. Gruppens uppgift var att ge stöd och rekommendationer inför beställarombudets beslut, samt att förankra projektet och dess resultat i SKB:s organisation. Vidare utsågs ett expertråd i bergteknik för projektledaren att kunna inkalla vid behov. Styrgruppen kom att spela en mycket aktiv roll vid de vägval projektet ställdes inför, medan det aldrig blev aktuellt att inkalla expertgruppen.

En referensgrupp etablerades för delprojekt Injektering som stöd för delprojektledaren. Medlemmarna representerade såväl forskningsmålet som akademisk och praktisk injekteringsexpertis för att kunna bidra med externa erfarenheter och konstruktiva synpunkter.

Entreprenören upphandlades i konkurrens. Ersättningen var huvudsakligen löpande baserad på à-priser för material och tid, med en fast ersättning för etablering. SKB gjorde själv vissa inköp som t ex injekteringsmedel och manschetter.

En projektplan upprättades som huvudsakligen beskrev arbetets organisering, administration, planering och rapportering, medan projektets tekniska innehåll beskrevs i delprojektplaner. Gemensamt för projektet var även miljöplanen som redovisade organisation för miljöplanering och miljösäkring samt projektets miljöaspekter och hantering av dessa. Det arbete som specificerades i delprojektplanerna bröts ner till aktiviteter som beskrevs i aktivitetsplaner. För delprojekt injektering upprättades även särskilda design-pm för varje skärm. För styrning av injekteringsarbetena, se vidare avsnitt 6.3.3.

2.3 Projektgenomförande

I detta avsnitt ges en översikt över projektets genomförande.

Projektet inleddes med en förstudie hösten 2006. Förstudien hade representation från de resurser från Äspölaboratoriet och från Chalmers som sedan kom att genomföra projektet. Förstudien resulterade i förslag på stegvis drivning av en knappt 100 m lång tunnel på 450-metersnivån i Äspö, uppdelad på fem injekteringsetapper. Även projektets omfattning och avgränsning diskuterades med hänsyn till andra frågeställningar som potentiellt skulle kunna studeras i samband med byggandet av tunneln. Det slogs fast att huvudprioritering skulle vara att testa injektering och att övrig teknikutveckling skulle inskränka sig till de aktiviteter som var nödvändiga för att driva tunneln. Berguttagen och sprängtekniken kom härvid att stå i centrum för den andra stora insatsen för teknikutveckling som gjordes inom projektet. En preliminär tunnelsträckning valdes baserat på tillgänglighet samt geohydrologiska faktorer som var direkt relaterade till projektets prioriterade mål.

Våren 2007 påbörjades projektets genomförandefas. Parallellt med att projektets organisation för styrning, detaljplanering och utvärdering upprättades, genomfördes utveckling av utrustning, förundersökningar och projektering längs den preliminärt valda tunnelsträckningen samt upprättades förfrågningshandling för upphandling av entreprenör. En projektplan upprättades där det poängterades att etapperna skulle komma att behöva anpassas mot de påträffade bergförhållanden samt efter erhållna resultat från tidigare etapper.

Förundersökningarna bekräftade den preliminärt valda platsens lämplighet och inledande tester av injekteringsmaterial, uppsatta samband och utrustning gjordes. Detta arbete genomfördes även i fält av delprojektledaren för injektering med kollegor från Chalmers. Samtidigt slutfördes förundersökningen med den detaljerade kärnkarteringen, oktober 2007.

Kontrakt med entreprenören skrevs i september och entreprenören etablerade sig på Äspö i oktober 2007. Arbetet tillsammans med entreprenören inleddes med introduktion och utbildning. Syftet var att säkerställa att manskapet förstod arbetenas syfte, eftersom projektets fokus ej var på framdriften, som i ”vanliga projekt”, utan på tätningsresultatet och vägen dit. Vidare att introducera silica sol och den hantering detta medel kräver samt att etablera en förståelse för betydelsen av arbetenas och dokumentationens kvalitet som en grundläggande förutsättning för ett framgångsrikt projekt. Den första injekteringsskärmen borrades i november 2007.

Principen för uppläggning av arbetsetapperna var att varje etapp skulle bestå av två geometriskt lika skärmar med berguttag efter varje skärm. Efter varje etapp skulle kartering och mätvallar göras så att inläckaget till varje enskild etapp skulle kunna utskiljas. Med hänsyn till resultat och andra aktiviteter på Äspö kom etapperna genom projektets egen planering men också genom styrgruppens beslut att bli variationer på detta upplägg, främst genom tillägg av omfattande insatser för sulrensning och kartering av inläckage.

Sommaren 2008, när fyra skärmar hade gjorts, utgjorde TASS-tunneln plats för ett annat projekt. Detta projekt syftade till att undersöka sprickutbredningen i det efter berguttaget kvarstående berget (EDZ – Excavation Damaged Zone). Efter diskussioner om vilken teknik som kunde tillåtas för att inte störa förhållandena för injekteringstesterna togs åtta bergblock ut ur tunnelväggen med hjälp av linsågning /Olsson et al. 2009/.

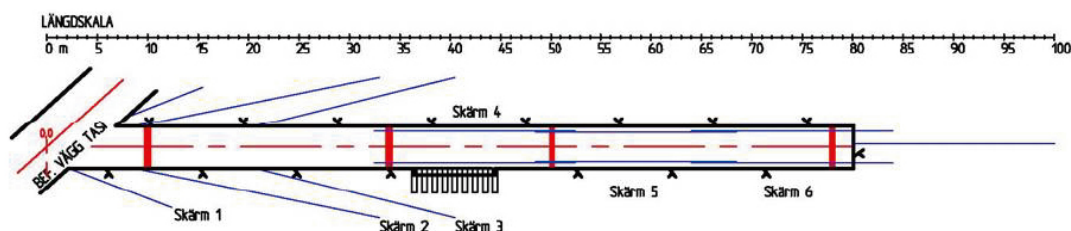
Sommaren 2008 genomfördes en omfattande rensning och läckagekartering av sulan. Detta gjordes som en förberedelse för att designa en systematisk efterinjektering av sträckan med skärmar utanför kontur (etapp 2 skärm 2 och 3) eftersom inläckaget var högre än målet. Karteringen resulterade dock i att punktläckage kunde identifieras och åtgärdas lokalt varför systematisk efterinjektering ej kom att utföras här.

Efter berguttag visades att inläckaget längs den första skärmen innanför kontur (etapp 3, skärm 4) ej uppfyllde målet. Designen ändrades därför för påföljande skärm innanför kontur (skärm 5), och man fattade därefter beslutet att göra en till skärm (skärm 6) lik skärm 5. Vidare byggdes en extra mätvall för att avgränsa sträckan längs skärm 4.

I december 2008 nådde tunneln sektion 81 m. Inläckaget till avsnittet med skärmar utanför kontur (10–33 m) liksom inläckaget till avsnittet med skärmar innanför kontur med den nya designen (48–80 m) uppfyllde respektive mål, räknat som en proportionell andel av det tillåtna inflödet 1 liter per 60 m

och minut. Projektet hade fortfarande inte prövat efterinjektering och ett tillkommande mål, att avsluta tunneln med en särskild stuffinjektering, kallad ortavslut, kvarstod också. Tanken med denna åtgärd var att följa upp en iakttagelse att en oproportionerligt stor andel av inläckaget till tunneln föreföll komma från tunnelns front (stuffen) och att därför göra en särskild tätning av stuffen vid tunnelavslut. Prognosen indikerade dock tätt berg framför tunnelns front, vilket innebar att erfarenheterna från ett ortavslut i aktuellt läge med påföljande berguttag till ”slutlig front” antagligen skulle bli ringa. För att styrka prognosen sattes kriterier för fortsättning upp baserade på resultat från hydrauliska tester från borrhål i aktuellt berg. Baserat på kriterierna och resultaten beslöts att avsluta tunneldrivningen i aktuellt läge. Vidare beslöts att efterinjektera sträckan längs skärm 4 (33–48 m). Efterinjekteringen påbörjades i mars 2009 och ingår ej i denna rapport. I figur 2-1 visas schematiskt utförda skärmar och den resulterande tunneln. I figur 2-2 visas TASS-tunneln med en injekterings-skärm som är borrade och klar för injektering.

Genomförandet av varje enskild injekterings-skärm med hydrauliska tester, stuffhål och tre borrhåls-omgångar tog 3–4 arbetsveckor (en-skift och femdagars arbetsvecka) i anspråk. Tid för ett berguttag om 4 stycken 4 m långa salvor var ca 2 arbetsveckor. Med 6 berguttag och lika många injekterings-skärmar innebär detta att närmare hälften av kalendertiden mellan entreprenörens etablering och avetablering åtgick till annat än själva drivningen och tätningen av tunneln. I tabell 2-1 ges en översikt över projektaktiviteterna i tunneln och tidpunkterna för deras genomförande.



Figur 2-1. Planskiss över TASS-tunneln. Förinjekterings-skärmarna är markerade med blått, mätvallarna med rött. Markeringen med svart mitt för skärm 4 avser borrhål och blockuttag för undersökning av sprickutbredning (EDZ). Längdmätningen utgår från TASI-tunneln och påslaget är vid 4,47 m. Riktningen anges i Äspö96.



Figur 2-2. TASS-tunneln med borrade och manschetterad injekterings-skärm.

Tabell 2-1. Etappindelning och projektaktiviteter i TASS-tunneln. Ordinarie tunnelkartering gjordes efter varje berguttagsetapp och redovisas inte här.

Datum	Sektion	Aktivitet
Februari 07		Förberedelser i TASI, installationer, skydd etc
Mars–juli 07		Förundersökningar tre kärnborrhål med hydrauliska tester
	Stuffläge 4 m	Etapp 1
Juli–oktober 07	4 m	"Korset"; inledande tester av uppsatta samband, material och utrustning för injektering
Oktober–november 07		Förberedande arbeten Utbildning av entreprenören
November–december 07	4 m	Skärm 1
December 07	4–8 m	Berguttag 1
	Stuffläge 8 m	Etapp 2
Januari–februari 08	8 m	Skärm 2 raketmätning av hålen i omgång A
Februari 08	8–20 m	Berguttag 2
	Stuffläge 20m	
Februari–mars 08	10 m	Mätvall 1 byggs
Mars 08	8–20 m	Droppkaraktisering
Mars–april 08	20 m	Skärm 3
April 08	20–33 m	Berguttag 3 (3 salvor)
April–maj 08		Droppkaraktisering
	Stuffläge 33 m	Etapp 3
Maj 08	33 m	Skärm 4
Maj 08	8–20 m	Droppkaraktisering
Juni 08	33–49 m	Berguttag 4
	Stuffläge 49 m	
Juni–juli 08	34 m	Mätvall 2 byggs
Juli 08	8–33 m	Droppkaraktisering
Juli 08	10–33 m	Läckagekartering av sula
Juli–augusti 08	36–44 m	EDZ-uttag
Augusti 08	20 m	Kompletterande injektering av läckande sulhål
Augusti–september 08	49 m	Skärm 5 rakhetsmätning av alla hål
September 08	10–33 m	Sulan iordningsställs med makadam o fiberduk
September 08	48–64 m	Berguttag 5
	Stuffläge 65 m	
Oktober 08	48 m	Mätvall 3 byggs
Oktober 08	34–50m	Droppkaraktisering
November 08	64 m	Skärm 6 rakhetsmätning av alla hål
December 08	64–80 m	Berguttag 6 inmätning av injekteringshålens position i tunneln efter varje salva
	Stuffläge 81 m	Etapp 4
December 08	78 m	Provisorisk mätvall byggs
Januari 09	81 m	Stuffhål inflödesmäts.Beslut om avslutning av tunneln. Stuffhålen injekteras
Februari 09	50–81 m 32–52 m	Droppkaraktisering
Mars 09	78 m	Provisorisk mätvall bedöms tät, permanentas och kallas Mätvall 4

2.4 Redovisning av projektets resultat

Projektets resultat hittills redovisas primärt i fyra stycken SKB R-rapporter. Två av dessa avser injektering, två avser berguttagen. De första rapporterna för respektive disciplin begärdes som särskilda delrapporteringar. Föreliggande rapport täcker in projektets samtliga förinjekteringsskärmar, alltså även de som tidigare redovisats. Design, utförande och resultat från efterinjekteringen kommer att presenteras i en egen rapport. För en mer detaljerad redovisning av förundersökningarna och tunnelkarteringarna hänvisas till två andra rapporter, se vidare tabell 2-2.

Tabell 2-2. Rapporter från projektet.

IPR-08-18 , The TASS-tunnel project "Sealing of tunnel at great depth". Geology and hydrogeology – Results from the preinvestigations based on boreholes KI0010B01, KI0010B01 and KI0010B01
R-08-122 , Berguttag i TASS-tunneln. Delresultat t o m september 2008
R-08-123 , Injekteringen av TASS-tunneln. Delresultat t o m september 2008
R-10-31 , Berguttag i TASS-tunneln. Slutrapport / #Slutrapport från drivningen av TASS-tunneln/
R-10-35 , Äspö Hard Rock Laboratory. The TASS-tunnel. Geological mapping
R-10-39 Injekteringen av TASS-tunneln. Design, genomförande och resultat från förinjekteringen (föreliggande rapport)

3 Teori och metoder

3.1 Använda begrepp

Nedan listas några injekteringsrelaterade begrepp med en beskrivning av deras betydelse i föreliggande rapport.

Injekteringstryck	Injekteringstryck används i denna rapport i betydelsen totaltryck, d v s injekteringstrycket är det vid pumpen pålagda trycket. Injekteringstryck är således summan av injekteringsövertrycket och motstående grundvattentryck ($P_{tot} = \Delta P + P_{grv}$).
Återflöde, ytläckage	Återflöde är injekteringsmedel eller vatten (vid vattenförlustmätning) som flödar tillbaka in i tunneln, antingen genom sprickor i bergytan ("ytläckage") eller genom borrhål ("samband"). I injekteringsprotokollen används "återslag" synonymt med återflöde.
Effektivt injekterad volym	<p>Effektivt injekterad volym är den registrerade volymen minus borrhålsvolymen.</p> <p>Före injekteringsstart fylls slangen med injekteringsmedel. Därefter slås registreringen på samtidigt som manschetten öppnas och injekteringen startar.</p> <p>Vid beräkning av den effektivt injekterade volymen tas ingen hänsyn till eventuellt återflöde av injekteringsmedel genom sprickor eller sambandshål. Den effektivt injekterade volymen är inte nödvändigtvis den volym som stannat kvar i bergmassan, men när ytläckage eller samband observeras noteras detta i injekteringsprotokollet.</p> <p>Den volym som står i injekteringsprotokollen i bilagorna är den registrerade volymen.</p>
Injekteringstid	Injekteringstiden startar när registreringen slås på, manschetten är öppen och ett flöde och/ eller tryck har registrerats. Injekteringstiden slutar när pumpen slås av.
Effektiv injekteringstid	Den effektiva injekteringstiden startar när manschetten är öppen, och designtrycket uppnåtts, och varar den tid som designtrycket hålls. Det innebär att borrhålet är fyllt innan den effektiva injekteringstiden börjar.
Injekteringsteknik	Används i rapporten i betydelsen injekteringstryck och effektiv injekteringstid, d v s det som i utförandet "verkställs" med pumpen. Jämför "skärmgeometri" som i utförandet "verkställs" med bormaskinen.
Injekteringsdesign	Injekteringsdesignen definierar injekteringstekniken, skärmgeometrin och injekteringsmedlet, samt kontroller och åtgärder.
Tätt borrhål	Projektets kriterium för att betrakta ett kontrollhål som tätt var ett naturligt inflöde mindre än 0,1 l/min till hålet.
Basdesign	Basdesignen är den som finns när skärm 1 påbörjades. Den är baserad på förundersökningarna och kompletterades efter korset. Ingen "uppdaterad basdesign" förekommer. Vi gör anpassningar och förändringar som kan vara varaktiga eller tillfälliga.

3.2 Beskrivning av iterativt arbetsätt

För en ordinär tunnelinjektering indelas berget ofta i klasser och olika injekteringsutföranden tillskrivs respektive klass. Med hänsyn till projektets syfte valdes istället att göra en basdesign med ett antal variabla parametrar, som väljs utifrån aktuella hydrauliska data i injekteringshål och kontrollhål. Basdesignen baseras huvudsakligen på förundersökningarna och data om platsen som fanns sedan tidigare, men kompletterades baserat på erfarenheterna från ”korset” i etapp 1. Den definierar geometri på injekteringskärmens inklusive borrhålsavstånd; injekteringstryck, effektiv injekteringstid samt injekteringsmedel. Basdesignen beskriver även de kontroller som genomförs för att anpassa design och injekteringsteknik till den under arbetet ökande kännedomen om lokala bergmasseförhållanden och successivt uppnådda resultat. Dessa anpassningar görs enligt i förväg fastlagda kriterier. Det övergripande arbetsättet är beskrivet i tabell 3-1. De särskilda anpassningar som förutsågs med hänsyn till geometriska förutsättningar (snett tunnelpåslag, närhet till annat experiment) ligger definitionsmässigt utanför basdesignen.

Osäkerheten som motiverar det iterativa arbetsättet föreligger dels i kännedomen och beskrivningen av bergmassan, dels i de uppsatta samband som beskriver själva injekteringsförloppet. Beskrivningarna och sambanden bygger på stickprov och förenklingar. Därigenom finns också en osäkerhet i den resulterande tätheten i bergmassan efter injektering. Likaså är kopplingen mellan tätheten i berget och inflödet till tunneln inte helt enkel. Därför behöver såväl antaganden som resultat successivt följas upp.

Tabell 3-1. Bergets genomsläpplighet samt injekteringen och dess verkan kontrolleras före, under och efter injekteringen. Arbetsättet förutsätter att det finns en design baserad på förundersökningresultaten. Tabellen utgår från /Emmelin et al. 2007/ och är anpassad till projektets syften.

När	Krav	Observation,	Åtgärd
Före injektering	Inflöde och sprickkaraktäristik ska överensstämma med den prognos som låg till underlag för basdesignen. <i>Kriterium 1</i>	Hydrauliska data och sprickdata från injekteringshålen	Vid överensstämmelse väljs variabla parametrar enligt satta kriterier. Vid icke överensstämmelse görs särskild anpassning av basskärm.
Under injektering	Flöde vid aktuellt tryck och total volym ska överensstämma med det som förväntats i aktuell design <i>Kriterium 2</i>	Registrerade tryck – volym – flödeskurvor, återflöde in i tunneln	Anpassa åtgärden, i första hand genom anpassning av variabla parametrar
Efter injektering, före berguttag	Täthet i den injekterade bergmassan ska överensstämma med den erforderliga täthet som beräknats <i>Kriterium 3</i>	Inflöde i kontrollhål	Ytterligare injekteringsomgång, omfattning enligt satta kriterier
Efter berguttag	Verkligt inflöde till tunneln ska vara lägre än kravvärdet <i>Kriterium 4</i>	Inflöde i mätvall och droppkartering	Efterinjektering, åtgärdande av läckande hål

Arbetsättet har likheter med observationsmetoden. Observationsmetoden är tillämplig i situationer där man måste basera designen på osäkra data och samband. Den innebär också att en design upprättas baserad på de förväntade förhållandena och att man under arbetet kontrollerar att de antaganden man gjort avseende bergförhållanden och förväntade resultat stämmer. Om så ej är fallet vidtas en i förväg definierad åtgärd. Observationsmetoden är beskriven i Eurocode /SS-EN 1997-1:2005/. Villkoren för en strikt tillämpning återges bl a i /Emmelin et al. 2007/. Där ges också en första tolkning av hur metoden kan tillämpas på injektering.

Tabell 3-1 förutsätter att det finns en grundförutsägelse om bergförhållandena, upprättad från befintliga data och förundersökningar. Denna anges i tabellens första rad ”Före injektering”. Förutsägelsen avser den oinjekterade bergmassan; genomsläpplighet, sprickkaraktäristik och det inflöde denna skulle ge. För att kontrollera förutsägelsen (kriterium 1) utnyttjas hydrauliska data från injekteringshålen. Insamlad hydraulisk data får genom uppsatta samband representera såväl genomsläpplighet, sprickkaraktäristik som hypotetiskt inflöde, eftersom inga av dessa sökta storheter går att direkt mäta.

Hydrauliska data används också för att bestämma aktuella värden på basdesignens variabla parametrar. Detta styrs av i förväg uppsatta gränser. Om data skulle ligga utanför de uppsatta gränserna är basdesignen inte giltig och en särskild anpassning behövs.

Tabellens andra rad ”Under injektering” anger kontroll av injekteringsförloppet. I designarbetet har man valt en lämplig kombination av injekteringsmedel, pumptryck och tid som ska ge den erforderliga spridningen av injekteringsmedlet i berget, d v s man har gjort en prognos av hur detta sker och ungefär hur mycket medel som kommer att gå åt. Avvikelser utanför det förväntade under utförandet (kriterium 2) indikerar att prognostiserat resultat inte kommer att uppnås och att anpassning av utförandet behövs.

En injekteringsskärm kan byggas upp av en eller flera omgångar. Antalet omgångar är i den valda basdesignen minst två och maximalt tre, där omfattningen av den andra och tredje omgången är villkorat av resultaten från omgången innan, allt i syfte att uppnå en viss i designen ansatt täthet i bergmassan. Kontrollerna i tabellens tredje rad, ”Efter injektering, före berguttag” syftar till att bekräfta uppnådd täthet i den injekterade bergmassan (kriterium 3) för att avgöra behovet och omfattningen av ytterligare omgång. Hydrauliska data hämtas från de kontrollhål som borras.

Så länge resultaten av kontrollerna ligger innanför gränserna och basdesignen kan följas antas att den ursprungliga prognosen av bergmassan varit god och att designen fungerar ihop med denna. Det är dock inte förrän efter berguttaget som måluppfyllelsen (kriterium 4) kan kontrolleras direkt, genom att mäta inflödet i mätdammar. Som implicit förutsättning för hela arbetssättet ligger valet av förinjektering, d v s att injektera bergmassan innan berget tas ut. Det omvända, efterinjektering, d v s att injektera bergmassan efter att berget tagits ut, är en svårare operation, ett faktum som särskilt motiverar kontroll av resulterande täthet i den injekterade bergmassan före berguttaget.

Från kontrollhål erhålls således indikation på ökad täthet i den injekterade bergmassan under pågående injekteringsarbete. Mätvallar byggs vid etappgränserna för att kunna mäta inläckaget från respektive injekteringsstapp efter utsprängningen av etappen. För en ytterligare förståelse av resultatet mäts och analyseras även taktropen.

Undersökningsmetoder som använts i projektet för att ge den grundförutsägelse om bergförhållandena och de uppdaterade beskrivningarna av bergets täthet som behövs för att arbeta enligt tabell 3-1, redovisas i avsnitt 3.3. De teorier och metoder som använts för att designa injekteringen samt ange de kriterier som styr anpassningen redovisas i avsnitt 3.4. Metoder för kontroll och analys av det resulterande inläckaget redovisas i avsnitt 3.5.

3.3 Undersökningsmetoder

3.3.1 Undersökningsmetoder för geohydrologisk prognos

Omfattningen och innehållet i de undersökningar som gjordes i förundersökningen och under utförandet av injekteringsarbetet har en klar koppling till de preliminärt bedömda bergförhållandena, kraven på den tunnel som ska byggas och därmed den valda designmetodiken. I projektet skulle förundersökningen också bekräfta den preliminärt valda platsen.

Den valda designmetodiken bygger på en karakterisering som innehåller en beskrivning av sprickförekomst, sprickorientering och hydrauliska sprickvidder. För att uppskatta dessa har nedanstående metoder använts och analyser gjorts.

Kärnbörning, BIPS och kärnkartering

I projektet användes data från kärnborrhål som underlag för att identifiera sprickor samt deras egenskaper. Genom att korrelera data från flera kärnborrhål kunde också sprickorienteringar prognostiseras.

Kärnbörning utfördes med en borrdiameter på 76 mm som yttre mått. Kärndiametern var 50 mm. I de yttersta delarna av kärnborrhålen installerades 2,3 m långa foderrör (även kallat casing). Karteringen av kärnorna följde SKB:s standard för kartering med hjälp av programmet Boremap där bilder från BIPS (Borehole Image Processing System) användes som underlag för att kartera

bergart, sprickor och sprickfyllnad. BIPS-undersökning, innebär att en filmkamera förs in i kärnbronnhålet, vilket möjliggör detaljerade studier av bronnhålsväggen. Utrustningen innehåller även ett orienteringsverktyg som ger möjlighet att orientera de sprickor som syns i bilden och som återfinns i kärnan. Se vidare /Hardenby et al. 2008/.

Tunnelkartering

Tunnelns sula, tak och väggar karterades med avseende på bergarter och sprickor enligt Äspöstandard. Denna innebär att sprickor som är längre än 0,5 m i skärningen med tunnelns periferi karteras avseende läge, orientering och sprickfyllnad. Vidare karterades tunnelns front efter varje salva, dock med en lägre noggrannhet. Taket karterades visuellt från tunnelsula. För att möjliggöra kartering av sulan rensades denna efter varje bergguttagsomgång (3–4 salvor). För en mer detaljerad beskrivning av omfattning och utförande hänvisas till /Hardenby och Sigurdsson 2010/.

Mätning av inflöde och grundvattentryck

Grundvattentrycket och bergmassans genomsläpplighet styr inflödet till ett bronnhål och till en tunnel. Med inflöde till ett bronnhål och grundvattentrycket kan bergmassans transmissivitet beräknas och utifrån denna den hydrauliska sprickvidden (se avsnitt 3.4.2). Trycket behövs också för att avgöra vilket injekteringsstryck som behöver användas med hänsyn till spridning och erosion av injekteringsmedlet.

Huvudsakligen tre typer av inflödesmätningar gjordes:

- (1) helhålmätningar, med successivt ökande längd (3 m) alternativt enbart färdigborrat hål, ”naturligt inflöde”.
- (2) mätningar i 3-meterssektioner, ”dubbelmanschettmätning”.
- (3) mätningar i 1-meterssektioner med steg 0,1 m, ”PFL” (Posiva Difference Flow Logger, se nedan).

Grundvattentrycket registrerades

- (4) som icke stabiliserat tryck i samband med (1) enligt ovan.
- (5) som stabiliserat grundvattentryck i samband med (2 och 3) enligt ovan.

Vid helhålmätningar av det successivt allt längre bronnhålet (1) mättes det naturliga inflödet vid kärnupptag respektive skarvning av borrstål, det vill säga ca var tredje meter, vilket innebär att data erhöles från ett successivt allt längre ”helt hål” (mätlängd 3, 6, 9 m etc).

Med ”det naturliga inflödet” avses det vatten som rinner in till bronnhålet vid mätfallet. En uppblåsbar manchett monteras ytligt i bronnhålet och bronnhålet fylls vid behov med vatten. Aktuellt tryck avläses på en manometer som är monterad på manschetten. Flödet genom manschetten mäts genom att samla upp vattnet i ett graderat mätkärl under en viss tid och räkna ut flödet. Mätområdet i denna metod är från några droppar till flera tiotals liter beroende på tillgänglig tid samt till hur stort och noggrant kärl man kan använda. Efter avklarad mätning demonteras manschetten och borringen fortsätter.

Helhålmätningar med successivt ökande längd gjordes i samtliga kärnbronnhål. Dessutom gjordes helhålmätningar av färdigborrat hål i samtliga övriga injekteringshål och kontrollhål.

För kärnbronnhålen gjordes helhålmätningar av inflödet vid varje kärnupptag vilket skedde ca var tredje m. Stationära flöden inväntades ej eftersom dessa mätningar endast användes för att få en bekräftelse på förekomsten av vattenförande strukturer och en första uppfattning om bergmassans transmissivitet och hydrauliska sprickvidder.

För mätningar i 3-meterssektioner (2) användes Äspö:s Underground Hydraulic Test System (UHT-1). Testsektionen avgränsas av två uppblåsbara manschetter och mätmetoden kallas också dubbelmanschettmätning. Efter det att manschetterna blåsts upp inväntas stabilisering och trycket mäts i bergmassan med digital tryckmätare. Medan flödesmätning sker hålls trycket i sektionen konstant 1,0 MPa under det naturliga. Mätområdet för UHT-1 utrustningen är ca 0,006–60 l/min. Dubbelmanschettmätningar gjordes i samtliga tre kärnbronnhål.

Mätningar i 1-meterssektioner med steg 0,1 m (3) möjliggör flödesbestämningar för 0,1-meterssektioner och därmed kan även lägena för inflödena bestämmas. Mätningarna utfördes med Posiva difference Flow Logger (PFL). PFL har två manschetter med ett inbördes avstånd på 1,0 m och manschetten flyttas 0,1 m åt gången, därav namnet difference Flow Logger. Mätområdet är ca 0,002–5 l/min. PFL utnyttjades i enbart ett kärnbronnhål.

Mätning av inflöden med både PFL och dubbelmanschett innebär att två uppsättningar inflödesdata erhöles. För designen användes flödena från dubbelmanschettmätningarna för att bestämma den hydrauliska sprickvidden medan PFL-mätningarna gav lägena på inflödena och även kompletterande information om spannet på förekommande sprickvidder.

Mätning av grundvattentryck som stabiliserat grundvattentryck i helhål med successivt ökande längd om 3 m var planerat i samtliga kärnborrhål. Att mäta stabiliserat grundvattentryck är dock mycket tidskrävande; ju mindre flöde i sektionen desto längre behöver man vänta för att få en rättvisande tryckregistrering. På detta och inverkan på närliggande experiment kom omfattningen av stabiliserade mätningar att bli mindre än vad som ursprungligen var planerat. Stabiliserat grundvatten tryck mättes som helhålmätningar med 10 m intervall i det först utförda kärnborrhålet. I nästkommande hål gjordes mätningförsök men på grund av hydrauliskt samband med det tidigare borrade kärnhålet erhöles få användbara data och på grund av därmed ökat tryck och flöde i ett närliggande experiment gjordes inga stabiliseringsförsök i det tredje borrhålet.

Transmissiviteten, T från flödet, Q och sektionstrycket, Δh mätt med PFL utvärderas med Moyes formel enligt (Gustafson, 2009)

$$T = \frac{Q}{2\pi \times \Delta h} \left[1 + \ln \left(\frac{L}{2r_w} \right) \right] \quad (3-1)$$

där L =sektionslängd och r_w =borrhålsradien.

Vattenförlustmätningar

En vanlig metod för att utvärdera hydrauliska egenskaper i borrhål är vattenförlustmätningar, (VFL). Istället för att mäta det naturliga inflödet till borrhålet mäts flödet som pressas in i borrhålet under visst konstant tryck. Detta liknar en injektering och en annan benämning på vattenförlustmätning är injektionstest. Med använd utrustning kan värden mellan 0,1 och 50 l/min läsas av men vid vattenförluster under ca 5 l/min blir mätnoggrannheten allt sämre och vid värden under 1 l/min kan felet uppgå till mer än 100 %. För uppskattning av storleken på små flöden gjordes en kontroll baserat på vikten av vattnet som gått in borrhålet.

Vattenförlustmätningar utfördes i samtliga injekteringshål och kontrollhål. Injekteringsriggen användes för dessa mätningar. Injektionsövertrycket var 0,3 MPa och flödet mättes under 3 minuter. Vattenförlustmätningen användes för 1) bedömning av hur stora bruksblandningar som kommer att gå åt under injekteringen, 2) bedömning av vilka borrhål som har hydraulisk kontakt samt 3) för bedömning av ytliga slag och sprickor.

Tryckupbyggnadstester

Tryckupbyggnadstester (TUT) användes för att utvärdera en mer global genomsläpplighet av bergmassan samt ge underlag för förståelse hur vattnet flödar (1-, 2- eller 3-dimensionellt). Vid tryckupbyggnadstester används en manchett, utrustning för flödesmätning samt digital tryckmätare med logger. Manschetten öppnas och tidpunkten noteras. Vatten får nu rinna ut fritt under en längre tidsperiod, 6–12 timmar (ju större flöde desto kortare tid). Efter denna tidsperiod mäts flödet och manchetten stängs. Tidpunkt noteras. Trycket börjar stiga. Tryckstegringen registreras och en tryckupbyggnadskurva erhålls. Helst vill man att trycket skall nå det naturliga trycket i berget; registreringen av tryckupbyggnaden görs dock inte under längre tid än den tid som avsänkningen varat.

Tryckupbyggnadstester gjordes i samtliga kärnborrhål samt i ett injekteringshål. Tryckupbyggnaden tillsammans med flödet användes för att utvärdera transmissivitet samt magasincoefficiënt och skinfaktor.

Transmissiviteten, T , bestäms från återhämtningsfasen från ett tryckupbyggnadstest med Jacob's metod /Cooper och Jacob 1946/. Återhämtningen, s'' , uttrycks enligt:

$$s'' = \frac{Q}{2\pi T} \frac{1}{2} \left(0.8091 + \ln \frac{T}{r^2 S} \cdot \left(\frac{t_{PB} \cdot t_p}{t_{PB} + t_p} \right) \right) = \frac{Q}{4\pi T} \left(0.8091 + \ln \frac{T t_e}{r^2 S} \right) \quad (3-2)$$

där r =radiellt avstånd, S =magasinkoefficienten och Q = flödet se t ex /Gustafson 1986/. Den justerade tiden, t_e , bestäms från tiden då flödet läts rinna fritt kallad flödestid, t_p , och tiden från det att återhämtningen startade, alltså tryckupbyggnadstiden, t_{PB} . Till att börja med plottas återhämtningen, s'' och den justerade tiden, t_e i log-log diagram för att utvärdera flödesdimensionen. Kurvutseendet återspeglar flödesdimensionen, se t ex /Carlsson och Gustafson 1991, Doe och Geier 1990/.

Jacob's metod består sedan i att plotta återhämtningen, s'' , och den justerade tiden, t_e i ett semi-logaritmiskt diagram. Transmissiviteten utvärderas sedan med,

$$T = \frac{0,183Q}{\Delta s''} \quad (3-3)$$

där $\Delta s''$ är lutningen på återhämtningslinjen i diagrammet s'' mot t_e (oftast används avsänkning för en dekad (t_1 to $10t_1$)). Den specifika kapaciteten, Q/dh utvärderas också.

3.3.2 Kontroll av grundvattenkemi

I projektet utfördes en omfattande vattenprovtagning. Syftet var att undersöka det hydrogeokemiska tillståndet i området för att kunna definiera den vattenkvalitet (salthalter, alkaliska jordartsmetaller, organiska halter/föroreningar) som råder vid försöksplatsen samt att kontrollera eventuell kolloidbildning som skulle kunna spåras till projektområdet.

Ett förenklat provtagningsförfarande användes jämfört med de sedvanliga monitoringsmetoderna på Äspö för att inte störa den rådande tid- samt aktivitetsplanen för huvudprojektet. Vattenprover om minst 1 liter togs för vidare hantering på laboratorium. Under drivningstidens första halvår så förelåg ett strålskydds-föreläggande som innebar att grundvattenprover måste friklassas innan de kunde tas ut ur anläggningen och hanteras vidare. Prover kunde därmed behöva stå i tunneln under upp till 1 dygn innan de kunde föras vidare till laboratorium för analys.

Det koncept som användes för att identifiera förhöjda halter kolloider var en två-stegs princip med två olika analysmetoder. Först kördes proverna i en PCS (Photon Correlation Spectroscopy) som mäter partiklar i lösning i storleksordningen 10–2 000 nm. Så länge storleksfördelningen är konstant i provet så är mätsignalen proportionell mot kolloidkoncentrationen. Om analysen indikerade kolloider i provet, det vill säga signalen var signifikant högre än bakgrunden, så var nästa steg att analysera provet med hjälp av SPC (Single Particle Counter). Koncentrationen av kolloidala partiklar kan mätas i fyra distinkta kanaler eller storleksfraktioner: 50–100, 100–150, 150–200 samt > 200 nm. I det fall som antalet kolloider kunde identifieras i varje storleksfraktion (kanal i instrumentet) så rapporterades koncentrationen som partiklar per milliliter (partiklar/mL).

För analyser av salthalter, främst klorid, användes LC (Liquid Chromatography). För huvudkomponenter samt metaller (inkl Si) användes ICP (Inductively Coupled Plasma) där provet hettas upp till en plasma och gaserna kan analyseras avseende som jon-innehåll.

3.4 Teori och metod för injekteringsdesign

3.4.1 Beskrivning av metod för injekteringsdesign

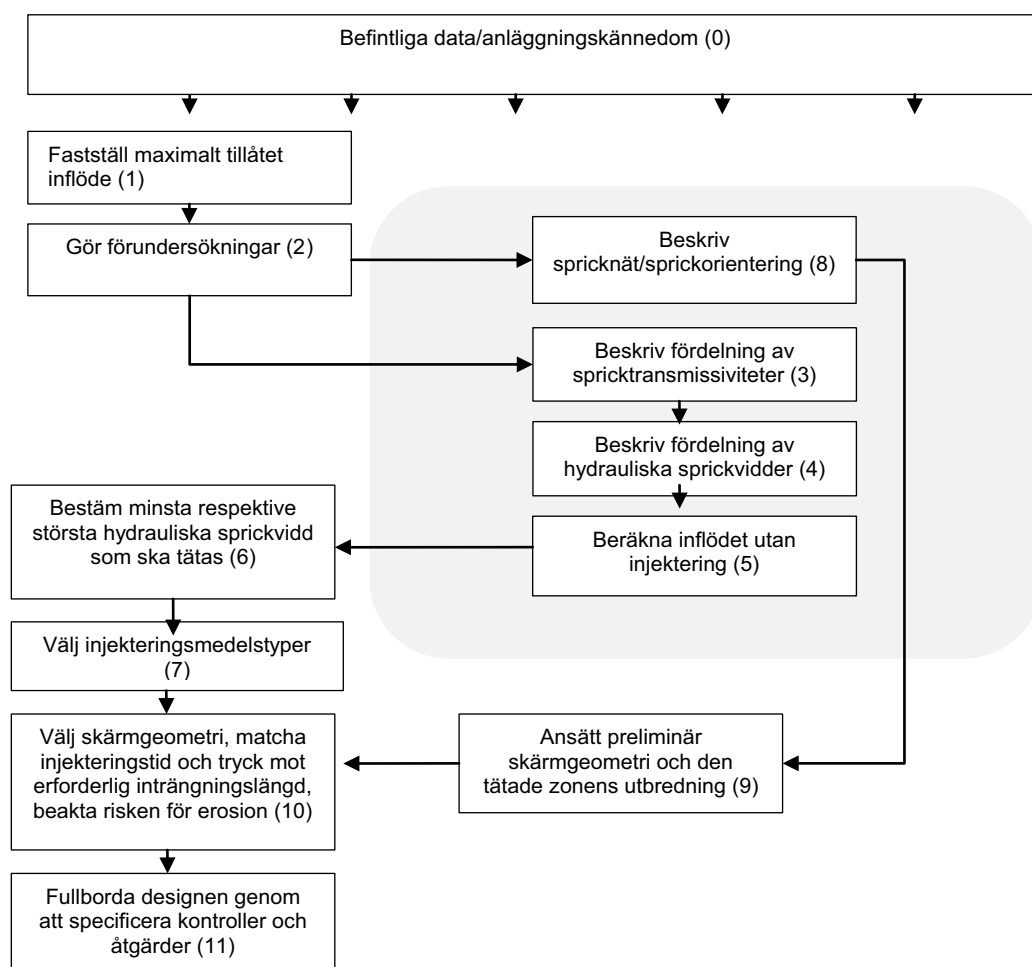
Den metod som användes för att designa injekteringen grundar sig i kännedom om förekomsten av sprickor och egenskaperna hos sprickorna i den bergmassa som ska tätas. Metoden presenteras nedan och finns även redovisad i /Fransson 2008/ som också redovisar projekt där metoden eller delar av metoden tillämpats.

Utifrån tillåtet inläckage samt sprickviddsfördelning beräknas vilket intervall av sprickor som ska tätas. Inträngningen i dessa måste vara tillräckligt lång för att ge en tätad zon runt den planerade tunneln. Den nödvändiga inträngningslängden beror även av den skärmgeometri som väljs. Inträngningslängden kan beräknas utifrån hydraulisk vidd, injekteringstid och tryck.

Ju tätare den planerade tunneln ska vara, desto finare sprickor behöver tätas. Förundersökningens omfattning beror därför bland annat av täthetsmålet. Eftersom utvärderingen av förundersökningen ska ge de indata som behövs för att upprätta designen, är utvärderingsmetodiken följaktligen en del av designmetodiken.

I flödesschemat figur 3-1 redovisas de arbetsmoment som ingår i den använda metodiken för att upprätta basdesignen. Generell input till designen är sedan tidigare existerande kunskaper om bergmassan samt data om den anläggning som ska byggas (moment 0, figur 3-1). Utgångspunkten är det tillåtna inflödet för den planerade anläggningen (moment 1). Metodbeskrivningar för de undersökningsmetoder som ingick i förundersökningen (moment 2) i detta projekt återfinns i avsnitt 3.2.

Förundersökningarna från kärnborrhål ger data i form av sprickfrekvens längs kärnborrhålet samt sektionsvis inflöde. Dessa data bearbetas och analyseras statistiskt i syfte att beskriva sprickförekomst och genomsläplighet med hjälp av statistiska fördelningar (moment 3 och 4). Utifrån dessa uppskattas inflödet till den oinjekterade tunneln (moment 5). Därefter görs en beräkning av hur fina sprickor som måste tätas för att täthetsmålet ska uppnås och även den största förväntade hydrauliska sprickvidden identifieras (moment 6), som underlag för val av injekteringsmedel (moment 7). Sprickornas orientering relativt tunneln beskrivs (moment 8) så att injekteringshålens planeras i en riktning som innebär en rimlig sannolikhet att träffa de sprickor som ska tätas samtidigt som skärmarnas längd och överlapp beaktas. Vidare görs beräkningar för att bedöma den tätade zonens utbredning (moment 9). Nästa steg innebär att olika kombinationer av effektiv injekteringstid och injekteringstryck (kallat ”injekteringsteknik”) och avstånd mellan borrhålen ansätts, jämförs och jämkas med hänsyn till injekteringsmedlets erforderliga inträngningslängd, arbetseffektivitet och övriga begränsningar. Vidare analyseras den valda designen med avseende på risken för erosion och jacking innan specifikationen sätts (moment 10). I detta projekt, där basdesignen innehåller variabla parametrar, ansätts även kriterierna för val av dessa. Olika samband är styrande för injekteringstekniken för olika injekteringsmedelstyper. I samband med att designen väljs ansätts också kriterier för att arbetets delmål ska anses uppfylla, jämför tabell 3-1.



Figur 3-1. Flödesschema för att etablera basdesign. Förundersökningens omfattning beror bland annat av täthetsmålet. Den grå plattan visar utvärderingen av förundersökningen, vilka resulterar i den geohydrologiska prognosen.

Den slutliga basdesignen inkluderar också beskrivning av de eventuella övriga observationer och åtgärder som ska göras för att säkerställa utförande, resultat och arbetsmiljö (moment 11).

I följande avsnitt beskrivs momenten 3–11 enligt figur 3-1 mer i detalj.

3.4.2 Fördelning av spricktransmissivitet och hydraulisk sprickvidd

Detta avsnitt beskriver moment 3 och 4 i figur 3-1.

Sprickorna beskrivs genom den hydrauliska sprickvidden. Beräkning av den hydrauliska sprickvidden görs utifrån sprickkartering i borrhål där antal sprickor per meter, inflödet mätt i sektioner längs borrhålen samt grundvattenstrycket är indata.

Den metod för injekteringsdesign som användes betraktar sprickorna som två-dimensionella strukturer, jämför även avsnitt 3.4.6. Två-dimensionella strukturer, innebär att den totala transmissiviteten för borrhålet är lika med summan av de enskilda sprickornas transmissivitet /Fransson 2002/. Med antagandet att det är en spricka som står för den största delen av vattenföringen per mätsektion i borrhålet, se t ex /Gustafson 2009/ kan transmissiviteten för den största enskilda sprickan, T , bestämmas som som den specifika kapaciteten, Q/dh

$$T = Q/dh \quad (3-4)$$

där Q i m^3/s är det mätta inflödet och dh i meter är trycket i borrhålet /Meier et al. 1999/. Den hydrauliska sprickvidden, b_{hyd} bestäms av ”cubic law” där transmissiviteten är proportionell mot den hydrauliska sprickvidden i kubik, se t ex /de Marsily 1986/ och /Gustafson 2009/.

$$b_{hyd} = \sqrt[3]{\frac{12\mu \times T}{g \times \rho}} \quad (3-5)$$

där μ är viskositeten, T är transmissiviteten, g är jordaccelerationen och ρ är densiteten.

De enskilda spricktransmissiviteterna längs borrhålet används som indata för att upprätta en statistisk fördelning avseende sprickor i bergmassan. Vald fördelningsmodell är den så kallade paretofördelningen. En paretofördelning förutsätter, vilket har visat sig stämma bra för svenska kristallina bergarter, att det finns ett fåtal sprickor med stor sprickvidd och många sprickor med liten sprickvidd /Gustafson 2009/. Detta stämmer överrens med antagandet ovan om att en enskild spricka står för det mesta av vattenföringen.

För att upprätta paretofördelningen används här Moyes ekvation, (ekvation 3-1) som utgångspunkt. Indata är transmissiviteten, T , för 3-m sektioner beräknad från dubbelpackermätningarna. Genom nedanstående fördelningsekvation beräknas $P(T < T_n)$, dvs sannolikheten för att transmissiviteten, T , är mindre än spricktransmissiviteten, T_n för spricka n ,

$$P(T < T_n) = 1 - \frac{(T_{max}/T_n)^k}{N+1} \quad (3-6)$$

där n är ordningstalet för spricktransmissiviteten sorterat efter storlek och k är en konstant för paretofördelningen. N är det totala antalet öppna sprickor för kärnborrhålet och T_{max} är transmissiviteten för den största sprickan.

$P(T < T_n)$, tas fram genom kombinatorik /Fransson 2002/, det vill säga genom statistisk bearbetning. Värdena som är framräknade plottas i ett diagram med $\log(1-P(T < T_n))$ mot $\log(T_n)$. Till dessa värden anpassas, enligt minsta kvadratmetoden, en linje vars lutning är konstanten k i ekvation 3-6. Denna linje representerar den paretofördelade spricktransmissivitetsfördelningen.

Metoden för att uppskatta fördelningar av transmissivitet och hydraulisk sprickvidd är beskriven i /Fransson 2002/ och vidareutvecklad med paretofördelningen i /Gustafson och Fransson 2005/. Metoden att använda paretofördelningen i injekteringsdesign finns beskriven /Gustafson et al. 2004/. När fördelningen av transmissiviteterna är framtagen kan denna direkt proportioneras i en fördelning av hydrauliska sprickvidder genom ”cubic law”, ekvation 3-5.

3.4.3 Skattning av inflöde och bestämning av sprickvidder som ska tätas

Detta avsnitt beskriver moment 5 och 6 i figur 3-1.

Inläckage till en djupförlagd tunnel eller borrhål beräknas enligt ekvation 3-7, se bland annat /Alberts och Gustafson 1983/.

$$q = \frac{2\pi T_{tot} H / L}{\ln(2H / r_t) + (T_{tot} / T_{grout} - 1) \cdot \ln(1 + t / r_t) + \xi} \quad (3-7)$$

där T_{tot} är transmissiviteten för det otätade berget mätt längs sträckan L , och T_{grout} är transmissiviteten för det tätade berget runt tunneln, d v s tätad zon. Inläckaget till tunneln är q uttryckt som m^3/s och meter tunnel. Vidare är H djupet till tunneln från grundvattenytan, r_t är radien på tunneln. Tjockleken på den tätade zonen, t , erhålls från skärmstick och inträngningslängd. Skinfaktorn, ξ , ges ett värde baserat på tidigare erfarenheter, och ligger normalt mellan 0 och 10 för kristallint berg /Rhén et al. 1997/. Skinfaktorn kan ses som en korrigeringsfaktor. Flödet till en tunnel eller ett borrhål påverkas exempelvis av att luft diffunderar in i sprickorna samt att borring eller utsprängning ändrar spänningarna i berget runt tunneln vilket förändrar flödesbilden.

Den resulterande paretofördelningen avseende hydrauliska sprickvidder används för att beräkna den minsta hydrauliska sprickvidd som behöver tätas för att klara täthetskravet, d v s den dimensionerande minsta sprickvidden. Varje individuell spricka ger ett bidrag till det totala inläckaget. Genom att dra ifrån varje sprickas bidrag till inläckaget och börja med de största erhålls en minsta hydraulisk sprickvidd som behöver tätas.

Den största förväntade hydrauliska sprickvidden bestäms också. Denna parameter används dels tillsammans med den minsta sprickvidden vid bedömningen av vilka typer av injekteringsmedel som behövs i projektet, dels för att bedöma den förväntade spridningen i aktuell sprickvidd och att den inte är för lång.

3.4.4 Val av injekteringsmedelstyper

Detta avsnitt beskriver moment 7 i figur 3-1.

Redan i projektets målbeskrivning fanns två typer av injekteringsmedel angivna, cementbaserat bruk med lågt pH och silica sol. Det cementbaserade bruket är särskilt utvecklat för användning i slutförvar. Typernas flyt- och hållfasthetsegenskaper kan inom vissa gränser varieras för att passa den aktuella situationen, se vidare avsnitt 5.1.

Valet mellan att använda cementbaserat bruk eller silica sol görs utifrån de beräknade hydrauliska sprickvidderna. Det cementbaserade bruket har begränsad förmåga att passera in i små öppningar, en egenskap som främst begränsas av cementkornens storlek och därav betingade egenskaper och som i detta sammanhang betraktas som konstant. Det angivna cementbaserat injekteringsbruket klarar att tränga in i sprickvidder ner till minst 100 μm . Vid mycket god och kontrollerad blandning av andra cementbaserade sammansättningar har inträngning i vidder ner till 50 μm uppnåtts /Eriksson 2002, Eklund 2002, Hernqvist et al. 2008/.

En annan aspekt att beakta är risken för erosion betingat av den skjuvkraft som beror av grundvattengradienten och sprickvidden, se avsnitt 3.3.7. Injekteringsmedlets skjuvhållfasthet måste motstå den eroderande skjuvkraften. Denna är större i vida sprickor, och silica sol som saknar initieell skjuvhållfasthet är därför olämpligt att använda i alltför vida sprickor.

3.4.5 Sprickorientering och skärmgeometri

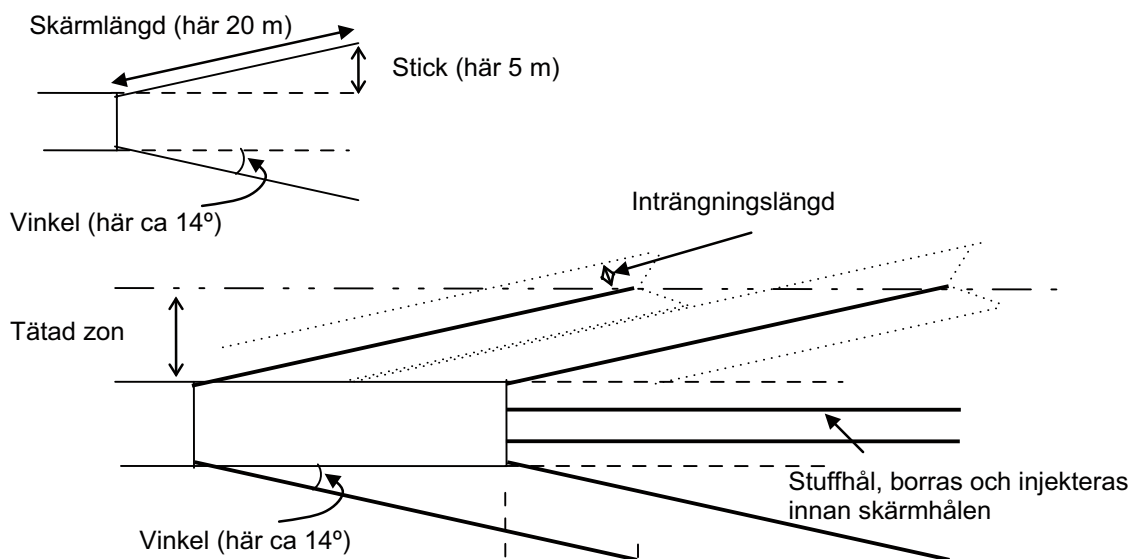
Detta avsnitt beskriver moment 8 och 9 i figur 3-1.

Injekteringen syftar till att skapa en zon runt tunneln där genomsläppligheten är lägre än i det omgivande berget. Inflödet beror av den tätade zonens utbredning och hydrauliska egenskaper, se ekvation för beräkning av inläckage till tunnel (ekvation 3-7). Vidare behövs en tätad zon med viss utbredning för att minska risken att zonen penetreras av bultar. Om möjligt bör skärmgeometrin ta

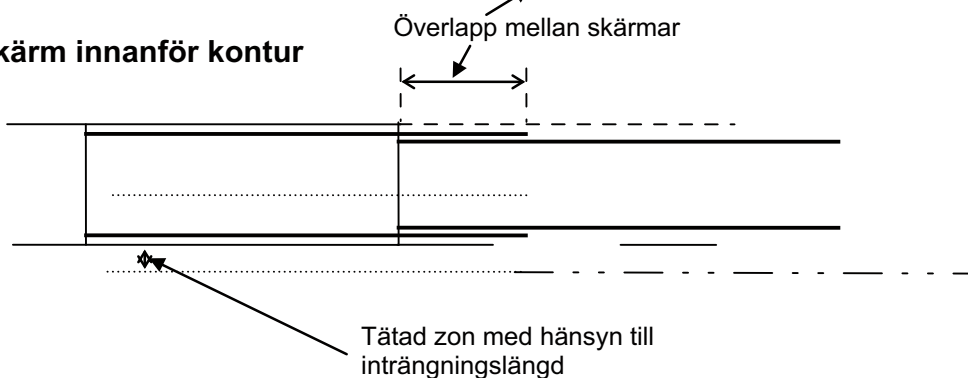
hänsyn till sprickornas orientering. Praktiskt sett är dock möjligheten att rikta borrhålen påtagligt begränsad vid tunnelinjektering, särskilt vid små tunnelareor. När borrhålen borrar innanför tunnelkontur är möjligheterna att anpassa borrhålen till aktuella sprickorienteringar ännu mer begränsad.

För att definiera skärmgeometrin används följande begrepp: Borrhålslängd, skärmlängd, (borr) vinkel, stick, överlapp mellan skärmar, överlapp (av inträngningslängd) mellan borrhålen, tätad zon, inträngningslängd, samt stuffhål (se vidare avsnitt 6.2.6) se figur 3-2.

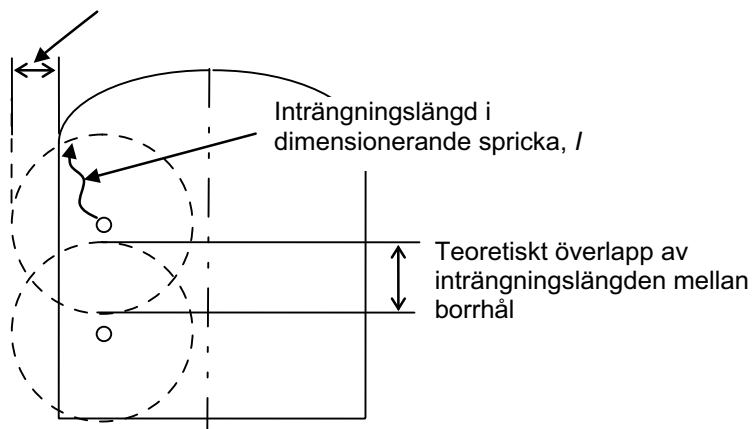
Skärm utanför kontur



Skärm innanför kontur



Inträngning och överlapp



Figur 3-2. Definitioner av geometriska begrepp för injektering som använts i projektet.

Traditionellt ansätts förinjekterings-skärmar med en vinkel utåt och framåt sett i tunnelns riktning. Som praxis brukar man anta att den tätade zonen är lika med sticket, och ett vanligt mått är 4–5 m. Av produktionskäl brukar injekterings-skärmarnas längd sättas så att de motsvarar 4 bergschaktetapper (salvor) plus ett överlapp mellan skärmarna motsvarande en schaktetapp. Med en borrhålslängd på 20 m och ett stick på 5 m blir borrhålsvinkeln ca 14°. Noteras bör att vi här använder längden på injekteringsborrhålen (normalt) 20 m som liktydigt för längden på skärmen, i detta fall en ”20 meters skärm”, trots att skärmens längd i tunnelns riktning (med sticket 5 m) är 19,4 m.

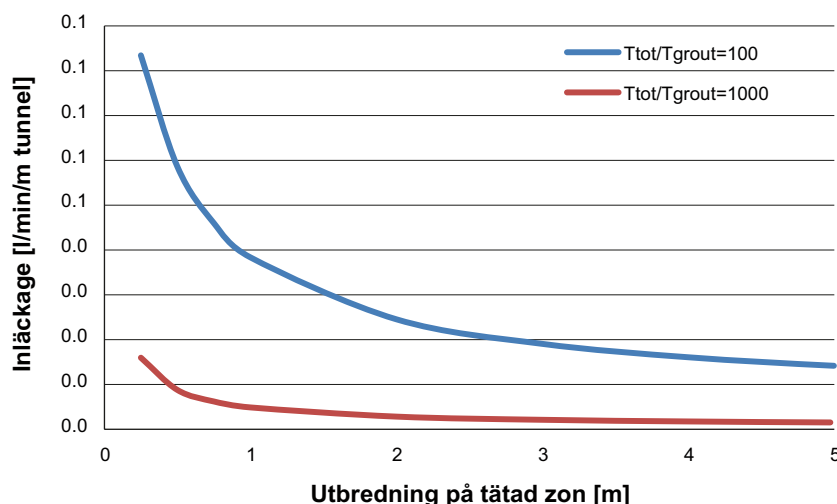
För en teoretiskt verifierad design är villkoret för skärmöverlapp att detta måste vara såpass stort att det blir helt tätt mellan skärmarna. Det innebär att inträngningen av injekteringsmedel i den dimensionerande sprickvidden från borrhålen i två intilliggande skärmar skall mötas. Omvänt uttryckt får inte det vinkelräta avståndet mellan skärmarna vara för stort. Om större stick används, för att skapa en större tätad zon, blir antalet skärmar per meter tunnellängd större och framdriften långsammare, givet att det vinkelräta avståndet mellan skärmarna hålls konstant.

Med skärmar innanför kontur uppskattas den tätade zonen baserat på inträngningen i den dimensionerande minsta sprickvidden. Som tätad zon kan dock bara tillgodoräknas den del av den tätade bergmassan som är kvar efter bergschakt. Det innebär att den tätade zonen beror dels av inträngningen, dels av avståndet mellan injekteringsborrhålen och den resulterande bergkonturen. Det är alltså ur tätningssynpunkt fördelaktigt att ha injekteringshålen så långt ut mot konturen som möjligt.

Samma villkor som gäller för det vinkelräta avståndet mellan skärmar, gäller för avståndet mellan borrhål i en skärm, d v s inträngningen av injekteringsmedel i den dimensionerande minsta sprickvidden från två intilliggande borrhål skall mötas.

För att ta hänsyn till att sprickorna dels inte är plana, dels inte är vinkelräta mot borrhålen, behöver inträngningslängden vara större än halva avståndet mellan skärmar respektive borrhål, se vidare kapitel 6. Detta uttrycks som att det behövs ett överlapp (av inträngningslängd) mellan borrhålen. Teorierna som används för att uppskatta inträngningslängden i sprickor med varierande vidd återfinns i avsnitten 3.4.6 och 3.4.7. Inträngningslängden i den dimensionerande minsta sprickvidden är alltså en central parameter som hanteras i nästa steg. Det innebär att slutlig skärmgeometri inte bestäms i detta steg, men för att komma vidare behövs ett preliminärt antagande.

I figur 3-3 visas principiellt hur inläckaget minskar som funktion av utbredningen (tjockleken) av den tätade zonen.



Figur 3-3. Inflödet per tunnelmeter som funktion av tjockleken hos den tätade zonen. För beräkningen har använts ekvation 3-7 och förutsatts följande: $H=450$ m, $\zeta=5$, $r_i=2,5$ m, $L=1$ m, $T_{tot}=1 \cdot 10^{-7}$ m²/s samt förhållande mellan T för tätad zon och omgivande berg $T_{tot}/T_{grout}=100$ och $1\ 000$.

Som figur 3-3 visar åstadkoms en avsevärd minskning av inläckaget om zonen är enbart 1 m tjock. Efter 2–3 m börjar kurvan att flacka ut. För en tunnel med 70 m längd skulle inläckaget bli ca 17 l/min (=0,25 l/min·70 m) om den tätade zonen var 2 m tjock och hade tätats till en transmissivitet på $T_{grouit}=1\cdot 10^{-9}$ m²/s. Ju större skillnaden mellan injekterat och injekterat berg är, desto mindre utbredning behövs. Resonemanget med tätad zon baseras på att berget ses som ett kontinuum, d v s ett resonemang som inte tar hänsyn till att flödet egentligen sker i sprickor i en praktiskt sett ogenomsläpplig bergmatrix. Metodiken för att välja injekteringsparametrar däremot, baseras på att sprickorna är diskreta plan, och designen syftar till att en fullständig tätning fås i dessa sprickplan ner till en viss kritisk sprickvidd. Denna fullständiga tätning kräver alltså att injekteringsmedlets inträngning är så pass lång att den möts mellan två intilliggande borrhål och detta kan uppnås genom anpassningar av skärmens geometri, men även genom anpassning av injekteringstryck och tid.

3.4.6 Val av skärmgeometri och injekteringsteknik för silica sol

Detta avsnitt beskriver moment 10 i figur 3-1 för silica sol.

Enligt avsnitt 3.4.3 och 3.4.5 ska designen uppfylla villkoren att den dimensionerande minsta sprickvidden ska tätas så att ett överlapp i inträngningen erhålls mellan borrhålen och att tätningen ska åstadkomma en zon med en viss utbredning.

Metoden förutsätter att inträngningslängden i sprickorna kan beräknas. Injekteringstryck och effektiv injekteringstid måste anpassas så att en tillräcklig inträngningslängd erhålls i den dimensionerande sprickvidden. För silica sol knyts den effektiva injekteringstiden direkt till den geltid som väljs. Se avsnitt 5.1.1 för begreppen geltid och gelinduktionstid.

Injekteringstryck används i denna rapport i betydelsen totaltryck, d v s injekteringstrycket är det vid pumpen pålagda trycket. Injekteringstryck är således summan av injekteringsövertryck och motstående grundvattentryck ($P_{pti}=\Delta P+P_{grv}$). Bestämningen av lämpliga tryck bygger på det teoretiska förhållandet mellan inträngningslängd och effektiv injekteringstid. Det finns en teoretisk maximal inträngningslängd för en given sprickvidd, tryck och flödesdimension samt givna flytegenskaper (reologi) hos injekteringsmedlet. Förhållandet innebär att kvoten mellan faktisk inträngningslängd och maximal inträngning, d v s den relativa inträngningen, I_D , är densamma i alla sprickor som injekteras från ett borrhål. Med hjälp av förhållandet kan man på basis av erforderlig inträngningslängd bestämma erforderlig effektiv injekteringstid. Metoden för beräkning av inträngningslängd har utvecklats av /Gustafson och Stille 2005/ för cementbaserade injekteringsmedel och vidareutvecklats för silica sol av /Gustafson och Funehag 2008a, b/.

Inträngningslängden är beroende av hur injekteringsmedlet sprider sig ut från borrhålet. Enligt tidigare (avsnitt 3.4.2) antas att sprickorna är två-dimensionella strukturer som inte har något hydrauliskt samband. Flödet i sprickorna kan då teoretiskt sett ske antingen radiellt i hela sprickplanet (två-dimensionellt, 2-D) eller i kanaler (en-dimensionellt, 1-D), eller som ett mellanting, beroende på fördelningen mellan öppna partier och kontaktytor i sprickan. Beräkningarna i designskedet förutsätter två-dimensionellt flöde som ger en kortare resulterande inträngningslängd än en-dimensionellt flöde.

Den maximala inträngningslängden för 2-dimensionellt flöde med silica sol, $I_{max, 2-D}$, beskrivs av /Gustafson och Funehag 2008a, b/.

$$I_{max, 2-D} = 0.45 \cdot b \cdot \sqrt{\frac{\Delta p t_G}{6\mu_0}} \quad (3-8)$$

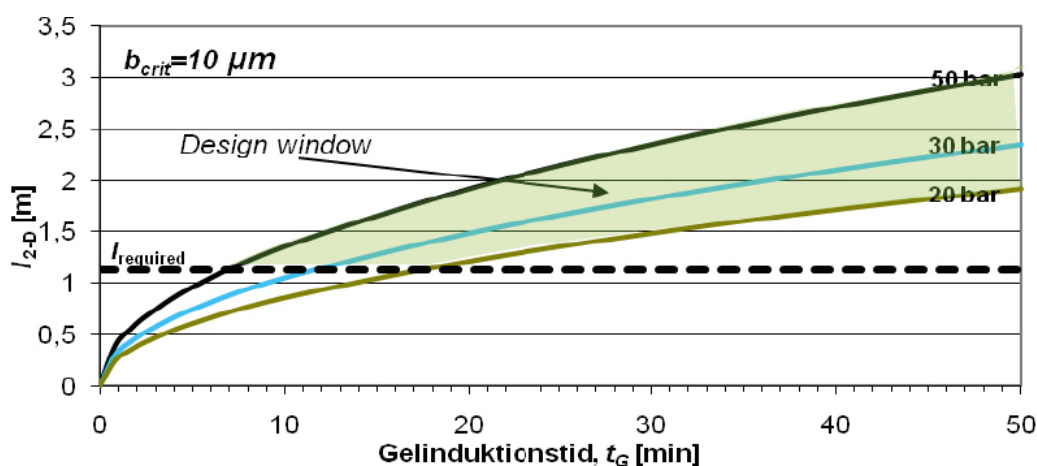
där b är den hydrauliska sprickvidden, Δp är pålagt övertryck, t_G är gelinduktionstiden och μ_0 är den initiella viskositeten hos silica sol. Vid gelinduktionstiden har den initiella viskositeten fördubblats, och gelningen sker därefter mycket snabbt vilket innebär att också inträngningen praktiskt sett upphör. I_{max} nås vid ungefär halva geltiden.

Enligt tidigare behövs ett överlapp (av inträngningslängd) mellan borrhålen för att kompensera för sprickorientering och att sprickorna inte heller är helt planparallella, och överlappets storlek väljs schablonmässigt som en procentuell andel av borrhålsavståndet med viss hänsyn tagen till aktuell sprickgeometri. Detta ger erforderlig teoretisk inträngning för olika borrhålsavstånd.

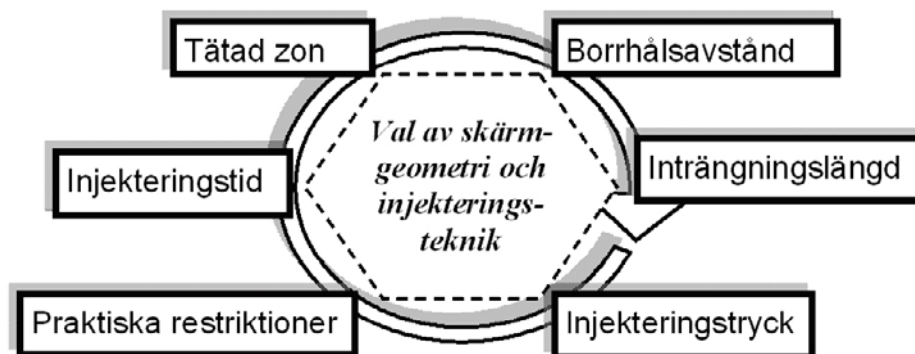
I figur 3-4 ses hur den maximala inträngningslängden för silica sol varierar med injekteringsövertryck och gelinduktionstid i en spricka med den hydrauliska vidden $10 \mu\text{m}$. Vidare visas med ett så kallat designfönster de kombinationer av injekteringsövertryck och gelinduktionstid som kan ge en inträngningslängd som är större än den erforderliga. För att praktiskt sett uppnå den maximala inträngningslängden krävs att den effektiva injekteringstiden är tillräckligt lång, se vidare avsnitt 6.2.5.

Den valda erforderliga inträngningslängden kommer även att bestämma den teoretiska utbredningen av den tätade zonen. Genom att pröva olika kombinationer för olika inträngningslängder kan utifrån de begränsningar som finns för de olika parametrarna och en ur praktisk synpunkt lämplig kombination väljas, se figur 3-5.

När gelinduktionstiden är uppnådd stiger viskositeten snabbt, och inträngningen avtar snabbt. Pumpningen måste emellertid fortsätta tills viskositeten blivit tillräckligt hög för att kunna motstå vattnets eroderande krafter. Det innebär att den effektiva injekteringstiden måste relateras till silica solens gelningsförlopp. Med hänsyn till den snabba viskositetstillväxten sätts pumptiden för silica sol som en schablonandel av geltiden. Mekanismerna för erosion redovisas i avsnitt 3.4.7.



Figur 3-4. Den maximala inträngningslängden, I_{2-D} , i en spricka med hydraulisk vidd $10 \mu\text{m}$, som funktion av olika kombinationer av injekteringsövertryck och gelinduktionstid. I figuren är $10 \mu\text{m}$ den dimensionerande sprickvidden och den teoretiskt erforderliga inträngningslängden är $1,2 \text{ m}$. Villkoret om inträngningslängd uppfylls för kombinationer av gelinduktionstid och tryck inom den grönmarkerade ytan, det så kallade designfönstret.



Figur 3-5. Valet av skärmgeometri och injekteringsteknik görs bl a utifrån praktiska begränsningar.

3.4.7 Val av injekteringsteknik för cementbaserat bruk

Detta avsnitt beskriver moment 10 i figur 3-1 för cementbaserat bruk.

På samma sätt som för silica sol behövdes ett överlapp i inträngning mellan borrhålen, men under aktuella förhållanden skulle överlappet ej vara dimensionerande, d v s ej vara bestämmande för designen; varken för injekteringstrycket eller för den effektiva injekteringstiden. Detta eftersom cementbruk skulle användas vid större sprickvidder än dimensionerade sprickvidd. Vid aktuellt vattentryck och bruk är det istället risken för erosion som behöver analyseras närmare. Med de injekteringstryck och sprickvidder som är aktuella för det cementbaserade bruket är det också väsentligt att kontrollera att injekteringsmedlet ej sprider sig för långt, med hänsyn till befintliga anläggningar eller generella begränsningar. De höga injekteringstrycken innebär också att risken för jacking behöver beaktas.

Ett av de villkor som satts upp för att minska risken för erosion är att den så kallade dimensionslösa inträngningslängden ska vara större än kvoten mellan aktuellt grundvattentryck och injekteringsöverttrycket /Axelsson 2009/.

För att hantera risken för erosion behövs således såväl en förståelse för mekanismerna för erosion som teorierna för inträngningslängd. Nedan beskrivs först teorin för bestämning av inträngningslängd för cementbaserat bruk enligt /Gustafson och Stille 2005/. Därefter redovisas mekanismerna för erosion enligt /Axelsson 2009/ och de villkor som satts upp för att risken för erosion ska minskas. Projektet har valt att följa dessa villkor.

Inträngningslängd cementbaserat injekteringsmedel

För att beräkna inträngningslängden behövs en bedömning av dimensionen för injekteringsmedlets flöde. I enlighet med tidigare förutsätter de samband som används att flödet är två-dimensionellt och nedan visas de begrepp och ekvationer som gäller för två-dimensionellt flöde. Om flödet istället skulle vara en-dimensionellt blir inträngningen längre.

För det cementbaserade injekteringsmedlet är inträngningslängden beroende av övertrycket, sprickvidden och medlets flytgräns (den spänning som måste överskridas för att medlet ska börja flyta), τ_0 ,

$$I_{\max, \text{cement}} = \frac{\Delta p \cdot b}{2\tau_0} \quad (3-9)$$

där $I_{\max, \text{cement}}$ är den maximala inträngningslängd som kan nås utan begränsning av den effektiva injekteringstiden. Att nå full inträngningslängd enligt ekvation 3-9 är möjligt teoretiskt men den effektiva injekteringstiden skulle bli mycket lång. Inträngningen sker snabbast i början av förloppet och den beror av den effektiva injekteringstiden i enlighet ekvationerna (3-10–3-14).

$$t_0 = \frac{6\mu_g \cdot \Delta p}{\tau_0^2} \quad (3-10)$$

t_0 är en karakteristisk tid som relateras till brukets viskositet, μ_g , och flytgräns, τ_0 , samt till injekteringsöverttrycket, Δp . Den karakteristiska tiden har enheten sekunder. För att kunna beräkna inträngningslängden omvandlas den karakteristiska tiden till en dimensionslös tid, t_D , genom att relatera den effektiva injekteringstiden, t , till den ovan beskrivna karakteristiska tiden.

$$t_D = \frac{t}{t_0} \quad (3-11)$$

Genom att ansätta en önskvärd effektiv injekteringstid, fås ett värde på den dimensionslösa tiden. Denna används i ekvation 3-12 för att räkna ut beräkningsfaktorn för tvådimensionellt flöde och ansatt effektiv injekteringstid, θ_{2D}

$$\theta_{2D} = \frac{t_D}{2(3+t_D)} \quad (3-12)$$

Beräkningsfaktorn, θ_{2D} , används sedan för att beräkna den dimensionslösa inträngningslängden för tvådimensionellt flöde och ansatt effektiv injekteringstid, $I_{D,2D}$.

$$I_{D,2D} = \sqrt{\theta_{2D}^2 + 4\theta_{2D}} - \theta_{2D} \quad (3-13)$$

Den dimensionslösa inträngningslängden beskrivs med ett värde mellan 0 och 1 som sedan används för att utgående från den maximala inträngningslängden, $I_{max,cement}$ enligt ekvation 3-9 erhålla den för den ansatta effektiva injekteringstiden aktuella inträngningslängden I_{2D} med enheten meter.

$$I_{2D} = I_{D,2D} \times I_{max,cement} \quad (3-14)$$

En innebörd av detta är att när hänsyn tas till den effektiva injekteringstiden blir inträngningslängden alltid kortare än den maximala beräknade inträngningslängden.

Villkor för erosion

Risken för erosion av injekteringsmedlet vid djupt belägna tunnlar är betingad av den höga grundvattengradient som uppstår runt tunneln och som vill driva vatten och injekteringsmedel i riktning in mot tunneln. Gradienten beskriver hur trycket förändras i riktning mot tunneln (med enheten m/m). Tunneln har atmosfärstryck och gradienten beror av det ostörda grundvattentrycket och flödesmotståndet i den omgivande bergmassan. Tryckförändringen mellan tunneln och den omgivande bergmassan är inte linjär utan är högre närmast tunneln. Om berget är tätare i ett parti närmast tunneln – d v s flödesmotståndet är större, blir tryckfallet – d v s gradienten – över partiet närmast tunneln ännu större.

Erosion i vid bemärkelse innefattar flera fysikaliska processer vilka ger en mekanisk degraderande påverkan på injekteringsmedlet. Dessa beskrivs av /Axelsson 2009/ som erosion (1), bakåtlöde (2) och ”fingering” (3). Erosion (1) uppstår då ett flödande vatten tar bort och för med sig (eroderar) injekteringsmedel, och enkelt uttryckt vattnet ”äter” på injekteringsmedlet. Bakåtlöde (2) är när injekteringsmedlet trycks tillbaka genom sprickan och/eller borrhålet. Fingering (3) är att vattenkanaler skapas i fronten på ett injekteringsmedel i rörelse på grund av att injekteringsmedlet inte helt förmår pressa undan vattnet. Fingering blir då en kombination av både bakåtlöde och erosion och uppträder direkt vid under injekteringen till skillnad mot erosion (1) som också kan uppträda en tid efter att injekteringen avslutats. Erosionsprocesserna har demonstrerats på laboratorium, men mekanismerna liksom aktuella gradienter är svåra att direkt mäta och bekräfta i fält. Kontroll av injekteringsparametrarna mot de villkor som satts upp måste därför på detta stadium snarare sägas syfta till att undersöka och minska riskerna. Viktigt är därför också utförandet och kontrollerna under utförandet.

Villkor som enligt /Axelsson 2009/ bör vara uppfyllda för att förhindra eller minimera ovanstående processer har således valts att följas i projektet. Villkoren och teorierna är följande:

Erosion (1)

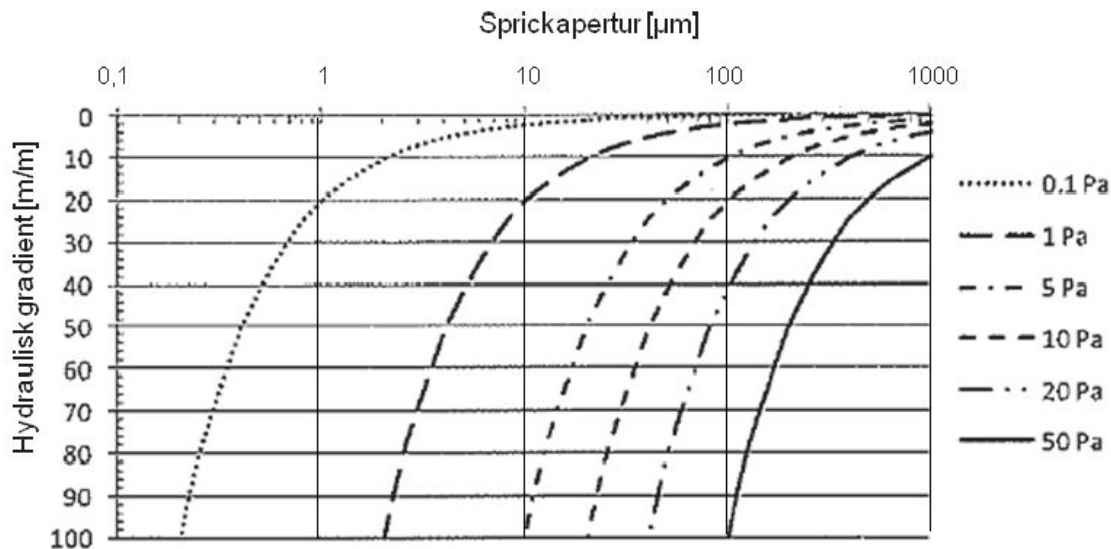
För att förhindra erosion (1) genom att vattnet ”äter” på injekteringsmedlet måste skjuvhållfastheten på bruket när injekteringen av ett hål avslutas vara stor nog att motstå vattnets eroderande kraft.

Vattnets eroderande kraft återspeglar sig i vattnets gradient. Grundvattengradienten ger upphov till en skjuvspänning som påverkar injekteringsmedlet. Denna skjuvspänning [Pa] beror av sprickvidd och grundvattengradient, se figur 3-6. Hög gradient ger stor risk för erosion. För att uppfylla villkoret gäller det alltså att välja ett medel med tillräckligt hög skjuvhållfasthet, eller att påverka gradienten genom att påverka de geometriska villkoren och flödesmotståndet i bergmassan.

Bakåtlöde (2)

För att förhindra bakåtlöde (2) ska inträngningen vara så pass lång att den mot sprickytan mobiliserar friktionskrafter som kan balansera den pådrivande kraften från vattentrycket. Det uttryck som ingår i villkoret är inte den faktiska inträngningslängden som uttrycks i meter, utan den så kallade dimensionslösa inträngningen $I_{D,2D}$, jämför ekvationerna för inträngningslängd ovan. Den dimensionslösa inträngningslängden ska vara större än kvoten mellan grundvattentrycket och injekteringsövertycket.

$$I_{D,2D} > p_w / \Delta p \quad (3-15)$$



Figur 3-6. Erforderlig flytspänning för att undvika erosion av bruket som funktion av sprickvidd och hydraulisk gradient. /Axelsson 2009/.

Fingering (3)

Fingering (3) motverkas så länge det är injekteringsmedlet som trycker undan vattnet och inte tvärtom. Vidare motverkas risken för fingering då viskositeten på medlet, μ_g är högre än vattnets viskositet, μ_w . Detta ställer krav på utförandet av injekteringen och injekteringsmedlets egenskaper.

$$\mu_g > \mu_w \quad (3-16)$$

Jacking

De tryck som blir aktuella för att uppfylla villkoren för att erosion ej ska ske innebär att trycken blir höga. Risken för jacking måste därför beaktas och det görs vid förinjektering som en enkel kontroll att injekteringsöverttrycket ej överstiger tre gånger trycket av överliggande berg minus två gånger grundvattentrycket /Fransson och Gustafson 2006/.

$$\Delta p \leq 3 \rho_{berg} g d - 2 p_{vatten} \quad (3-17)$$

Där ρ_{berg} är densiteten för berg (antagen till 2650 kg/m^3), d är djupet av ovanliggande berg och p_{vatten} är vattentrycket. Detta används enbart som en ingaffling av injekteringstrycket och inte som ett riktvärde på vilket tryck som är OK att använda. Observationer på plats måste användas för att minimera risken för lokala blockutfall.

Sammanfattning, riktlinjer för erosion

I praktiken innebär teorierna ovan att ett injekteringsmedel ska väljas som har skjuvhållfasthet och viskositet som uppfyller kraven (1) och (3), d v s som har tillräcklig skjuvhållfasthet och viskositet att stå emot vattnets eroderande kraft. Därefter testas olika sprickvidder, tryckförhållanden och injekteringstider för att finna kombinationer som på ett lämpligt sätt uppfyller villkoret för att undvika bakåtlöde (2). Anpassningar måste också göras mot övriga begränsningar såsom maximal inträngningslängd och jacking.

3.4.8 Design med kontroller och åtgärder

Detta avsnitt beskriver moment 11 i figur 3-1.

Genomförande i enlighet med de geometrier, den injekteringsteknik och de injekteringsmedel som resulterar ur designarbetet skulle under ideala förhållanden ge det åsyftade täthetsresultatet. Med hänsyn till de osäkerheter som finns i de data och uttryckta samband som ligger till underlag för

designen behövs dock det iterativa arbetssätt som beskrivits i avsnitt 3.1. Arbetssättet innebär således att de verkliga förhållandena och delresultaten kontrolleras mot de förväntade och att anpassningar görs enligt fastlagda kriterier, vidare att kontrollerna ingår som en del i designen. Den slutliga basdesignen inkluderar förutom kriterier enligt ovan också beskrivning av de eventuella övriga observationer och åtgärder som ska göras för att säkerställa utförande, resultat och arbetsmiljö

Förutsägelsen om den ännu ej tätade bergmassan (kriterium 1, tabell 3-1) kontrolleras och uppdateras med hjälp av hydrauliska tester i injekteringsborrhålen från aktuell tunnelfront. Resultaten ligger till grund för val av basdesignens variabla parametrar (som t ex injekteringsmedel) till aktuell skärm, och skulle resultaten ligga utanför de förväntade görs särskilda anpassningar av aktuell skärm. För bedömningen av bergmassans täthet antas medianvärdet av de mätta inflödena vara representativt. Detta antagande har använts i flera projekt och har visat sig ge en god uppfattning om tätheten, se t ex /Funehag 2007/. Medianinflödet räknas om till transmissivitet genom att transmissiviteten antas vara lika med den specifika kapaciteten (Q/dh).

Förutsägelsen om injekteringsmedlets spridning i bergmassan (kriterium 2, tabell 3-1) kontrolleras i realtid under utförandet på basis av det tryck, flöde och volym som registreras av utrustningen. Avvikelse indikerar att spricknätverket och/eller flödesdimensionen är annan än den antagna. Kriteriet som användes i projektet är kvalitativt; att flöde och volym ligger inom ”rimliga gränser” och att återflöde ej sker till tunneln genom blottade sprickor eller borrhål.

Förutsägelsen om den tätade bergmassan (kriterium 3, tabell 3-1) kontrolleras och uppdateras på samma sätt som för den otätade bergmassan. Utvärderingen av en injekteringsomgång görs genom att beräkna medianvärdet av inflödet i borrhålen före injektering och sedan jämföra detta med medianvärdet i nästa borrhålsomgång. Förändringen av medianvärdet används som ett mått på vilken effekt tätningen har haft.

Medianvärdet hämtas direkt från borrhålsomgångens samtliga inflöden, eller utvärderas från en anpassad fördelning. I /Funehag 2007/ används metoden med tolkade medianvärden från en anpassad log-normalfördelning för att påvisa effekten av injekteringen i varje injekteringskärm. Användningen av en log-normalfördelning för att beskriva fördelningen av individuella borrhålsinflöden är visad av /Gustafson och Krazny 1994/ och /Gustafson 2009/.

För kontroll av kriterium 4, tabell 3-1, se påföljande avsnitt om mätvallar och droppflöden, 3.5.1 och 3.5.2.

3.5 Metoder för kontroll av inflöde till tunneln

3.5.1 Mätvallar

Den slutliga kontrollen av måluppfyllelsen (kriterium 4, tabell 3-1) görs genom mätning av inflödet med hjälp av en mätvall.

En mätvall i TASS-tunneln består av en vall i vattentät betong som gjuts mot bergbotten på tunneln. För att få vallen tät görs en ridåinjektering i sulan framför vallen. Vidare förbereds vallen för kontaktinjektering att utföras vid behov. Kompletterande tätning kan också göras med bentonit. Vallen går över hela tvärsnittet och en typisk höjd på vallen är ca 0,3 m (figur 3-7). Höjden är anpassad för att kunna hålla kvar vattnet innanför mätvallen. Mätvallen projekterades av ett konsultbolag.

Principen för mätning är att sektionen innanför vallen manuellt fylls med vatten och att utflödet genom ett rör i vallen mäts, antingen manuellt med mätglas och klocka eller med en fast monterad flödesmätare. När utflödet genom röret nått ett stabilt värde motsvarar detta inläckaget till sektionen. Det uppmätta stabiliserade flödet jämförs med det maximalt tillåtna inflödet.

3.5.2 Dropp- och flödeskaraktärisering

Droppkaraktärisering innebär att droppar och mindre inflöden (sammantaget kallat droppflöde) i tunnelns tak och väggar mäts samt att droppflödena korreleras mot sprickkaraktäriseringen. Utöver läget bedöms storleken på droppflödet mycket noggrant. Det som karakteriseras är alltså den tätade bergmassan vars egenskaper beror av verkan av den utförda injekteringen. Syftet med dropp- och flödeskaraktäriseringen är att förstå injekteringsverkan. T ex är antalet sprickor som läcker och deras orientering av självklart intresse. Syftet är även – i det fall täthetsmålet ej uppnåtts – att få en bättre beskrivning av den otillräckligt tätade bergmassan som indata till en eventuell efterinjektering.



Figur 3-7. Funktionskontroll av mätvall nr 1. Vatten är fyllt innanför mätvallen och nedströms mätvallen är berget rensat. Underkant av mätvallen besiktigas okulärt med avseende på eventuellt vattenläckage mellan betongkonstruktion och berg. Bild: Magnus Kronberg, SKB.

Metoden som används innebär att läget för droppflödet bestäms med en precision på 0,5-0,5 m². Droppflödena kategoriseras inom fyra grupper; från fuktiga områden till rinnande områden, se tabell 3-2. Gruppen med lägsta droppflöde, d v s fukt, mäts genom att blöjor monteras i taket för att suga upp fukt. Det minsta flöde som kan mätas med blöjor är 0,0001 l/min. Hänsyn tas till den omgivande fukten genom att ett antal blöjor, kallade "blanks" hängs fritt i tunneln och ger ett korrigeringsvärde. De övriga tre grupperna av droppflöde mäts genom att fånga upp dropparna i ett mätkärl under en viss tid. I väggarna sågas snitt som möjliggör uppsamling av flödet från i väggen identifierade sprickor.

Tabell 3-2. Kategorier för droppflöde.

Kategori	Droppflöde (l/min)
Fukt	≈0
Fukt med sporadiskt dropp	0-0,001
Kontinuerligt dropp	0,001-0,03
Rinnande flöde	> 0,3

Utöver att karakterisera droppflöden utförs också flödeskaraktärisering i sulan. Vattenpölar bildas i sulan där sprickor och slag finns. Flödet bestäms genom att pölen töms på en känd mängd vatten och tiden det tar för pölen att återfyllas mäts.

4 Platsval och geohydrologisk prognos

4.1 Prognos i flera steg

Prognosen för de geohydrologiska förhållandena skapades i flera steg. Den första prognosen byggde helt på den kunskap om platsen som fanns från tidigare och utgjorde underlag för preliminärt platsval, d v s det underlag på vilket aktuell plats valdes för förundersökningar. De förundersökningar som gjordes på den preliminärt valda platsen syftade dels till att utgöra underlag för att slutligt bekräfta att platsen uppfyllde de krav som satts upp (se avsnitt 2.1), dels till att utgöra underlag för att detaljplanera försöket och upprätta en design.

I avsnitt 4.2 redovisas värderingen av befintlig kännedom med hänsyn till projektets behov av typ av plats.

I avsnitt 4.3 beskrivs summariskt omfattningen och genomförandet av förundersökningarna.

I avsnitt 4.4 beskrivs den mer generella utvärderingen och jämförelsen av resultaten med platskraven.

I avsnitt 4.5 redovisas den fördjupade analysen av förundersökningsresultaten. Denna är direkt kopplad till valet av designmetod redovisas i figur 3-1 som arbetsmoment som är en del i flödet för att upprätta design. Jämför även avsnitten 3.4.2 och 3.4.3.

I avsnitt 4.6 slutligen sammanfattas resultaten till den geohydrologiska prognos som fanns innan arbetsetapperna med injektering påbörjades.

4.2 Befintliga data och preliminärt platsval

Samtliga riktningar i denna rapport är angivna i Äspö96 om ej annat anges. 230 grader i Äspö96 motsvarar 216 grader i magnetisk norr.

I förstudien inventerades olika potentiella platser i Äspö Hard Rock Laboratory (Äspö HRL) där de hydrogeologiska förutsättningarna beskrevs utifrån befintliga data och jämfördes med de krav som satts upp för försöksplatsen, se avsnitt 2.1. Tillgänglig kunskap om de stora vattenförande zonerna (NE-1, EW-1) och kravet att ingen av dessa skall finnas inom 150 m från påslaget av tunneln (krav 1, avsnitt 2.1) var grundläggande vid inventeringen. Kännedom om huvudsakliga sprickriktningar var likaledes av central betydelse.

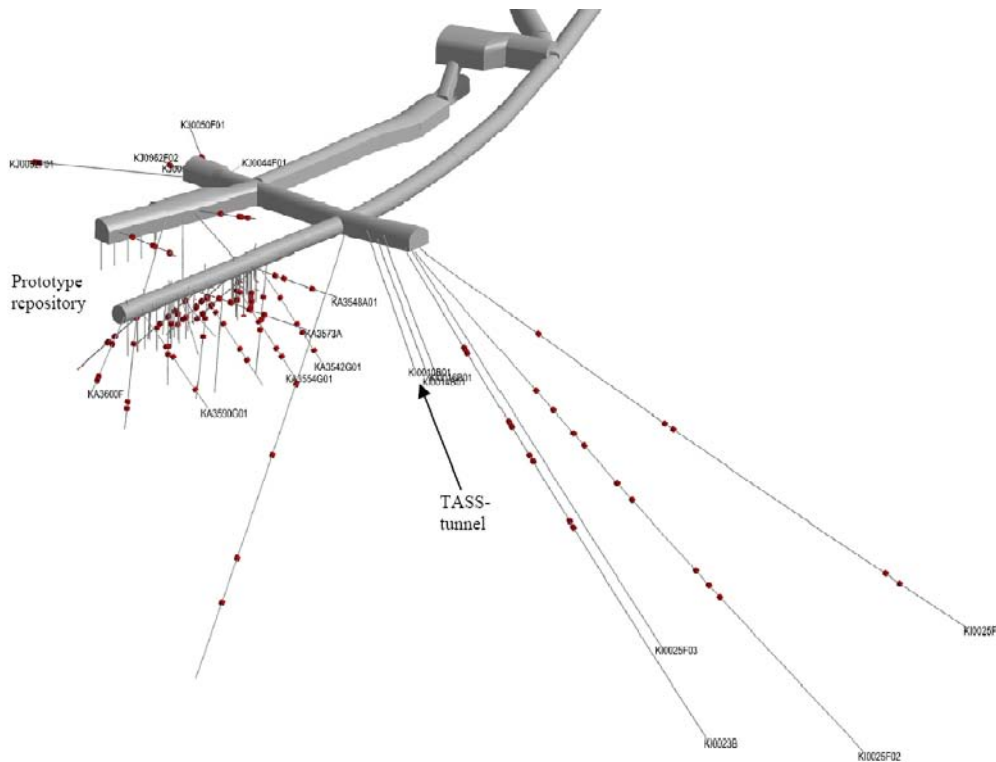
Bland de potentiella platserna utvaldes en för förundersökningar. Denna plats kom senare att väljas. Den preliminärt valda tunnelsträckningen låg på 450 m djup med påslag från den befintliga TASI-tunneln och gavs benämningen TASS, se figur 1-2. Tunnelsträckningen planerades i riktning 230°, för att ligga i det närmaste vinkelrätt mot den största horisontella huvudspänningsriktningen, eftersom denna förväntades sammanfalla med riktningen för de största vattenförande sprickorna.

Det föreslagna läget var i en bergvolym som från tidigare projekt är väl karakteriserad med avseende på strukturer och sprickzoner. Detaljerad kunskap om den preliminärt valda platsen fanns från främst 3 verksamheter: TRUE Block Scale projektet (TRUE), Prototyp-projektet (Prototyp) och Äspö Hydro Monitoring System (HMS).

TRUE syftar till en förståelse av bergmassans barriärfunktion genom undersökningar av transportmekanismer och hinder för transport i en bergmassa. De undersökningar som har utförts är omfattande och ger en god kännedom om bergets vattenförande strukturer.

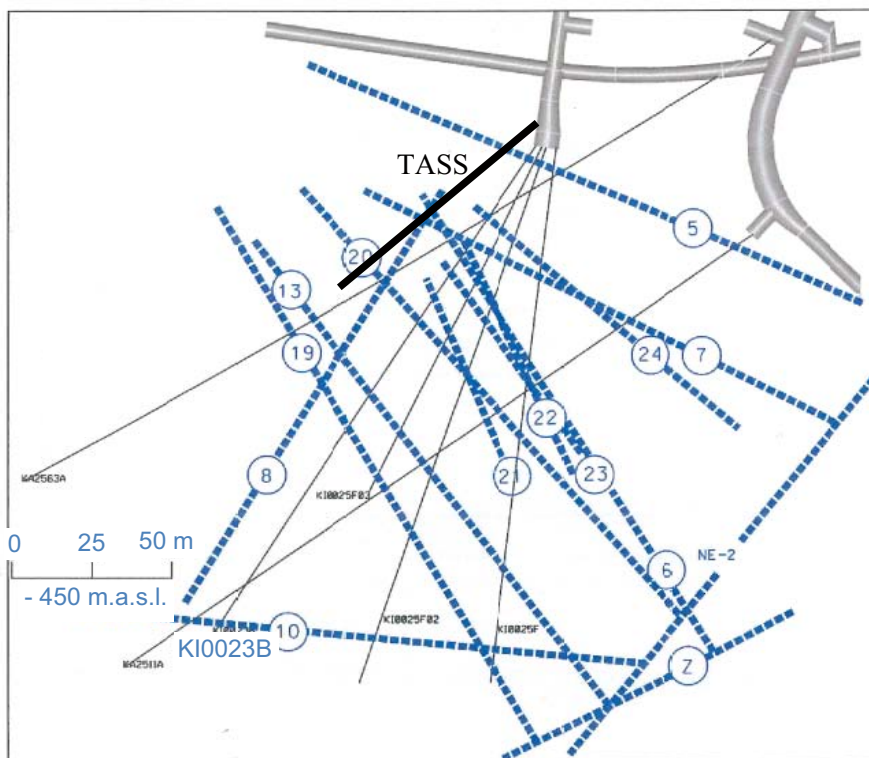
Prototyp-tunneln går mycket nära TASS-tunneln. Under drivning av tunneln gjordes geologiska och hydrogeologiska karteringar. Från prototyp-tunneln utgår många borrhål som har tryckgivare installerade. Tryckgivarna är kopplade till HMS.

Äspös HMS-system registrerar grundvattentrycket i bergmassan runt anläggningen. Mätningar har skett sedan anläggningen byggdes och idag loggas trycket kontinuerligt med hjälp av fast monterade givare i mängder av borrhål och borrhålssektioner. I figur 4-1 visas ett antal borrhål i närheten av TASS som är kopplade till HMS.



Figur 4-1. Nedre delen av Äspöanläggningen med borrhål som loggas kontinuerligt. Även de tre kärnhålen som i förundersökningen borrades längs planerad sträckning för TASS är här inlagda. Röda prickar markerar de manschetter som avgränsar mätsektionerna. /Hardenby et al. 2008/.

I Figur 4-2 visas en modell modifierad från TRUE, över den nedre delen av Äspöanläggningen med flertalet av de sprickor/strukturer som troligtvis korsar TASS-tunneln.



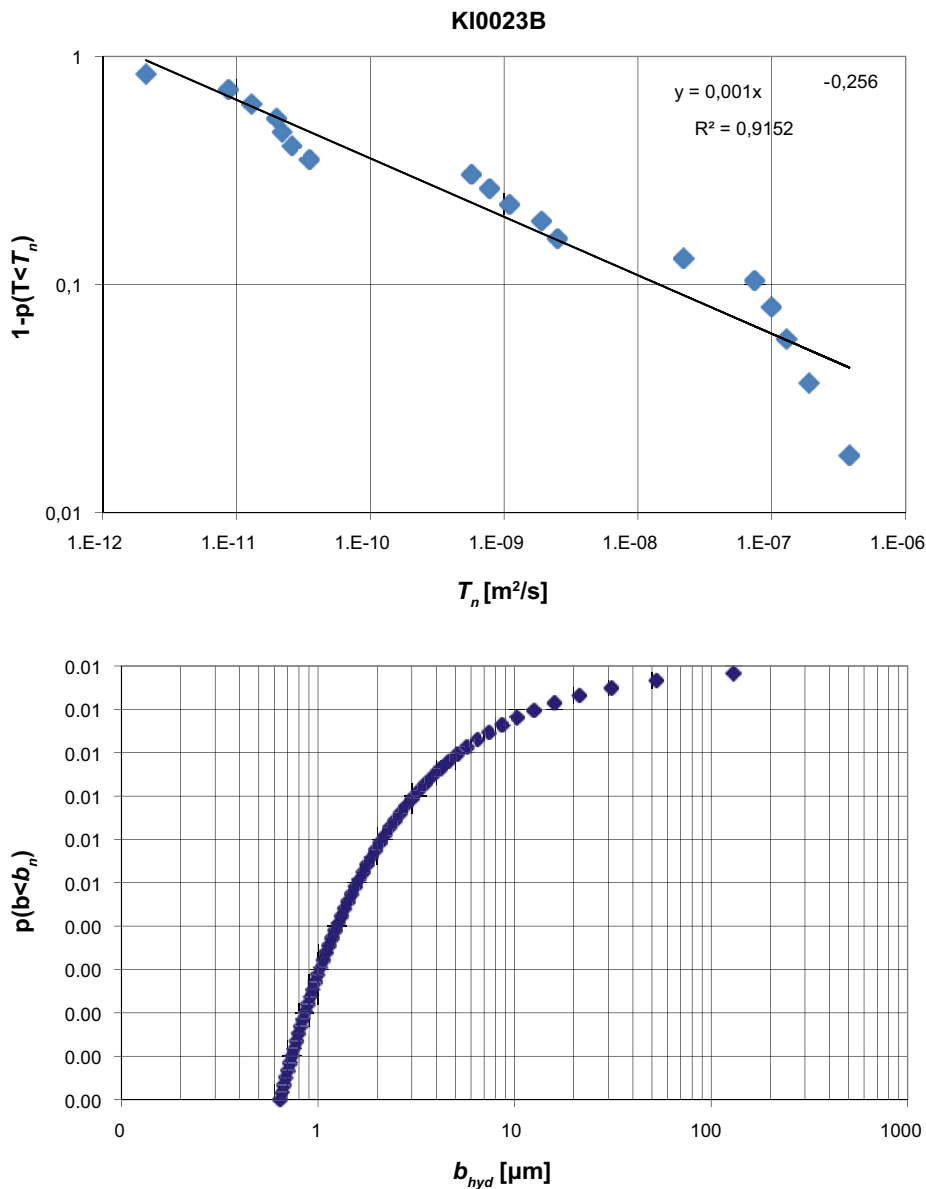
Figur 4-2. Schematisk modell över området runt TASS. Streckade tjocka linjer markerar strukturer som har karakteriserats i projekt TRUE och siffrorna refererar till numrering enligt TRUE /Andersson et al. 2002/.

Borrhål KI0023B går nära och nästan parallellt med den tänkta TASS-tunneln, se figur 4-1 och 4-2. Underlaget för sprickfördelningen i KI0023B som visas i figur 4-3 är antalet öppna sprickor tolkade från BIPS och undersökt längd går från sektion 40 m till 181 m. Borrhålet användes för att få en första uppskattning av spannet på transmissiviteten och de hydrauliska sprickvidderna samt bedöma vilka sprickvidder som behövdes tätas för att klara tillåtet inläckage. Bedömningen ställdes mot platskraven samt rimligheten att klara täthetskravet.

Spannet över transmissiviteterna för de uppmätta sektionsvärdena KI0023B är från ca $1 \cdot 10^{-11}$ m²/s till $4 \cdot 10^{-7}$ m²/s. Sannolikheten för att en påträffad spricka har en hydraulisk vidd mindre än 10 µm är 88% och sannolikheten att den har en vidd mindre än 130 µm är 98%.

Enligt beräkningsgången i avsnitt 3.4.2 och 3.4.3, måste alla sprickvidder ner till 10 µm tätas för att klara tillåtet inläckage på 1 l/min och 60 m tunnel. Detta bedömdes som rimligt. Utan injektering skulle inläckaget bli ca 40 l/min (24 l/min för 60 m) för en 100 m lång tunnel baserat på KI0023B.

Från allmän kändedom om Äspö kunde följande beskrivning av de geohydrologiska förhållandena göras.



Figur 4-3. Överst: Paretofördelning för transmissiviteterna för kärnborrhålet KI0023B. Underst: beräknade hydrauliska sprickvidder baserat på transmissiviteterna i paretofördelningen. $N = 58$, $T_{max} = 1,5 \cdot 10^{-6}$ m²/s, $k=0,26$. Sektionslängden är 5 m.

Äspöanläggningen är byggd i huvudsakligen s k äspödiorit. Äspödioriten är en variant av Smålandsgraniten där bildningen började för ca 1 800 miljoner år sedan. Bergarten utgör en del av det transskandinaviska granit- och porfyrbältet där graniten är främst grovkorning. Till skillnad mot vanlig granit innehåller dioriten en mindre andel av kvarts och större mängder av hornblände och plagioklas, alltså kan den sägas vara en basisk variant av smålandsgraniten. Äspödioriten är mörkgrå och medelkorning med stora ljusrosa kristaller av kalifältspat. I deformationszoner är dioriten oftast oxiderad till en röd variant.

Utgående från den befintliga kännedomen om bergmassan befanns det sannolikt att ingen av de större zonerna skulle gå inom 150 m från påslaget av den tänkta tunneln (krav 1 enligt avsnitt 2.1) och att tunnelriktningen kunde ansättas så att sprickorna skulle gå 70–90° mot planerad riktning (krav 2a enligt avsnitt 2.1). Tätningsinsatsen, att tätta alla sprickvidder ner till 10 µm, ansågs som rimlig. Berget bedömdes så pass genomsläppligt att injektering var behövlig och det beräknade inläckaget utan injektering var så pass stort att det skulle vara möjligt att bedöma effekten av injekteringen. Platsen bedömdes således som möjlig och baserat på denna bedömning valdes således att undersöka TASS närmre med förhoppningen att definitivt verifiera uppfyllandet platsvalskraven.

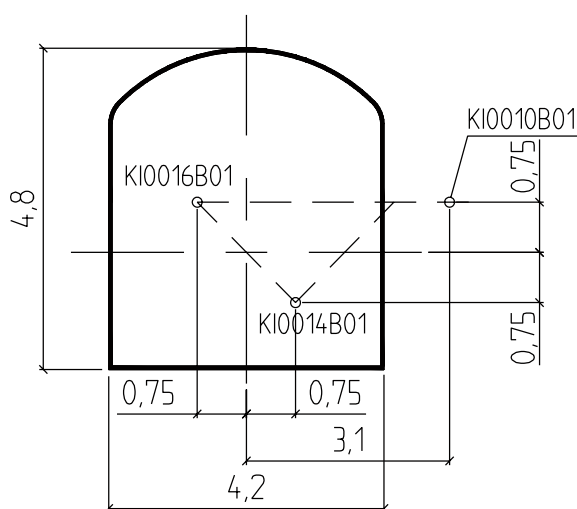
4.3 Förundersökningar

4.3.1 Omfattning och genomförande

Förundersökningen omfattade tre 100 m långa kärnborrhål, borrade parallellt med den tänkta tunneln, se figur 4-1, och undersökningar i dessa. Antalet valdes för att ge möjlighet att orientera och tolka förbindelse mellan påträffade sprickor. Två av hålen borrades innanför planerad kontur (KI0014B01 och KI0016B01) och ett (KI0010B01) utanför, se figur 4-4. Undersökningarna omfattade nedanstående moment.

- Mätning av helhålsflöde var 3: e meter under borring i det successivt allt längre borrhålet.
- Mätning av grundvattentryck var 10: e meter under borring i det successivt allt längre borrhålet (enbart i KI0010B01 och KI0016B01; dock var data från KI0016B01 svårtolkade).
- Flödes- och tryckmätning i 1-meterssektioner med 0,1-meters steg med PFL (enbart KI0010B01).
- Flödes- och tryckmätning i 3-meterssektioner med dubbelmanschett.
- BIPS-dokumentation av borrhålsvägg.
- Kärnkartering.

Metoderna är beskrivna i avsnitt 3.3.1. Utförande av respektive undersökningsaktivitet samt resultaten och utvärderingarna är redovisade i /Hardenby et al. 2008/. I detta avsnitt redovisas en sammanfattning.



Figur 4-4. Kärnborrhålens läge i förhållande till TASS-tunneln.

Borring av foderrör för samtliga hål utfördes först. Arbetena fortsatte med borring av KI0010B01 med hydrauliska helhålsmätningar under borring (flöde, tryck) samt efterföljande hydrauliska tester (PFL-mätning) och BIPS-dokumentation. Därefter borrades de andra två borrhålen under mätning av flöde och tryck varefter borrhålsväggarna dokumenterades med BIPS. Flödesmätning i 3m-sektioner utfördes när samliga borrhål var borrade. Under denna mätning var de andra två borrhålen stängda med en ytlig manschett. Den sista aktiviteten var en detaljerad kärnkartering i med hjälp av Boremap och BIPS-bilderna, se tabell 4-1.

Mätningen av flödet, och i förekommande fall även trycket, under borring i de successivt allt längre borrhålen syftade till att ge preliminär men tidig information om bergets vattenföring. Med fokus på sprickor utfördes också en översiktlig kärnkartering under pågående borring. Detta gav kontinuerlig indata att stämma av mot platskraven; sprickor per meter, varierande hydraulisk sprickvidd och grundvattentryck (krav 2b, 2c och 3 i avsnitt 2.1).

Tabell 4-1. Kronologisk redogörelse för hydrauliska tester, borring och BIPS i förundersökningshålen, efter /Hardenby et al. 2008/. Kartering med Boremap är en ovanjordsaktivitet och pågick mellan maj och oktober.

Ungefärlig tidpunkt 2007	KI0010B01	KI0014B01	KI0016B01
Mars,	Borring/Casing	Borring/Casing	Borring/Casing
April	Borring/Helhålsmätningar under borring		
April	BIPS		
Slutet Maj	PFL-mätning		
Juni		Borring/Helhålsmätningar under borring, sist att testas	Borring/Helhålsmätningar under borring
Början Juli		BIPS	BIPS
Mitten Juli	Flöde 3-m sektion, andra hål att testas	Flöde 3-m sektion, sist att testas	Flöde 3-m sektion, först att testas

4.4 Utvärdering och definitivt platsval

4.4.1 Utvärdering

Karteringen av de tre långa borkärnorna bekräftade att den dominerande bergarten är Äspödiorit. Två av kärnorna innehåller även mindre mängd av finkornig diorit/gabbro. Pegmatit- och finkorniga granitgångar finns i alla tre kärnor. Vissa mineral är oxiderade och epidot är rikligt förekommande.

Upp till 20 m borrade längd var flödena i kärnborrhålen relativt små; huvudsakligen mindre än 1 l/min. Den största flödesökningen vid mätningen av helhålsflöde under borring inträffade vid sektion ca 20 m i samtliga borrhål, se tabell 4-2. I tabellen redovisas även det ej stabiliserade totala inflödet till färdigborrade hål, 95 l/min som mest.

Tabell 4-2. Läge för största ökning av flödet mätt under borring samt helhålsinflödet för färdigborrat borrhål (ej stabiliserade värden).

Borrhål	Läge för största ökning av flödet (sektion) flödesökning)	Helhålsinflöde vid full längd, mätt direkt efter borring
KI0010B01	Ca 21 m/30 l/min	45 l/min
KI0014B01	Ca 20 m/12 l/min	78 l/min
KI0016B01	Ca 21m/35 l/min	95 l/min

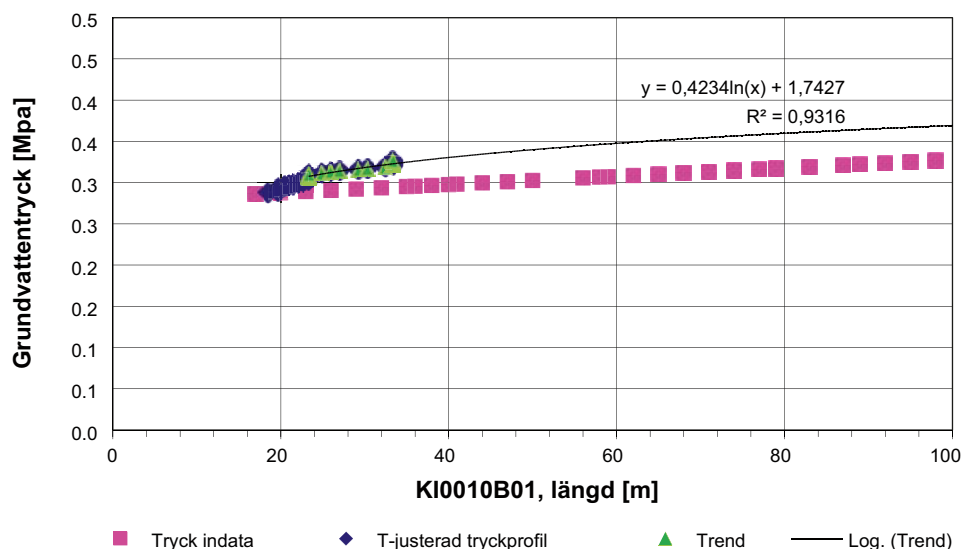
I det först utförda kärnborrhålet KI001B01 mättes trycken var 10e meter under nattuppehåll i borrhåningen. Ursprungligen var sektionssvisa mätningar planerade, och de istället utförda helhålmätningarna i successivt allt längre hål föranledde en särskild utvärdering av mätta trycks representativitet och en utvärderad tryckprofil skapades, se figur 4-5.

Det mätta trycket var lägre än det satta kriteriet på 3,5 MPa efter 25 m. Baserat på trycket i närliggande hål, (KA3548A01, KA3600F) samt den utvärderade tryckprofilen, bedömdes dock att trycket i bergmassan uppfyllde kravet.

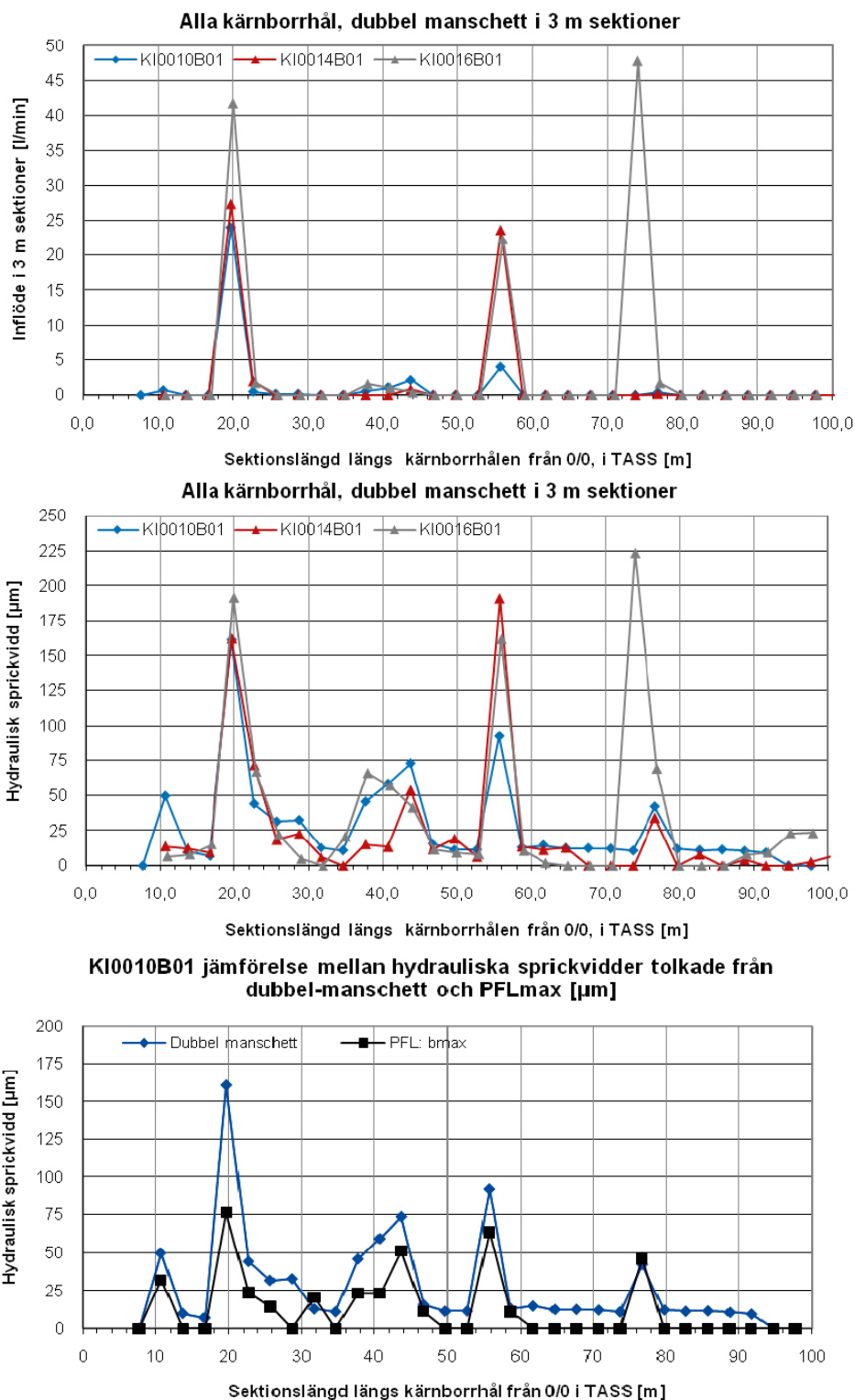
Den utvärderade tryckprofilen från KI001B01 användes huvudsakligen för att stämma av platsvalskravet. Den representerar trycksituationen framför tunnelfronten vid påslaget för TASS-tunneln. Tolkningen av profilen var att ett borrhål som är 25 m långt och borrar från påslaget förväntades uppvisa ett tryck på 3,3 MPa (tunnelsträckningen från 20–45 m i figur 4-5). Om borrhålet skulle borrar längre skulle trycket bli större, som mest 3,7 MPa vid längdmätning 100 m. Indata för beräkningen var trycket mätt vid helhålmätning. Vid ett allt längre borrhål mäts således trycket som medelvärde över borrhållängden vilket gör att trycket underskattas för kortare sektioner av borrhålet. Trycket har justerats beroende på var inflödena mätts i dubbelmanschettmätningarna, här från sektion 20–35 m. Från dessa tryckjusterade data anpassades en trendlinje och sedan en logaritmisk extrapolering för att tolka trycket för hela 100 m sträckan, se vidare /Hardenby et al. 2008/.

Baserat på avstämning av helhålsflödena och tryckanalysen bedömde projektet att det aktuella läget TASS var fortsatt lovande och förundersökningen fortsatte i detta läge.

Flödena mätta i 3-meterssektioner med dubbelmanschett, maxflödena mätta i 0,1-meterssektioner i motsvarande 3-meterssektion samt summaflödet per 3-meterssektion mätt i 0,1-meterssektioner med Posiva flow log (PFL) i kärnborrhål KI0010B01 presenteras i figur 4-6. De successiva inflödesmätningarna gav information om läget på inflödestopparna längs sträckningen och en bedömning av förväntade hydrauliska sprickvidder kunde göras. Resultatet användes för att i respektive skärmläge mobilisera för de två olika injekteringsmedlen samt för att göra en tydligare avstämning mot maximal tillåten inträngningslängd vid stora förväntade sprickvidder. Vidare gjordes en kontroll av rimligheten av spannet av inträngningslängder enligt basdesignen.



Figur 4-5. Utvärderad tryckprofil längs KI0010B01. Indata är en linjär interpolation från mätvärdena. Markeringarna för justerad position utgör positionerna som varje enskilt tryckvärde representerar. Positionerna utgår från var inflödena sker längs kärnborrhålet. Utvärderad tryckprofil är en logaritmisk extrapolation. Rosa punkter är mätta helhålstryck vid den successiva allt längre borrhåningen, blå punkter är justerade tryck från dubbelmanschettmätningarna, gula punkter är utvalda punkter för trendlinje, heldragen linje är extrapolerad logaritmisk tryckkurva.



Figur 4-6. Övre två diagrammen: Inflöden mätt i tre meters sektioner med dubbelmanschett och motsvarande hydrauliska sprickvidder. Undre diagrammet: KI0010B01. Jämförelse mellan hydraulisk sprickvidd utvärderad från flöde mätt i 3-meterssektion med dubbelmanschett och 0.1-meters maxflöde inom samma sektion från mätning med PFL. Längdangivelsen är från sektion 0/0 till den längst in belägna manschetten.

Figur 4-6 visar att överensstämmelsen i läget för registrerade flödestoppar och i viss mån storleken av flödet generellt var god mellan samtliga tre kärnbrorhål. Undantaget var sektion ca 75 m. I denna sektion registrerades en stor flödestopp i KI0016B01, en liten flödestopp i KI0010B01 (både med UHT och PFL) och ingen flödestopp i KI0014B01. En förklaring till varför mätvärdena skiljer sig i den tolkade genomsläppligheten återfinns i avsnitt 8.2.1.

Identifieringen av läget för största flödesökning från mätningen av helhålsflöde under borring visar också överensstämmelse med resultatet av mätningarna efter borring enligt tabell 4-2.

Inflödena mätta i 3-meterssektioner var ner till 0,02 l/ min och med PFL registrerades inflöden om 0,017 l/min (10^3 ml/h) och lägre vilket motsvarar hydrauliska sprickvidder ner till minst 10 μ m. Det innebar att kravet på varierande sprickvidder inom den lägre delen av intervallet 10–300 μ m var uppfyllt (krav 2 c, avsnitt 2.1). Det innebar också att inga nya indikationer erhöles på närhet till någon av de sedan tidigare kända större sprickzonerna.

Utgående från den ursprungliga modellen baserad på kännedomen från TRUE, fanns en förväntan om att ett antal vattenförande strukturer skulle korsa den planerade TASS-tunneln, jämför figur 4-2. I tabell 4-3 jämförs registrerade flöden och deras lägen i de tre kärnborrhålen med data för de strukturer som tidigare var kända från TRUE. Några öppna sprickor och mindre krosszoner ansågs, baserat på karteringen av borrhålen, motsvara samma fem TRUE-strukturer; strukturerna 5, 7, 20 och 22 och eventuellt även 8 (se även figur 4-2).

Tabellen visar ett stort spann på genomsläppligheten (transmissiviteten) för en och samma struktur i TRUE; en variation med en faktor 100 är inte ovanligt. Detta innebär att sprickans verkliga geometriska vidd varierar i sprickplanet. Samtidigt korsar inte borrhålen samma sprickor fast sprickorna kan tillhöra samma tolkade struktur vilket är nog den troligaste orsaken till varierande genomsläpplighet.

Tabell 4-3. Sammanställning av strukturer identifierade i TRUE och motsvarande hydrauliska observationer från förundersökningen för TASS. Transmissivitetsvärden från TRUE är hämtade från borrhålen KI0025F02, KI0025F03, KA2563A och KA2511A /Andersson et al. 2002/ och är i tabellen redovisade i denna ordning. Transmissivitetsvärden från TASS är baserade på dubbelmanschettmätningar (samtliga tre kärnborrhål) samt PFL-mätningarna i KI0010B01. Transmissiviteten baserad på PFL-mätningarna är utvärderad med Moyes utvärderingsmetod.

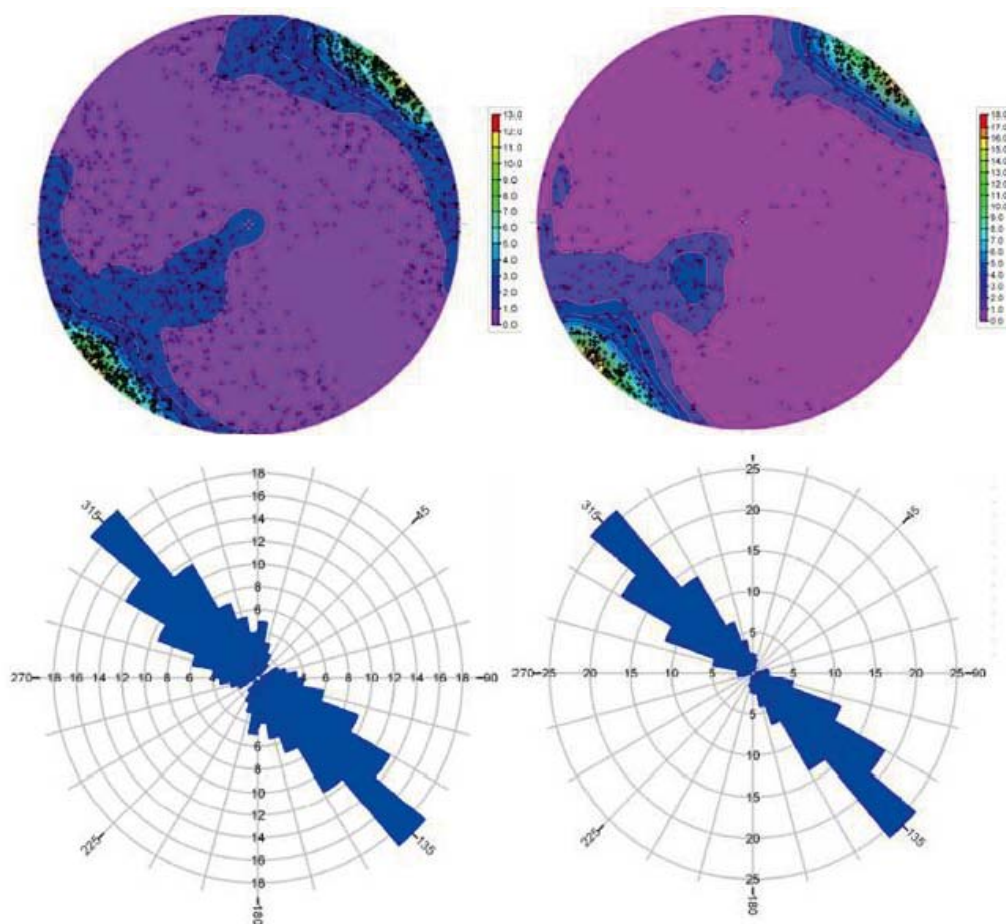
TRUE		TASS		
Struktur nr	T [m ² /s]	Läge i TASS [m]	T [m ² /s]	Testmetod
5	Q=700 l/min* Q=60 l/min*	20	Q=25–42 l/min*	Dubbelmanschett
		20	Q=5 l/min*, OBS = övre mätgräns	PFL
24	3,0E-8	Ej observerad		
7	5,4E-8, 6,8E-10, 1,4E-10, 1,4E-7	50–55	4,9E-07-2,7E-06	Dubbelmanschett
		55	1,6E-07	PFL
6	1,4E-08, 2,7E-07, 2,7E-08, 6,8E-08	Ej observerad		
22**	6,8E-08, 2,7E-08, 1,4E-09, 2,7E-10	40–43	4,6E-08–2,5E-07	Dubbelmanschett
		40–43	8,2E-08	PFL
23	Ej redovisad	Ej observerad		
21	3,4E-08, 1,4E-09, 6,8E-09, 3,4E-09	Ej observerad		
20	1,4E-07, 6,8E-08, 1,4E-06, 1,4E-06	70–75	2,5E-08–7,0E-06	Dubbelmanschett
		77	6,1E-08	PFL

*Transmissivitetsvärden för struktur nr 5 saknas. För jämförelsen anges därför även TASS-värden som l/min.

** Även tolkat som möjlig skärning med struktur 8.

Den dominerande sprickriktningen är 315° och förväntningen – att de mest vattenförande sprickorna skulle vara orienterade i denna riktning, var det grundantagande som motiverat den planerade tunnelns drivningsriktning på 230°. Sprickplanen som karterades från kärnborrhålen uppvisar en klar huvudsprickriktning i 314–315°, se figur 4-7. Planen har mestadels brant stupning men det finns även komponenter med flacka plan.

I tabell 4-4 visas antal öppna, läkta och delvis öppna sprickor för 100 m borrhärna. Baserat på tabellvärdena bedömdes kravet att försöksplatsen i medeltal ska ha mer än två sprickor per meter (krav 2 b, avsnitt 2.1) som uppfyllt.



Figur 4-7. Schmidtnät och sprickros över sprickor karterade från TASS kärnborrhål. Diagrammen är ej Terzaghikorrigerade. Korrigeringen bör göras i fall sprickdatan skall användas för utförligare analyser såsom vilka enskilda sprickor som blivit tätade eller inte. För den visuella tolkningen är det dock ej nödvändigt. Till vänster visas samtliga sprickor och till höger visas öppna sprickor. Färgerna i Schmidtnätet avser koncentration i % av antalet sprickor för arean /Hardenby et al. 2008/. TASS-tunnelns drivningsriktning är 230°.

Tabell 4-4. Totalt antal sprickor i kärnborrhålen KI0010B01, KI0014B01 och KI0016B01. Från /Hardenby et al. 2008/.

Borrhåls ID	Totalt antal öppna sprickor	Öppna sprickor/meter	Totalt antal läkta sprickor	Läkta sprickor/meter	Totalt antal delvis öppna sprickor	Delvis öppna sprickor/meter
KI0010B01	215	2.2	565	5.7	48	0.5
KI0014B01	340	3.5	407	4.2	24	0.2
KI0016B01	230	2.4	216	2.2	23	0.2

4.4.2 Jämförelse med platskraven och definitivt platsval

Totalt sett kunde man efter utförda förundersökningar konstatera att det fortfarande inte fanns någon indikation på att någon av de stora, sedan tidigare kända vattenförande strukturerna skulle finnas inom 150 m från påslaget (krav 1, avsnitt 2.1). Kärnkarteringen visade att sprickorienteringarna följde det vanliga mönstret på Äspö, d v s att de vattenförande sprickorna i medeltal stryker ca 315° och stupar brant. Det innebar att de förväntades skära tunneln under 85° vinkel, d v s uppfylla kravet 70–90° (krav 2a, avsnitt 2.1). Antalet öppna sprickor/m varierade mellan 2.2 och 3.5 vilket uppfyllde kravet om minst 2 sprickor/m (krav 2b, avsnitt 2.1). Sprickornas vidd, beräknat utgående från mätningar med 3-meters dubbelmanschett uppgick till drygt 200 µm vilket stämde relativt väl med tidigare kända hydrauliska värden från strukturer identifierade i TRUE-projektet. Med PFL mättes även mycket små inflöden, och därmed förväntades även sprickor ned mot 10 µm. Kravet på visade sprickvidder inom den nedre delen av intervallet 10–300 µm var därmed uppfyllt (krav 2c, avsnitt 2.1). När tryckmätningarna utfördes konstaterades hydrauliska förbindelser mellan nya och gamla kärnborrhål, vilket tolkades som att förväntningarna om att träffa på TRUE-strukturerna uppfylldes. Trycken mätta i successivt längre helhål i 10-meterssektioner varierade mellan 2,9 och 3,3 MPa (20–100 m längs hålet) och baserat på utvärderingen av dessa samt HMS-registreringar i närliggande hål, beslöts att anse att även tryckkravet (3,5 MPa på 25 m från påslag) var uppfyllt (krav 3, avsnitt 2.1).

Sammantaget kunde slutligt bekräftas att platsen uppfyllde de krav som satts upp och definitivt val av TASS som plats för försöken gjordes.

4.5 Fördjupad analys av förundersökningen

4.5.1 Fördelning av spricktransmissiviteter och hydrauliska sprickvidder

Bergmassans genomsläpplighet runt tunneln behövs för att bedöma inflödet till den oinjekterade tunneln och för att prognostisera inflödet till tätad tunnel, så att omfattningen på tätningsinsatserna kan bestämmas. För att bestämma omfattningen behöver även fördelningen av sprickornas transmissivitet och hydrauliska sprickvidd beskrivas.

Beräkning av spricktransmissiviteter och vidd gjordes i ett tidigt skede med data hämtade från ett befintligt kärnborrhål KI0023B, se avsnitt 4.2. Jämförande beräkningar gjordes därefter med data från förundersökningens kärnborrhål, d v s baserat på kärnkarteringen och dubbelmanschettmätningarna (inflöde och tryck) från KI0010B01, KI0014B01 och KI0016B01. Redovisningen görs även för en sammanslagning av de tre kärnborrhålen. Modellen är att varje kärnborrhål korsar en enskild spricka som ger ett specifikt flöde till borrhålet. Alltså är det olika egenskaper avseende flöde och sprickvidd för varje borrhål. Med detta synsätt fås att tre kärnborrhål används för att tolka 100 m bergmassa. Detta används främst för att beräkna ett prognostiserat inflöde till TASS-tunneln i avsnitt 4.5.2.

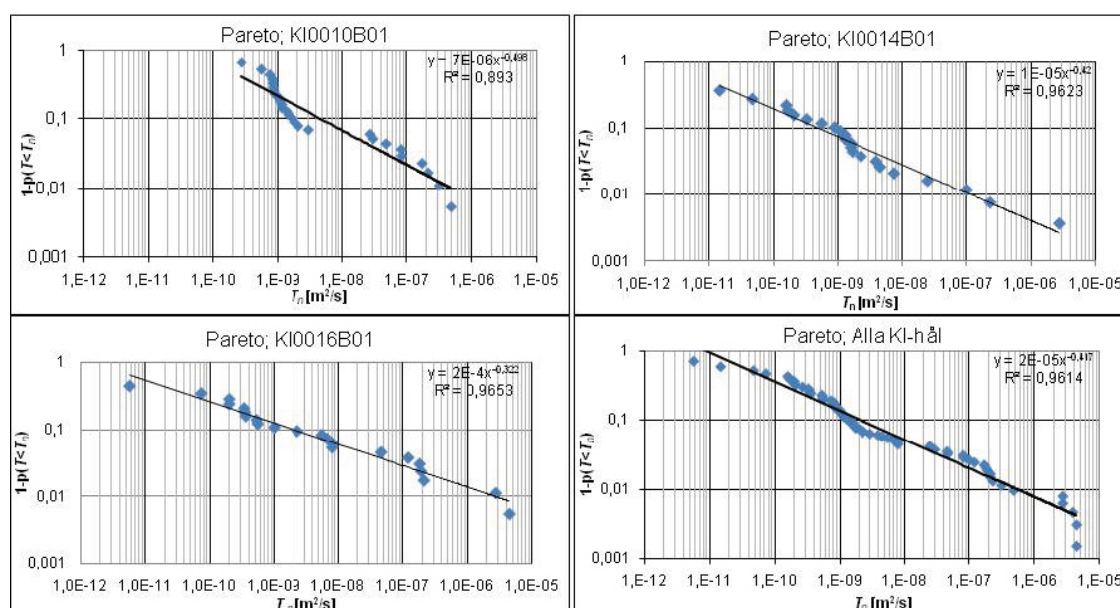
Jämförelsen mellan resultat från det gamla respektive de nya kärnborrhålen resulterade i att den för designen utnyttjade fördelningen av hydraulisk sprickvidd inklusive värdet på den dimensionerande hydrauliska sprickvidden, 10 µm, som var utvärderade från KI0023B, bedömdes vara giltigt för designen. Utvärderingen från förundersökningens hål med avseende på största hydrauliska sprickvidd visade dock en betydande sannolikhet för större sprickvidder än de som förväntades utifrån den första utvärderingen.

Nedan redovisas de utvärderade värden som användes för beräkningarna, se tabell 4-5, en sammanfattning av de beräkningar och bedömningar som gjordes samt resulterande fördelningar och sprickvidder.

För att bestämma transmissivitetsfördelningen räknades inflödet per 3-meters respektive 5-meters sektion om till sektionstransmissivitet med Moyes formel (ekvation 3-1). Kärnborrhålets totala transmissivitet beräknades som summan av sektionstransmissiviteterna. Med den maximala sektionstransmissiviteten, de övriga sektionstransmissiviteterna, antalet sprickor i sektionen och totala antalet sprickor för hela borrhålet som indata (se tabell 4-5) räknades sedan en paretofördelning över de enskilda spricktransmissiviteterna fram med hjälp av ekvation 3-6. Beräknade resultat för samtliga förundersökningsborrhål redovisas figur 4-8.

Tabell 4-5. Transmissiviteter och sprickantal för skattning av fördelning av spricktransmissiviteter. Observera att kärnlängden som används för skattningen är något kortare än hela kärnkarteringen i tabell 4.4 samt att sektionerna är anpassade till där dubbelpackern har mätt inflödet.

Kärnborrhål	Σ Transmissivitet hela borrhålet T_{tot} [m^2/s]	Max sektionstransmissivitet T_{max} [m^2/s]	Effektiv borrhåls-längd [m]	Mätsektionens längd [m]	Antal öppna sprickor, N [st]	Antal vattenförande sektioner i [st]
KI0010B01	$3,8 \cdot 10^{-06}$	$2,6 \cdot 10^{-06}$	94	3	195	28
KI0014B01	$7,5 \cdot 10^{-06}$	$4,4 \cdot 10^{-06}$	94	3	276	23
KI0016B01	$1,5 \cdot 10^{-05}$	$7,0 \cdot 10^{-06}$	94	3	189	23
Sammanlagda; 10, 14 och 16	$2,7 \cdot 10^{-05}$	$7,0 \cdot 10^{-06}$	282	3	660	74
KI0023B	$2,4 \cdot 10^{-06}$	$1,5 \cdot 10^{-06}$	141	5	58	27



Figur 4-8. Skattade spricktransmissiviteter för KI0010B01 ($k=0,50$), KI0014B01 ($k=0,42$), KI0016B01 ($k=0,32$) och Sammanlagda ($k=0,42$). Spricktransmissiviteterna har antagits paretofördelade och indata utgörs av inflöden i 3-meterssektioner och antal karterade öppna sprickor. Observera de olika skalorna på x-axeln.

De framräknade fördelningarna visade mycket god anpassning till de mätta sektionstransmissiviteterna för KI0014B01 och KI0016B01. KI0010B01 visar en sämre anpassning men denna iakttagelse föranledde ingen justering av beräkningen.

För att erhålla sprickviddsfördelningen för de nya kärnborrhålen omräknades spricktransmissivitetsfördelningarna med ekvation 3-6. Med en enkel betraktelse utifrån tabell 4-5 kan också noteras att det totala antalet sprickor var stort och antalet vattenförande sektioner över 20, men så mycket som ca hälften av den totala transmissiviteten härrörde från en enda mätsektion, och detta gällde för samtliga borrhål. Den redovisade sannolikheten som motsvarar att av hypotetiskt 200 sprickor längs en sträcka skulle en spricka ha en hydraulisk vidd större än 100 μm och 199 sprickor ha en vidd mindre än 100 μm bedömdes därmed som rimlig.

Den största mätta sektionssvise transmissiviteten i 3 meters sektion återfanns i borrhål KI0016B01 i sektion 66,5–69,5 m längs kärnan. Denna transmissivitet, $T_{max}=7 \cdot 10^{-6} m^2/s$, beräknad med ekvation 3-1, motsvarade en hydraulisk sprickvidd på 223 μm . Den förväntade största sprickvidden, enligt den framräknade fördelningen, hade transmissiviteten $1,3 \cdot 10^{-5} m^2/s$ vilket korresponderar till en hydraulisk sprickvidd om 272 μm . Sannolikheten för en så stor spricka eller större var 0,5 % och indikationen kom från KI0016B01. För den förväntade största spricktransmissiviteten och den korresponderande hydrauliska vidden från fördelningen för respektive borrhål, se tabell 4-6.

Tabell 4-6. Förväntad (0,5% sannolikhet) största hydrauliska sprickvidd, utdata från upprättad paretofördelning.

Kärnborrhål	Beräknad max spricktransmissivitet ($p=0,99,5-99,6$) $T_{r,max}$ [m^2/s]	Korresponderande max hydraulisk sprickvidd max b_{hyd} [μm]
KI0010B01	$2,2 \cdot 10^{-06}$	152
KI0014B01	$5,4 \cdot 10^{-06}$	204
KI0016B01	$1,3 \cdot 10^{-05}$	272
Sammanlagda; 10, 14 och 16	$5,1 \cdot 10^{-06}$	224
KI0023B	$1,2 \cdot 10^{-06}$	125

4.5.2 Skattning av inflöde

I föregående avsnitt beskrevs beräkningen och fördelningen av de transmissiviteter och sprickvidder som skulle ligga till grund för att upprätta basdesignen, dvs en fördjupad analys av förundersökningsdata. Basdesignen utgick alltså från det *spann* av spricktransmissiviteter/hydrauliska sprickvidder som förväntades, utan hänsyn till *var* inflödena förväntades vara som störst respektive minst.

Inflödet till tunneln utan injektering beräknades enligt ekvation 3-7, där T_{groul} sätts lika med T_{tot} (tabell 4-7). Som värde på den totala transmissiviteten, T_{tot} användes värdet från de tre kärnborrhålen, KI0010B01, KI0014B01 och KI0016B01. Djupet under grundvattenytan sattes till 350 m baserat på det bedömda maxtrycket 3,5 MPa. Skinfaktorn, ζ , valdes till 5, se /Gustafson 2009/, och tunnelradien, r , till 2,5 m. Den använda borrhåls längden, L , är 94 m för samtliga kärnor.

Tabell 4-7. Total transmissivitet, T_{tot} , och beräknat inläckage, Q_{inj} , till TASS-tunneln för kärnborrhålen i förundersökningen. För kärnborrhålen finns också redovisat egenskaper utvärderade från paretofördelningen och för jämförelse även det teoretiskt ideala förhållandet mellan T_{tot}/T_{max} enligt /Gustafson 2010/.

Kärnborrhål	Σ Transmissivitet hela borrhålet T_{tot} [m^2/s]	Beräknat inläckage, Q_{inj} , från T_{tot} [$l/min \cdot 60 m$]	Max sektions-transmissivitet T_{max} [m^2/s]	Förhållande T_{tot}/T_{max}	Formparameter, k för pareto-fördelningen	Kontroll förhållande T_{tot}/T_{max} enl Gustafson, 2010
KI0010B01	3,8 E-6	30	2,6 E-6	1,45	0,52	1,5
KI0014B01	7,5 E-6	59	4,4 E-6	1,70	0,42	1,4
KI0016B01	1,5 E-5	118	7,0 E-6	2,13	0,32	1,2

Med ovanstående data visar beräkningarna att inläckaget till tunneln, 60 m lång, utan injektering kan variera mellan 30 till hela 118 l/min. KI0010B01 borrades först i helt ostörda förhållanden. De påföljande kärnborrhålen, KI0014B01 och KI0016B01 borrades efteråt och där en viss påverkan på tryck och flödessituationen kan ha förekommit, borrhålen kan ha konnekterats.

I den högra delen i tabellen visar förhållandet mellan den största transmissiviteten och den totala transmissiviteten för kärnborrhålen. För en kontroll av paretofördelningens noggrannhet kan detta förhållande jämföras med vad det beräkningsmässigt borde var med hjälp av formparametern, k och antalet sprickor enligt /Gustafson 2010/. För kärnborrhål KI0010B01 är förhållandet 1,45, alltså den totala transmissiviteten är 1,45 gånger större än den maximala transmissiviteten, eller att den största sprickan är står för 70% av den totala transmissiviteten. Med ca 100 sprickor och ett k på 0,5 blir förhållandet mellan $T_{tot}/T_{max} \approx 1,5$ för en helt ideal paretofördelning. Alltså verkar den upprättade paretofördelningen för KI0010B01 stämma bäst överrens mellan de olika kärnborrhålen.

En praktisk betraktelse av antalet korsande sprickor, och indirekt borrhåls längd, är att ju fler sprickor som ett borrhål korsar ju större skillnad blir det mellan borrhålets totala transmissivitet och den största sektions transmissiviteten. Vid k -värden under ca 0,45 blir skillnaden i förhållandet, T_{tot}/T_{max} , ytterst liten oavsett om det är några få sprickor (10 st) eller många (1 000 st), se /Gustafson 2009/.

Genom att använda sättet med att beräkna den totala transmissiviteten utifrån den uppmätta maximala transmissiviteten kan även den sammanslagna paretofördelningen användas för beräkning av inläckage, se tabell 4-8. T_{max} för de sammanslagna motsvarar den maximala sektion transmissiviteten för kärnborrhål, KI0016B01 ($T_{max}=7,0E-6$ m²/s). Antalet sprickor är summan av varje kärnborrhåls sprickantal ($N=660$), formfaktorn, k är sedan tidigare beräknad till 0,42 vilket ger enligt /Gustafson 2009/ att den totala transmissiviteten för den sammanslagna flödet beräknas till $9,8E-6$ m²/s. Från detta kan inläckaget beräknas till 78 l/min och 60 m tunnel där kärnans längd är 94 m, alltså vi använder tre parallella kärnor för att undersöka 94 m bergmassa. Inläckaget från de sammanslagna kärnborrhålen är något högre än medelvärdet av de tre kärnborrhålen.

Tabell 4-8. Beräknat inläckage för de tre sammanslagna kärnborrhålen baserat på framräknad total transmissivitet.

Kärnborrhål	Max sektionstransmissivitet T_{max} [m ² /s]	Beräknad T_{tot} för $k=0,42$, enligt /Gustafson 2009/ ($1,4 \cdot T_{max}$) [m ² /s]	Beräknat inläckage, Q_{inj} [l/min*60 m]
Sammanslagna, KI0010B01, -14B01, -16B01	7,0 E-6	9,8 E-6	78

4.6 Sammanfattande geohydrologisk prognos

Karteringen av de tre långa borrhålen visade att den dominerande bergarten är Äspödiorit. Två av kärnorna innehöll även mindre mängd av finkornig diorit/gabbro. Pegmatit- och finkorniga granitgångar fanns i alla tre kärnor. Vissa mineral var oxiderade och epidot var rikligt förekommande. Vissa underordnade delar var vittrade. Huvudsprickriktningen konstaterades vara 136° – 316° , det vill säga nästan vinkelrätt mot tunnelns drivningsriktning på 230° . Sprickplanen hade mestadels brant stupning men det fanns även komponenter med flacka plan.

Sektion ca 20 m var den sektion som gav den största individuella ökningen av flödet för samtliga borrhål. Vid sektion 65 m fanns en större flödesökning, 47 l/min, men enbart i ett av kärnborrhålen. Helhålsinflödet för de tre kärnborrhålen var 45, 78 respektive 95 l/min. Borrningen av borrhålen innebar i sig en störning av förhållandena, d v s tryck och flöde påverkades, och helhålsinflödet ger därför endast en fingervisning.

Det uppmätta grundvattentrycket var som högst 3,2 MPa och mättes längst in i kärnborrhål KI0010B01. En analys utfördes som tar hänsyn till att en avsänkning sker runt borrhålet, och analysen visade att trycket kan vara så höga som 3,7 MPa längst in i de 100 m långa borrhålen.

De utförda sektionsvisa inflödestesterna visade flera distinkta inflödestoppar, i ett spann från några få liter per minut till hela 47 l/min. Utöver topparna fanns flera mindre inflöden längs stora delar av kärnorna. Den största utvärderade inflödet i 3 m sektion 47 l/min motsvarar en hydraulisk sprickvidd på ca 230 μ m om inflödet antas härröra från en spricka i sektionen. På samma sätt tolkas inflödet om 22–45 l/min vid längdmätning 20 m till sprickvidder om 150–190 μ m.

För uppskattning av största sannolika hydrauliska sprickvidd användes paretoanalysen för de tre sammanslagna förundersökningshålerna. Sannolikheten var 99,8% att sprickvidderna understiger 224 μ m. De enskilda analyserna visade på största hydrauliska sprickvidd på 150 μ m för KI0010B01, 202 μ m för KI0014B01 respektive 272 μ m för KI0016B01.

Inflödet till den tänkta TASS-tunneln prognostiserades till 30–118 l/min och 60 m tunnel utan injektering baserat på resultaten från kärnborrhålen. Analysen av de tre kärnborrhålen sammanslagna ger ett inläckage på 78 l/min och 60 m tunnel.

5 Material och utrustning

5.1 Injekteringsmedel

5.1.1 Silica sol

Silica sol är en kolloidal lösning av silicapartiklar i vatten och är ett relativt nytt material för injektering. När silica sol blandas med salt, t ex natriumklorid, startar en reaktion och kiselpartiklarna bildar kedjor; materialet ”gelar”, dvs härdar. Geltiden går att styra och är en central parameter för design och utförande av själva injekteringen.

Silica sol är relativt nytt för injektering av sprickor i kristallint berg men har använts till exempel i USA och Japan för stabilisering av jordar samt som tätbarriärer runt deponianläggningar. Även i Europa används silica sol, främst till stabilisering av kraftigt vittrat berg och jord.

I Sverige har tidigare studier av silica sol som injekteringsmaterial i kristallint berg genomförts av SKB, SBUF, KK-stiftelsen, BeFo, Banverket och Vägverket. SKB:s tidigare studier har hittills innefattat såväl laboratoriestudier av de reologiska och mekaniska egenskaperna /Butron et al. 2007/, som mindre fältförsök i Äspö /Funehag och Fransson 2005/. Den teoretiska kunskapen om vilken reologi och vilka materialegenskaper som krävs i olika injekteringssituationer har också utvecklats. Vidare har begränsade injekteringar med systematisk design och utvärderingar genomförts i flera järnvägs- och vägprojekt bland annat i Hallandsås och i Törnskogstunneln, /Funehag 2005, Funehag och Gustafson 2005/ och Nygårdstunneln /Butron et al. 2008/. Någon praktisk erfarenhet av användning av silica sol vid ett vattentryck motsvarande planerat förvarsdjup har dock hittills inte funnits.

Silica solpartiklarna kan variera i storlek mellan ca 2 nm och 100 nm. Som jämförelse har cement av typen Ultrafin 16 en partikelstorlek på ca 16 µm, d v s cement partiklarna är i storleksordningen tusen gånger större. I projektet användes följande silica sol och saltlösning:

Silica sol: Meyco MP320®; 40 % lösning. Medelpartikelstorleken är 25 nm.
Saltlösning: Meyco MP320 accelerator® (10 % NaCl-lösning).

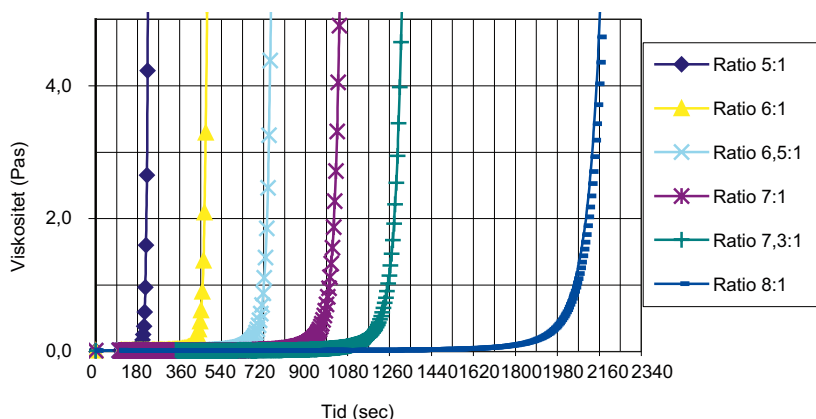
Produkterna är tillverkade av Eka Chemicals, Bohus och levererade av BASF. Silica solen (Meyco MP320) betraktas inte som hälsofarlig. De toxikologiska och ekotoxikologiska effekterna är mycket låga. Vid hudkontakt kan silica solen verka uttorkande eftersom pH är 9–10. Saltlösningen (Meyco MP320 Accelerator) kan irritera ögonen. Den toxikologiska effekten bedöms som låg. För den ekotoxikologiska effekten finns inga data¹.

När silica sol blandas med saltlösningen påskyndas den naturliga aggregeringen av silica solpartiklarna, s k gelning. Inledningsvis är blandningen vattenlik, d v s den har låg viskositet. Mängden saltlösning styr hastigheten på gelningen. Ju högre saltkoncentrationen är, desto snabbare är gelningen, se figur 5-1. Gelningen är även starkt temperaturberoende; t ex ger en höjning av temperaturen från 10 till 20°C en ändring i geltid från 30 till 20 min vid blandningsförhållandet 4,5:1.

För beskrivning av silica solens gelningsförlopp har två begrepp definierats: Gelinduktionstiden och geltiden. Gelinduktionstiden är definierad som den tidpunkt vid vilken den initiella viskositeten fördubblats. Geltiden definierades i detta projekt utgående från kopprovet. Med kopprovet bestäms geltiden som den tid det tar innan man kan vända en kopp med blandad silica sol 90 grader utan att blandningen visar minsta tillstymmelse att rinna.

Som en tumregel kan sägas att gelinduktionstiden är 1/3 av geltiden. Viskositeten sätts vid beräkning initialt till ca 5 mPas, är vid gelinduktionstiden i storleksordningen en hundradels Pas och vid geltiden flera tusen Pas. Som jämförelse har vatten en viskositet på ca 1 mPas. Det innebär att efter gelinduktionstiden sker gelningen mycket snabbt, se figur 5-2. Detta innebär att inträngningen i en spricka också upphör kort därefter; vid halva geltiden är maxinträngningen praktiskt sett uppnådd, se vidare avsnitt 6.2.5.

¹ Säkerhetsdatablad (MSDS) för Meyco MP320 och MP320 accelerator.



Figur 5-1. Illustration av viskositetsstillväxten över tiden för olika blandningsförhållanden mellan silica sol och salt vid 8°C. Observera att dessa blandningsförhållanden inte används i detta projekt utan endast utgör exempel på viskositetsstillväxten.

Den låga initiella viskositeten tillsammans med den kontrollerbara snabba viskositetsökningen är centrala egenskaper som möjliggör beräkning av inträngningslängd samt design av injekteringen med silica sol. Geltiden är också en central parameter för kontroll av blandningen och för att styra den effektiva injekteringstiden, se avsnitt 3.4.6.

Injekteringsmedlet blandades satsvis och en ny sats användes för varje injekteringshål. Satsvis blandning möjliggör en enkel styrning av geltiden. Blandningen av silica sol och salt gjordes i omröraren på injekteringsplattformen, se avsnitt 5.2.1. Doseringen skedde med hjälp av två fåtpumpar som styrdes av ett receptinvägningssystem (DOSAC) vilket doserade med hjälp av lastceller kopplade till ett vågsystem. Silica solen vägdes upp direkt i ett blandningskärl med tre lastceller samtidigt som saltlösningen vägdes upp i en tillsattstank med en lastcell ovanför blandningskärllet. Normalt blandades satsen på ca 200–250 kg, dvs ca 150–200 liter. När silica solen var uppvägd tillsattes saltlösningen automatiskt samtidigt som omröraren var igång. När saltet var tillsatt fick omröraren gå i 30 sekunder, innan ett referensprov togs. Injekteringen kunde därefter starta.

Referensprov togs på varje injekteringsats. Kontrollerna innefattade att geltiden var den avsedda för satsen samt blandningens temperatur, se tabell 5-1.

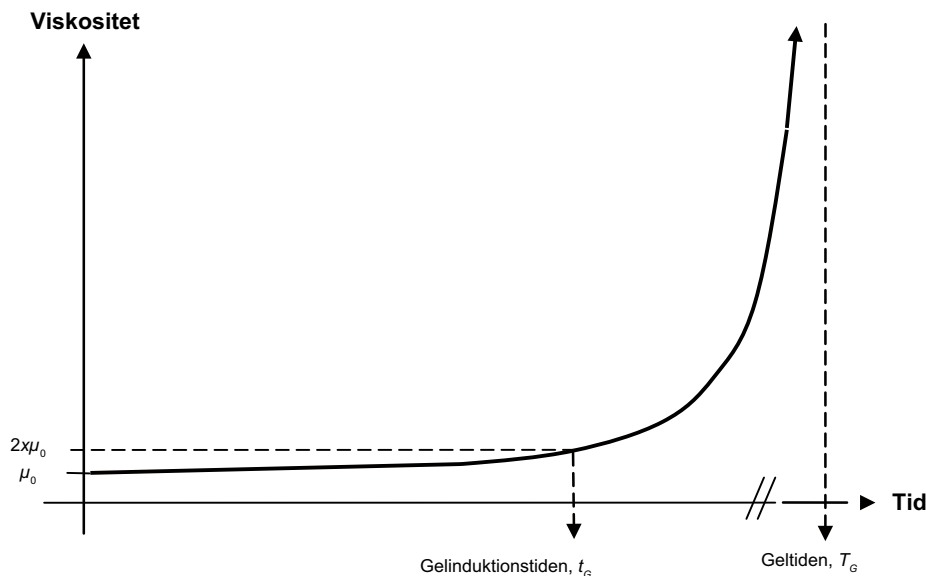
För att kontrollera geltiden gjordes kopprovet. Ett prov togs med en plastmugg från blandningen och tiden mättes från det klockslag när blandningen var färdig.

Tabell 5-1. Egenskaper på silica solen som kontrollerades i fält samt utrustning för kontroll.

Egenskap	Utrustning
Geltid	Engångsmugg av plast
Temperatur	Termometer

Temperaturen mättes direkt i omröraren vid varje påbörjad injektering för att ge möjlighet att finna förklaringen till eventuellt avvikande geltider.

I detta projekt mättes också viskositeten på laboratorium med en reometer. Viskositeten plottades mot tid efter blandning och diagram av typen enligt figur 5-1 erhöles. Oblandad silica sol åldras med tiden med påföljd att geltiden i den blandade silica solen också förändras; gelningen sker snabbare för en äldre (några månader) än för en ny silica sol. Reologimätningarna utfördes inför varje leverans av leverantören (Eka Chemicals, Bohus). Detta gjordes för att säkerställa att leveransen uppfyllde de åtaganden som Eka satt på en silica sol. För de första leveranserna utfördes även kontroller av rheologin på Chalmers med en Bohlin, CVO200. Kontrollerna gav godkända värden, och leverans skedde så ofta att ingen silica sol användes som var äldre än två månader användes.



Figur 5-2. Schematisk skiss över begreppen gelinduktionstid och geltid. Observera att tidsaxeln är bruten. Geltiden är mycket längre än vad som åskådliggörs i detta diagram.

Den silica sol som finns tillgänglig på den europeiska marknaden är MP320 och MP320T. Skillnaden är i halten kisel, där MP320 har den största halten kisel om 40% mot ca 15% för MP320T. MP320 valdes helt enkelt för att det är den som det finns mest erfarenhet av (se Funehag, 2007) och vidare att den bedömdes vara den som kommer att finnas tillgänglig på marknaden längst tid.

5.1.2 Cementbaserat injekteringsmedel med lågt pH

Det cementbaserade injekteringsmedlet med lågt pH som användes är i huvudsak det recept som utvecklats av Posiva /Sievänen et al. 2006/. Det har en sammansättning som ger ett lakvatten från cementbruket som håller ett pH lägre än 11. Förutom cement innehåller medlet en betydande andel silica fume (microsilica, se vidare nedan) och en mindre andel superplastiserare. ”Vanligt” cementbruk för injektering består av cement, vatten och tillsatsmedel där tillsatserna är enbart någon eller några procent. Tidigare fälterfarenheter från användning av det cementbaserade bruket var begränsade; receptet hade testats i en pågående injektering i Onkalo.

I projektet användes tre cementbaserade blandningar; två för injektering (typ 1 och 2) och ett för hålfyllnad. Samtliga består av cement, silica fume, vatten och superplastiserare. Alla tre bruken har samma förhållande cement/silica fume. Skillnader i recepten är mängden vatten samt typ av cement, antingen Cementa Ultrafin 16 (UF 16) eller Cementa Injektering 30 (INJ 30). Den huvudsakliga skillnaden mellan cementen är att INJ 30 har större korn och en något större spridning av partiklarnas storlek.

Cementen utgörs av sulfatbeständigt portlandcement med d_{95} på 16 μm för UF 16 och d_{95} på 30 μm för INJ 30. Cementtyperna utgår från samma klinker som anläggningscement och mals i speciella kvarnar till önskad partikelstorlek. Båda cementtyperna består av strävt dammande pulver och klassas som irriterande. Irritation kan fås i slemhinnor och ögon samt vid långvarig kontakt även frätskador i ögonen. Vid kontakt med vatten bildas kalciumhydroxid vilket har ett högt pH (12,5–13,5). Normalt pH vid bruksblandningar är 12,8. Det finns ingen känd ekotoxikologisk information. Avfallet (härdad cement) kan deponeras som byggnadsavfall².

Silica fume består av microsilica, i detta fall dispergerad i vatten med en koncentration av ca 50 % fasta partiklar, under produktnamnet GroutAid[®]. Partiklarna är av storleksordningen mikrometer ($d_{90}=1 \mu\text{m}$). Silica fume, är inte hälsofarlig eller miljöfarlig och inte heller klassad som farligt avfall. pH-värdet ligger mellan 5 och 7. Om GroutAiden skulle torka eller damma kan den irritera ögon och slemhinnor³.

² Säkerhetsdatablad (MSDS) för UF16 och INJ30.

³ Säkerhetsdatablad (MSDS) för GroutAid.

Använd superplastiserare är en naftalensulfonat-baserad produkt som i Finland benämns ”Mighty 150”. I Sverige säljs denna produkt som ”SIKA Melcrete”. Melcrete har dock lägre torrhalt; 35 % jämfört med 40 % för Mighty 150. Receptet i projektet har samma viktsandel Melcrete som Posivas recept har med Mighty. SIKA Melcrete är inte klassad som miljöfarlig men ingående konserveringsmedel har i hög koncentration hög toxicitet för vattenlevande organismer. Avfallet klassas som farligt avfall. De toxikologiska effekterna är sveda och irritation i slemhinnor och ögon⁴.

UF 16 samt INJ 30 levereras i 20 kg plastbekladda papperssäckar. Silica fume med produktnamnet GroutAid, levereras i fat om 200 l och säljs av Elkem AS, Norge. Den i detta projekt använda GroutAiden levererades från Holland. Superplastiseraren med produktnamnet SIKA Melcrete levereras i fat om 200 l eller i 20 l dunkar och säljs av SIKA.

Sammansättningen av de tre använda blandningarna redovisas i tabell 5-2. På grund av den stora mängden tillsatt silica fume är det traditionella begreppet för blandningsförhållandet mellan vatten och cement, vattencementtalet vct, mindre relevant. Därför används istället förhållandet mellan mängden vatten och torrmaterial, W/DM (water to dry material).

Tabell 5-2. Recept för cementbaserade bruk redovisade som viktförhållanden.

Material	Typ	Tolerans	Bruk typ 1	Bruk typ 2	Hålfyllnadsbruk
Vatten	Dricksvatten	± 0,01	1,67	0,64	0,64
Cement	UF 16/INJ 30	± 0,01	1,00 (UF16)	1,00 (UF 16)	1,00 (INJ 30)
Silica fume	Grout Aid	± 0,01	1,37	1,37	1,37
Superplastiserare	Melcrete	± 0,001	0,068	0,07	0,07
W/DM			1,4	0,8	0,8

Sammansättningen utgår främst från behovet att ha en hög skjuvhållfasthet för att förhindra erosion samtidigt som blandnings- och pumpbarhet måste beaktas. I tabell 5-3 anges värden på de egenskaper som bruket skulle ha, samt de kontrollmetoder som användes för att säkerställa dessa. Filterpumpstest och fallkontest utfördes med lägre intervall/vid behov, medan övriga tester gjordes på varje blandad sats. Resultaten redovisas i bilaga 4.

Baserat på resultatet av förprovningar i fält och i laboratoriet gjordes under injektering provtagning på varje sats vilken skulle godkännas för Bruk typ 1 om två av tre kriterier enligt tabell 5-3 uppfylls, men med villkoret att om samma resultat erhålls för påföljande blandning måste detta utredas innan injekteringen kan fortsätta. Om fler värden låg utanför gränserna skulle Bruk typ 1 kasseras.

För hålfyllnadsbruket är det framför allt den lägre gränsen på flytgränsen (tabell 5-3) som är kritisk för funktionen. Om högre värden än riktvärdena erhöles för hålfyllnadsbruket skulle blandningsförfarandet justeras, men det var tillåtet att pumpa in den blandande satsen.

Tabell 5-3. Erforderliga egenskaper samt fältkontroller för cementbaserat bruk.

Egenskap (utrustning)	Enhet	Bruk typ 1 W/DM 1,4	Bruk typ 2 samt hålfyllnadsbruk W/DM 0,8
Densitet (mudbalance)	kg/m ³	1 310–1 350	1 470–1 570
Flödesegenskaper (Marsh-cone)	s	39–55	Noteras endast
Flytgräns (yield stick)	Pa	> 10	> 10
Inträngningsförmåga (Filterpump, 100 µm)	Volym passerat	Inget definierat gränsvärde	Inget definierat gränsvärde
Hållfasthet (Fallkon)	kPa	Inget definierat gränsvärde	Inget definierat gränsvärde

⁴Säkerhetsdatablad (MSDS) för Sika Melcrete.

För fältkontroll av brukets flytgräns användes en av Chalmers nyutvecklade produkt, kallad yield stick. En rundsvarvad trästicka med en tyngd i ena änden förs försiktigt ned och får sjunka i ett mätglas med bruk. Skjuvhållfastheten bestäms utifrån sjunkdjupet samt densiteten (mätt med mudbalance) och kan läsas av direkt i ett normerat diagram /Axelsson 2009/.

Övrig utrustning för kontroll av det cementbaserade bruket måste betraktas som standardutrustning i injekteringssammanhang, se t ex /Eriksson och Stille 2005/.

Blandnings- och provtagningsproceduren togs fram delvis genom laboratorietester utförda på Chalmers, men framförallt genom fältstudier under inledningen av projektet. Blandningen i laboratoriet utfördes med en mixer av typen Desoi AKM 70D som har en mycket hög blandningshastighet likt den man får vid fältblandning med den aktuella blandaren AC CEMIX 203 HWB som är monterad på Unigrouten (se avsnitt 5.2).

Följande blandnings- och provtagningsprocedur användes:

- 1) Tillsats av vatten i blandarkärl.
- 2) Tillsats av cement, ska ske successivt under ca 1 min och den ska tillsättas i mitten av kärlet.
- 3) Blandning i 2 min efter att all cement är tillsatt.
- 4) Samtidig tillsats av silica fume och superplastiserare. Tillsats ska ske långsamt, under ca 1 min. Silica fumen tillsätts via en fatpump med volymmätare medan superplastiseraren vägs upp och hålls i manuellt.
- 5) Blandning i ytterligare 3 min efter att doseringen är klar.
- 6) Blandningen förs över till omröraren.
- 7) Provtagning.
 - a) Mud-balance för kontroll av densitet.
 - b) Marshkon för kontroll av flödesegenskaperna.
 - c) Yield stick för kontroll av flytgräns.
- 8) Injektering utförs om egenskaperna uppfyller de krav som ställs.
- 9) Filterpumpstester och fallkonförsök utförs som ytterligare kontroll exempelvis vid uppstart av injektering samt om ordinarie provtagning visar flera påföljande provningar med negativt utfall.

5.1.3 Omhändertagande av spill

Den satsvisa blandningen innebar för silica sol att varje sats endast användes för ett hål, eftersom geltiden är en viktig styrparameter. Resterande blandning kasserades. Blandade satser med cementbaserat bruk fick användas för flera hål så länge den inte hade blivit för styv. Det gamla medlet kasserades. Satsstorlekarna anpassades till en grovt prognostiserad volym för att minska spillet.

Vid ett använt blandningsförhållande på 5:1 mellan silica sol och 10% NaCl-lösning blir saltkoncentrationen i injekteringsmedlet 1,7%. En normalstor sats var ca 240 kg vilket ger ca 4 kg salt. Allt injekteringsmedel injekterades inte i berget utan en stor del, uppskattningsvis ca 50 % blev över, fanns kvar i slangar eller kom tillbaka in i tunneln genom borrhål eller sprickor i bergytan. För en injekterings-skärm bestående av 40 borrhål med blandningssatser om 240 kg gick det åt ca 10 ton. 50 %, d v s 5 ton injekterades, medan 5 ton blev spill. Detta bedöms som den maximala spillvolym som uppkom vid en skärm i projektet, oftast blev det mindre. Saltmängden som injekterades var då ca 80 kg, medan 80 kg blev spill. Saltbelastningen var således ca 80 kg för en injekterings-skärm. Spillet samlades upp i kärl där det fick gela. Denna del stod för den största delen av spillet. Det spill som utgjordes av återflöde eller spill från slangar blandades upp med vattnet som fanns vid tunneln. Vattnet inklusive borrhax och injekteringsmedel pumpades till sedimentationstankar. Där sedimenterade injekteringsmedel och borrhax som sedan grävdes upp ur tankarna och kördes till deponi eller destruktion. Den i kärlet samlade vattenuppblandade silica solen innehöll mycket vatten vilket gjorde att den behövde lång tid för gelning. Inga vätskor får deponeras varför salt (vägsalt) tillsattes för att påskynda gelningen.

Spillet från cementinjektering samlades upp i kärl och gick till deponi. Spill från rengöring av utrustningen samlades upp i samma kärl. Det spill som utgjordes av återflöde eller spill ifrån slangar blandades upp med vattnet som fanns vid tunnelfronten och sedimenterade i makadamen i sulan.

UF16 och INJ30 är ej miljöfarliga och ej klassade som farligt avfall. Silica fume är en vattenlösning med dispergerad silica och är varken miljöfarlig eller hälsofarlig. SIKKA Melcrete är inte klassad som miljöfarlig men ingående konserveringsmedel har i hög koncentration hög toxicitet för vattenlevande organismer. Avfallet klassas som farligt avfall. En cementblandning med ovanstående komponenter, d v s UF16/INJ30, silica fume och Melcrete, som har härdat kan deponeras som byggnadsavfall.

5.2 Utrustning

5.2.1 Injekteringsutrustning

Tunneln har ett litet tvärsnitt och därför valdes att använda en liten, automatiserad mobil injekteringsplattform från Atlas Copco, Unigrout EH22 200–140 AWB-SS. Plattformen var specialanpassad för detta projekt. De modifieringar som beställdes består av anpassningar för att enkelt kunna blanda silica sol; de styrda fatpumparna samt behållaren för saltlösningen. Vidare är omröraren placerad på tre lastceller för att få stor noggrannhet i uppvägningen.

Följande utrustning fanns monterad på plattformen:

- Blandare AC CEMIX 203 HWB; Storleken är 200 l och den blandar med en hastighet på 1 500 rpm.
- Omrörare AC CEMAG 403 HWB; Storleken är 400 l där omrörningen kan styras mellan 10–100 rpm. Det är detta kärl som användes för blandningen av silica solen. Omröraren står på tre lastceller där vikten även under injekteringen kan utläsas för att beräkna ett flöde och total injekterad volym. Detta används som en kontroll mot flödesgivaren.
- Pump PUMPAC BASIC 80/110HD; Maximalt flöde som kan pumpas är 100 l/min vid 10 MPa. Med en omställning kan trycket uppgå till 200 bar men maxflödet blir då 50 l/min.
- Kompressor LE15-10SE120M.
- Receptvägningssystem ”*Doserings- och blandningssystem*” DOSAC; till detta system är kopplat fatpumpar samt en behållare för dosering av saltlösningen till silica solen.
- Registreringsutrustning LOGAC G5.
- Flödesgivare METER UNIT CP 150; Flödesgivaren visar 0–50 l/min där noggrannheten är som bäst för de större flödena. Vid låga flöden, under ca 5 l/min, blir mätnoggrannheten allt sämre och vid värden under 1 l/min kan felet uppgå till mer än 100 %. Denna utrustning användes även för vattenförlustmätningen i injekteringsborrhålen.
- Fatpumpar. Fatpumparna har inbyggda flödesgivare samt kan stängas av automatiskt av doseringssystemet när rätt vikt var nådd i omröraren. Fatpumparna användes både för silica sol, saltlösningen och för silica fumen.

5.2.2 Injekteringsmanschetter

Borrhålen borrades nominellt med en diameter om 64 mm. Manschetterna levererades av GMA (Gurlita GMA AB, Torsby). De klarar borrhål med diameter mellan 62 och 66 mm. De var av typ flergångsmanschett (används ca 3 ggr innan de kasseras), hade en innerdiameter på 22 mm och var utrustade med kulventil och snabbkoppling. För att klara det höga injekteringstrycket (dimensioneringstryck 25 MPa, PN250) bestod manchetten av tre gummipackningar som spändes upp separat; först två packningar, därefter den tredje packningen. Avståndet mellan de två innersta och den yttersta packningen är 1 m. När de högsta injekteringstrycken användes sammanbands samtliga manschetter med en stålkätting.

5.2.3 Pump för avluftning av borrhål

Ett problem finns med att luft och vatten finns i borrhålet när injekteringen skall börja. Detta gäller framförallt i de nedåtlutande borrhål som finns i sulan. Vattnet medför en effektivitetssänkning då detta måste pressas ut i sprickorna innan injekteringsmedlet kan fylla borrhålet. Luften utgör ett säkerhetsproblem då den instängda luften kan leda till att manschetterna trycks ut vid pumpning. För att undvika dessa problem användes under de inledande testerna enkla system med slang som fördes genom manschetten till borrhålsbotten där injekteringsbruket skulle trycka ut luft och vatten genom slangen. Detta fungerade inte så bra och istället infördes ett evakueringssystem baserad på vakuumpumpning för att tömma borrhålen på vatten och luft innan injektering utförs. Hålevakuering är viktigt dels för att man snabbt ska kunna fylla hålen med injekteringsmedel och dels med hänsyn till brukskvalitet och tidsåtgången för injektering.

Vakuumsystemet består av två delar; en pump med en tank om 150 liter som skapar vakuum, som tillverkas av Busch Vakuumenteknik, respektive ett ventilpaket som sätts på manschetten, som tillverkas av Chalmers. På ventilpaketet sitter en anordning som används för att tätas mot en slang och föra ner denna till borrhålsbotten. Slangen (10 mm i diameter) är i kontakt med luften i ena änden och med borrhålsbotten i den andra vilket gör att vakuumsugningen blir mycket effektiv. När vakuumpumpen startar, sugas vatten ut först. När borrhålet har tömts på vatten dras slangen ut och borrhålet vakuumpumpas.

Principen är att först evakuera vatten och slam vilket kräver ett motsvarande inflöde av luft och därefter att försätta hålet under vakuum. För hålevakueringen är arbetsmomenten enligt följande:

1. Manschetten öppnas så att vatten och slam rinner ut.
2. Därefter stängs manschetten, vakuumpumpen kopplas på för att suga ut luften.
3. En slang förs ned till botten av borrhålet, gäller för nedåtlutande borrhål.. Slangen skall möjliggöra för att dra ner luft i borrhålet under tiden vakuumpumpningen utförs. På manschetten kopplas vakuumslangen som är kopplad till vakuumpumpen.
4. Pumpen sätts igång och drar upp vatten och slam genom manschett igenom vakuumslangen.
5. När borrhålet är tömt dras luftslangen ut och ventilen till manschetten stängs, vakuumpumpen går fortfarande.
6. När slangen är utdragen och enbart luft pumpas ut bildas vakuum i borrhålet. När detta är tillfyllest kopplas vakuumanordningen bort och injekteringen kan börja.

5.2.4 Borrutrustning

Borrmaskinen för injekteringsborrning var densamma som för salvborrningen, d v s en Atlas Copco, typ Rocket Boomer E2C (två-bomsrigg), med en effekt på 30 kW. Det är en liten men kraftfull maskin lämplig för små tunnlar. Korgen med borrstål monterad på borrarman byggdes om för att kunna borra tätt mot bergvägg.

6 Design och styrning av injekteringen i fintättningsprojektet

6.1 Särskilda förutsättningar

Projektarbete kan generellt beskrivas som ett arbete med ständiga prioriteringar mellan delmålen för att hålla sig inom given resursram, inom tidplan och för att uppnå avsedd kvalitet. I fintättningsprojektet stod det emellertid klart att kvaliteten på ingående aktiviteter skulle ha prioritet för att ge goda förutsättningar att erhålla de resultat som åsyftades och för att kunna bygga vidare på resultaten. Projektets funktion, som en del i teknikutvecklingen för att bygga slutförvar, innebar att det förutom att visa täthetsresultat även var avgörande att visa under vilka förhållanden dessa uppnåts, eller inte uppnåts, och varför.

Ovanstående innebar att dokumentationen var omfattande, men också att betydligt mer omfattande insatser planerades och genomfördes, än om målet varit formulerat endast som minsta tillåtna inläckage. Eftersom uppnåendet av täthetsresultaten var viktiga, och dessa inte kan direkt mätas under arbetets gång gjordes också designen konservativ, d v s på säkra sidan. Optimering var således inte en fråga för detta projektet.

I avsnitt 6.2 redovisas projektets ”Designreport” d v s tillämpningen av flödesschemat i figur 3-1 med de överväganden och tolkningar som gjorts och som resulterat i projektets basdesign.

6.2 Basdesign

6.2.1 Tillåtet inläckage och övriga utgångspunkter

Baserat på projektets målskrivning och den geohydrologiska prognosen fanns följande förutsättningar för att upprätta en basdesign och för att utföra arbetena i tunneln. Till underlag för basdesignen låg också de erfarenheter av främst injekteringsmedlen som erhöles i ”korset” i etapp 1.

Den utförda förundersökningen hade bekräftat att den dominerande orienteringen för vattenförande sprickor följde det allmänna mönstret på Äspö. Detta medförde att TASS skulle skära sprickorna i det närmaste vinkelrätt och innebar vidare goda förutsättningar att träffa sprickorna med injekteringshål i skärmar utanför kontur och även med injekteringshål innanför kontur. Vidare bedömdes att det fanns förutsättningar att de önskvärda höga trycken skulle påträffas. Koncentrationen till en sprickriktning innebar också att designmetodiken, som bygger på förenklingen att sprickorna är parallella diskar utan hydrauliskt samband, bedömdes vara väl tillämplig för den aktuella situationen.

Platsvalskriteriet angav hydrauliska sprickvidder från 10 µm till 300 µm för att ge möjlighet att testa både silica sol och cementbaserat injekteringsmedel utan att gå in i några stora zoner. De flesta av sprickorna (mer än 99 %) förväntades vara mindre än 200 µm, se avsnitt 4.6, men tydliga indikationer fanns även på större vidder. Slutsatsen var att silica sol skulle komma att användas i majoriteten av borrhålen och att silica solinjekteringen skulle styra injekteringskärmarnas geometri.

Det tillåtna inläckaget till tunneln var satt till 1 l/min och 60 m tunnel. Med denna stränga begränsning av inläckaget i kombination med det höga grundvattentrycket var det redan från starten av projektet uppenbart att mycket små sprickor skulle behöva tätas. Inträngningshastigheten i små sprickor är låg, varför det stod klart att själva injekteringen (pumpningen av injekteringsmedel) skulle ta mycket tid även med ett stort antal injekteringshål.

De stora skillnaderna i hydraulisk sprickvidd innebar att man måste räkna med stora skillnader i inträngningslängd i bergmassan. Med hänsyn till närheten till prototypprojektet, som också manifesterats under förundersökningarna genom snabba tryckresponser i prototyp, sattes den maximala teoretiska inträngningslängden till 20 m. Denna maxlängd användes som dimensioneringskriterium för hela tunneln.

De större sprickvidderna i kombination med trycket och förväntade gradienter innebar att risken för erosion måste beaktas. Precis vid tunnelfront var grundvattentrycket lågt och 10 m från tunnelfronten bedömdes att trycket kunde vara så högt som 2,5 MPa, d v s gradienterna kunde vara stora; 2,5 MPa på 10 m motsvarar gradienten 25 m/m.

Tryckmätning i förundersökningens kärnbrorhål hade resulterat i tryck på drygt 3 MPa. Baserat på utvärderingen av dessa samt HMS-registreringar i närliggande hål bedömdes dock att trycket skulle kunna vara så högt som 3,5 MPa. Dessa höga tryck innebar att även injekteringsstrycken skulle behöva vara mycket höga och att särskild utrustning och handhavande skulle krävas.

I kommande avsnitt redovisas upprättandet av och den resulterande basdesignen.

6.2.2 Erforderlig reduktion av inflödet

I den fördjupade analysen av förundersökningen i avsnitt 4.5 beskrevs beräkningen och fördelningen av de transmissiviteter och sprickvidder som skulle ligga till grund för att upprätta basdesignen. Basdesignen utgick från det *spann* av spricktransmissiviteter/hydrauliska sprickvidder som förväntades, utan hänsyn till *var* inflödena förväntades vara som störst respektive minst.

Inflödet till tunneln utan injektering beräknades i avsnitt 4.5.2. Vid beräkning utgående från ekvation 3-7 och varje enskilt kärnbrorhål blev inflödet mellan 30 och 118 l/min och 60 m tunnel. Med användande av förhållandet mellan T_{max} och T_{tot} för de sammanslagna kärnbrorhålen blev inflödet 78 l/min och 60 m tunnel. Att varje spricka ger ett bidrag till inläckaget till tunneln är länken mellan de utvärderade sprickvidderna och inläckaget till tunneln. Varje spricka ger ett tillskott till inflödet i tunneln och genom att täta samtliga sprickor ner till en viss hydraulisk sprickvidd kan inflödet reduceras till önskad nivå. Genom att utgå från det prognostiserade inläckaget utan tätning och successivt reducera detta med inflödet från de största sprickorna tills det maximalt tillåtna inflödet är nått, erhålls den minsta hydrauliska sprickvidden som måste tätas, d v s dimensionerande hydraulisk sprickvidd. Resultatet för de sammanslagna kärnbrorhålen (enligt avsnitt 4.5) visas i tabell 6-1.

Tabell 6-1. Beräknat inläckage enligt ekvation 3-7 till en 60 m lång tunnel när sprickvidder ner till en visst värde tätats. Indata är $H=350$ m, $L_{kärna}=94$ m, $r_i=2,5$ m, $t=5$ m, $\zeta=5$. $T_{tot}=1,4 \cdot T_{max}=9,8E-6$ m²/s. Beräkningen baseras på de sammanslagna kärnbrorhålen KI0010B01, KI0014B01 och KI0016B01 enligt diagrammet i figur 4-9.

Minsta tätad sprickvidd b_{min} [μ m]	Beräknat inläckage q_{grount} [l/min, 60 m]	Transmissivitet tätad berg, T_{grount} [m ² /s]	Kommentar
Ingen	78	$9,8 \cdot 10^{-06}$	Utan injektering
224	61	$7,1 \cdot 10^{-06}$	Största spricka tätad
130	48	$1,3 \cdot 10^{-06}$	Näst största spricka tätad
50	21	$9,6 \cdot 10^{-08}$	—
8	1	$2,9 \cdot 10^{-10}$	Dimensionerande sprickvidd

Tabell 6-1 indikerar att samtliga hydrauliska sprickvidder ner till ca 8 μ m måste tätas för att begränsa inläckaget till kravet 1 l/min och 60 m tunnel. Detta är mindre än den först utvärderade minsta sprickvidden från KI0023B01 som var 10 μ m. Sammantaget bedömdes att valet att behålla en dimensionerande sprickvidd om 10 μ m och ett teoretiskt överlapp av injekteringsmedel mellan injekteringsborrhålen om 50% borde vara tillräckligt för att skapa en tillräckligt tät tunnel.

6.2.3 Val av injekteringsmedelstyper

Utifrån spannet på de sprickor som skulle tätas (10 och 200 μ m i hydraulisk vidd) stod det klart att silica sol var nödvändigt för att kunna täta de fina sprickorna, men också att det av SKB angivna cementbaserade injekteringsmedlet för sprickvidder ner till 100 μ m hade potential att fungera. Det fanns också ett faktiskt behov att använda cementbaserat medel för några sedan tidigare kända och

nu sannolikt påträffade hydrauliska strukturer som bedömdes kunna vara kraftigt flödande. Någon övre gräns för silica sols användbarhet fanns ej, men i målskrivningen fanns delmålet att identifiera gränserna för användbarhet vad gäller hydrauliska sprickvidder vid aktuellt grundvattentryck. För att tillmötesgå önskemålet att testa även det cementbaserade medlet och med hänsyn till de eroderande krafter som kan förväntas i större sprickor sattes nedre gränsen för när cementbaserat bruk skulle användas till 150 µm. Motivet till valet av denna gräns var också – att vid lyckat resultat – ha funnit ett intervall (100–150 µm) där båda typerna fungerar.

Under arbetet med att bestämma injekteringstider och -tryck insågs att spridningen av silica solen skulle bli avsevärd i de större sprickorna om samma geltider användes som behövdes för att få tillräcklig inträngning i de mindre. Ett spann av geltider angavs därför i basdesignen. Det fastställdes också att val av injekteringsmedelstyp och geltid skulle väljas individuellt för varje borrhål enligt tabell 6-2.

Tabell 6-2. Val av injekteringsmedelstyp.

Hydraulisk sprickvidd [µm]	Injekteringsmedelstyp
0–130	silica sol, lång geltid
130–150	silica sol, kortare gel tid
150 µm eller större	låg-pH cementbaserat bruk

Det bestämdes också att både silica sol och det cementbaserade bruket initialt skulle testas efter blandning med fältutrustningen, se ”korset”, avsnitt 7.2. Syftet var att kontrollera både kvaliteten på det injekteringsmedel som kunde blandas och de uppsatta sambanden för inträngning.

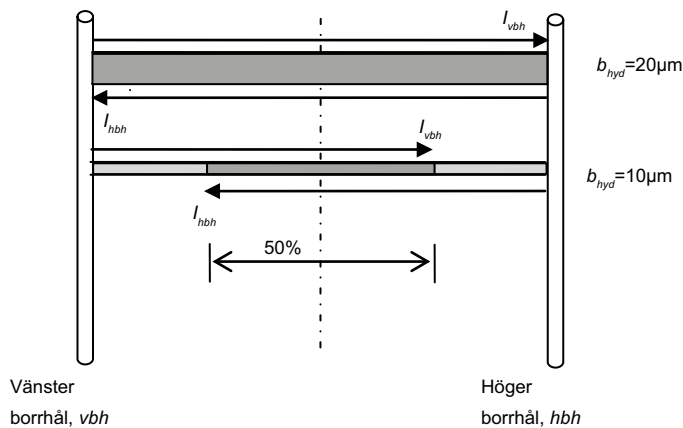
6.2.4 Sprickorientering, preliminär skärmgeometri och den tätade zonen utbredning

Drivningsriktningen för tunneln var näst intill vinkelrätt mot huvudsprickriktningen. Detta var en fördel ur injekteringssynpunkt då injekteringsborrhålen därmed skulle träffa huvuddelen av sprickorna nästan rätvinkligt, se figur 4-7. De första skärmarna skulle vara uppbyggda som traditionella injekterings-skärmar. I detta fall valdes att följa den samlade erfarenheten kring förinjektering; att borra 20 m långa borrhål med ett stick på 5 m och ett överlapp mellan skärmarna på minst 4 m. Detta skulle således ge en tätad zon om 5 m.

Med den dimensionerande sprickvidden 10 µm måste väljas ett begränsat borrhålsavstånd eftersom inträngningshastigheten i en så pass liten spricka är långsam. Ett borrhålsavstånd om 2 m vid spets ansattes. Med hänsyn till att sprickorna förväntades vara i princip vinkelräta eller ha trubbig vinkel mot borrhålen bedömdes att ett teoretiskt överlapp av inträngningslängden mellan borrhålen om 50 % skulle vara tillräckligt för att fullständigt täta förekommande sprickor ner till 10 µm. I figur 6-1 visas att om överlappet är 50 % och borrhålet skulle korsa en spricka som har den dimensionerande minsta vidden med en vinkel om knappt 40° så skulle matematiskt sett sprickan precis bli helt fylld. Ansatsen 2 m vid spets innebar alltså att ett tryck och pumptid som ger 1,5 m inträngning i den dimensionerande sprickvidden skulle sökas. Med det inbördes avståndet i borrspets om 2 m och sticket 5 m kunde borrhålen placeras ut runt tunneln, vilket gav att antalet borrhål i skärmens första omgång blev 22 stycken.

Antagandet enligt praxis att den tätade zonen är lika med sticket är inte relevant för skärmar med borrhål innanför teoretisk tunnelkontur. För den första skärmen innanför kontur (skärm 4) beaktades inte särskilt behovet av att ha en viss utbredning på den tätade zonen. Så gjordes dock i påföljande skärmar, se vidare kapitel 7. Behovet av en viss utbredning på den tätade zonen utbredning med hänsyn till praktiska aspekter exempelvis bultsättning utgjorde ej heller dimensioneringsgrund.

Förutsättningen att en injektering lyckas är att de vattenförande sprickorna träffas av injekteringshålen. I figur 6-2 visas injekteringshålens skärning med sprickorna för skärm 2, 4 och 5 och 6. Sprickredovisningen omfattar de öppna sprickor som karterats i förundersökningens tre kärnborrhål längs det avsnitt som motsvarar respektive skärm. Injekteringshålens riktningar är schematiskt



Figur 6-1. Illustration över det teoretiska överlappet mellan två injekteringsborrhål.

markerade som ringar för skärm 2 (överst i figuren) för åskådliggöra principen. Om ringen för borrhålsvektorn är markerad i samma punkt som polpunkten för sprickplanet är borrhålet således en perfekt normal till planet, d v s borrhålet träffar sprickan vinkelrätt. Den yta som är markerad med raster motsvarar de sprickor som träffas av borrhål under en vinkel som avviker max 10 grader från rät vinkel.

6.2.5 Val av skärmgeometri och injekteringsteknik för silica sol

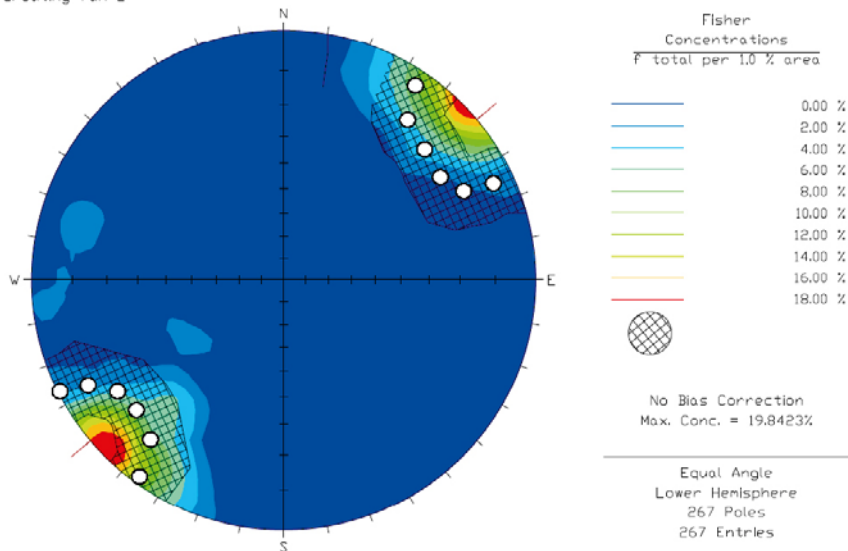
För att slutgiltigt bestämma skärmgeometrin samt pumptryck och tider måste sökas de tryck och tider som skulle ge den erforderliga inträngningslängden 1,5 m i den dimensionerande sprickvidden samtidigt som praktiska aspekter och övriga begränsningar beaktades. En begränsning var den tidigare beslutade maximala inträngningslängden, 20 m, på grund av närheten till prototypförvaret. Vidare måste risken för erosion beaktas.

Baserat på förundersökningsresultaten förväntades de vattenförande sprickplanen ligga vinkelrätt mot tunneln och utan inbördes hydraulisk förbindelse. Detta innebär att flödet antingen kunde vara två-dimensionellt, d v s ske i hela sprickplanet, eller en-dimensionellt, d v s ske i kanaler i sprickplanet. De beräkningar som gjordes förutsatte två-dimensionellt flöde vilket ger en kortare resulterande inträngningslängd än en-dimensionellt flöde. Det innebär att resultatet skulle vara på säkra sidan för den dimensionerande minsta hydrauliska sprickvidden. För den största resulterande inträngningslängden, som ju uppstår i den största sprickvidden, förutsattes också två-dimensionellt flöde.

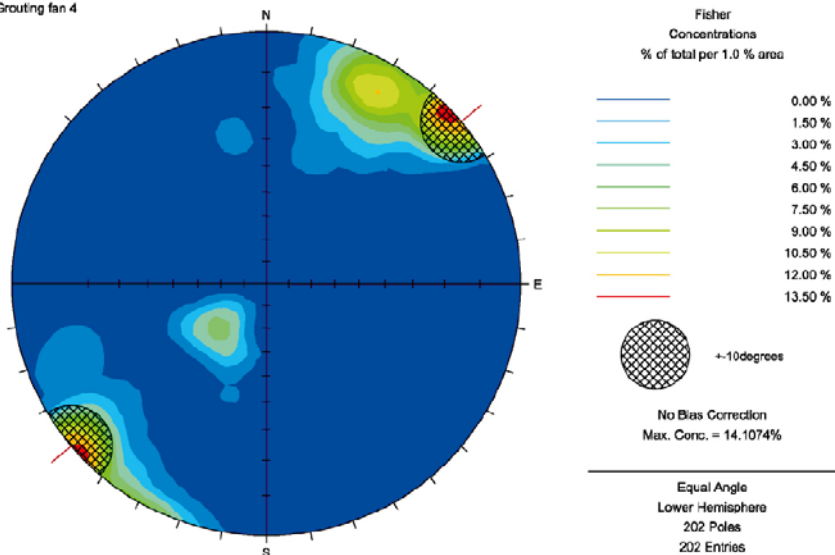
Den maximala inträngningslängden beror enligt ekvation 3-8 av den hydrauliska sprickvidden, injekteringsövertrycket, gelinduktionstiden och viskositeten. Laboratorietester i en sprickreplik tidigare utförda på Chalmers /Funehag 2007/ undersökte inträngningen som funktion av tiden. Försöken visade att den maximala inträngningslängden uppnåddes vid halva geltiden, 25 minuter. Eftersom inträngningen upphör vid halva geltiden, kan den resulterande inträngningen överslagsmässigt sättas lika med den maximala inträngningen, under förutsättning att injekteringen börjar när injekteringsmedlet är färdigblandat och sker minst fram till dess halva geltiden är uppnådd. I figur 6-3 visas resultatet för en gel med geltiden 50 minuter.

Ett ytterligare villkor för den effektiva injekteringstiden är att den måste vara längre än gelinduktionstiden för att minska risken att silica solen eroderar. Risken för erosion beskriven för cement i avsnitt 3.4.7 gäller i princip även för silica sol med den skillnaden att silica sol initieellt saknar flytgräns och stoppmekanismen är annorlunda. Sprickvidderna som silica sol skall täta är mindre än de för cement vilket leder till att risken för bakåtlöde är mindre. Beräkningsmässigt sett utgår erosionsvillkoret från ett hållfasthetskrav vid avslut av injekteringen och uttrycks som en andel av geltiden. Vid inte så djupt belägna tunnlar där risken för erosion är liten kan halva geltiden användas som effektiv injekteringstid. För TASS sattes den effektiva injekteringstiden till 4/5 av geltiden. Mätningar av hållfastheten med fallkon vid olika ålder på silica solgel indikerar att hållfastheten är 60 Pa vid 4/5 av geltiden. Fallkonstester medger inte direkt mätning av låga hållfastheter, och den uppmätta hållfastheten på 60 Pa är nära gränsen för mätområdet. Extrapoleringen av mätresultat på gel med högre hållfasthet indikerar dock

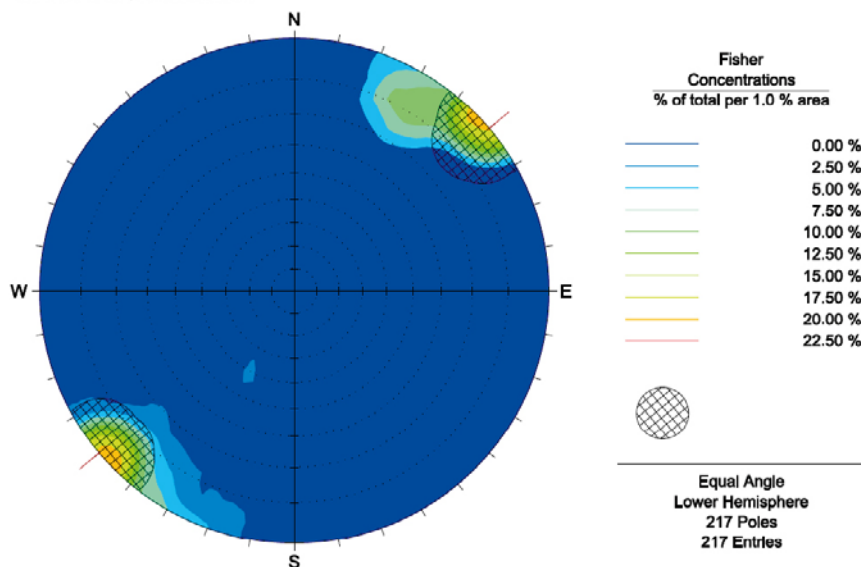
Grouting fan 2



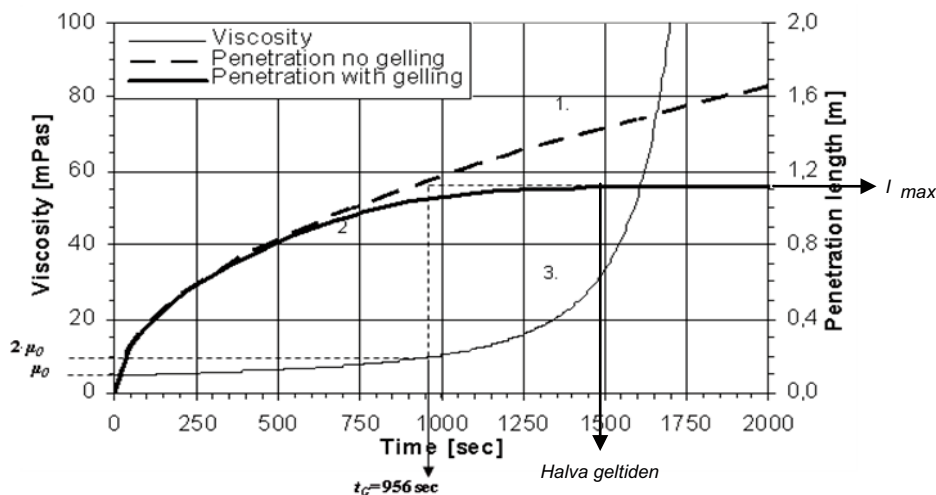
Grouting fan 4



Skärm 5 och 6, innanför kontur



Figur 6-2. Stereoplott av sprickorna karterade från förundersökningshålen med injekteringsborrhålens "träffyta" inlagda (raster med riktning ± 10 grader). De i stereoplotten redovisade sprickorna är öppna och karterade i kärnborrhålen i läget för respektive skärm. Färgerna i stereoplotten avser koncentration i % av antalet sprickor per 1% av arean.



Figur 6-3. Laborrietester utförda på Chalmers under 2006. Silica sol med geltiden 50 minuter injekterades i smala rör och inträngningslängden mättes. Samtidigt mättes viskositetsutvecklingen. Gelinduktionstid ca 16 min. Linje 1) Inträngningskurva för vätska med konstant viskositet, linje 2) Inträngningskurva för silica sol med växande viskositet, linje 3) viskositetsutvecklingen för silica solen i försöket som gav linje 2. Den maximala inträngningslängden uppnåddes vid halva geltiden, ca 25 minuter. /Funehag 2007/.

att 60 Pa är ett korrekt uppmätt värde (Axelsson, 2009). Gradienten på ett avstånd av 10 m från en oinjekterad tunnelfront bedömdes vara ca 25 m/m vilket för en spricka med en hydraulisk sprickvidd på 150 μm (vilket var den största sprickvidd som silica sol teoretiskt sett skulle användas för) skulle innebära en eroderande kraft på ca 20 Pa, se figur 3-6. Den eroderande kraften är mindre ju mindre sprickorna är, alltså bedömdes att en skjuvhållfasthet på 60 Pa och därmed en effektiv injekteringstid på 4/5 av geltiden, skulle vara tillräcklig.

Den minsta dimensionerande inträngningslängden från den preliminärt ansatta skärmgeometrin var 1,5 m. Detta var baserat på ett borrhålsavstånd om 2,0 m och ett teoretiskt överlapp om 50 %.

Inträngningen i en spricka med dimensionerande sprickvidd som funktion av trycket och gelinduktionstiden beräknades för att se vilka tryck- och tidskombinationer som skulle ge en tillräcklig inträngningslängd, se figur 3-4. Geltider mellan 20 och 60 min bedömdes som lämpliga och möjligt pumptryck var 13 MPa. Följande kombinationer angavs:

Sprickvidder < 130 μm ; en geltid på 63 min vid 3 MPa övertryck eller en geltid på 39 min geltid vid 5 MPa övertryck. Effektiv injekteringstid 4/5 av geltiden= 50 min respektive 32 min.

Sprickvidder 130–150 μm ; en geltid på 21 min vid 3 MPa övertryck. Effektiv injekteringstid 4/5 av geltiden= 16 min.

Metoden angav att injekteringsmedel och tryck skulle väljas för varje enskilt borrhål. Indata skulle vara det naturliga inflödet mätt i hela borrhålet samt vattenförlustmätningarna. Beräkningen av största hydrauliska sprickvidd gjordes med ekvation 3-4 och 3-5 samt antagandet att inflödet till borrhålet härrör från endast en spricka. Transmissiviteten för denna enda spricka sattes därmed lika med hela borrhålets specifika kapacitet (Q/dH). Det naturliga inflödet i borrhålet var utgångsläget men om mycket stora vattenförluster mättes användes även dessa för tolkning av den hydrauliska sprickvidden. Antagandet att inflödet i borrhålet härrör från en spricka ger en överskattning av den enskilda hydrauliska sprickvidden då det är sannolikt att mer än en flödande spricka korsar borrhålet.

6.2.6 Val av injekteringsteknik för cementbaserat bruk

Då det var större sprickor som cement skulle täta var en tillräcklig inträngningslängd inte en fråga utan villkoret var att få cementbruket att stanna kvar i sprickan. Designvillkor för det cementbaserade injekteringsmedlet var således villkoren avseende erosion och största inträngningslängd.

Villkoren som skulle uppfyllas för att reducera risken för erosion var de som anges i avsnitt 3.4.7 och listas nedan:

(Erosion, villkor 1) Skjuvhållfastheten på medlet vid den effektiva injekteringstidens slut ska vara större än vattnets eroderande kraft.

(Bakåtflyde, villkor 2) Inträngningslängden (uttryckt som dimensionslös inträngning) vid den effektiva injekteringstidens slut ska vara större än kvoten mellan grundvattentrycket och injekteringsöverttrycket.

(Fingering, villkor 3) Injekteringsmedlets viskositet ska vara större än vattnets viskositet och vidare förutsätts att det är injekteringsmedlet som driver vattnet framför sig. Om vattnet driver injekteringsmedlet (exempelvis injektering i kraftiga gradientfält) kan fingering uppstå även om viskositetskillnaden är stor.

Grunden för att uppfylla villkoren (1) och (3) är att använda ett styvt bruk, d v s att flytegenskaperna skjuvhållfasthet och viskositet är tillräckligt höga. Samtidigt minskar den maximala inträngningen när medlets skjuvhållfasthet höjs (ekvation 3-9), d v s förutsättningarna för att uppfylla (2) påverkas. I TASS-fallet var det cementbaserade medlet och därmed flytegenskaperna givna. Villkor (2) ställer krav på ett högt injekteringstryck. I samband med valet av tryck kontrollerades därför även risken för jacking.

I tabell 6-3 visas den beräkningsmässiga prövning som gjordes för att finna de injekteringsöverttryck som gör att villkoret (2) uppfylls vid grundvattentryck på 2,5, 3,0 respektive 3,5 MPa. Beräkningen är gjord för det tillhandahållna cementbaserade bruket som har en flytgräns på 15 Pa och en viskositet på 25 mPas. Ytterligare förutsättningar som användes i beräkningen var en hydraulisk sprickvidd på 150 μm , vilket är den nedre gränsen för användning av cementbaserat medel och som ger sämst förutsättningar att klara villkor (2). Utgående från beräkningsresultaten kan sedan injekteringstryck och effektiv injekteringstid för att få en tillräcklig lång inträngningslängd väljas.

Den beräknade dimensionslösa inträngningslängden i 2D redovisas i den färgade raden i tabell 6-3. Värdena ska jämföras med tryckförhållandet som redovisas i den nedre delen av tabellen. Vid exempelvis 3 MPa grundvattentryck (streckad ram) uppfylls kravet, $I_{D, 2D} \geq p_w / \Delta p$ vid minst 7 MPa överttryck (gröna rutor), medan röda rutor anger att kravet inte klaras. Vid en kortare effektiv injekteringstid måste trycket ökas.

För att kontrollera att risken för jacking inte skulle vara styrande jämfördes aktuella injekteringsöverttryck med trycket från bergmassan och vattnet. Ekvation 3-17 gav att risken för jacking (lyfning av ovanliggande berg) kunde uppstå vid injekteringsöverttryck på 27 MPa eller högre (antaget grundvattentryck=4 MPa, djup till tunneln=450 m, densiteten på berget=2 650 kg/m³). Alltså vid valda injekteringstryck på 10 MPa föreligger låg risk för jacking. Detta används enbart till en ingaffling av injekteringstrycket och observationer på plats för att minimera risken blockutfall måste användas.

Från tabellen ses också att den teoretiska radiella inträngningslängden, I_{2D} i en spricka med den hydrauliska vidden 150 μm är ca 14 meter vid 5 MPa överttryck. Den radiella inträngningslängden för en spricka med den hydrauliska vidden 100 μm , som inte visas här, blir ca 9 m. 100 μm motsvarar ungefär den vidd som säkert medlet kan penetrera enligt avsnitt 5.1.2.

Överttrycket valdes till 7 MPa och en effektiv injekteringstid på 45 min och även grundvattentryck på 3,5 MPa skulle klaras utan risk för erosion.

Det cementbaserade bruk som skulle användas har en initiell flytgräns på 15 Pa och frågan var om det var tillräckligt, med hänsyn till villkor (1). Gradienten vid 250 m grundvattentryck och 10 m från oinjekterad tunnelfront förväntades enligt tidigare vara ca 25 m/m vilket för en spricka med en hydraulisk sprickvidd på 150 μm skulle innebära en eroderande kraft på ca 20 Pa, enligt figur 3-6. Denna kraft var större än cementets flytgräns och därför bedömdes att erosionsrisk förelåg. Åtgärden för att klara detta var en praktisk lösning kallad stuffhål, med syftet att minska grundvattengradienten.

Tabell 6-3. Val av injekteringstryck för att klara det ansatta villkoret avseende bakåtflyde $l_{D,2D} > p_w / \Delta p$ (ekvation 3-15). Övre delen visar beräkningen av den dimensionslösa inträngningen (rad 4) för olika injekteringsövertryck. Nedre delen visar kvoter mellan injekteringsövertryck och aktuellt vattentryck. Gröna rutor anger kombinationer där villkor (2) är uppnått. Vid större injekteringsövertryck är villkoret också uppnått. Den för beräkningen använda, flytgränsen är 15 Pa, viskositeten är 25 mPas, den effektiva injekteringstiden är 45 minuter. Tabellen innefattar också inträngningen i en spricka med 150 μ m sprickvidd (rad 5 och 6).

Parameter	Δp [MPa]=				
	=1	=3	=4	=5	=7
t_0 [sec]	666,67	2 000,00	2 666,67	3 333,33	4 666,67
t_D	4,05	1,35	1,01	0,81	0,58
q_{2D}	0,29	0,16	0,13	0,11	0,08
$l_{D,2D}$	0,82	0,65	0,60	0,55	0,49
l_{max} [m]	5,00	15,00	20,00	25,00	35,00
l_{2D} [m]	4,11	9,72	11,91	13,86	17,27
p_w [MPa]	$P_w/\Delta p$				
2,5	2,5	0,83	0,63	0,5	0,36
3,0	3,0	1,0	0,75	0,6	0,43
3,5	3,5	1,17	0,88	0,7	0,5

Grundvattengradienten mot tunneln beskriver hur skillnaden mellan bergmassans tryck och tunnelns nolltryck fördelas i bergmassan. Grundvattengradienten är brantast närmast tunneln och flackar ut med avståndet från bergväggen. När en injekteringsskärm utförts kommer en stor del av tryckfallet att fördelas ut över den med skärmen tätade zonen och närmast tunnelvägg minskar gradienten. När nästa skärm injekteras kommer den del som ligger närmast tunnelvägg att ”skyddas” från höga gradienter från den utanförliggande tidigare skärmen. Den del som ligger utanför den tidigare skärmen har ett större avstånd till tunnelvägg – alltså lägre gradient. Skärmöverlapp minskar alltså risken för erosion. I fallet TASS bedömdes att risken för erosion behövde minskas ytterligare med hjälp av så kallad stuffinjektering. Genom att täta bergmassan framför stuf *innan* man är framme i aktuellt stuffläge kan gradienterna alltså minskas så att förhållandena blir mer gynnsamma. Med överlapp mellan injekterings-skärmar samt användning av stuffinjektering minskas risken för höga gradienter markant.

Designen kompletterades därför med tre till fyra stuffhål som skulle borraras i stuf och parallellt med tunneln till en längd motsvarande injekteringsskärmen. Injekteringen av dessa hade alltså syftet att sänka den hydrauliska gradienten för *kommande* skärms injektering (bilaga 1).

Borrningen av stuffhål skulle också ge möjlighet att skaffa kompletterande information om förhållandena framför tunneln. Stuffhålen skulle testas hydrauliskt på samma sätt som skärmhålen. De flöden som mättes i stuffhålen skulle jämföras med förväntade strukturers sprickvidder samt lägen.

Villkor 3, för att motverka fingering, bedömdes redan vara uppfyllt i och med det trögflytande cementbruket för de större sprickorna. Det valda injekteringstrycket skulle också påläggas direkt och resolut så att det är bruket som driver vattnet framåt.

Villkor 2 som avser att minimera risken för bakåtflyde kom således att bli styrande för injekterings-tryck och tid för injektering med cementbaserat bruk. Överlappet mellan injekteringsskärmar gör att en ”extra” tät bergmassa erhålls nära stuf och stuffhål infördes för öka denna effekt och minska gradienten, skjuvkraften och erosionsrisken.

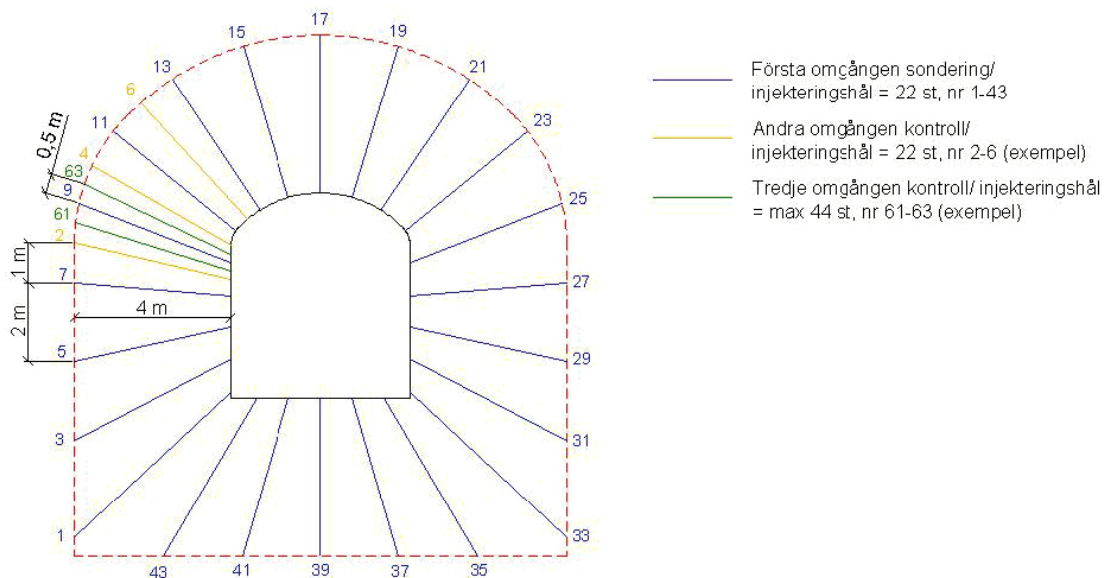
6.2.7 Design med kontroller och åtgärder

Basdesignen utgick från specificerade villkor och förutsättningar och den resulterande ”basdesign omgång A” skulle enligt teorin och vid ideala förhållanden ge det resultat som efterfrågats. Eftersom de uppsatta sambanden innehåller förenklingar både vad gäller sprickorna och spridningsmekanismer behövde basdesignen även beskriva hur man kontrollerar resultatet och villkoren för ytterligare åtgärd, som i normalfallet är ytterligare en borrhålsomgång. För TASS-tunneln bestämdes att minst två omgångar skulle göras i varje skärm. Tre omgångar skulle göras i det fall omgång två bedömdes vara inte tillräckligt tät, d v s tredje omgången skulle göras om inte samtliga borrhål i den andra omgången hade ett inflöde på mindre 0,1 l/min. Det förhållandevis stora antalet borrhål/omgångar gjordes dels för att öka sannolikheten att klara täthetsmålen, dels för att samla data.

Injekteringskärmarna byggdes således upp av flera injekteringsomgångar kallade omgång A, B och C, se figur 6-4. Arbetsgången för att avgöra omfattningen av nästa borrhålsomgång bestämdes till följande.

Borrhålen i varje omgång testas hydrauliskt och injekteras därefter. Efter hydrauliska tester och injektering av omgång A borrar ett antal borrhål, placerade mittemellan och parallellt med omgång A:s borrhål. De nya injekteringsborrhålen benämns omgång B och utgör först kontrollhål till omgång A. Kontrollhålen har två syften: 1) ge information om tidigare omgångs injektering haft effekt på tätheten, och 2) möjliggöra ytterligare tätning om det bedöms nödvändigt.

För det första syftet placeras fem av kontrollhålen jämnt fördelade längs periferin på tunneln i skärmomgång B och C. För det andra syftet väljs lägen för kontrollhålen där det antas att injekteringen har tätat sprickorna som sämst: 1) kontrollhålen placeras mitt emellan borrhål med störst inflöden och vattenförlust, 2) kontrollhålen placeras mitt emellan borrhål som har största injekterad volym, och 3) kontrollhålen placeras alltid mellan borrhål som har uppvisat hydrauliskt samband. I samtliga borrhål i alla omgångar mäts trycket, det naturliga inflödet till borrhålet samt vattenförlusten. En jämförelse mellan värden i borrhål i omgång A och i omgång B, ger alltså ett svar på hur väl injekteringen i omgång A tätat. Detta förlopp upprepas ännu en gång och utgör då omgång C. Om inflödet i varje enskilt borrhål i omgång B är mindre än ett visst flöde, se nedan, avslutas dock injekteringen. Efter omgång C borrar inga ytterligare kontrollhål. Fler omgångar skulle göra att risken för att borra ihop flera borrhål skulle bli överhängande.



Figur 6-4. Baskärm; borrhålavstånd första omgången=2 m. Enbart ett fåtal borrhål i omgång B och C är utritade för tydlighetens skull.

I konceptet ingår att alltid injektera alla borrarade hål, även de som bedömdes täta. D v s täta hål injekterades med silica sol med tryck och tid som uppfyller kravet på inträngning och övriga designvillkor. Projektets kriterium för att betrakta ett borrhål som tätt var ett inflöde mindre än 0,1 l/min. Att bergmassans transmissivitet kan antas representeras av mediantransmissiviteten /Gustafson et al. 2010/ var utgångspunkten för det val som gjordes i projektet, att betrakta ett borrhål som tätt när inflödet är 0,1 l/min, fast detta flöde motsvarar en hydraulisk sprickvidd om 20 µm vid ett grundvattentryck på 3 MPa och vi syftar till att täta sprickor ner till 10 µm.

En nedre mätgräns för inflödesmätningar fastställdes baserat på de mätresultat som inledningsvis erhöles i tunneln. Flöden på 0,002 l/min kunde mätas (några få droppar per minut). Mätgränsen sattes sedan ca en tiopotens lägre, alltså 0,0001 l/min. För vattenförlustmätningen är mätgränsen högre, 0,1 l/min vilket beror på den flödesmätare som använts.

Sammanfattningsvis upprättades en basdesign som innefattade injekteringsutförande med basskärm och kontrollåtgärder. Basdesignen utarbetades från förundersökningsresultaten och var gällande för dessa förhållanden; alltså från mycket små sprickvidder upp till normalt 200 µm och ett grundvattentryck på 3,0 MPa. Högre tryck (3,5 MPa) förväntades längre ut i bergmassan (längre ut än längden på en injekteringskärm) i och med att läckaget till stuff sänker trycket lokalt.

I figur 6-4 visas basskärmen. Baskärmen omfattade både fixa och variabla parametrar, tabell 6-4. Fixa parametrar var avståndet mellan borrhålen i borrhålsomgången, längden på injekteringskärmen, överlappet för kommande injekteringskärm samt borrhålsstick. Variabla parametrar för injekteringsutförandet – injekteringsmedel, injekteringsstryck och effektiv injekteringstid – var att välja utgående från hydrauliska sprickvidder.

Styrningen före berguttag var mot det övergripande målet att inläckaget till tunneln skulle bli maximalt 1 l/min och 60 m, men den slutgiltiga kontrollen av tunneln skulle göras med mätvallar.

Tabell 6-4. Basdesign för fintättningsprojektet.

FIXA PARAMETRAR	Parameter- värde	Kommentar
Dimensionerande minsta hydrauliska sprickvidd	10 µm	Beräknat utifrån erforderlig täthet
Begränsad inträngningslängd	20 m	Betingat av närheten till prototyp-tunneln.
Borrhålsavstånd, c-avstånd	2 m	Gäller för omgång A
Injekteringskärmens längd	20 m	Gäller för omgång A. Omgång B görs 1 m kortare, omgång C görs 2 m kortare.
Överlapp mellan skärmomgångarna	4 m	Praxis, kopplat till salvlängd som i projektet är 4m.
Injekteringskärmens stick	5 m	Rätvinkligt avstånd från tunnelkontur till borrhålsstick Praxis är 4–5 m och är relaterat till bultlängd. För skärm innanför kontur var sticket planerat till 0 m
Önskvärd/dimensionerande Inträngningslängd i 10 µm sprickan, l_{dim}	1,5 m	$l_{dim} = \frac{3}{4}$ av borrhålsavståndet 2 m $\cdot \frac{3}{4} = 1,5$ m
Effektiv injekteringstid för silica sol	4/5 av geltiden	Betingat av risken för erosion. Vald med hänsyn till erforderlig hållfasthet hos gelen när pumpningen upphör.
Effektiv injekteringstid för cementbaserat bruk	45 minuter	Betingat av risken för erosion. Vald med hänsyn till erforderlig inträngning.

Variabla parametrar	Parametervärde baseras på	Kontroller	Villkor, valt värde, kommentarer
Injekteringsmedel	Hydraulisk sprickvidd	Inflöde och vattenförlust i borrhålen	0–150 µm: silica sol. > 150 µm: Cementbaserat bruk, typ 1.
Geltid för silica sol	Hydraulisk sprickvidd, lämpligt val med hänsyn till praktiska och övriga restriktioner. Jämför även injekteringsövertryck (designfönster).	Inflöde och vattenförlust i borrhålen	Normalt mellan 20 och 60 min Exempelvis 0–130 µm: geltid 39 eller 63 min. 130–150 µm: minskad geltid, 21 min.
Injekteringsövertryck $\Delta p = p_{tot} - p_{grv}$	Injekteringsmedel, geltid samt möjligt maximalt tryck (givet utrustningen)	Hydraulisk sprickvidd	Cementbaserat bruk: 7 MPa. Silica sol: 3 MPa med 63 min geltid 5 MPa med 39 min geltid ger inträngning 1,5 m i 10 µm sprickan. 3 MPa med 21 min geltid ger inträngning 15 m i 150 µm sprickan.
Omgång B, Antal kontrollhål och placering	Inflöde, vattenförlust, bruksåtgång och borrhål som uppvisat hydrauliskt samband	Hydrauliska tester samt data och observationer från injektering	Minst 5 borrhål i split spacing. Kontrollhål placeras mellan/intill injekteringshål med inflöde $\geq 0,1$ l/min som har haft stor bruksåtgång som uppvisar samband med intilliggande borrhål.
Omgång C, Antal kontrollhål och placering	Inflöde, vattenförlust, bruksåtgång och borrhål som uppvisat hydrauliskt samband	Hydrauliska tester samt data och observationer från injektering	Kontrollhål placeras mellan/intill injekteringshål med inflöde $\geq 0,1$ l/min. Kontrollhål borrar inte om omgång B endast innehöll täta borrhål (inflöde $< 0,1$ l/min).

För genomförandet förutsågs ett behov att kunna justera både injekteringstryck och geltider beroende på observationer vid stuff. Vid en trycksänkning måste geltiden ökas för att bibehålla inträngningslängden. Om kontrollhålen skulle visa på att tätheten inte ökat antas att inträngningslängden är för kort och både geltid och tryck kan då ökas. Följande förändringar och åtgärder förutsågs i basdesignen, se tabell 6-5.

Tabell 6-5. Observationer och åtgärder under injekteringen.

Observation/Kriterium	Åtgärd
Medianvärde av inflödet i omg B \geq Omg. A	Minska borrhålsavstånd eller öka inträngningslängden genom att öka injekteringstryck/ och eller öka den effektiva injekteringstiden+geltiden
Samtliga borrhål skall penetrera förmodad struktur/sprickzon tolkad från förundersökningarna ligger mitt i skärm	Justera skärm längden så att hela zonen penetreras av en skärm
Omfattande ytläckage som gör att designtrycket ej nås och satsen verkar ta slut Sambandshål	I första hand blanda ny styvare/snabbgelande sats, I andra hand minska trycket Notera sambandet. Låt manschetterna vara öppna under injekteringen som fortsätter enligt design. Efter injekteringen rensas sambandsborrhålen ut genom spolning/ vakuumpumpning. Hålen injekteras därefter enligt design.
Registrerad volym mindre än borrhålsvolym	Borrhålet rensas ut och injekteras åter enligt design.

En stor bruksåtgång kan observeras när borrhålet tar mycket bruk, ytläckage detekteras på bergytter eller då hydrauliskt samband finns med andra borrhål. I samtliga dessa fall injekteras hela den första satsen, sedan injekteras en sats med kortare geltid eller injekteringsbruk typ 1.

6.3 Utförande med anpassning av design och övriga åtgärder

6.3.1 Resultaterande arbetscykel

Baserat på basdesignen gjordes följande beskrivning för utförandet av en injekteringsskärm. Tillkommande arbeten för varje injekteringsskärm var inmätning av borrhål, provblandning av silica sol för att detektera eventuella förändringar p g a åldrande samt löpande provtagning och kontroll av injekteringsmedlet.

1. Stuffinjekteringshål borrar och injekteras för att minska gradienten framför fronten samt risken för erosion.
2. Borrhålen i själva injekteringsskärmen borrar och injekteras för att minska inläckaget till tunneln.

Följande cykel används för samtliga injekteringsborrhål för de hydrauliska testerna och injekteringen:

1. Borrning och manschettering av hålen i aktuell borrhålsomgång; stuffhål, A, B eller C i den aktuella injekteringsskärmen.
2. Hydrauliska tester utförs som helhålmätningar i samtliga hål:
 - a. Naturligt grundvattentryck.
 - b. Naturliga inflödestester.
 - c. Vattenförlustmätningar.
3. Analys av resultatet av de hydrauliska testerna utförs. De variabla parametrarna bestäms individuellt för varje borrhål. Satsstorlek bedöms baserat på vattenförlustmätningen.
4. Injektering. Hålen i botten injekteras först och de i taket sist. Efter injektering får silica sol härda åtminstone 1 timme och cementbruk åtminstone 6 timmar före borrning av nästa omgång.

Stuffhål och omgång A: Antal hål definieras av basdesignen.

Omgång B: Antal hål i och placering bestäms enligt tidigare beskrivna metod för placering av kontrollhål, se avsnitt 6.2.7.

Omgång C: Omgången utförs om inflödet i något av borrhålen i omgång B är större än 0,1 l/min. Antal hål och placering bestäms enligt tidigare beskrivna metod för placering av kontrollhål.

5. Rapportering och kvalitetskontroll av data.

6.3.2 Särskilda observationer

I projektet utfördes droppkaraktärisering för att utöka förståelse kringinjektering. Droppkaraktäriseringen utfördes efter varje injekteringsetapp.

Metoden för droppkaraktäriseringen är beskriven i avsnitt 3.5.2. Arbetet syftade initiiellt till att efter utsprängd etapp få en bild över var dropp från tak bildas. Genom att korrelera de dropppunkter som bildades mot lägen på sprickor från tunnelkarteringen erhöles ytterligare information för analys och förståelse av injekteringsresultatet.

Flödesmätningar i vägg och sula med kompletterande flödesmätningar i borrhål var en aktivitet som ej var inplanerad vid starten av fältarbetena. Mätningarna beskrivs i avsnitt 7.3.4.

I och med att droppen från taken var små i förhållande till mätvallsflödena antogs att flödena måste komma från väggar och sula. Flera sulrensningar kom därför att utföras under projektets gång. I pölarna som bildades i slag och sprickor i sulan kunde ett flöde beräknas. På så sätt kunde inflödena relateras till sprickor från tunnelkarteringen. I väggarna sågades centimeterdjupa spår där vatten från väggen samlades upp och flödet beräknades. Ett summaflöde från de individuellt identifierade och mätta inflödena som sammanfaller med mätvallsflödet togs som ett belegg för att såväl mätvallsflödena var korrekta som att man i huvudsak identifierat alla inflödespunkter. Med en sådan här noggrann kartering och flödesmätning identifierades också ett antal läckande borrhål.

6.3.3 Styrning av injekteringen vid tunnelfronten

En aktivitetsplan (AP) för hela injekteringen upprättades innan den första skärmen utfördes. Denna AP tog upp i stort hur en injektering skulle gå till såsom utrustning, arbetsmiljö, rapportering samt vilka ytterligare dokument som skulle upprättas. För varje enskild injekteringskärm upprättades successivt PM som beskrev i detalj hur injekteringen skulle utföras. AP o PM upprättades av delprojektledaren för injektering.

Referensgruppen för injektering fick AP och PM på remiss och projektledaren godkände efter granskning. SKB:s arbetsledare tog emot det godkända PM:et och skrev en arbetsinstruktion för injekteringen där varje ingående moment beskrevs i detalj. Arbetsberedningen innehöll upp till 38 moment, se arbetsberedningen för skärm 3 (bilaga 2). Arbetsinstruktionen godkändes av delprojektledaren. Arbetsledaren hade genomgång med entreprenören om utförandet på arbets- och uppföljningsmöten och var med i tunneln under hela injekteringsprocessen. Under arbetet skrevs protokoll som direkt efter de hydrauliska testerna i omgången skickades till delprojektledaren som kontrollerade data och skrev in hur injekteringen av nästa injekteringsomgång skulle utföras. Vid regelbundna möten samlades referensgruppen och delprojektledaren för en muntlig redovisning om hur injekteringen hade utförts samt för att belysa hur kommande injektering skulle utföras.

Före beslut om borring av ytterligare en borrhålsomgång respektive berguttag gick delprojektledaren igenom injekteringsprotokollen för att säkerställa att injekteringen hade utförts enligt design (tryck, tider samt att injekterad volym är större än borrhålsvolymen och kontrollera om läckande borrhål fanns).

7 Etappbeskrivningar med resultat och observationer

7.1 Etappöversikt

Arbetet med TASS-tunneln delades in i olika etapper. Arbetsetapperna delades in framförallt efter de olika delmålen.

Den ursprungliga etappindelningen justerades med hänsyn till resultaten under arbetets gång. Nedan redovisas den slutliga indelningen.

Etapp 1 bestod av ett fälttest vid påslaget för TASS-tunneln med arbetsnamnet ”korset” och den första injekterings-skärmen, skärm 1, med borrhål utanför tunnelkontur. Syftet var att testa utrustning och metoder.

Etapp 2 bestod av två ”traditionella” skärmar med borrhål utanför kontur; skärm 2 och 3.

Etapp 3 bestod av tre skärmar med borrhål innanför kontur; skärm 4,5 och 6.

Etapp 4 bestod av sonderingar och hydrauliska tester som låg till grund för beslut om avslutande av tunneldrivningen.

Etapp 5 bestod av efterinjektering i läget för skärm 4, sektion 33,9–50 m, redovisas ej i denna rapport.

7.2 Arbetsetapp 1, korset och skärm 1

7.2.1 Etappmål och förutsättningar

För korset var de specifika målen att ta fram arbetsgång med praktiska, repeterbara och dokumenterbara rutiner för de olika arbetsmomenten som manschettering, blandning av injekteringsmedel och injektering. Vidare skulle de uppsatta sambanden för inträngning verifieras och de nya teorierna gällande erosion testas. Därför var det önskvärt att använda båda injekteringsmedlen. Platsen var påslaget för TASS-tunneln och ca 10 m in i bergmassan. För syftet borrades kärnborrhål i ett speciellt korsmönster och kärnkartering samt hydrauliska tester utfördes för att karakterisera bergmassan. Borrhål injekterades därefter i två omgångar, den första med cement och den andra med silica sol, och för att påvisa en ökad täthet utfördes efter varje omgång hydrauliska tester i närliggande borrhål.

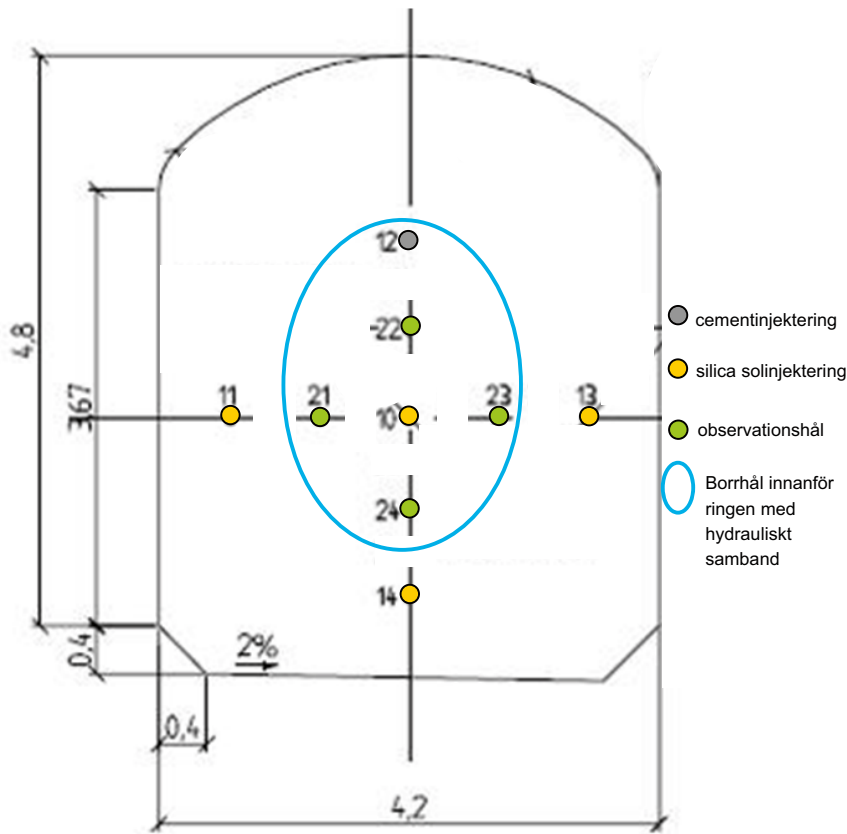
TASS-tunneln var placerad i en vinkel om ca 50 grader mot TASI-tunneln. Därför blev påslaget för skärm 1 inte vinkelrätt och därför skulle skärm 1 utföras på sådant sätt att skärm 2 kunde borraras och injekteras från vinkelrätt stuf med lika långa borrhål för samtliga borrhål i skärmen. Ett annat syfte med skärm 1 var att testa den specialbeställda injekteringsutrustningen samt att testa hela arbetsutförandet med de entreprenörer och konsulter som var tänkta att användas för resten av tunneln.

7.2.2 Korset

Geometri och hydrotester före injektering, korset

Korset bestod av nio st 7 m långa kärnborrhål i form av ett kors, se figur 7-1. Hålen borrades vid samma tillfälle. Borrhålsdiametern var 76 mm. I samtliga borrhål utfördes hydrauliska tester; vattenförlust med konnektivitetstest, inflöde från helhål med enkelmanschett och i sektioner om 0,5 m med en dubbelmanschett. Konnektivitetstest utfördes genom att utföra en vattenförlustmätning i ett borrhål medan de andra borrhålen hölls stängda och en eventuell tryckökning mättes i dessa. Ökade trycket snabbt ansågs hålet vara konnekterat (ha samband) med det hål som vattenförlustmättes.

För att verifiera att inträngning av injekteringsmedel skedde användes så kallade strumpor. Ett borrhål injekterades sedan de närliggande borrhålen hade försetts med 7 m långa latexstrumpor som blåsts upp till ett högre tryck än injekteringstrycket. På så sätt förhindrades inträngning i det hål som var



Figur 7-1. Borrhålslayout för "korset". Avstånd mellan injekteringshålen 1,5 m. Cementshållet injekterades först med efterföljande hydrauliska tester, därefter silica solhålen och hydrauliska tester. Ellipsen inringar de borrhål som uppvisat starkast inbördes hydrauliska samband.

försett med strumpa och hydrauliska tester kunde utföras efteråt. En sänkt specifik kapacitet (flöde dividerat med övertycket, Q/dh) indikerade att inträngning i sprickorna hade skett. Injektion, med efterföljande kontroll i närliggande hål av den resulterande specifika kapaciteten, gjordes i fem av hålen. De inledande hydrauliska testerna av oinjekterad bergmassa redovisas i tabell 7-1.

Tabell 7-1. Hydrauliska egenskaper, naturligt inflöde och vattenförlust för borrhålen innan injektion utfördes. Med helhål menas att den mätta sektionen är från borrhålsbotten till manschetten som är placerad 1 m från tunnelvägg.

Borrhålsdata		Mätning av naturligt inflöde, 0,5 m dubbelmanschett					Vattenförlustmätning vid 0,6 MPa totaltryck (helhål)	
nr	Tryck	Inflöde helhål	Antal flödande sektioner	Största sektionens flöde	Q/dh (största sektion)	$b_{hyd}(Q/dh)$	Inflöde	Q/dh
[-]	[MPa]	[l/min]	[-]	[l/min]	[m ² /s]	[μm]	[l/min]	[m ² /s]
10	0,13	2,39	3	2,28	$2,84 \cdot 10^{-06}$	151	6,97	$2,4 \cdot 10^{-06}$
11	0,13	0,25	2	0,15	$1,87 \cdot 10^{-07}$	61	0,86	$3,0 \cdot 10^{-07}$
12	0,12	2,24	1	2,26	$3,05 \cdot 10^{-06}$	155	6,25	$2,1 \cdot 10^{-06}$
13	0,25	0,28	5	0,145	$9,39 \cdot 10^{-08}$	49	0,37	$1,7 \cdot 10^{-07}$
14	0,39	Ej mätt, ty liten vattenförlust				–	0,02	$1,3 \cdot 10^{-08}$
21	0,14	1,82	2	1,8	$2,08 \cdot 10^{-06}$	137	6,01	$2,1 \cdot 10^{-06}$
22	0,12	0,84	2	0,87	$1,17 \cdot 10^{-06}$	113	2,14	$7,2 \cdot 10^{-07}$
23	0,16	3,02	5	2,73	$2,76 \cdot 10^{-06}$	150	3,49	$1,3 \cdot 10^{-06}$
24	0,31	0,32	3	0,19	$9,92 \cdot 10^{-08}$	50	0,32	$1,8 \cdot 10^{-07}$

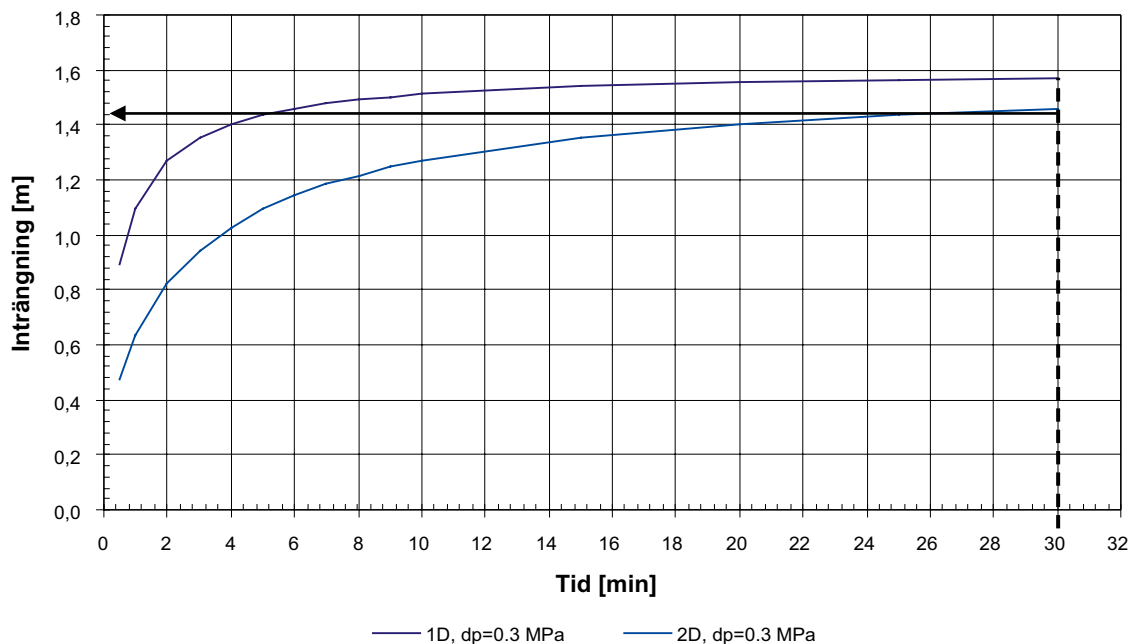
Design och genomförande cement, korset

Designen baserades på de hydrauliska mätningarna i borrhålen. Största hydrauliska sprickvidd beräknades utifrån de sektionssvisa inflödena i 0,5 m sektioner. Sprickvidden beräknades med "cubic law", ekvation 3-5.

Borrhål nr 12 uppvisade starka hydrauliska samband med borrhål 22, 10 och 24 och hade också den största prognostiserade hydrauliska sprickvidden, 155 μm . Därför valdes att injektera detta borrhål med cement, medan övriga fyra skulle injekteras med silica sol. Därmed kunde silica sol testas vid den övre gränsen för dess i projektet valda tillämpningsområde; 150 μm . Designen för cementinjekteringen var följande: Minsta hydrauliska sprickvidd = 100 μm , Grundvattentrycket = 0.16 MPa, den dimensionerande inträngningslängden i den minsta sprickvidden = 1.13m (0.75·1.5 m). Viskositeten och flytgränsen på det cementbaserade bruket = 20 mPas respektive 15 Pa. För att minst nå den önskvärda inträngningslängden valdes ett övertryck 0,3 MPa och en effektiv injekteringstid på 30 min. Med denna injekteringsteknik fås teoretiskt en inträngningslängd på strax över 1,4 m, se figur 7-2. Beräkningen utfördes med ekvation 3-9–3-14.

Målet med cementinjekteringen var att den teoretiska inträngningslängden i den för cement minsta penetrerbara sprickvidden, här antagen till 100 μm , skulle vara 75 % av borrhålavståndet till närliggande injekteringshål, alltså 1,12 m. Erosionsteorin som är beskriven i avsnitt 3.4.7 beaktades vilket med aktuellt bruk gav en minsta inträngningslängd för att motstå erosion. Med det antagna låga grundvattentrycket fanns en risk för erosion om sprickvidden var större än 170 μm vilket inte var fallet.

Med dessa förutsättningar valdes övertrycket 0,3 MPa och den effektiva injekteringstiden 30 min. En sammanställning över data från den utförda cementinjekteringen redovisas i tabell 7-2.



Figur 7-2. Beräknad inträngning som funktion av tiden med ett övertryck på 0,3 MPa och bruksegenskaper enligt ovan. Vald effektiv injekteringstid var 30 min, lodrätt streckad linje i figuren vilket ger en radiell inträngningslängd på 1,42 m vid ett övertryck på 0,3 MPa.

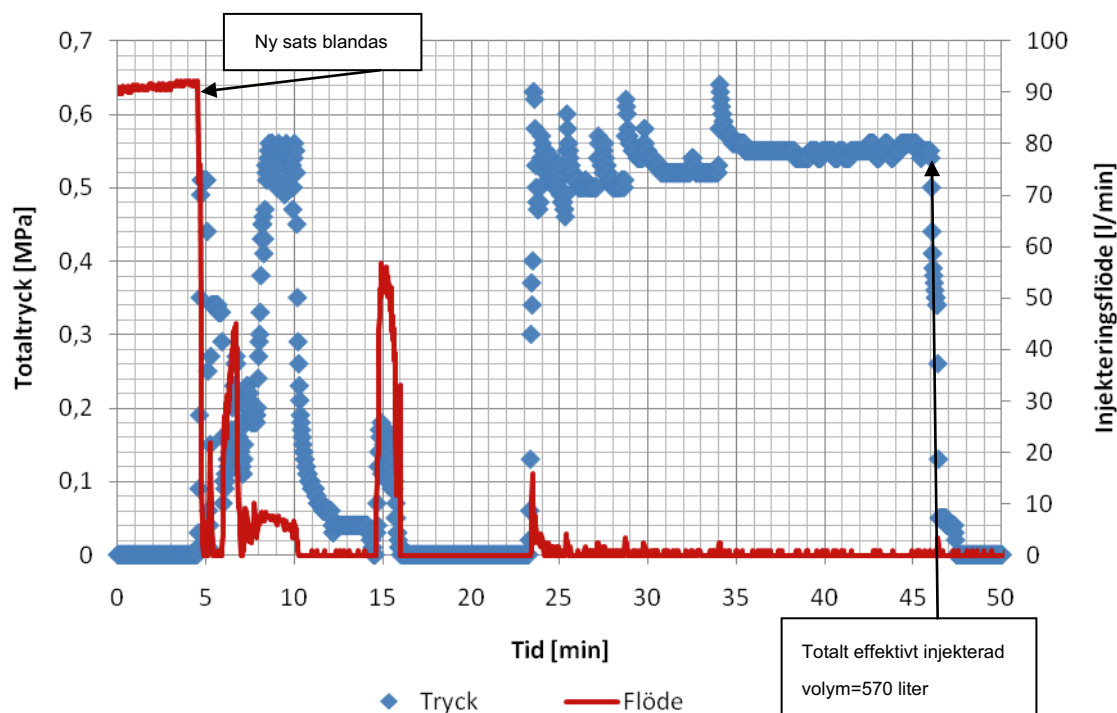
Tabell 7-2. Cementinjektering, korset.

Borrhål	Antal sats	Inj tid [min]	Total-tryck [MPa]	Effektivt Injekterad volym [liter]	Kommentar
12	2	45*	0,55	570	Stora ytläckage noteras, trycket är något högre än designtrycket men bedömdes vara rimligt nära.

* Förlängd effektiv injekteringstid för att kompensera tidsåtgången för blandning av ny sats.

Under injekteringen registrerades tryck, volym (flöde) och tid. I figur 7-3 visas den erhållna pumpkurvan för injekteringen av borrhål 12. När utrustningen var avluftad öppnades manschettventil och injekteringen startade, 0 min i figur 7-2. Dock upptäcktes redan efter en minut ett samband med att cement strömmade ur borrhål 23, och 5 min efter starten av injekteringen var cementsatsen nästan slut och trycket sänktes medan en ny sats blandades och bh 23 manschetterades. Dessutom krånglade pumpen, men efter totalt 23 minuter fortsatte pumpningen och designtrycket nåddes. Detta hölls tills injekteringen avbröts vid 46 minuter. Totalt åtgick 570 liter som effektivt injekterad volym men stora delar kom tillbaka som ytläckage. Att notera är att ytläckagen avtog successivt under sista delen av pumpningen.

Då den första satsen tog slut snabbt fanns det ingen tid för provtagning av cementegenskaperna utan enbart den andra satsen testades. Dock gjordes ett misstag gällande ingående cementmängd vilket medförde att W/DM blev högre än avsett. De utvärderade egenskaperna var nära dem som hade uppmätts på laboratorium, se tabell 7-3.



Figur 7-3. Pumpkurva för cementinjekteringen av borrhål 12.

Tabell 7-3. Jämförelse mellan utvärderade egenskaper från fältmätningar och de egenskaper som tidigare uppmätts i lab.

	Densitet [kg/m ³]	Flytgräns [Pa]	Viskositet [mPas]
Låg pH, W/DM:1,63	1 340	10,5	13
Lab värde, W/DM:1,40	1 330	14	15

Manschetten fick stå stängd tills nästa dag (mer än 6 timmar), och dagen efter plockades strumporna ut och hydrauliska tester utfördes.

Design och genomförande silica sol, korset

Det borrhål av de fyra silica solhålen som visade hydrauliska samband med de strumpförsedda hålen var borrhål nr 10. Efter cementinjekteringen steg grundvattentrycket från 0,12 MPa till 0,65 MPa i borrhålet. De hydrauliska testerna i borrhål 10 före injektering visade att det fanns en dominerande spricka med bedömd hydraulisk sprickvidd om 151 μm . Efter injekteringen med cement visade testerna i samma hål på ett specifikt flöde ($Q/dh=1\cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) motsvarande en hydraulisk sprickvidd på 108 μm .

Designen baserades på de hydrauliska mätningarna i aktuellt borrhål. Dessa gav två olika sprickvidder; 50 och 100 μm . Den minsta inträngningslängden sattes till 75% av borrhålsavståndet (50% överlapp mellan borrhålen). 1,5 m hålavstånd innebar att den minsta dimensionerande inträngningslängden skulle vara 1,12 m.

För sprickvidden 100 μm valdes 14,5 min geltid och övertrycket 0,2 MPa vilket minst skulle ge den erforderliga inträngningslängden. 4 minuter av geltiden behövdes för avluftning av slangar och borrhål och att komma upp i tryck, se figur 7-4. Därefter inleddes den effektiva injekteringen och pågick i valda 5 minuter. För att erhålla geltiden 14,5 min var blandningsförhållandet i vikt 4:1 (75 liter silica sol och 24,3 kg saltlösning (10 %)).

För sprickvidden 50 μm valdes en längre geltid, 35 min, den effektiva injekteringstiden 15 min och övertycket 0,4 MPa. Blandningsförhållandet i vikt var 5:1 (50 liter silica sol och 12,96 kg saltlösning (10 %)). En sammanställning över data från den utförda silica solinjekteringen redovisas i tabell 7-4.

Tabell 7-4. Silica sol injektering, korset. Hålen redovisade i injekteringsordning.

Bh	Eff injtid* [min]	Bestämd geltid [min]	Övertryck [MPa]	Registrerad volym [liter]	Erhållen geltid [min]	Effektivt injekterad volym	Kommentar
14	15	35	0,4	22	36	< 0	Troligtvis dålig avluftning av borrhål
11	15	35	0,4	48	36	7	Ytläckage noterades.
13	15	35	0,4	31	38	5	
10	5	14,5	0,2	34	16	2	Ytläckage noterades.

* Observera att den effektiva injekteringstiden i korset är satt enbart utifrån villkoret att nå maximal inträngningslängd vilket överslagsmässigt bedöms ske vid halva geltiden.

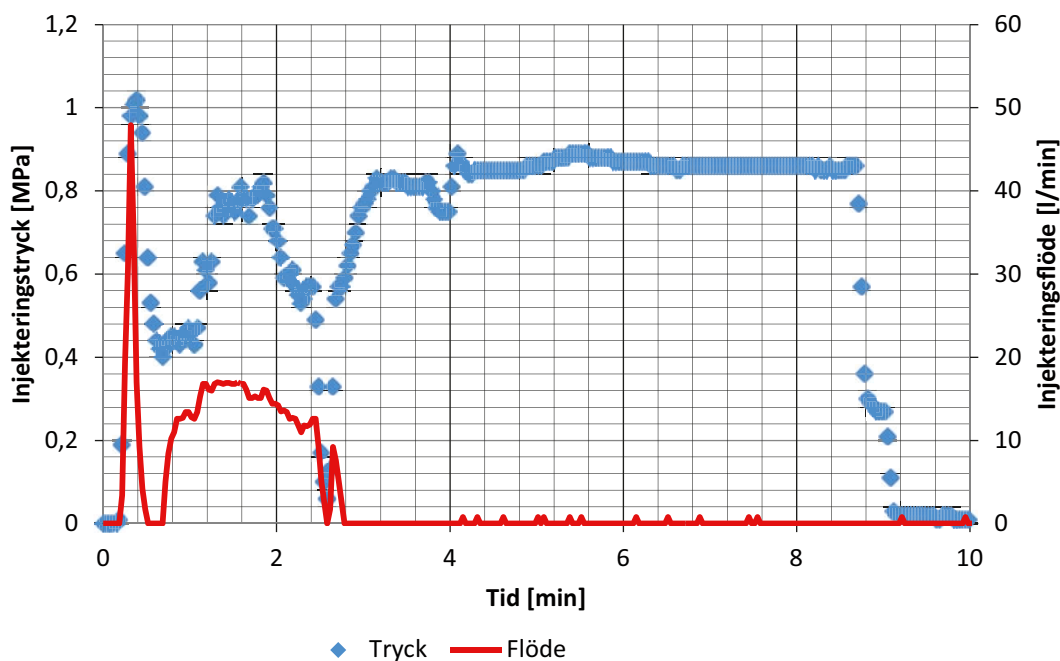
I figur 7-4 visas pumpkurvan för borrhål 10. Injekteringstrycket låg på stabila 0,85 MPa och åtgången på injekteringsmedel blev totalt 34 liter. Borrhålsvolymen var teoretiskt 27 liter och 4 liter gick till fyllning av slangar. Den effektiva injekterade volymen blev då ca 3 liter. Notera att vid beräkning av den effektiva injekterade volymen görs ingen reduktion för eventuellt återflöde av injekteringsmedel från berget (ytläckage och sambandshål). Efter 6 minuter sågs i detta fall ett ytläckage 75 cm från borrhålet samt en tryckökning i borrhål 23 på ca 0,9 MPa.

Resultat och utvärdering, korset

Förändrad genomsläpplighet

Den första omgångens injektering bestod av cementinjektering med bruk typ 1 i borrhål 12. Före denna försågs borrhålen 21, 22, 23 och 24 med strumpa och trycksattes. När injekteringen var färdig togs strumporna ut efter minst 6 timmar (eller tills dagen efter) och hydrauliska tester utfördes.

Konnektivitetstesterna hade gett samband mellan borrhål 12 och borrhål 10, 22 och 24. Cementinjekteringen reducerade inflödet i de strumpförsedda borrhålen 10 och 24, men inte i det närmast belägna borrhålet 22. Reduktionen var 70 respektive 61 %, tabell 7-5 (Kolumner med grön fyllning är opåverkade borrhål, grå fyllning borrhål efter att cementinjektering är utförd och sist orangefyllda är borrhål efter att silica sol har injekterats).



Figur 7-4. Pumpkurvan för silica sol injekteringen i borrhål 10.

Samtliga borrhål förutom det cementinjekterade hålet spolades ur från eventuellt cement. Borrhålen 21, 22, 23 och 24 försågs med strumpor igen och trycksattes. Borrhålen 10, 11, 13 och 14 injekterades med silica sol. Endast ett av injekteringshålerna hade under konnektivitetstesterna haft tydligt samband med de nu strumpförsedda hålen; injekteringshål 10 hade visat samband med bh 22 och 23. Möjligtvis hade bh 14 visat samband med bh 24, men inte vice versa.

Tabell 7-5. Förändringen i genomsläpplighet (specifik kapacitet) som ett resultat av injekteringen, mätt i borrhålen både som inflöde i helhål och som vattenförlust. Grön kolumn visar värden före injekteringen. Grå kolumn visar värden efter att bh 12 injekterats med cementbruk typ 1. Orange kolumn visar värden efter att bh 10, 11, 13 och 14 injekterats med silica sol. Den tjocka ramen runt tre av raderna visar de borrhål som haft hydrauliskt samband med injekteringshålerna. Det är dessa rader som resultat kan utvärderas från.

Borrhål [-]	Vattenförlust, helhål, Före och Efter injektering			Inflödestester, helhål, Före och Efter injektering			Red cement		Red silica	
	Oinjekt	Cement	Silica sol	Oinjekt	Cement	Silica sol	VFL	Inflöde	VFL	Inflöde
	q/dh [m ² /s]	q/dh [m ² /s]	q/dh [m ² /s]	q/dh [m ² /s]	q/dh [m ² /s]	q/dh [m ² /s]	q/dh [%]	q/dh [%]	q/dh [%]	q/dh [%]
10	2,4·10 ⁻⁰⁶	7,2·10 ⁻⁰⁷	sil sol	2,8·10 ⁻⁶	1,0·10 ⁻⁰⁶	sil sol	70	64		
11	3,0·10 ⁻⁰⁷	/*	sil sol	1,9·10 ⁻⁰⁷	/	sil sol				
12	2,1·10 ⁻⁰⁶	cement	cement	3,0·10 ⁻⁰⁶	cement	cement				
13	1,7·10 ⁻⁰⁷	/	sil sol	9,4·10 ⁻⁰⁸	/	sil sol				
14	1,3·10 ⁻⁰⁸	/	sil sol	/	/	sil sol				
21*	2,1·10 ⁻⁰⁶	2,4·10 ⁻⁰⁶	5,2·10 ⁻⁰⁶	2,1·10 ⁻⁰⁶	1,7·10 ⁻⁰⁶	7,3·10 ⁻⁰⁷	0	19	0	57
22	7,2·10 ⁻⁰⁷	8,7·10 ⁻⁰⁷	7,1·10 ⁻⁰⁷	1,2·10 ⁻⁰⁶	5,2·10 ⁻⁰⁷	2,2·10 ⁻⁰⁸	0	56	19	96
23	1,3·10 ⁻⁰⁶	5,5·10 ⁻⁰⁷	3,9·10 ⁻⁰⁷	2,8·10 ⁻⁰⁶	9,4·10 ⁻⁰⁷	4,0·10 ⁻⁰⁷	57	66	28	58
24/*	1,8·10 ⁻⁰⁷	7,0·10 ⁻⁰⁸	1,8·10 ⁻⁰⁷	9,9·10 ⁻⁰⁸	3,5·10 ⁻⁰⁸	6,8·10 ⁻⁰⁸	61	65	0	0

* Borrhål 21 och 24 uppvisade inget hydrauliskt samband med närliggande injekterade borrhål.

Att notera är att efter den första injekteringen med cement ökade de naturliga trycken i borrhålen ganska mycket, i medeltal från ca 0,19 till 0,51 MPa. Detta kan förväntas av en injektering då berget tätas. Från de borrhål som uppvisade samband kan sägas att bruk typ 1 tätade borrhålen 10, 23 och 24. De naturliga inflödestesterna i 0,5 m sektioner visade att det största flödet (2,28 l/min) kom från sektionen 5–5,5 m i borrhål 10. Detta flöde och ett grundvattentryck på 0,13 MPa motsvarar en sprickvidd på ca 150 µm. Resten av inflödet (2,39–2,28 l/min=0,11 l/min) antogs komma från två andra sektioner längs borrhålet, med en gemensam total sprickvidd på 55 µm.

Silica sol injekteringen visar på att ytterligare tätning uppnåddes i borrhål 22 och 23 baserat på inflödesmätningarna. Vattenförlustmätningen i borrhål 22 visar dock på att den specifika kapaciteten är återigen på ursprungsvärdet, $7 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ efter det att silica sol injekterats. Vad detta beror på är svårt att säga men trycken har en avgörande roll vid mätningarna och om stabila tryck nåtts är osäkert. Det borrhål som resulterade i den ökade tätheten är troligtvis bh 10 och eventuellt bh 14. Bh 14 hade enbart trycksamband med borrhål 24 och detta då vattenförlustmätning utfördes i bh 24 och tryckresponsen följdes i bh 14, alltså inte åt andra hållet.

Erfarenheter från genomförandet av injekteringarna

Silica solinjekteringen i borrhål 10 resulterade inte i någon ordentlig borrhålsplugg i hålet; en sörja fyllde delvis hålet och visst flöde noterades. Borrhålet rensades ut och inflödet mättes. På ett djup av 2,2 m mättes ett inflöde om 1,8 l/min. Detta motsvarade med trycket 0,65 MPa en sprickvidd på ca 140–150 µm om flödet antas komma från en och samma spricka. Vad detta berodde på kan ha flera orsaker men en möjlig orsak är att vattenflödet hade eroderat silica solen. Gradienten som silica sol injekterades mot i borrhål 10 var hög, 30 m/m (0,65MPa/2,2 m) eller högre. Med gradienten 30 m/m och sprickvidden 150 µm blir vattnets skjuvkraft 22 Pa. Det innebär att skjuvkraften från vattnet kan ha varit större än skjuvhållfastheten hos silica solen när injekteringstrycket släpptes, vilket då skulle ha givit upphov till erosion av silica solen.

En annan möjlig förklaring är att avluftningen av borrhålet inte fungerade tillfyllest. Avluftningen gick till så att genom manschetten fördes en plastslang in till borrhålsbotten. Injekteringsmedlet pumpades in genom borrhålet och när injekteringsmedlet (uppblandat med borrhålsvatten) sprutade ut genom slangens drogs denna ut. När slangens ute stängdes manschettventilen och trycket ökades till designtryck. Efter de avsatta 5 minuterna öppnades ventilen och injekteringen startade. Som pumpkurvan för borrhål 10 visar i figur 7-4 nåddes designtrycket under själva avluftningen vilket kan innebära att den uppblandade silica solen trycktes ut i berget. Efter de satta 5 minuterna för avluftning så hölls inte designtrycket i mer än 3,5 minut istället för den satta tiden 5 minuter. Således kan även denna korta pumptid vara orsaken till att ingen borrhålsplugg bildades.

Vunna erfarenheter, korset

Gällande silica sol injekteringen togs flera åtgärder fram för att klara erosionen;

- Alla borrhål skall avluftas och tömmas på vatten innan injektering. Täta borrhål samt borrhål med inflöden upp till 2 l/min skall avluftas med vakuumpump, se vidare avsnitt 5.2.3.
- Den effektiva injekteringstiden vid nått designtryck skall vara 4/5 av geltiden. Vid denna tid så är hållfastheten på silica sol större till mycket större än skjuvkraften från vatten för dessa förväntade grundvattentryck, se vidare avsnitt 3.4.7.
- Den hydrauliska gradienten kan avsevärt minskas genom att använda stuffhål. För skärm 1 så kan ”korsets” injekteringshål fungera som stuffhål.

Geltiderna vid olika recept hade tidigare utprovats på laboratorium men korset visade att geltiderna varierade endast med ±1 minut även med aktuell utrustning och produktionsanpassade satsstorlekar. Därmed ansågs att repeterbara geltider kunde uppnås och silica soblandningen fungerade enligt förväntan.

Genomförandet med att avsätta 5 minuter för avluftning togs bort som en åtgärd då vakuumpumpning ansågs gå fortare än 5 minuter. Istället ställdes ett kriterium att designtrycket skulle vara uppnått inom 5 minuter från att satsen var färdigblandad. Om tiden överskreds skulle borrhålet spolras ur och en ny sats blandas och injekteras.

Gällande cementinjekteringen så fungerade det tidigare receptet kallat cementbruk 1. Vid blandningarna av bruket undersöktes särskilt blandningsförfarandet. Om silica fume tillsattes före superplastiseraren blev bruket alldeles för tjockt och knappt pumpbart. När silica fume sattes till samtidigt som superplastiseraren, blev resultatet repeterbart.

Den använda mobila Unigrouten var en lånad maskin av Atlas Copco i väntan på den nya. Den fungerade rent injekteringstekniskt i form att den blandade bruket väl samt kunde hålla trycket tillräckligt bra, en variation på ca $\pm 0,03$ MPa när trycket stabiliserats kunde erhållas, jämför pumpkurvan för cementinjekteringen i figur 7-3. Dock noterades en tryckökning vid början på varje ny flödesökning på ca 0,1 MPa vilket är vanligt vid förträngningspumpar av enkolvstyp. Det bedöms dock att de små skillnaderna i trycket inte påverkar injekteringsresultatet och inte heller utvärderingen. I korset mättes (vikt och volym) samtliga injekteringsmaterial manuellt. Med denna utrustning kunde en fullständig specifikation på den nya Unigrouten göras där de mesta av förändringarna koncentrerades till blandningen och invägning av de ingående materialen.

Gummistrumporna som användes i korset för att förhindra att observationshålen injekterades igen, fungerade enligt förväntan, men krävde stora arbetsinsatser.

7.2.3 Skärm 1

Design o genomförande, skärm 1

Den valda designen för skärm 1 summeras i tabell 7-6. En plan över skärmens läge i tunneln och en sektion med resulterande injekteringshål visas i figur 7-5.

Tabell 7-6. Design för skärm 1.

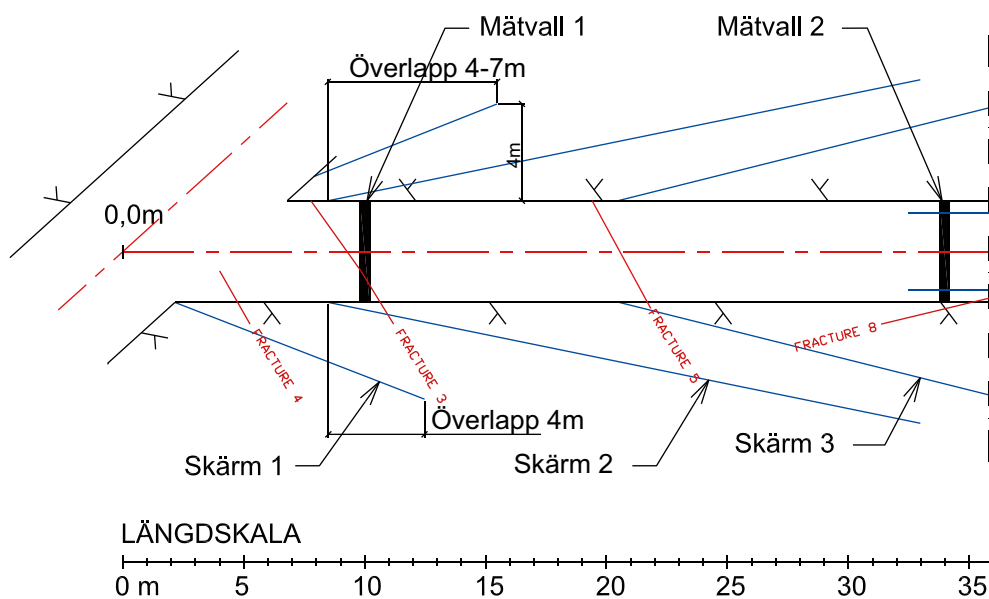
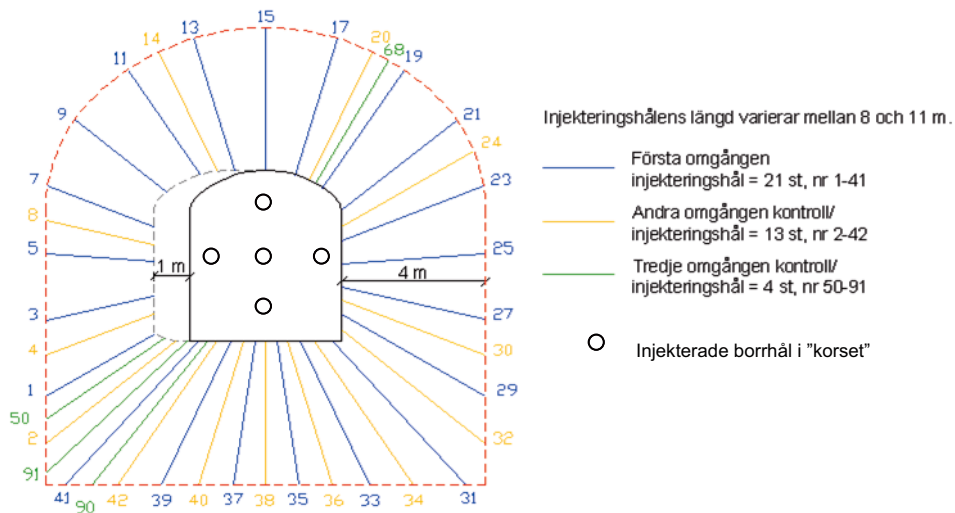
Parameter	Skärm 1	Kommentarer
Injekteringsmedel	Silica sol alla hål	
Silica sol	21 min / 3,0 MPa	130–150 μ m = Geltid 21 min, trycket begränsat p g a närhet till prototyp
Geltid /övertryck	39 min / 5,0 MPa	
	63 min / 3,0 MPa	
Stuffhål	Hålen i "korset" fungerade som observationshål	
Borrhålsavstånd vid spets	2,0 m	Totalt 21 stycken borrhål i omgång A
Borrhålslängd, omgång A	8–11,5 m	"Snett" påslag. Längden varierar för att få ett rakt påslag i nästkommande skärm.
Stick	4 m	Begränsat stick p g a närheten till bergvägg i vänstersida.

Stuffhål

Stuffhålen i skärm 1 bestod av 5 stuffinjekteringshål som utfördes i korset, se tidigare avsnitt där ett borrhål injekterades med cement och de övriga fyra med silica sol. Längden på stuffhålen var 7 m. Omfattande hydrauliska tester utfördes i samtliga borrhål. Det cementinjekterade borrhålet injekterades först, 0,3 MPa övertryck under 45 minuter. Åtgången av cement för detta borrhål var ca 570 liter men stora mängder kom tillbaka på stuff genom ytläckage. De andra stuffhålen injekterades med silica sol med två olika tekniker; Övertryck på 0,2 MPa under 5 minuter med en geltid på 14,5 min samt övertryck= 0,4 MPa under 15 minuter med en geltid på 35 min. För detaljer se avsnitt 7.2.2. Åtgången av silica sol i dessa fyra borrhål var ca 14 liter som effektivt injekterad volym.

Omgång 1A

Omgång 1A borrades med ett spetsavstånd på 2 m mellan borrhålen och totalt utfördes 21 borrhål i omgången. Borrhålen utfördes i olika längder, mellan 8–11,5 m. Borrgeometrierna följde således inte basskärmen utan anpassades för att ge ett rätvinkligt påslag av skärm 2. Sticket var 4 m.



Figur 7-5. Skärmgeometri för skärm 1, sett framifrån samt i plan.

Inflöde, grundvattentryck och vattenförlust mättes i samtliga borrhål. Samtliga borrhål injekterades med silica sol då de beräknade hydrauliska sprickvidderna från inflödet var mindre än 150 μm .

Övertrycket för injektering samt den effektiva injekteringstiden var satt till 5 MPa respektive 31 min för borrhålen i höger vägg och 3 MPa respektive 50 min för vänster vägg. Geltiderna var 39 min för de högra borrhålen och 63 min för de vänstra. De kortare geltiderna på 39 minuter valdes med hänsyn till att begränsa inträngningen till Prototyp-tunneln som ligger till höger om TASS-tunneln. Geltider på 21 minuter användes efter det att ytläckage och hydrauliskt samband noterats i vägg.

Under injekteringen av omgång 1A användes 1 543 l silica sol som effektiv injekterad volym (= totalt registrerad volym – teoretisk borrhålsvolym).

Omgång 1B

I omgång 1B borrades 13 borrhål med samma stick. De placerades ut enligt kriterierna för kontrollhål, se avsnitt 6.2.7. Tio av dessa borrhål bedömdes som täta, d v s med inläckage på mindre än 0,1 l/min eller en beräknad hydraulisk sprickvidd på mindre än 20 μm . Tre av borrhålen läckte, bh nr 2, 40 och 42 och behövde injekteras, läget för dessa tre var i det nedre vänstra hörnet, se figur 7-5.

Samtliga 13 borrhål injekterades med silica sol. De tre läckande borrhålen injekterades sektionsvis i två omgångar på grund av ytläckage. Den innersta sektionen från 4 till 11,5 m injekterades först och sedan den yttre sektionen 1–4 m. Den effektivt injekterade volymen för samtliga 13 borrhål var 107 l.

Omgång 1C

I omgång 1C borrades fyra kontrollhål för att kontrollera injekteringen i de tre föregående (läckande) borrhålen. Hydrauliska tester utfördes på nytt och utvärderingen visade att de skulle injekteras med silica sol. Totalt effektiv injekterad volym för dessa fyra borrhål var 408 l. Samtliga fyra borrhål uppvisade hydrauliskt samband med närliggande borrhål.

I tabell 7-7 visas inflöden och tryck före injektering. I tabell 7-8 visas sammanfattande data från injekteringen i respektive omgång. Alla data återfinns i tabeller i bilaga 3.1.

Tabell 7-7. Inflöde och tryck, skärm 1.

	Antal borrhål	Medelvärde inflöde [l/min]	Medianvärde* inflöde [l/min]	Största inflöde [l/min]	Största mätta grundvattentryck [MPa]
Skärm 1A	21	2,7	0,3	27	3,0
Skärm 1B	13	1	0,01	8,4	3,1
Skärm 1C	4	0,6	0,003	2,2	3,0

*Median av de enskilda mätta värdena.

Tabell 7-8. Injektering, skärm 1.

	Antal injekterade med silica sol	Antal injekterade med cement	Cementrecept/ geltider	Effektivt injekterad volym [liter]	Kommentar
Skärm 1A	21	0	63, 39, 21 min	1 543	Samband samt ytläckage
Skärm 1B	13	0	63, 39, 21 min	107	Samband med närliggande bh
Skärm 1C	4	0	39 min	408	Samband med närliggande borrhål för alla 4 bh

Resultat, skärm 1

Förändrad genomsläpplighet

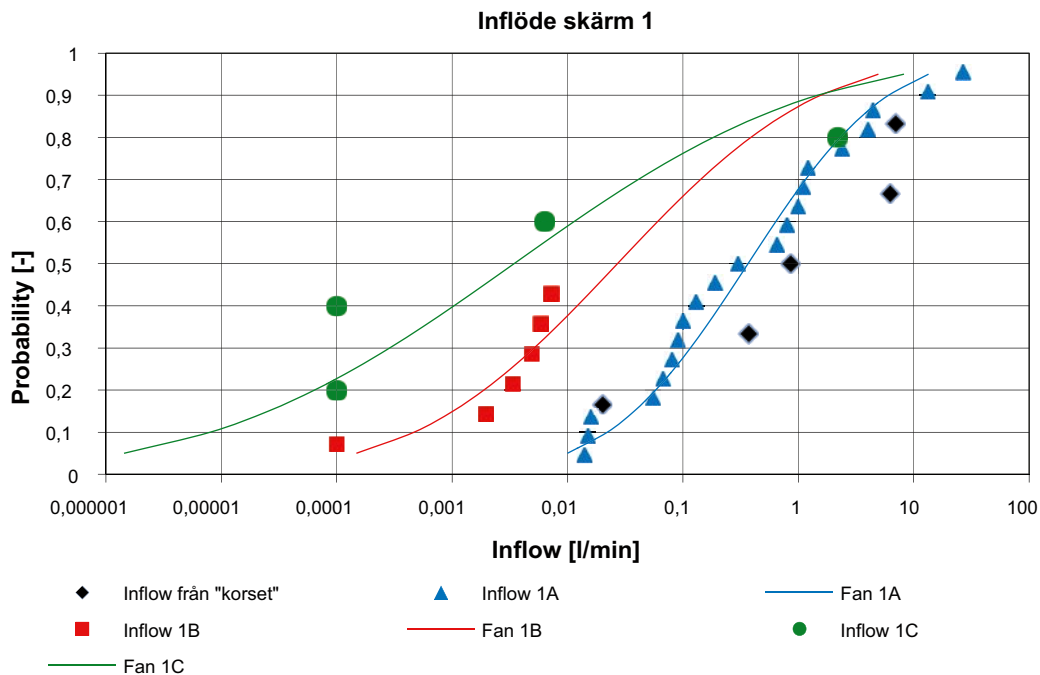
I figur 7-6 visas de i borrhålen mätta inflödena plottade som en kumulativ fördelning för respektive omgång före injektering, samt den anpassade log-normalfördelningen i syfte att åskådliggöra tätningseffekten.

Medianvärdena ($p = 0,5$) av inflödet för varje omgång är summerade i tabell 7-9. Transmissiviteten är antagen att vara lika med den specifika kapaciteten (Q/dh). Flödet är medianinflödet som utläses från diagrammet och använt tryck är 3,0MPa.

Tabell 7-9. Beräknad mediantransmissivitet för skärm 1, utifrån log-normalkurvorna. Grundvattentryck = 3,0 MPa.

Omgång	Median inflöde [l/min]	Beräknad median transmissivitet ($T=Q/dh$) [m^2/s]
Stuffhål	0,86	$4,8 \cdot 10^{-08}$ **
A	0,366	$2,0 \cdot 10^{-08}$
B	0,027	$1,5 \cdot 10^{-09}$
C	0,003	$1,9 \cdot 10^{-10}$

** Median av fem mätta värden, ej kurvanpassad.



Figur 7-6. Inflöden och anpassade log-normalkurvor för varje borrhålsomgång.

Vunna erfarenheter, skärm 1

Den första etappen hade syftet att utrustning och metodik skulle testas under full produktion samtidigt som rutiner för datahantering och beslutsvägar kontrollerades. Skärmens geometri anpassades efter det sneda påslaget. Injekteringen av skärm 1 var fullgod efter tre omgångar och totalt 38 borrhål. Totalt sänktes inflödet i kontrollhålen med en faktor 100, från 0,4 l/min till ca 0,004 l/min. Flera hydrauliska samband och injekteringsmedel som flödade tillbaka ut ur bergväggen noterades.

Geltiderna stämde bra, ungefär ± 1 min. Enbart ett av borrhålen i skärm 1A hade en förändrad geltid och det är oklart varför; temperaturen var stabil på ca 12°C i både luft och berg. Dock visade gelningskontrollerna att geltiderna kan variera mellan olika silica sol-leveranser varför beslut togs att fortsättningsvis göra minst en provblandning inför varje injekteringsomgång.

Injekteringsutrustningen gav stabila tryck och kapaciteten på pumpen medförde att injekteringsstrycket uppnåddes snabbt. Datahanteringen från utrustningen krävde dock mycket manuellt arbete, bland annat utfördes handskrivna protokoll, vilket inte hade varit nödvändigt i samma utsträckning om en mer automatiserad injekteringsutrustning hade använts.

Avluftningen av samtliga borrhål utfördes med vakuumpumpen. Enbart 2 av 21 borrhål i Skärm 1A hade en mindre injekterad volym (enligt registreringen i Logac) än den teoretiska borrhålsvolymen (maximalt var det 7 liter mindre än borrhålsvolym för borrhål nr 31). Beslut togs att avluftningen av borrhål fortsättningsvis skulle göras med hjälp av vakuumpumpen.

7.2.4 Etappresultat och erfarenheter inför etapp 2

”Korsets” borrhål var ca 7 m långa och gick parallellt med TASS-tunneln. Som ett resultat i efterhand fungerade dessa borrhål som stuffhål för skärm 1. Analyser utfördes av betydelsen av att använda stuffhål, och det bestämdes att stuffhål skulle användas i samtliga kommande injekteringskärrar. Stuffhålens främsta uppgift var alltså att sänka den hydrauliska gradienten och inget särskilt mål att täta en viss minsta sprickvidd sattes. Injekteringen måste dock utföras så att ingen erosion av injekteringsmedlet skulle ske, vilket ställde krav på injekteringsstryck och -tid. Man bedömde att 3–4 stycken stuffhål jämnt spridda i stufen skulle räcka för en tillräckligt tät stuff.

Under utförandet av korset och skärm 1 testades metod för tömning av borrhål på vatten och luft före injektering. Tömning förutsattes behöva göras för hål som gav ett inflöde om mindre än 3 l/min eller

för hål som uppvisat samband vid injektering. För flöden om 3 l/min och uppåt bedömdes hålet tillräckligt genomsläppligt för att injekteringsmedlet skulle kunna pressa tillbaka vattnet från borrhålet in i sprickorna utan att injekteringsmedel och vatten blandas om. De metoder som testades var:

1. När borrhålet fylls med injekteringsmedel från manschetten går luft och vatten ut genom en 12 mm avluftningsslang förd genom manschett till botten av borrhål.
2. Borrhålet fylls med injekteringsmedel genom en 12 mm slang förd till borrhålsbotten. Vatten och luft pressas därmed mot manschetten och lämnar borrhålet (manschetten inte fullt åtdragen).
3. Den mer traditionsenliga metoden, så kallad slangfyllning, där borrhålet fylls med injekteringslangan från botten och upp, genom att slangens successivt dras ut ur hålet. Detta görs före manschettering.
4. Vakuumpumpning. Principen är att först evakuera vatten och slam vilket kräver ett motsvarande inflöde av luft och därefter att försätta hålet under vakuum, se vidare avsnitt 5.2.3.

Ingen av metoderna 1–3 fungerade tillfredsställande. Vatten och injekteringsmedel blandades om, sannolikt p g a turbulens. Vidare gick inte all luft ut vilket kunde konstateras genom icke fyllda hål. Metod 2 kändes svår att få att fungera, och metoden var också tidskrävande. Metoden med vakuumpumpen fyllde avsedd funktion och var förhållandevis produktionseffektiv. För skärm 2 beslöts därför att använda enbart metod 4, vakuumpumpen.

Under skärm 1 noterades flera ytläckage där de injekterade volymerna var stora. Två åtgärder testades; 1) Den första satsen injekterades enligt ursprunglig design men ytterligare en sats blandades med ännu kortare geltid. 2) Manschetten fördes längre in, till ett djup av 3 m, och injekteringen gjordes enligt design. Sedan injekterades den yttersta biten av borrhålet med en mycket kort geltid på 10 min och ett totaltryck på 1,0 MPa och trycket hölls i 8 minuter.

Under etapp 1 gavs således tillfälle att pröva och inför nästkommande etapper befästa och vidare beskriva de åtgärder som skulle tas till vid ytläckage av silica sol: Grundläggande observationer var tryck och flöde (bruksåtgång) samt en bedömning av var och hur stort ytläckaget är. Om en sats bedömdes ta slut innan fullgjord tid (utan att designtrycket nåtts och hållits angiven tid) skulle en ny sats med kortare geltid blandas. Om designtrycket kunde hållas angiven tid skulle ingen åtgärd göras förutom en notering och omhändertagande av spillet.

För det fall återflöde observerades och tryck och tid ej kunde hållas valdes följande arbetssätt. Som första åtgärd skulle injekteringsmanschetten omedelbart flyttas längre in och eventuella sambandshål manschetteras. Om den första satsen tog slut skulle en ny sats med kortare geltid injekteras. Om tryck eller tid ej kunde hållas för denna sats, skulle trycket sänkas för nästkommande sats.

7.3 Arbetsetapp 2, traditionella förinjekteringsskärmar

7.3.1 Etappmål och förutsättningar

Denna etapp bestod av två injekteringsskärmar; skärm 2 och 3. Etappen syftade till att visa att täthetsmålet 1 liter/minut och 60 m tunnel kan uppnås med konventionellt utformade injekteringsskärmar borrarade utanför tunnelkonturen.

Projektets cementbruk hade inte testats i full produktion tidigare och arbetsetapp 2 skulle inledas med provblandning och förprovning av detta.

I skärm 2 skulle rakhetsmätning utföras med syftet att kontrollera borrhålsavvikelsen. Max tillåten borrhålsavvikelse sattes till 4% av borrhålslängd. För ett 20 m långt hål innebar detta att avvikelsen fick vara max 0,8 m. Om avvikelsen översteg kravet behövde inte borrhålet borraras om men åtgärder skulle vidtas inför nästa skärm.

Den största sprickan i detta parti som prognostiserats med dubbelmanschettmätningarna fanns i sektion 20 m och hade hydraulisk sprickvidd mellan 160 och 180 μm , se figur 4-6. Bedömningen var att inflödet skulle kunna härröra från den sedan tidigare kända strukturen, struktur 5, och att denna då skulle kunna ge ett ännu större flöde, uppemot 700 l/min, se kapitel 4. Vidare fanns det en förmodad hydraulisk kontakt mellan struktur 5 och 8. Tryckuppyggnadstester i ett av stufhålen skulle göras

efter varje omgång i skärm 2 i denna etapp. Utvärdering av tryckuppbyggnadstester ger värden på transmissiviteten längre ut från borrhålet än inflödesmätningar och syftet var att försöka påvisa täthetseffekten p g a injektering i de större strukturerna. Ett ytterligare syfte var att försöka förstå hur den hydrauliska konnektionen av strukturerna 5 och 8 skulle kunna påverka flödesdimensionen; ett väl konnekterat system borde ge ett 3-D flöde.

Prototyptunneln är bentonitfylld i höjd med skärm 2 och framåt, och direkta observationer av genomslag av injekteringsmedel in till prototyp var ej möjliga. För att begränsa risken att påverka prototyp gjordes därför en justering av dimensionerande inträngningslängd. Med ett minskat borrhålsavstånd om 1,5 m kunde den dimensionerande längden minskas och då minskar också inträngningen i den största sprickan.

Förekomsten av stora sprickor innebar också att både silica sol och cementbruk skulle användas i samma skärm. Eftersom injekteringen skulle börja med cementhålen, innebar det att de större sprickorna skulle tätas först och därmed skulle möjligheten för silica sol att sprida sig för långt ytterligare begränsas.

7.3.2 Skärm 2

Provblandning och förprovning

Provblandning

Den provblandning som utfördes med hänsyn till de stora egenskapsvariationerna hos bruket till skärm 1, gjordes under överinseende av en extern resurs med mångårig erfarenhet av injektering. De egenskaper som bestämdes för att kontrollera repeterbarheten var densiteten genom mud-balance, viskositetsvärde med marshkon och flytgräns med yield stick. Särskilt undersöktes variationerna när superplastiseraren tillsattes med det automatiska doseringssystemet respektive via manuell invägning.

Med den automatiska inblandningen varierade marshkontiden avsevärt, från 35 till hela 50 sekunder. Med den manuella invägningen varierade tiden från 40 till 44 sekunder. Densiteterna uppmätta med mudbalance var stabila för båda inblandningssätten ($1,33 \text{ kg/m}^3$). Den troliga orsaken till variationerna vid den automatiserade inblandningen var en viss efterringning från doseringskärlet. Doseringen skulle eventuellt ha kunnat ställas in men man valde ändå att fortsättningsvis väga in superplastiseraren manuellt. För de särskilda provblandningarna och samtliga förprovningar på cementbaserat bruk, se bilaga 4.

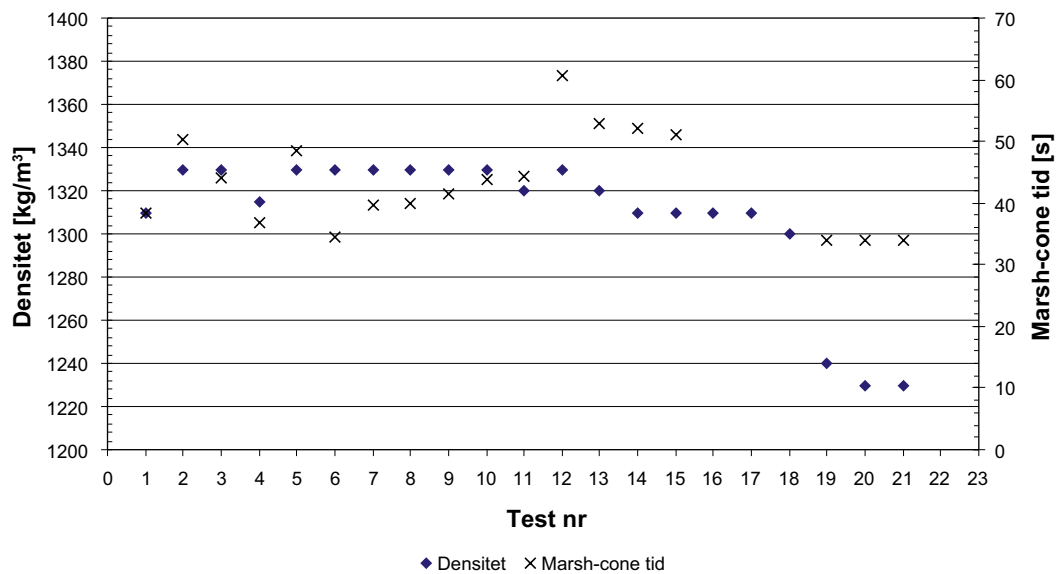
Förprovning

Sedan manuell invägning hade valts utfördes fullständig förprovning av cementbruket. I figur 7-7 redovisas densitet och marshkontiden från provblandningarna som utfördes före injektering i skärm 2, totalt 15 satser. I figuren har provningar från olika tider (0–60 min efter blandning) på de 15 satserna sammanställts, totalt 21 provningar. Provning 19–21 utfördes 10, 30 och 60 min på en blandning som innehöll mindre silica fume än vad som ingår i receptet, vilket förmodligen är orsaken till de låga densiteterna.

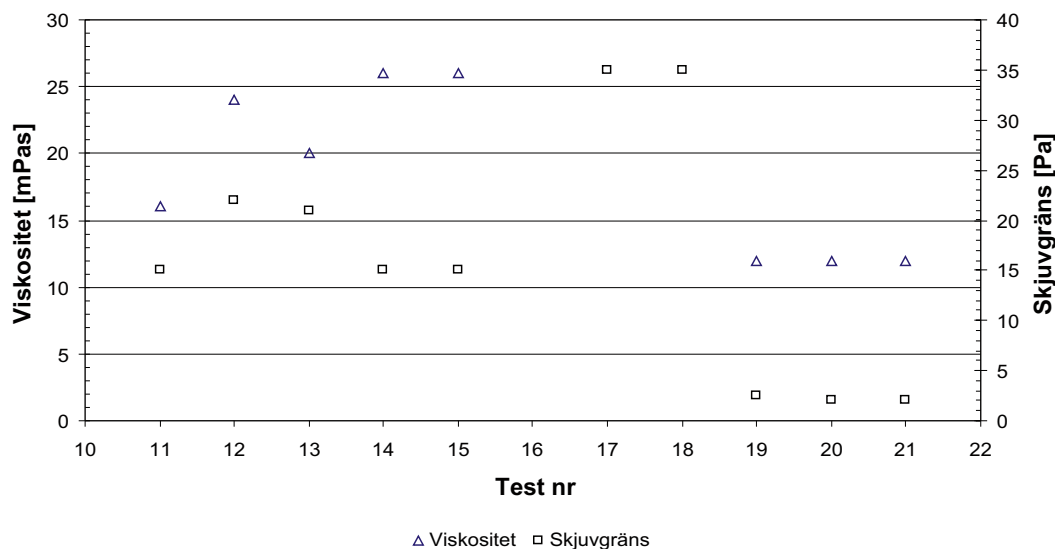
Provning 11–21 innefattade även mätning av flytgränsen. Detta innebar att viskositeten kunde beräknas med hjälp av densitet och resultaten från marshkonen. I figur 7-8 redovisas uppmätt flytgräns och beräknad viskositet. I denna figur är det tydligt att framför allt flytgränsen sticker ut för provning 19–21 och sannolikt beror på den mindre mängden silica fume, se ovan.

Design och genomförande, skärm 2

För att minska risken att störa prototyptunneln valdes spetsavståndet i skärm 2 till 1,5 m. Med det minskade borrhålsavståndet om 1,5 m krävdes en dimensionerande inträngningslängd om 1,1 m. Genom att använda det redan tidigare använda medlet med geltid 39 min och att sänka injekteringsövertrycket till 3,0 MPa erhöles den teoretiska inträngningslängden 1,2 m. För de silica solhål som ligger närmast prototyp och där en sprickvidd över 130 μm indikerats, valdes en geltid om 25 min och trycket 4 MPa. Det anpassade spetsavståndet gav 31 borrhål i omgång 2A. Längden på skärmen hade diskuterats med hänsyn till önskan att fullständigt penetrera den tidigare identifierade kraftigt vattenförande strukturen, men det bedömdes slutligen att en normal 20 m skärm skulle räcka. Dock brast kommunikationen och borrhålen blev 25 meter långa. Sticket var 5 m.



Figur 7-7. Densitet och marshkontid för provblandningar i fält med cementbaserat bruk typ 1, W/DM=1.4.



Figur 7-8. Viskositet och flytgräns från provblandningarna i fält med cementbaserat bruk typ 1, W/DM 1.4.

Stuffhålen bekräftade förekomsten av större sprickor. Med hänsyn till de prognostiserade större strukturerna genomfördes efter varje injekteringsomgång tryckuppbyggnadstester. Tryckuppbyggnadstesterna gjordes i ett observationshål i stuffen som hölls stängt under injekteringen av de andra hålen. Borrhålet uppvisade samband och spolades därför rent före varje test.

Den valda designen för skärm 2 summeras i tabell 7-10. En plan över skärmens läge i tunneln och en sektion med resulterande injekteringshål visas i figur 7-9.

Tabell 7-10. Design för skärm 2.

Parameter	Skärm 2	kommentarer
Injekteringsmedel	Cementbaserat bruk, typ 1: 1 stuffhål, samt 8 st i omgång A Silica sol: övriga hål	
Silica sol Geltid /övertryck	39 min / 3,0 MPa 25 min/4,0 MPa 25 min/5,0 MPa	130–150 µm = Geltid 25 min, trycket begränsat p g a närhet till prototyp
Cementbaserat bruk typ 1 tid/övertryck	45 min/5,0 MPa i stuffhålet 45 min/7,0 MPa i övriga	Ett fel gjordes, designen angav 7 MPa i 45 min för samtliga
Stuffhål	4 hål i stuffen varav ett inledningsvis fungerade som observationshål	
Borrhålsavstånd vid spets	1,5 m	Det anpassade avståndet gav totalt 31 stycken borrhål i omgång A
Borrhålslängd, omgång A	25 m	Med hänsyn till de prognosticerade strukturerna diskuterades 25 m, men slutligt val var 20 m. Dock brast kommunikationen och skärmen borrades 25 m.
Stick	5 m	Sticket utfördes enligt plan

Stuffhål

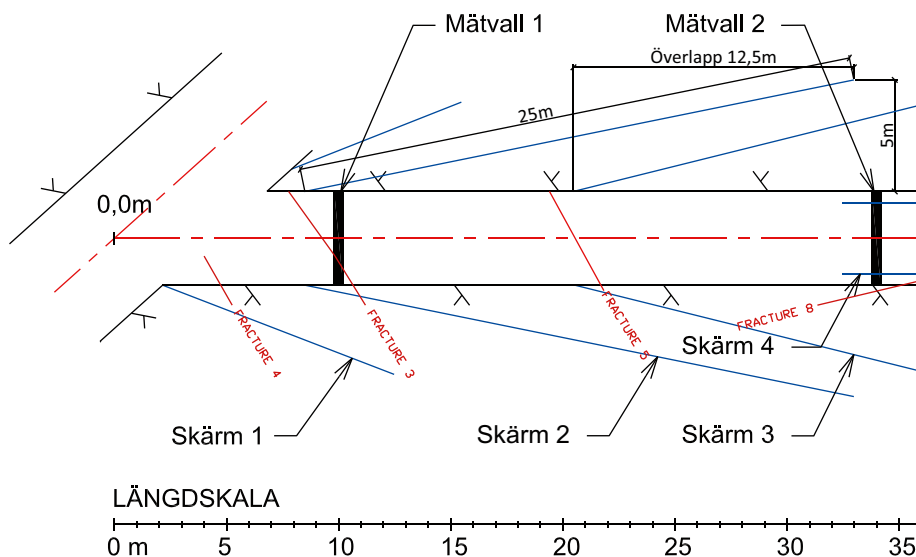
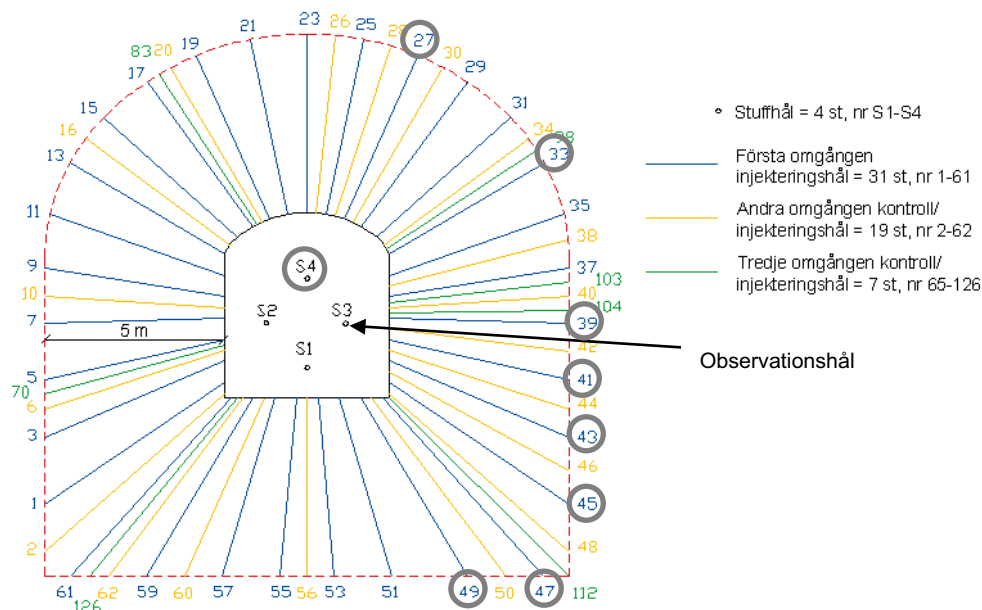
Stuffhålen i skärm 2 bestod av tre stuffinjekteringshål samt observationshålet. Längden på stuffhålen var 20 m. Placeringen gjordes så att stuffhålen skulle sammanfalla med salvhålen. På samma sätt som tidigare, för skärm 1, utfördes hydrauliska tester. Vattenförlusten var i ett av hålen sådan att ett av stuffhålen injekterades med injekteringsbruk typ 1, trots att inflödesmätningen indikerade silica sol. De andra stuffhålen injekterades med silica sol med en geltid på 25 min och 4 MPa. Det cementbaserade bruket injekterades enligt basdesignen; injekteringstryck på 7 MPa och effektiv injekteringstid på 45 minuter. Observationshålet manschetterades före injektering. Totalt injekterades 273 liter som effektiv volym varav 109 liter var cementbaserat bruk och 164 liter silica sol.

Omgång 2A

De hydrauliska testerna i omgång 2A utfördes; det största inflödet var 96 l/min, och flera låg mellan 40 och 60 l/min. Detta medförde att åtta borrhål injekterades med cementbaserat bruk och resterande med silica sol. Med hänsyn till den förändrade skärmgeometrin anpassades tryck, geltid och inträngningslängder. Tider och tryck valdes så att den dimensionerande inträngningslängden, I_{dim} , i den minsta sprickvidden, 10 µm skulle återigen ge 50% överlapp mellan borrhålen $d v s 1,1 m$, och med 3,0 MPa övertryck och geltid 39 min blev den teoretiska inträngningen i 10 µm sprickan 1,24 m. Vidare blev den teoretiskt maximala inträngningslängden i den största sprickvidden använd för silica sol ca 17 m. Den anpassade designen innefattade cementbaserat bruk typ 1 med totaltryck på övertryck på 7 MPa och effektiv injekteringstid på 45 min.

Under injekteringen av omgång 2A användes 1 287 l som effektivt injekterad volym. Tre av borrhålen stod för den största bruksåtgången: 787, 287 respektive 188 l. Det första borrhålet som injekterades tog 787 l cementbaserat bruk. Bruksåtgången var större än förväntat och för att kunna avsluta injekteringen blandades ett styvare bruk, cementbruk typ 2. Bruk typ 2 hade utprovats tidigare i laboratoriet och provblandats i injekteringsutrustningen men kriteriet för när den skulle användas var inte bestämt.

I omgång 2A konstaterades omfattande hydrauliskt samband med andra borrhål vilket också antyddes av de stora volymerna.



Figur 7-9. Skärmgeometri för skärm 2 sett både framifrån och i plan. I plan vyn finns även de förmodade strukturerna samt förundersökningshålen inritade. I tvärsektionen är borrhålen som injekterades med cement inringade.

Denna borrhålsomgång raketmättes.

Omgång 2B

I skärm 2B borrades 19 borrhål, ansatta enligt kriterierna för kontrollhål, vilket resulterade i att hålen blev relativt jämnt utspridda över skärmen. Från de hydrauliska testerna bedömdes 12 kontrollhål som täta. Sju av borrhålen läckte mer än kriteriet för tätt hål. Tre av dessa var placerade mellan tidigare silica sol-injekterade borrhål och fyra placerade invid hål som tidigare injekterats med cement.

Injektering av samtliga borrhål i omgång 2B utfördes med silica sol, geltid 25 min och effektiv injekteringstid 20 min, samt injekteringsövertryck 5,0 MPa. Även fast de utvärderade hydrauliska sprickvidderna var mindre än 130 µm valdes att använda den kortare geltiden på 25 min. Detta gjordes för att omgång A hade mycket ytläckage och samband med stor volymsåtgång som följd. Effektiv injekteringsvolym var 132 l och i denna skärm sågs tre hydrauliska samband med andra hål samt enbart två större ytläckage.

Omgång 2C

I omgång 2C borrades sju kontrollhål varav 5 var jämt fördelade längs skärmen och två intill borrhålet med största inflödet innan injektering och det hål med störst bruksåtgång i skärmen. Det största inflödet var i borrhål 98 med ett flöde på 0,19 l/min vilket borrades intill ett tidigare silica sol injekterat borrhål. Övriga sex borrhål hade inflöden på mindre än 0,08 l/min, d v s under kriteriet för läckande hål. Samtliga sju borrhål injekterades med silica sol med samma övertryck (5,0 MPa) och tider (25/20 min) som skärm 2B. Den effektivt injekterade volymen var 218 l vilket är mycket och sannolikt beror på att det var samband i 6 av hålen.

I tabell 7-11 visas inflöden och tryck före injektering. I tabell 7-12 visas sammanfattande data från injekteringen i respektive omgång. Alla data återfinns i tabeller i bilaga 3.2.

Tabell 7-11. Inflöde och tryck, skärm 2 med värden från observationshålet (redovisat i spalten för största värde) efter respektive omgång.

	Antal borrhål	Medelvärde inflöde [l/min]	Medianvärde inflöde [l/min]	Största inflöde [l/min]	Största mätta grundvattentryck [MPa]
Observationshål	1	—	—	17,4	3,1
Stuffinjekteringshål	3	7,3	8,5	9,2	3,1
Observationshål	1	—	—	5,4	3,1
Skärm 2A	31	22,7	10,0	96	2,9
Observationshål	1	—	—	0,3	2,2
Skärm 2B	19	0,1	0,1	1,2	2,7
Observationshål	1	—	—	0,1	2,1
Skärm 2C	7	0,1	0,0	0,2	—
Observationshål	1	—	—	0,1	—

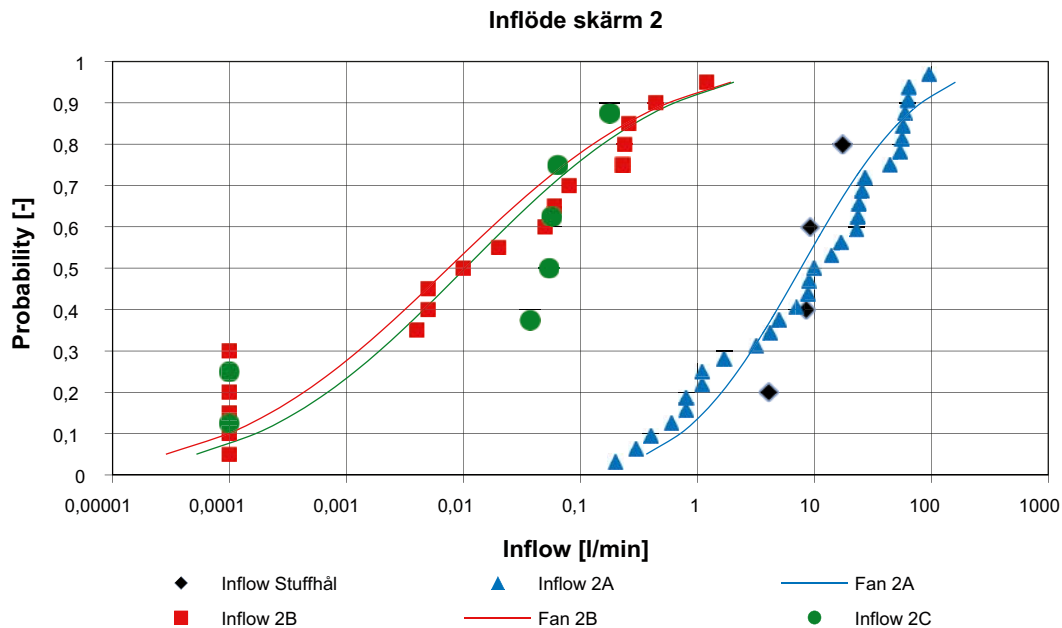
Tabell 7-12. Injektering, skärm 2.

	Antal injekterade med silica sol	Antal injekterade med cement	Cementrecept/ Geltider	Effektivt injekterad volym [liter]	Kommentarer
Stuffhål	2	1	Injbruk typ 1 25 min	109 164 Σ273	Samband med kärnborrhålen
Skärm 2A	23	8	Inj.bruk typ 1 Inj. bruk typ 2 39 och 25 min	ca 883 ca 187 217 Σ1 287	Samband mellan flera borrhål
Skärm 2B	19	0	25 min	132	Samband
Skärm 2C	7	0	25 min	218	Samband

Resultat, skärm 2

Förändrad genomsläpplighet

I syfte att åskådliggöra tätningseffekten plottades de mätta inflödena i kontrollhålen som kumulativa fördelningar för respektive omgång före injektering, och log-normalfördelningar anpassades till värdena. De kumulativa inflödena redovisas i figur 7-10. Transmissiviteten i varje omgång uttryckt som medianvärde, baserat på medianinflödet från diagrammet ($p = 0,5$) redovisas i tabell 7-13.



Figur 7-10. Inflöden och anpassade log-normalkurvor för respektive omgång i skärm 2.

Tabell 7-13. Beräknad mediantransmissivitet för skärm 2, utifrån log-normalkurvorna. Grundvattentryck = 3,1 MPa.

Omgång	Medianinflöde [l/min]	Beräknad mediantransmissivitet (T=Q/dh) [m ² /s]
Stuffhål	8,9	4,8·10 ^{-07**}
A	7,7	4,1·10 ⁻⁰⁷
B	0,007	4,0·10 ⁻¹⁰
C	0,010	5,6·10 ⁻¹⁰

** Median av fyra mätta värden, ej kurvanpassad.

Tabell 7-14. Tryckuppbyggnadstest (Pressure Build-up Test, PBT) i skärm 2: inflöde Q, grundvattennivå h, transmissivitet T, skinfaktor ξ och specifik kapacitet Q/dh. T och ξ är utvärderade med Jacob's metod, ekvation 3-2 och 3-3. $\Delta(Q/dh)_{\text{latest}}$ uttrycker reduktionen från närmast föregående test, d v s resultatet av mellanliggande injektering. $\Delta(Q/dh)_{\text{tot}}$ är den totala reduktionen, alltså aktuellt reduktion jämfört med ursprungsvärdet från PBT 1.

Test	PBT1 före injektering	PBT2 efter stuffinjekt	PBT3 efter omgång A	PBT4 efter omgång B	PBT5 efter omgång C
Q	17.4 l/min	5.4 l/min	0.30 l/min	0.14 l/min	0.11 l/min
h	324 m	313 m	218 m	210 m	191 m
T	1.8·10 ⁻⁰⁶ m ² /s	1.0·10 ⁻⁰⁶ m ² /s	*	*	*
ξ [-]	3.9	13	*	*	*
Q/dh	8.9·10 ⁻⁰⁷ m ² /s	2.9·10 ⁻⁰⁷ m ² /s	2.3·10 ⁻⁰⁸ m ² /s	1.1·10 ⁻⁰⁸ m ² /s	9.6·10 ⁻⁰⁹ m ² /s
$\Delta(Q/dh)_{\text{latest}}$		67%	92%	52%	13%
$\Delta(Q/dh)_{\text{tot}}$		67%	97%	99%	99%

* Utvärdering kunde inte göras då testtiden inte var tillräckligt lång.

Tryckttester

Resultaten från tryckuppbyggnadstesterna användes för att bedöma den globala transmissivitetsförändringen längre ut i bergmassan som resultat av injekteringen. Resultaten sammanfattas här, tabell 7-14. Vi ser att den specifika kapaciteten minskade väsentligt efter den första stuffinjekteringen, en sänkning på 67% jämfört med innan injektering. Den enskilda omgång som minskade genomsläppligheten mest är omgång A (92 %). Efter den andra omgången nåddes en reduktion av genomsläppligheten om totalt sett 99% och effekten av den sista omgången var marginell (13%).

Rakhetsmätning

Rakhetsmätningen gav vid handen att den maximala borrhålsavvikelsen från mätningar i sex borrhål i omgång 2A var 34 cm vilket innebar att toleranskravet om max 4 % innehölls. Senare redovisningar pekar dock på att avvikelsen kan ha varit större, se vidare avsnitt 7.7.1.

Vunna erfarenheter, skärm 2

Det automatiska blandningsförfarandet fungerade inte. Manuell invägning av superplastiseraren gav dock eftersträvarade och repeterbara egenskaper på bruket. Manuell invägning blev standardförfarandet för kommande skärmar. Efter att detta val gjorts gjordes en fullständig förprovning.

Bruksåtgången blev i två av hålen mycket stor och under pågående injektering beslöts att tillgripa bruk typ 2, som är ett styvare bruk. Efter injekteringen bestämdes ett kriterium för när bruk typ 2 skulle injekteras: efter en inpumpad total volym på 400 l baserat på ett ingenjörsmässigt antagande.

Tryckuppyggnadstesterna som utfördes fungerade väl och gav tydliga data, men rubbade arbetsrutinerna, främst beroende på de långa stabiliseringstiderna. Stabiliseringstiderna var också felbedömda och räckte inte för att ge fullständiga data för utvärdering av dimensionalitet.

7.3.3 Skärm 3

Design och genomförande, skärm 3

Skärm 3 skulle göras så lik skärm 2 som möjligt, förutom att borrhålen skulle vara 20 m i likhet med basdesignen.

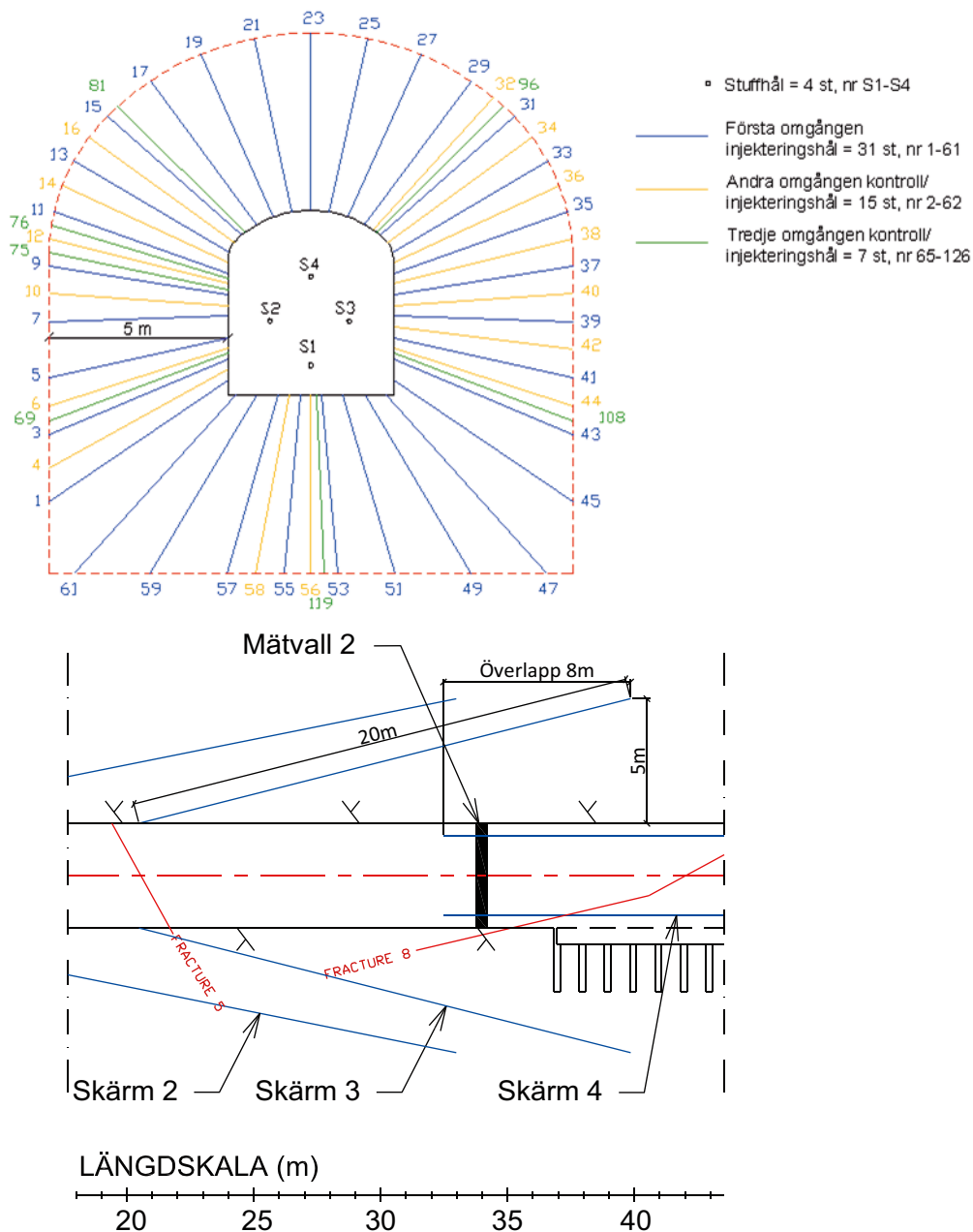
Den valda designen för skärm 3 summeras i tabell 7-15. En plan över skärmens läge i tunneln och en sektion med resulterande injekteringshål visas i figur 7-11.

Stuffhål i skärm 3

När stuffborrhålen skulle borraras observerades att kärnborrhål KI0014B01 läckte i stuffen. En tydlig stråle från ovansidan av borrhålspluggen syntes och flödet mättes till ca 3 l/min. I höger vägg nästan framme vid stuff noterades ett flöde på ca 1,2 l/min. Tolkningen var att det var framförallt två plan som gav detta flöde, ett nästan horisontellt och ett mer brantstående. För mätning av flödet sågades en slits i berget och ett fönsterbleck monterades. De individuella flödena mättes till 0,76 l/min respektive 0,56 l/min.

Tabell 7-15. Design för skärm 3.

Parameter	Skärm 3	kommentarer
Injekteringsmedel	Cementbaserat bruk, typ 1: samtliga stuffhål Silica sol: alla övriga hål	Kriteriet för val av cementbruk ej följt. Endast grovtätning (sänkning av konduktiviteten med faktor 50) eftersträvades.
Silica sol Geltid /övertryck	25 min/4,0 MPa 14 min/2,3 MPa	Design likt skärm 2. Vid vfl-mätningen visade borrhål 11 tendenser till uppspräckning varför den innersta sektionen (manschett 4 m) först injekterades enligt basdesign varefter den yttre delen injekterades med sänkt tryck och geltid
Cementbaserat bruk typ 1 tid/övertryck	45 min/7 MPa min i stuffhålet	
Stuffhål	4 stuffhål	Varav ett var kbh KI0014B01 (från förundersökningen) som borrarades upp
Borrhålsavstånd vid spets	1,5 m	
Borrhålslängd, omgång A	20 m	
Stick	5 m	



Figur 7-11. Skärmgeometri för skärm 3, stuffhålens placering är schematisk inlagda.

Det läckande borrhålet KI0014B01 borrades upp till ett djup av 20 m för att användas som ett av fyra stuffinjekteringshål och flödet uppgick därefter till mellan 54 l/min och 60 l/min. Flödet motsvarade det flöde som fanns i borrhålet innan det cementfylldes. När manschetten sattes in på ett djup av enbart 40 cm (p g a hinder) så knakade det i berget och vatten sipprade ut på flera ställen i stuff. Manschetten öppnades för att lätta på trycket och hindret togs bort. Därefter flyttades manschetten in till ett djup på 4 m, d v s så långt det var praktiskt möjligt, och stängdes. Inget flöde eller knakande noterades med manschetten på detta djup. Denna manschettplacering blev utgångsläget för hydrauliska tester och stuffinjektering av samtliga stuffhål i skärm 3. För att bedöma stabiliteten fördes även ett resonemang som bygger på tumregeln att inspända förhållanden råder i bergmassan på ett avstånd från bergvägg som är större än tunnelns pilhöjd, i detta fall 1,2 m och att manschetten därför skulle placeras minst 1,2 m in i berget. Placeringen av manschett var tidigare 1,5 m och detta läge behölls fortsättningsvis som normalplacering.

I skärm 3 ingick fyra stoffinjekteringshål; De två stoffborrhål som injekterades med silica sol i skärm 2 samt observationshålet vilka förlängdes till total längd 20 m, och det efter berguttag 2 redan till 20 m längd uppborrade kärnborrhålet KI0014B01. De hydrauliska testerna visade att det största inflödet var i kärnborrhålet, 60 l/min, medan de tre andra hade inflöden på 3,4; 3,0 respektive 0,4 l/min. Samtliga borrhål injekterades med cementbruk typ 1, eftersom endast en grovtätning eftersträvades. Under pumpningen av kärnborrhålet var bruksåtgången stor och efter att 343 l som total volym av bruk typ 1 (285 l effektiv volym) hade pumpats in blandades en sats med det styvare cementbruk typ 2 och ytterligare 108 l pumpades in. Trycket kom inte upp i designtrycket på 10 MPa vid den första pumpningen medan ett tryck på nära 10 MPa uppnåddes under den sista pumpningen. Totalt injekterades i stoffhålen 422 l som effektivt injekterad volym där kärnborrhålet stod för den största volymen på 393 l.

Omgång 3A

Omgång 3A borrades med ett spetsavstånd på 1,5 m mellan borrhålen och totalt utfördes 31 borrhål i omgången. Längderna på borrhålen var 20 m med ett stick på 5 m.

I och med att knak hade hörts under förberedelserna av stoffhålen vidtogs åtgärder inför injektering av omgång 3A. Dessa bestod av att var tredje borrhål skulle provtryckas med vatten genom att successivt gå upp i designtrycket 10 MPa i samband med vattenförlustmätningen. Eventuella knak och blockrörelser skulle noteras. Vid instabila förhållanden skulle manschetter placeras 3 m in i hålet och ny provtryckning göras och eventuellt löst sittande berg skulle knackas bort.

Under vattenförlustmätningen genomfördes den planerade provtryckningen. Vid provtryckningen av borrhål nr 11 så knäppte stoffen till lite och vatten flödade ut ur en spricka mitt i stoff. Först var vattnet cementfärgat och sedan kom rent vatten. Det började också pusa i borrhål nr 7 och vatten läckte ut vid manschetter; troligen trycktes vatten ut mellan de två tätande gummimanschetterna. Vatten trycktes också ut i injekteringshål från skärm 2, troligen hål nr 3 i sektion 11–12 m. Manschetterna flyttade in till 3 m djup, varefter arbetet kunde fortsätta. Inga ytterligare instabila förhållanden som föranledde flytt av manschetter uppkom vid provtryckningen eller vid injekteringen.

Hydrauliska tester i omgång 3A visade att det största inflödet var på 4,5 l/min medan flertalet borrhål hade ett inflöde på mindre än 1 l/min. Största mätta grundvattentryck var 3,4 MPa i injekteringshålen. Dock användes för denna borrhålsomgång grundvattentrycket 3,7 MPa enligt det utförda tryckuppbyggnadstest i stoffhålen redovisat injekteringsprotokollen (bilaga 3.3). Samtliga borrhål injekterades med silica sol, injekteringsöverttryck på 4 MPa (alltså 7,7 MPa totaltryck), geltid på 25 min och en effektiv injekteringstid på 20 min. Ett av hålen injekterades i två sektioner då ytläckage noterades vid vattenförlustmätningen och ”knak” hördes vid provtryckningen.

Under omgång 3A användes 225 l som effektivt injekterad volym. Fyra av hålen pumpades ej till sluttid eller kom ej upp till designtryck p g a ytliga slag eller stor bruksåtgång. De fyra borrhålen rensades ur och en sats med kortare geltid (11–15 min) injekterades.

Omgång 3B

I omgång 3B borrades 15 borrhål till en längd av 19 m relativt utspritt över skärmen. Sex av de 15 kontrollborrhålen bedömdes täta. Borrhål nummer 42, placerat i höger vägg hade det största inflödet (1,8 l/min), se figur 7-11.

Injektering av samtliga 15 borrhål i omgång 3B utfördes med silica sol. Ett borrhål valdes att injekteras med en kort geltid (11 min) då vattenförlustmätningen visade på tydligt ytläckage. Övriga borrhål injekterades som skärm A; geltid 25 min. Effektiv injekteringsvolym var 350 l varav två av borrhålen stod för den största bruksåtgången; 121 respektive 181 l. Vid pumpning av fyra av hålen sågs ytläckage i stoffen och till ett av borrhålen injekterades en sats med kortare geltid.

Omgång 3C

I omgång 3C borrades sju kontrollhål. Utifrån inflödet bedömdes samtliga borrhål vara täta. Borrhålen injekterades med silica sol på samma sätt som i omgång 3B. Ett borrhål från omgång 3B ominjekterades då ytläckage noterades under injekteringen. En effektiv volym på 66 l injekterades.

I tabell 7-16 visas inflöden och tryck före injektering. I tabell 7-17 visas sammanfattande data från injekteringen i respektive omgång. Alla data återfinns i tabeller i bilaga 3.3.

Tabell 7-16. Inflöde och tryck, skärm 3.

	Antal borrhål	Medelvärde inflöde [l/min]	Medianvärde inflöde [l/min]	Största inflöde [l/min]	Största mätta grundvattentryck [MPa]
Stuffinj.hål	4	16,9	3,2	61	3,2
Skärm 3A	31	0,7	0,3	4,5	3,4
Skärm 3B	15	0,3	0,1	1,8	3,1
Skärm 3C	7	0,02	0,02	0,07	1,5

Tabell 7-17. Injektering, skärm 3.

	Antal injekterade med silica sol	Antal injekterade med cement	Cementrecept/ geltider	Effektivt injekterad volym, [liter]	Kommentar
Stuffhål	0	4	Injbruk typ 1	422	Varav 393 l i stuffhål nr 1
Skärm 3A	31	0	25 och 14 min	425	
Skärm 3B	15	0	25 och 11 min	350	Ytläckage i stuff samt stor bruksåtgång
Skärm 3C	7	0	25 min	66	Geltiderna 4 min för långa för 4 av borrhålen

Resultat skärm 3

Efter utsprängning av sektionen längs skärm 3, 20 till 32 m, återfanns i vänster vägg ett borrhål och en spricka som läckte, med 0,2 respektive 0,1 l/min. Inga åtgärder gjordes för att lösa detta, utan resultatet av skärm 4 inväntades.

Flödet på 1,2 l/min som noterades i höger vägg nära stuff i sektion 20 m efter berguttag 2, upphörde helt under injekteringen av skärm 3. Sannolikt penetrerade borrhålen i skärm 3 de två plan som troligtvis orsakade flödet.

De mätta inflödena i kontrollhålen redovisas som kumulativa fördelningar för respektive omgång före injektering i figur 7-12. Transmissiviteten i varje omgång uttryckt som medianvärde, baserat på medianinflödet ($p = 0,5$) från den anpassade kurvan i diagrammet redovisas i tabell 7-18.

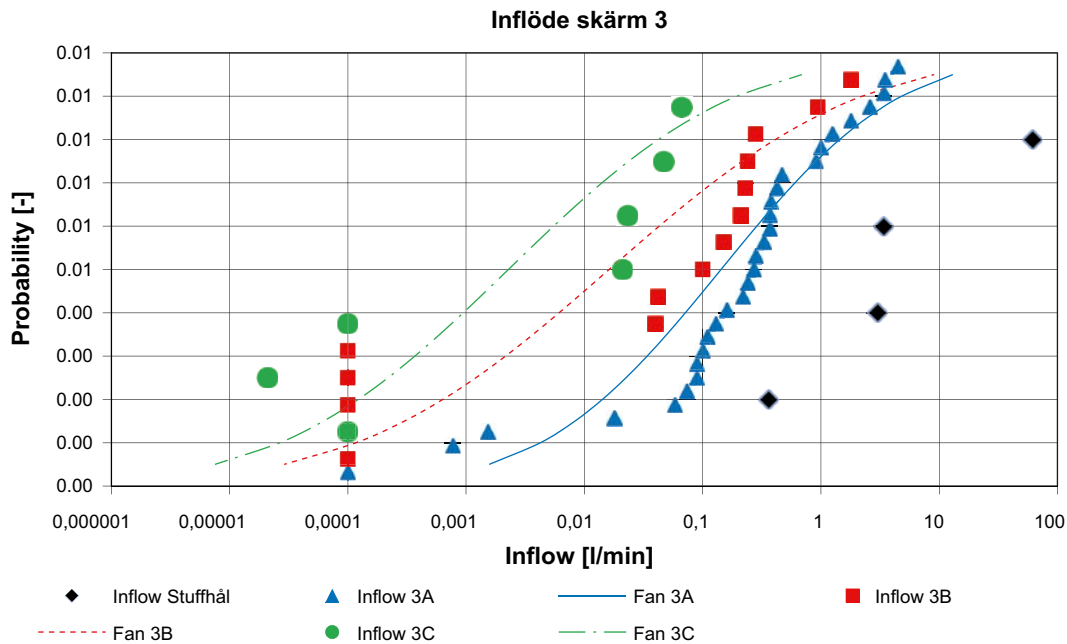
Tabell 7-18. Beräknad mediantransmissivitet för skärm3, utifrån log-normalkurvorna. Grundvattentryck = 3,4 MPa.

Omgång	Medianinflöde [l/min]	Beräknad median transmissivitet ($T=Q/dh$) [m^2/s]
Stuffhål	3,2	$1,6 \cdot 10^{-07}$ **
A	0,14	$7,0 \cdot 10^{-09}$
B	0,016	$7,9 \cdot 10^{-10}$
C	0,002	$1,1 \cdot 10^{-10}$

** Median av fyra mätta värden, ej kurvanpassad.

Vunna erfarenheter, skärm 3

De enstaka knak som hade hörts vid vattenförlustmätningen med de förhöjda injektionstrycken indikerade att stabiliteten lokalt kunde vara sämre. Erfarenheten av detta gjorde att vakenheten för tecken på instabilitet ökade. Rent praktiskt blev instruktionen att provtryckning och manschettflytt skulle göras om knak skulle uppträda.

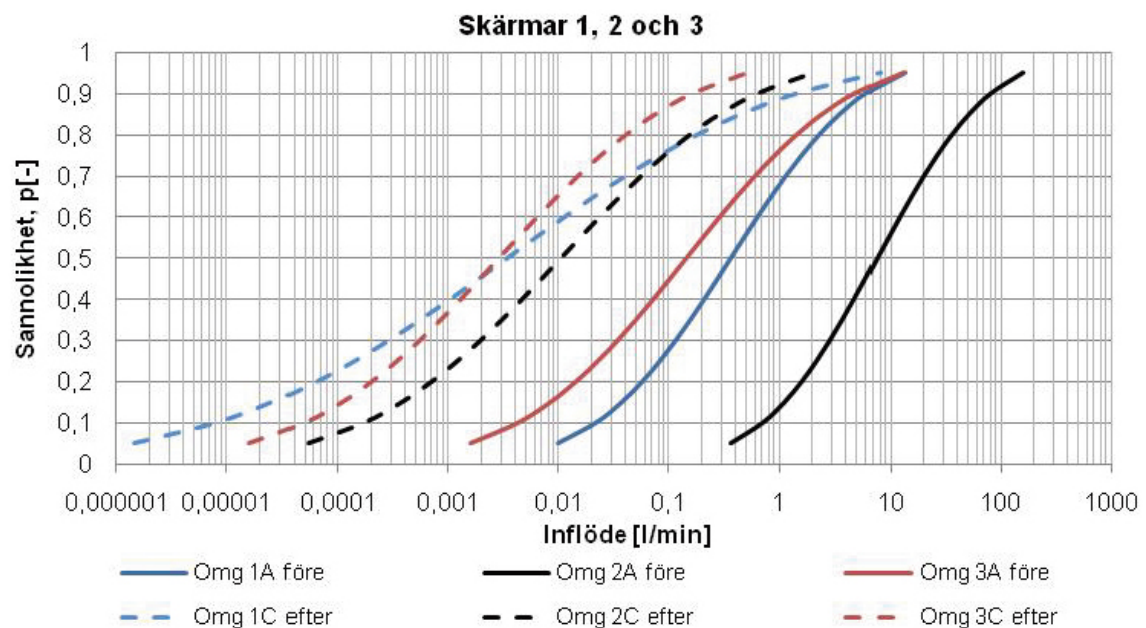


Figur 7-12. Inflöden och anpassade log-normalkurvor för varje borrhålsomgång i skärm 3.

7.3.4 Etappresultat och erfarenheter inför etapp 3

Syftet med den andra etappen var att visa att begränsningen av inläckaget till 1 l/min och 60 m tunnel kan nås med injekterings-skärmar placerade utanför tunnelkontur. För att åskådliggöra tätningseffekten för samtliga skärmar utanför kontur redovisas i figur 7-13 etappens skärmar 2 och 3 tillsammans med skärm 1. I figuren visas inflödet i borrhålen i omgång A – d v s före injektering, samt inflödet i borrhålen i omgång C – d v s efter injektering av omgång B.

De tolkade medianinflödena och beräknade resulterande transmissiviteterna är sammanställda i tabell 7-19. För beräkning av transmissiviteten användes det största uppmätta trycket.



Figur 7-13. Skärm 1, 2 och 3. Inflöden i injekteringshål före injektering samt resulterande inflöden i kontrollhål i påföljande omgångar. Skärm 1 är inkluderad för att samlat redovisa samtliga skärmar utanför kontur.

Tabell 7-19. Resultierande medianinflöden och transmissiviteter för kontrollhålen i skärm 1, 2 och 3.

Skärm Nr	Medianinflöde före injektering [l/min]	Medianinflöde efter injektering [l/min]	Beräknad resulterande mediantransmissivitet (T=Q/dh) [m ² /s]
1	0,37	0,003	1,9·10 ⁻¹⁰
2	7,7	0,010	5,6·10 ⁻¹⁰
3	0,143	0,002	1,1·10 ⁻¹⁰

Från samtliga tre skärmar är inflödet i kontrollhålen efter injekteringen mycket liten, 2–7 ml/min. Transmissiviteten för bergmassan mellan borrhålen är 1–5·10⁻¹⁰ m²/s. Detta värde kan räknas om till en motsvarande konduktivitet om ca 1·10⁻¹¹ m/s.

Inflöde till sektion 10–34 m, skärm 2 och 3

Mätvall 1 i sektion 10 m färdigställdes i mars 2008 när skärm 2 och bergguttag 2 var gjorda och stuffläget var vid 21 m. Härvid förväntades att en första utvärdering av inflödet till en del av sektionen skulle kunna göras och mätningar gjordes också. Senare erfarenheter pekade dock på att flödesmätningar där materialet i sulan består av sprängsten ger ett trögt stabiliseringsförlopp varför mätningarna fram till dess att sulmaterialet bytts ut torde kunna ge för höga värden. Noteras ändå att inflödet till sektionen 10–21 m vid den första mätningen var 2,4 l/min (som möjligtvis ej stabiliserat värde) varav 1,5 l/min kunde observeras ur två sprickor i vägg, och att flödet efter injekteringen av skärm 3 men före bergguttag 3 mättes till ca 0,5 l/min, (som möjligtvis ej stabiliserat värde, men mätt vid två tillfällen).

Efter bergguttag 3 var resulterande stuffläge 33 m och flöden som varierade från 0,4 till 0,9 l/min (som möjligtvis ej stabiliserade värden) mättes. Före injektering av skärm 4 grävdes ett dike för att påskynda stabiliseringen och flödet 0,9 l/min mättes återigen, vilket indikerar relevans för de tidigare värdena. Efter injekteringen av skärm 4 mättes inflödet till 0,9–1,0 l/min.

I samband med salva 2 i bergguttag 4 (sektion 37 m) noterades inläckage i flera av salvhålen och att tidigare inläckage till tre injekteringshål i skärm 3 (sektion 21 m) minskat med 0,2-0,3 l/min.

Mätvall 3 i sektion 34 m färdigställdes i juli 2008 när bergguttag 4 var gjort och stuffläget var vid 49 m. Mätningar gav stabila mätvärden om 0,5 l/min till sektionen mellan mätvallarna 1 och 2. Vid den fullständiga sulrensning och läckagestudie som genomfördes i augusti identifierades ett läckande borrhål i vänster vägg/sula i läget för skärm 3 med inflöde om ca 0,3 l/min. En kompletterande injektering i två omgångar med silica sol följt av fyllning av borrhålet med cement utfördes. Flödet gick därefter ned till 0,3 l/min (mätt med helt rensad sula) vilket innebar att målvärdet för sektionen, 0,4 l/min, var uppfyllt.

För att få en körbar tunnelbotten men också en rimligt lång stabiliseringstid rullades en fiberduk ut på sulan och makadam lades ovanpå varefter fiberduken drogs tillbaka, för att slutligen täckas av ett tunnare lager makadam. Flödesmätningar verifierade att flödet stabiliserades på ungefär samma tid med denna konstruktion som med en helt rensad sula. I figur 8-7 illustreras stabiliseringsperioderna för inflödesmätningarna under augusti–september, d v s med rensad sula respektive med makadamkonstruktionen.

Det mätta inflödet till sektionen under förinjekteringsperioden, fram till mars 2009, låg därefter på 0,3 l/min. Mätning skedde minst en gång i veckan när ostörda förhållanden rådde, antingen som en direkt mätning mellan mätvallarna 1 och 2 eller som en differensmätning. Diagram återfinns i figur 7-21.

Droppkarakterisering, sektion 10–33 m

Droppkarakterisering av sektionen 10–33 m utfördes under juli 2008. Karteringen visade att det fanns fem ställen varifrån det droppade eller rann i taket. Samtliga ställen hamnade inom gruppen kontinuerligt dropp (6 till 200 droppar per minut). Det totala takdroppet i sektionen var 0,03 l/min, se tabell 7-20.

Tabell 7-20. Resultat av droppkaraktisering mellan sektion 10 m och 33 m, innanför mätvall 1. Se även bilaga 5.

Grupp	Antal dropp [droppar/min]	Flöde [l/min]	Kategori
D1	–	0.0041	Fukt
D2	–	0.0039	Fukt med sporadiskt dropp
D3	122	0.0219	Kontinuerligt dropp
D4	–	0	Flödande
Total	122	0.0299	

Övrigt: Cementbruket och provtryckningen

De inledande provblandningarna av cementbruket visade stor variation i densitet, marshkonvärde och filterpumpsvärde. En särskild utvärdering av blandningsproceduren gjordes därför. Det visade sig att repeterbarhet uppnåddes med manuell invägning av superplastiseraren men ej med den automatiska invägningen. Man beslöt därför att blanda medlet manuellt. För projektet fungerade detta manuella arbete men för framtiden måste utrustningen vidareutvecklas.

Cementbruket uppvisade goda egenskaper med lämplighet för injektering där grundvattentrycket är högt. En flytgräns, τ_0 , på mer än 10 Pa uppnåddes, samtidigt som flytegenskaper och blandbarhet bibehölls. Enbart två injekteringsbruk användes, ett basinjekteringsbruk samt ett styvare bruk som användes när bruksåtgången var stor. Dessa typer bedömdes tillfyllest under de förhållanden som förevar.

”Knak” i stufen inför injekteringen av skärm 3 föranledde en ökad uppmärksamhet på att trycken som används är avsevärda. Provtryckning med vatten där trycket successivt ökas till designtryck innan injekteringen utförs bedömdes vara en praktisk metod att säkerställa att inte för höga tryck användes. Instruktionen för de fortsatta arbetena var att vara fortsatt uppmärksam och att testa med vatten när bergknak hördes eller när andra tecken på instabilitet observerades, t ex manschetter som glider. Som yttersta åtgärd om inte designtrycket kunde nås under stabila förhållanden skulle trycket minskas och geltiden ökas.

7.4 Arbetsetapp 3, skärmar innanför kontur

7.4.1 Etappmål och förutsättningar

Det specifika målet för denna etapp var att visa att täthet kan erhållas med injekteringsskärmar innanför konturen. Eftersom ingen tidigare erfarenhet fanns från att göra skärmar innanför kontur, var ett särskilt fokus att samla erfarenheter om utrustning, utförande och handhavande. Efter att skärm 4 var utförd kom också ett beslut att tunneln skulle upplåtas till en specialundersökning av sprängskadezonen (EDZ). Beslutet föregicks av diskussioner i projektets styrgrupp om möjlig påverkan på injekteringsresultatet och möjligheten att tolka detta.

Injekteringshålen skulle placeras så att hela borrhålet hamnade innanför den teoretiska tunnelkonturen. Eftersom injekteringen syftar till att täta bergmassan utanför konturen skulle ett naturligt val vara att placera injekteringshålen så nära teoretisk kontur som praktiskt möjligt med observans på att borrhålsavvikelse inte får leda till att borrhålet hamnar utanför teoretisk kontur. Samtidigt var ett mål med bergguttagen att erhålla en så jämn tunnelkontur så nära den teoretiska tunnelkonturen som möjligt. Placeringen av injekteringsborrhålen utgjorde således ett kritiskt val där geometrin av injekteringsskärmen stod mot möjlig påverkan på utfallet av sprängningen. Efter diskussioner mellan delprojekt injektering och delprojekt bergguttag valdes att sätta an injekteringshålen 0,6 m från tunnelkontur.

Etapp 3 planerades att gå från sektion 33 till 69 m (från start av skärm 4 till slutläge för borrhålen i skärm 5), med skärmlängd 20 m och överlapp 4 m i enlighet med basdesignen. Efter att skärm 4 och 5 utvärderats beslöt emellertid att inkludera ytterligare en skärm (skärm 6) i denna etapp, lik skärm 5 för att få två likadana skärmar.

De uppmätta sektionflödena från förundersökningen i läget för etapp 3 presenterades i figur 4-6. För skärm 4 var inte något stort inflöde förväntat och inte heller korsning med någon större struktur. Dubbelmanschettmätningarna indikerade dock en sektion runt 40 m med en utvärderad hydraulisk sprickvidd mellan 50 och 75 μm . För skärm 5 förväntades ett större inflöde (sprickvidd 90–190 μm) vid sektion ca 55 m som kunde tolkas som struktur 7. Inflödespuckeln vid 55 m syntes tydligt i både dubbelmanschettmätningen och PFL-mätningen. För etappen bedömdes att både silica sol och cement sannolikt skulle komma att användas.

Rakhetsmätningar skulle genomföras i skärm 5.

7.4.2 Skärm 4

Design och genomförande, skärm 4

Skärm 4 var den första skärmen innanför kontur och denna utgick från sektion 33 m med ett överlapp från föregående skärm om 8 m.

Ansättningen av injekteringshål hade med hänsyn till de sprängningsrelaterade projektmålen jämkats till 0,6 m från tunnelkontur. Hålspetsavståndet i föregående skärm var 1,5 m och den bästa anpassningen för att få samma avstånd i denna skärm var 9 stycken borrhål med hålspetsavståndet 1,4 m. Borrhålen skulle borras helt parallellt med tunneln.

Antalet stuffhål valdes till 3 stycken; samma som för skärm 3. Med samma motiv som för skärm 3– att stuffhålens syfte var grovtätning för att få ner gradienten– bestämdes att cement skulle användas. På samma sätt som för skärm 2 planerades observationshål för tryckupbyggnadstester med syftena att påvisa injekteringseffekten samt att studera flödesdimensionen eftersom indikationer fanns på strukturer med hydrauliskt samband. På grund av mycket låga flöden i stuffhålen beslöts senare att testerna skulle utgå.

Den valda designen för skärm 4 summeras i tabell 7-21. En plan över skärmens läge i tunneln och en sektion med resulterande injekteringshål visas i figur 7-14.

Tabell 7-21. Design för skärm 4.

Parameter	Skärm 4	kommentarer
Injekteringsmedel	Cementbaserat bruk, typ 1: 3 stuffhål Silica sol: alla övriga hål	Kriteriet för val av cementbruk ej följt. Endast grovtätning (sänkning av konduktiviteten med faktor 50) eftersträvades.
Silica sol Geltid /övertryck	39 min /3,0 MPa	
Cementbaserat bruk typ 1, tid/övertryck	45 min/ 7,0 MPa	
Stuffhål	3 stuffhål	Att använda ett av stuffhålen som observationshål utgick ty flödet var för litet
Borrhålsavstånd vid spets	1,4 m	Ger 9 hål i omgång A
Borrhålslängd, omgång A	20 m	
Stick	0 m	Ansättning 0,6 m innanför kontur, hål parallella med tunnelriktningen

Stuffhål

De hydrauliska testerna stuffhålen visade att det största inflödet var 0,8 l/min och att grundvatten-trycket som mest var 2,9 MPa. Trots det låga inflödet behölls valet att injektera stuffhålen med bruk typ 1 och 36 l injekterades som effektiv injekteringsvolym med övertryck 7,0 MPa och effektiv injekteringstid på 45 minuter.

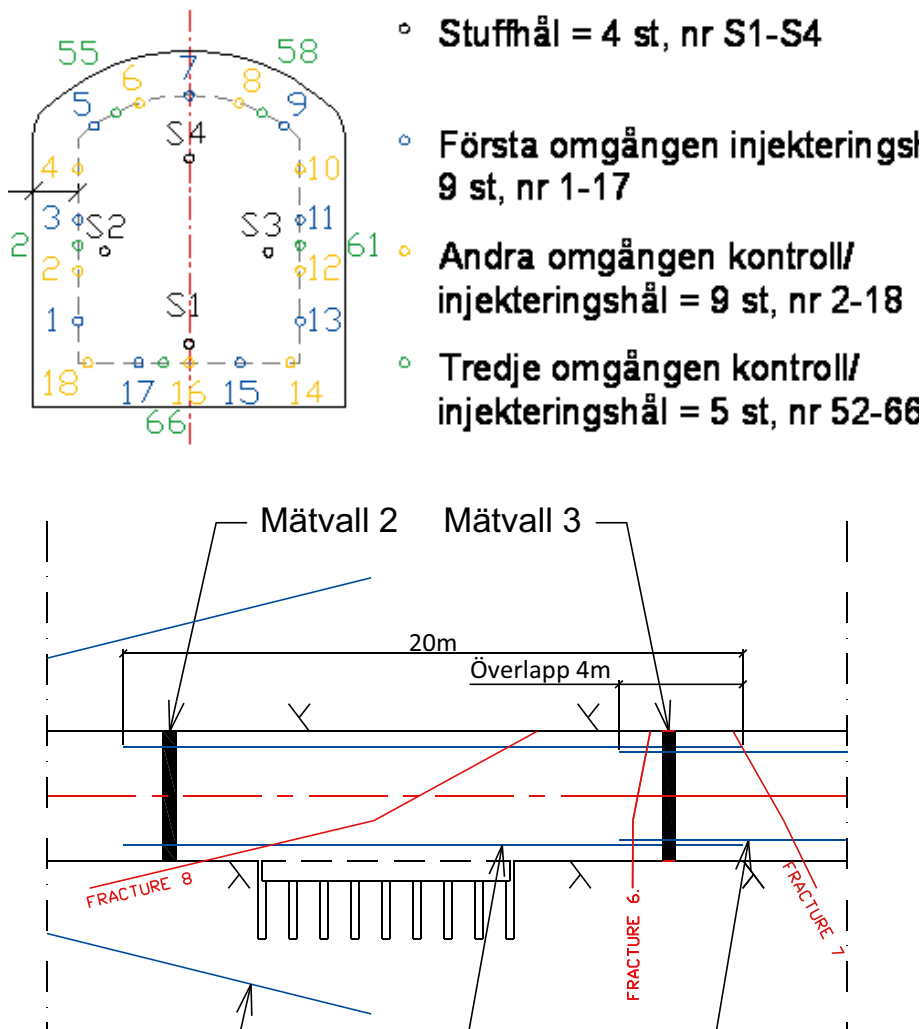
Omgång 4A

De hydrauliska testerna i omgång 4A visade att det största inflödet var 0,6 l/min medan flertalet borrhål hade ett inflöde på mindre än 0,1 l/min. Samtliga borrhål injekterades med silica sol; giltid 39 min, övertryck 3,0 MPa och effektiv injekteringstid 31 min. Under injekteringen av omgång 4A användes 46 l som effektivt injekterad volym.

Omgång 4B

I omgång 4B borrades nio borrhål till en längd av 19 m. Antalet hål i omgång 4B var således det maximala, trots att hålen i omgång 4A varit relativt täta. Motivet var att få underlag till en statistisk analys. Sju av de nio kontrollborrhålen bedömdes vara täta. De två mindre täta borrhålen hade inflöden på 0,4 respektive 0,3 l/min och var placerade i höger vägg, respektive i vänstra delen av sulan, borrhål 12 och 18, figur 7-14.

Injektering av samtliga nio borrhål i omgång 4B utfördes med silica sol på samma sätt som i omgång 4A; övertryck 3,0 MPa, effektiv injekteringstid 31 min. Effektiv injekteringsvolym var 52 l med en relativt jämn fördelning av bruksätgång mellan alla nio borrhålen.



Figur 7-14. Skärmgeometri för skärm 4.

Omgång 4C

I omgång 4C borrades fem kontrollhål, jämnt fördelade runt skärmen. Det största inflödet var 0,1 l/min. Tre borrhål var täta. Borrhålen injekterades med silica sol på samma sätt som i omgång 4A och 4B. En effektiv volym på 21 l injekterades.

I tabell 7-22 visas inflöden och tryck före injektering. I tabell 7-23 visas sammanfattande data från injekteringen i respektive omgång. Alla data återfinns i tabeller i bilaga 3.13.

Tabell 7-22. Inflöde och tryck, skärm 4.

	Antal borrhål	Medelvärde inflöde [l/min]	Medianvärde inflöde [l/min]	Största inflöde [l/min]	Största mätta grundvattentryck [MPa]
Stuffinj.hål	3	0,5	0,5	0,8	2,9
Skärm 4A	9	0,1	0,1	0,6	2,8
Skärm 4B	9	0,1	0,0	0,4	Ej mätt
Skärm 4C	5	0,0	0,0	0,1	Ej mätt

Tabell 7-23. Injektering, skärm 4.

	Antal injekterade med silica sol	Antal injekterade med cement	Cementrecept/ Geltider	Effektivt injekterad volym [liter]	Kommentar
Stuffinj.hål	0	3	Typ 1	36	—
Skärm 4A	9	0	39 min	46	—
Skärm 4B	9	0	39 min	52	—
Skärm 4C	5	0	39 min	20	—

EDZ blockuttag

Efter berguttag 4 sågades åtta stycken 1,5 m höga och 0,7 m djupa block ut i höger tunnelvägg i sektion 36–44 m för att studera sprängskadezonen, EDZ (Excavated Damaged Zone). För att kunna såga ut blocken borrades först 18 kärnborrhål rakt ut i väggen. Hålen var 2,5 m långa och hade diametern 250 mm /Olsson et al. 2009/.

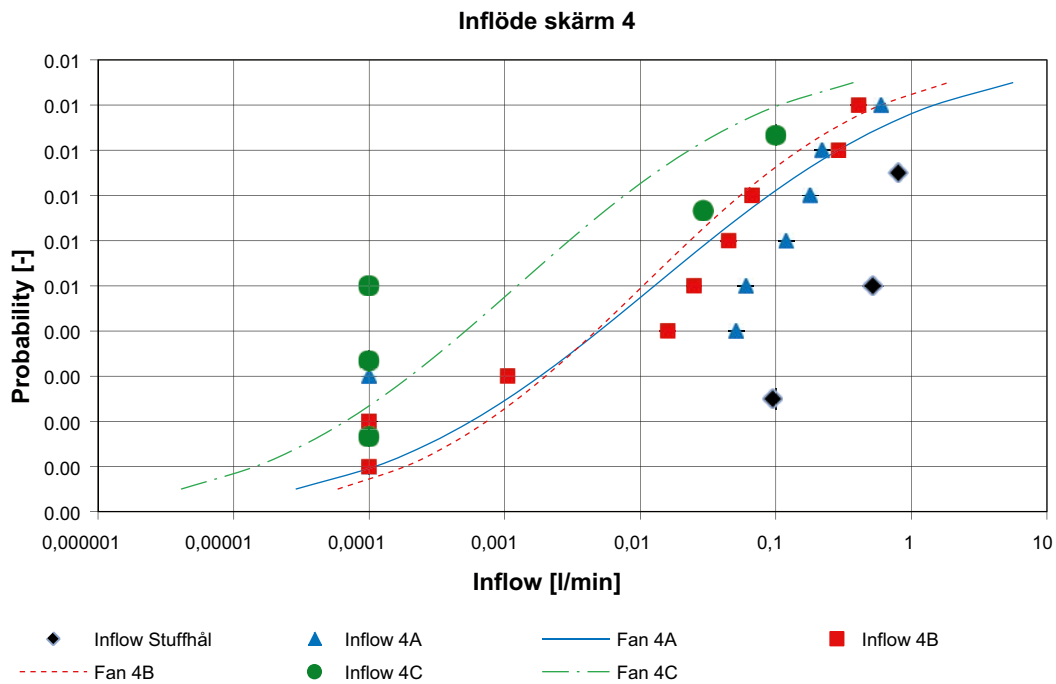
Resultat skärm 4

På samma sätt som tidigare redovisas de mätta inflödena i respektive omgång som kumulativa fördelningar, figur 7-15. Transmissiviteten i varje omgång uttryckt som medianvärde, baserat på medianinflödet ($p = 0,5$) från den anpassade kurvan i diagrammet redovisas i tabell 7-24. Medianinflödet sjönk inte speciellt mycket mellan omgång A och B. Med omgång A och B tillsammans sjönk inflödet med en faktor 10.

Tabell 7-24. Beräknad mediantransmissivitet för skärm 4, utifrån log-normalkurvorna. Grundvattentryck = 2,9 MPa.

Omgång	Median inflöde [l/min]	Beräknad mediantransmissivitet ($T=Q/dh$) [m^2/s]
Stuffhål	0,52	$2,9 \cdot 10^{-08}$ **
A	0,013	$7,3 \cdot 10^{-10}$
B	0,010	$6,0 \cdot 10^{-10}$
C	0,001	$7,1 \cdot 10^{-11}$

** Median av tre mätta värden, ej kurvanpassad.



Figur 7-15. Inflöden och anpassade log-normalkurvor för varje borrhålsomgång.

Vunna erfarenheter, skärm 4

Designen utgick från tidigare använt spetsavstånd 1,5 m och tillhörande inträngningslängd 1,13 m. Med jämnt fördelade injekteringshål 0,6 m innanför kontur blev antalet hål nio. Detta gav en teoretisk utbredning av den tätade zonen på 0,5 m räknat från kontur och ut i det omgivande berget.

Vidare borrades borrhålen helt parallellt med tunneln vilket gjorde att sannolikheten att träffa nära horisontella plan var liten. Förändringen i genomsläppligheten mellan borrhålsomgång A och B var inte stor.

Efter berguttaget (berguttag 4) konstruerades en mätvall (mätvall 2) i sektion 34 m och denna visade att inläckaget i sektion 34–49 m var för stort.

När den använda designen tänktes över ledde detta till den omedelbara slutsatsen att en teoretisk tätad zon om 0,5 m inte var tillräckligt och att utbredning av den tätade zonen i den kvarstående bergmassan måste vara ett designkriterium vid skärmar innanför kontur. Vidare begrundades det faktum att alla injekteringshål var parallella och horisontella och att därför inte horisontella sprickplan skulle korsas av hålen.

7.4.3 Skärm 5

Design och genomförande, skärm 5

Till skärm 5 gjordes en del förändringar baserat på de erfarenheter som vunnits i skärm 4.

- Ansättningen av borrhålen flyttades till 0,3 m innanför tunnelkontur.
- Den dimensionerande inträngningslängden ökades till 2,5 m i den dimensionerande sprickvidden på 10 μm . Detta möjliggjordes genom att
 - geltiden ökades till 89 minuter; pumptiden blev då 71 minuter.
 - injekteringsövertrycket ökades till 6,5 MPa; med ett grundvattentryck på 3,5 MPa blev då totaltrycket 10 MPa.
- Borrhålen orienterades så att det ena borrhållets ansättning motsvarade det andra borrhållets slutpunkt projicerat till tunnelstuff, kallat vriden skärm, se figur 7-16.

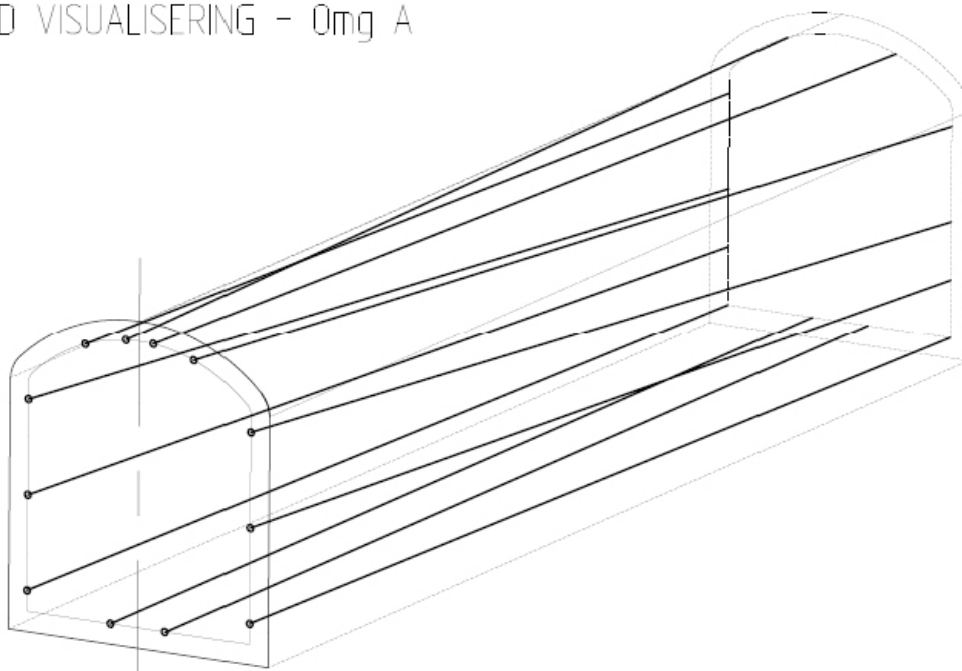
Med den nya designen skulle utbredningen av den tätade zonen i kvarstående berg bli 2,2 m samtidigt som de vridna borrhålen ansågs öka möjligheten för borrhålen att penetrera även de flackt lutande sprickplanen. Vald geltid var alltså avsevärd, och eftersom ingen erfarenhet fanns från så lång geltid, gjordes laboratorietester för att kontrollera att gelningen var styrbar med de relativt låga saltkoncentrationer som blev aktuella. Med det nya avståndet till tunnelkontur blev i omgång A antalet borrhål 12, dessa placerades ut så att det ena borrhålets startpunkt skulle vara det bredvidliggande hålets slutpunkt, projicerat på tvärsektion.

Den valda designen för skärm 5 summeras i tabell 7-25. En plan över skärmens läge i tunneln och en sektion med resulterande injekteringshål visas i figur 7-17.

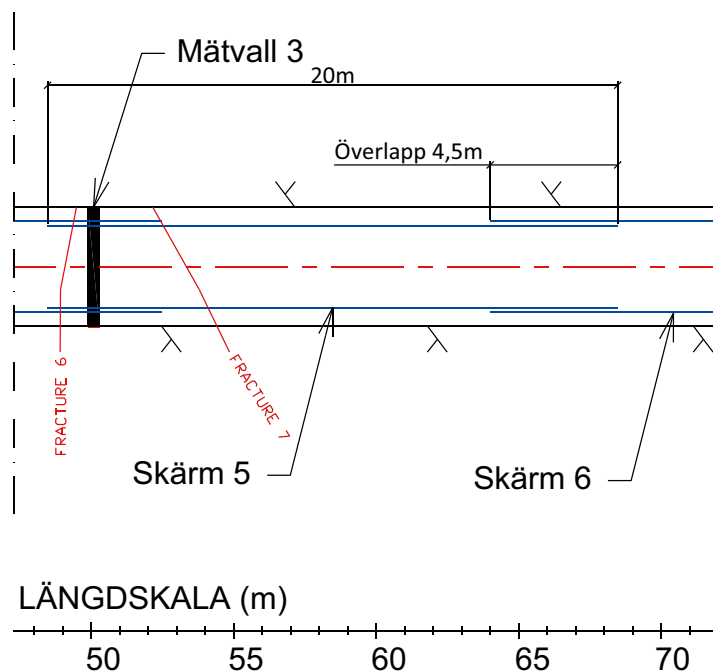
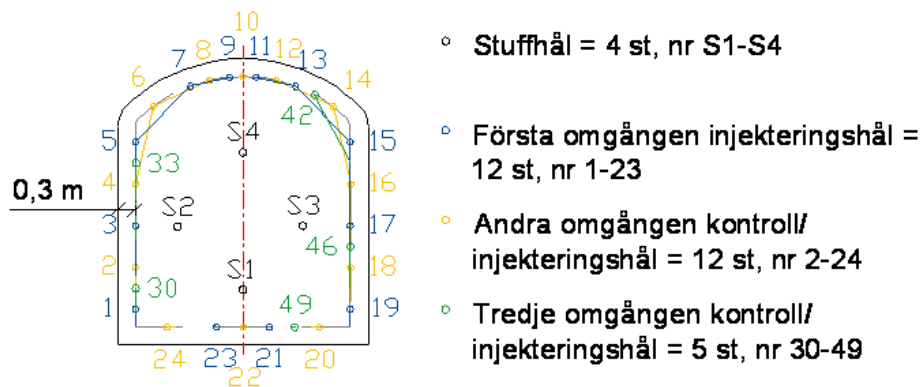
Tabell 7-25. Design för skärm 5.

Parameter	Skärm 5	Kommentarer
Injekteringsmedel	Silica sol: Samtliga hål inklusive stuffhål	Kriteriet för val av injekteringsmedel baserat på sprickvidd återinfördes, för att även stuffhålen skulle bidra till tätheten.
Silica sol Geltid /övertryck	Stuffhål: 39 min / 4,0 MPa Omgång A, B, C: 89 min / 6,5 MPa 25 min/6,5 MPa	Stuffhålen som tidigare design. Skärmomgångarnas dimensionerande inträngningslängd ökades till 2,5 m vilket krävde längre effektiv injekteringstider och högre tryck. Den kortare geltiden användes för de täta borrhålen i skärm omgång C
Stuffhål	4	
Borrhålsavstånd vid spets	1 medel 1,0 m	Minst 0,75 m, mest 1,2 m. Gav 12 hål i omgång A.
Borrhålslängd, omgång A	20 m	
Stick	0 m	Ansättning 0,3 m innanför tunnelkontur Borrhålen vridna för att träffa horisontella sprickplan.

3D VISUALISERING - Omg A



Figur 7-16. Skärm 5 och 6 utfördes som "vriden skärm".



Figur 7-17. Skärmgeometri för skärm 5.

Stuffhål

Stuffhålen i skärm 5 bestod av fyra stuffinjekteringshål. Längden på stuffhålen var 20 m. De hydrauliska testerna visade att det största inflödet var 2,7 l/min och grundvattentrycket 3,5 MPa som mest. Samtliga stuffhål injekterades med silica sol; totaltryck på 7,5 MPa, geltid på 39 min och en effektiv injekterings-tid på 31 min. Totalt injekterades 485 l som effektiv injekteringsvolym, varav två av borrhålen stod för den största bruksåtgången.

Omgång 5A

Hydrauliska tester i omgång 5A visade att det största inflödet var 2,6 l/min medan flertalet borrhål hade ett inflöde på mindre än 0,1 l/min. Samtliga borrhål injekterades med silica sol; övertryck 6,5 MPa, geltid 89 min och effektiv injekteringstid 71 min.

Under injekteringen av omgång 5A användes 126 l som effektivt injekterad volym. Geltiden avvek som mest med 10 minuter från avsedda 89 minuter (geltid 99 min) och blandningsproportionerna justerades inför kommande hål, varvid avvikelserna för samtliga blandade 89-minuterssatser gick ner till som mest 4 minuter.

Omgång 5B

I omgång 5B borrades tolv borrhål till en längd av 19 m. Kontrollhål placerades mellan varje hål i omgång A då de flesta inte nått teoretisk borrhålsvolym och de uppvisat hydrauliska samband. Elva av de tolv kontrollhålen bedömdes vara täta. Det största inflödet var i borrhål 10 (0,1 l/min), se figur 7-17.

Samtliga tolv borrhål injekterades på samma sätt som borrhålen i omgång 5A. Effektiv injekteringsvolym var 322 l. Två hydrauliska samband med andra borrhål noterades. Borrhål nr 6 hade störst bruksåtgång.

Omgång 5C

I omgång 5C borrades fem kontrollhål, jämnt fördelade runt skärmen. Samtliga borrhål bedömdes som täta. Det största inflödet var 0,01 l/min. Borrhålen injekterades med silica sol; övertryck 6,5 MPa, geltid på 25 min och en effektiv injekteringstid på 20 min. En effektiv volym på 14 l injekterades.

I tabell 7-26 visas inflöden och tryck före injektering. I tabell 7-27 visas sammanfattande data från injekteringen i respektive omgång. Alla data återfinns i tabeller i bilaga 3.5.

Tabell 7-26. Inflöde och tryck, skärm 5.

	Antal borrhål	Medelvärde inflöde [l/min]	Medianvärde inflöde [l/min]	Största inflöde [l/min]	Största mätta grundvattentryck [MPa]
Stuffhål	4	0,8	0,3	2,7	3,5
Skärm 5A	12	0,4	0,1	2,6	3,4
Skärm 5B	12	0,0	0,0	0,1	0,2
Skärm 5C	5	0,0	0,0	0,01	—

Tabell 7-27. Injektering, skärm 5.

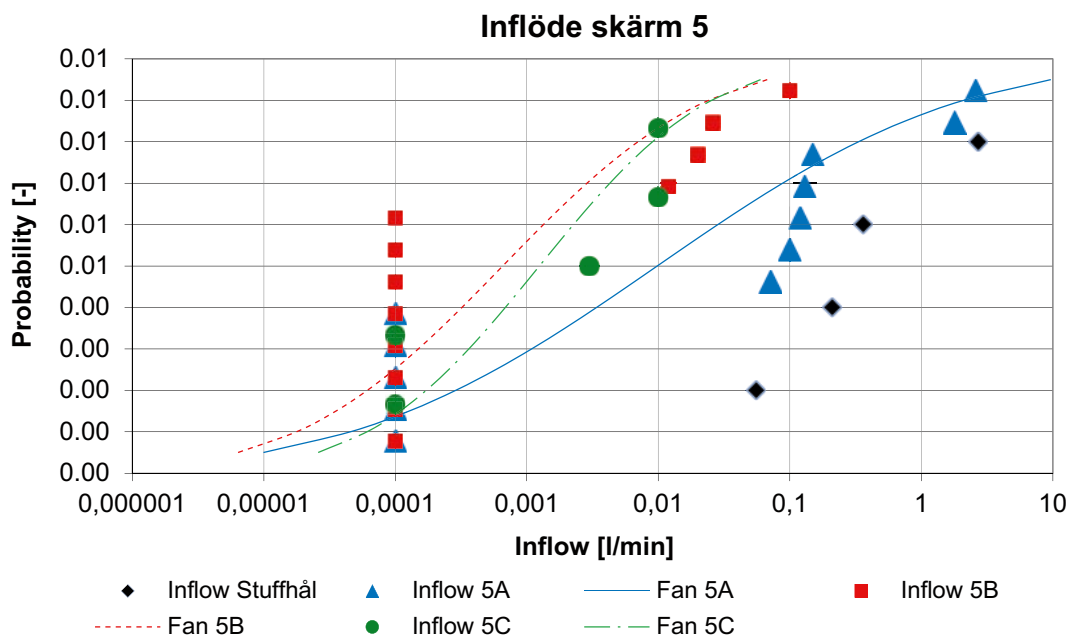
	Antal injekterade med silica sol	Antal injekterade med cement	Cementrecept/ Geltider	Effektivt injekterad volym, [liter]	Kommentar
Stuffhål	4	0	39 min	485	Borrhål 1 och 3 stod för den absolut mesta volymen (461 liter)
Skärm 5A	12	0	89 min	126	—
Skärm 5B	12	0	89 min	322	—
Skärm 5C	5	0	25 min	14	Samband med två borrhål

Rakhetsmätning

I stort sett samtliga borrhål rakhetsmättes. Resultaten från samtliga rakhetsmätningar finns samlade i avsnitt 7.7. Det var svårt att utifrån erhållen data dra några säkra slutsatser gällande hur väl borrhållningen är utförd. Därför beslöts att utöka programmet för kontroll av borrhållningen i skärm 6.

Resultat skärm 5

På samma sätt som tidigare redovisas de mätta inflödena i respektive omgång som kumulativa fördelningar, figur 7-18. Transmissiviteten i varje omgång uttryckt som medianvärde, baserat på medianinflödet ($p = 0,5$) från den anpassade kurvan i diagrammet redovisas i tabell 7-28.



Figur 7-18. Inflöden och anpassade log-normalkurvor för varje borrhålsomgång.

Tabell 7-28. Beräknad mediantransmissivitet för skärm 5, utifrån log-normalkurvorna. Grundvattentryck = 3,5 MPa.

Omgång	Median inflöde [l/min]	Beräknad median transmissivitet (T=Q/dh) [m ² /s]
Stuffhål	0,285	1,5·10 ⁻⁰⁸ **
A	0,010	4,7·10 ⁻¹⁰
B	0,001	3,1·10 ⁻¹¹
C	0,001	5,9·10 ⁻¹¹

** Median av fyra mätta värden, ej kurvanpassad

Vunna erfarenheter, skärm 5

Förändringen i genomsläpplighet mellan borrhålsomgång A och B var mycket bättre för skärm 5 jämfört med skärm 4. De förändringar som gjordes i designen hade effekt. Det beslöts att vridningen av skärmen skulle behållas i skärm 6, trots att effekten av vridningen inte analyserats särskilt.

Rakhetsmätningen redovisas i avsnitt 7.7.1. Resultaten var emellertid sådana att det var svårt att påvisa hur borrhningen faktiskt var utförd. Ytterligare kontroll av borrhningen beslöts därför för skärm 6.

7.4.4 Skärm 6

Design och genomförande, skärm 6

Skärm 6 var den avslutande skärmen med borrhål innanför kontur i denna etapp. Skärmen skulle utföras identiskt som skärm 5. I skärmläget fanns det största tolkade inflödet från dubbelmanschettmätningarna, 47 l/min vid sektion 74 m, se figur 4-6.

Den valda designen för skärm 6 summeras i tabell 7-29. En plan över skärmens läge i tunneln och en sektion med resulterande injekteringshål visas i figur 7-19.

Tabell 7-29. Design för skärm 6.

Parameter	Skärm 6	Kommentarer
Injekteringsmedel	Silica sol: Samtliga hål inklusive stuffhål	
Silica sol	Stuffhål:	
Geltid /övertryck	39 min / 4,0 MPa Omgång A, B, C: 89 min / 6,5 MPa 25 min/6,5 MPa	Samtliga parametrar valda lika som för skärm 5
Borrhålsavstånd vid spets	1 medel 1,0 m	
Borrhålslängd, omgång A	20 m	
Stick	0 m	
Injekteringsmedel	Silica sol: Samtliga hål inklusive stuffhål	

Stuffhål

De hydrauliska testerna i stuffhålen i skärm 6 visade på ett största inflöde på 0,7 l/min och grundvattentrycket var som mest 3,6MPa. Som i föregående skärm injekterades dessa med silica sol; totaltryck på 7,6 MPa, geltid på 39 min och en effektiv injekteringstid på 31 min. Totalt injekterades i stuffhålen 29 l som effektiv injekteringsvolym. När borrhål 1 injekterades observerades samband med borrhål 2 och 3.

Omgång 6A

I omgång 6A borrades 12 hål. Vid borrningen av hål nr 5 fastnade styrstången och borrningen kunde inte fortsätta. Beslut togs att inte borra ett nytt borrhål utan att placera ett kontrollhål vid detta borrhål. De hydrauliska testerna visade att det största inflödet här också var 0,7 l/min och 4 stycken borrhål hade inflöden runt 0,1–0,3 l/min. Resten hade inflöden på mindre än 0,05 l/min. Samtliga borrhål injekterades med silica sol; övertryck 6,5 MPa, geltid på 89 min och en effektiv injekteringstid på 71 min. Borrhål nr 19 borrades ihop med ett borrhål från skärm 5 och en enkel manschett monterades på ett djup av 3 m i borrhålet.

Den effektiva injekterade volymen för omgång 6A var negativ, d v s den registrerade volymen var mindre än den teoretiska borrhålsvolymen. Största effektivt injekterade volym var 4 liter. Flera borrhål hade runt 2 liter mindre än borrhålsvolymen. Ett av hålen tog 15 liter mindre än teoretisk borrhålsvolym. Inga noteringar om samband gjordes under vattenförlustmätning eller injektering.

Omgång 6B

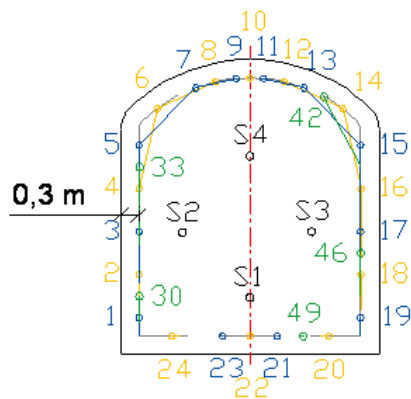
I omgång 6B borrades 12 borrhål på samma sätt som för skärm 5. Samtliga bedömdes täta, se figur 7-20. De injekterades på samma sätt som omgång A och åtgången var liten. För tre av hålen noterades volymer som var mindre än den teoretiska borrhålsvolymen. Dessa vakuumpumpades och återinjekterades upp till tre gånger, men utan att uppnå en positiv effektivt injekterad volym.

Omgång 6C

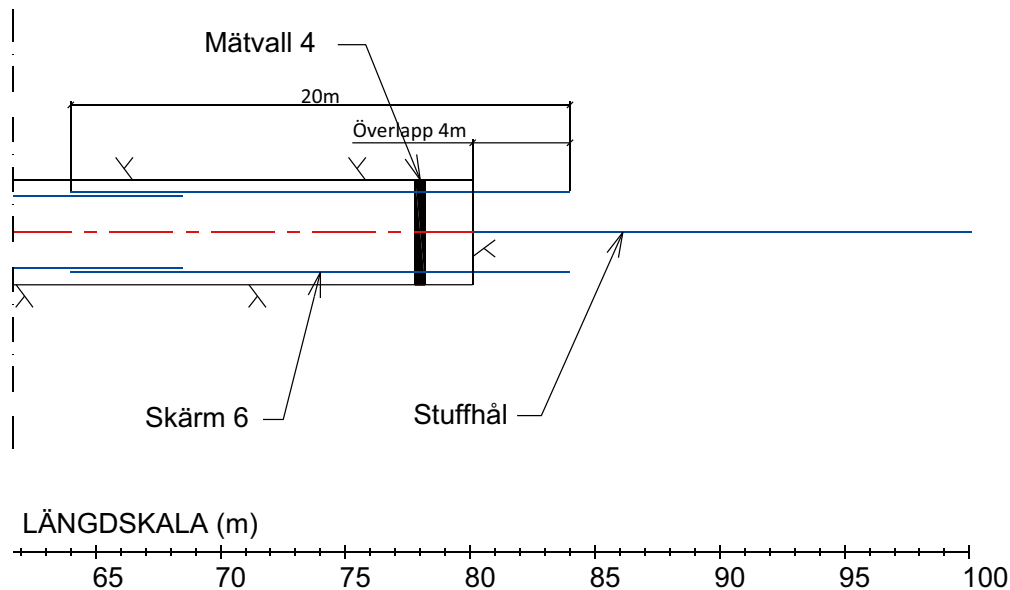
Trots att samtliga kontrollhål var täta i omgång 6B så valdes att borra 5 kontrollhål även i omgång 6C för att efterlikna skärm 5. Trots att borrhålen hade mycket små inflöden uppvisade de samband under vattenförlustmätningen med 3 borrhål i tidigare omgångar. Borrhålen rensades ur och manschetterades. Kontrollhålen i omgång 6C avslutades med injektering på samma sätt som för omgång 5C; övertryck 6,5 MPa, geltid på 25 min och en effektiv injekteringstid på 20 min. Under injekteringen av omgång 6C åtgick det 133 liter som effektiv volym men samband noterades med de tidigare hålen vilket förklarar de stora volymerna.

Geltiden för samtliga blandade 89-minuterssatser avvek som mest med 4 minuter (geltid 93 min).

I tabell 7-30 visas inflöden och tryck före injektering. I tabell 7-31 visas sammanfattande data från injekteringen i respektive omgång. Alla data återfinns i tabeller i bilaga 3.6.



- Stuffhål = 4 st, nr S1-S4
- Första omgången injekteringshål = 12 st, nr 1-23
- Andra omgången kontroll/ injekteringshål = 12 st, nr 2-24
- Tredje omgången kontroll/ injekteringshål = 5 st, nr 30-49



Figur 7-19. Skärmgeometri för skärm 6.

Tabell 7-30. Inflöde och tryck, skärm 6.

	Antal borrhål	Medelvärde inflöde [l/min]	Medianvärde inflöde [l/min]	Största inflöde [l/min]	Största mätta grundvattentryck [MPa]
Stuffinj.hål	4	0,293	0,11	0,7	3,6
Skärm 6A	12	0,124	0,039	0,7	3,6
Skärm 6B	12	0,002	0,000	0,02	2,2
Skärm 6C	5	0,000	0,000	0,001	0,1

Tabell 7-31. Injektering, skärm 6.

	Antal injekterade med silica sol	Antal injekterade med cement	Använda geltider [min]/Cementrecept	Effektivt injekterad volym [liter]	Kommentar
Stuffinj.hål	4	0	39	26	Bh 1 hade samband med bh 2 och 3
Skärm 6A	12	0	89	-21	Liten effektiv injekterad volym
Skärm 6B	12	0	89	-7,6	3 bh tog mindre volym än borrhålsvolym
Skärm 6C	5	0	25	133	Stor effektiv injekterad volym i alla bh utom bh 30, samband med hål i tidigare omgångar

Rakhetsmätning och inmätning av hål i stuff

I stort sett samtliga borrhål rakhetsmättes. Efter varje berguttag mättes även läget i stuff för borrhålen in. Resultaten finns i avsnitt 7.7.1.

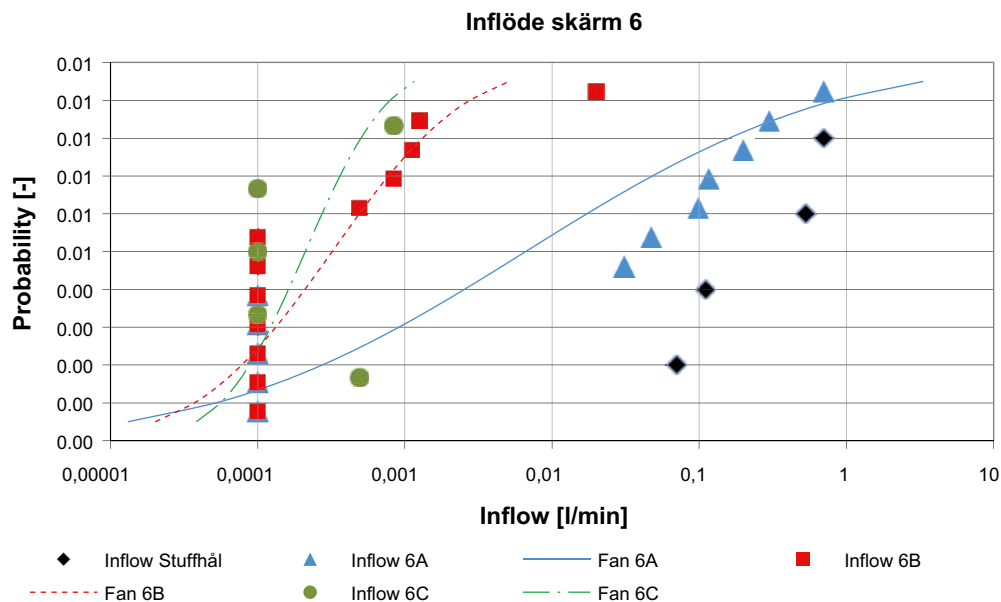
Resultat, skärm 6

På samma sätt som tidigare redovisas de mätta inflödena i respektive omgång som kumulativa fördelningar, figur 7-20. Transmissiviteten i varje omgång uttryckt som medianvärde, baserat på medianinflödet ($p = 0,5$) från den anpassade kurvan i diagrammet redovisas i tabell 7-32.

Vunna erfarenheter, skärm 6

Ett borrhål i skärm 6 borrades ihop med ett borrhål från skärm 5 och en enkel manschett monterades på ett djup av 3 m i borrhålet. När använd skärmgeometri beaktas inses att risken för att detta ska ske torde vara stor särskilt med skärmar innanför kontur, och särskilt med ”vriden” skärm.

Det utökade programmet för kontroll av borring där borrhålen mättes in i stuff efter varje salvuttag redovisas i avsnitt 7.7.1.



Figur 7-20. Inflöden och anpassade log-normalkurvor för varje borrhålsomgång.

Tabell 7-32. Beräknad mediantransmissivitet för skärm 6, utifrån log-normalkurvorna. Grundvattentryck = 3,6 MPa.

Omgång	Median inflöde [l/min]	Beräknad mediantransmissivitet ($T=Q/dh$) [m^2/s]
Stuffhål	0,32	$1,5 \cdot 10^{-08}$ **
A	0,006	$3,0 \cdot 10^{-10}$
B	0,000	$1,5 \cdot 10^{-11}$
C	0,000	$1,0 \cdot 10^{-11}$

** Median av fyra mätta värden, ej kurvanpassad.

7.4.5 Etappresultat och erfarenheter inför etapp 4

Skärmar innanför kontur

Inga tidigare erfarenheter finns från injekteringsskärmar innanför kontur. Designen av skärm 4 utgick från att ansättningen av borrhålen av spräng- och borrhåletekniska skäl skulle vara 60 cm innanför teoretisk kontur samt att samtliga borrhål skulle vara parallella med tunnelriktningen. Vidare var utgångspunkten i basdesignen att den dimensionerande inträngningslängden var 1,13 m. Med 9 borrhål gav detta ett c-avstånd på ca 1,4 m mellan borrhålen. Den teoretiskt tätade zonen för skärm 4 var enbart 0,5 m för den minsta dimensionerande sprickvidden. Efter injektering av omgång A i skärm 4 visades ingen direkt sänkning av inflödet i kontrollhålen. När omgång B injekterats sågs dock en sänkning i kontrollhålen. Att observera är att inflödet var litet redan innan injektering.

För skärm 5 var ansättningen 30 cm från teoretisk kontur och riktningarna (vridningen av skärmen) var mer anpassade mot de mer flacka sprickplan som antydde i tunnelvägg och i stuff än mot tunnelriktningen. Denna design gav en ”spretig” skärm som troligtvis ändå hölls innanför kontur, se vidare inmätningen av borrhålen i avsnitt 7.7.1.

Antalet hål i omgång B ökades från nio i skärm 4, till 12 i skärm 5, vilket ger en 25% ökning av antal borrhål. Vidare förlängdes geltiden från 39 minuter till 89 minuter samtidigt som totaltrycket ökades från ca 6 till 10 MPa. Förändringarna av dessa parametrar medförde en teoretiskt ökad inträngningslängd i förhållande till skärm 4, från 1,13 m till 2,5 m i den dimensionerande minsta sprickvidden.

Att notera är att stuffhålen såväl i skärm 5 som skärm 6 hade ett medianinflöde på 0,3 l/min ($T=1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$) innan injektering. Förändringen i genomsläpplighet mellan borrhålsomgång A och B är också likvärdig. Skärm 5 och 6 kan därför bedömas som lika, såväl vad gäller förutsättningar, utförande som resultat.

Erfarenheterna från skärm 4 tolkas som att det för skärmar innanför kontur är avgörande att sätta ett designkriterium för utbredningen av den tätade zonen.

Sammanfattningsvis kan om borrhningen sägas att erfarenheterna från etapp 3 visar att denna måste utföras bättre.

Inflöde till sektion 34–50 m, skärm 4

Eftersom injekteringen av skärm 4 bedömdes som mindre bra och nästkommande skärm 5 gjordes annorlunda, beslöts att bygga en mätvall i sektion 50 m för att kunna isolera inflödet längs skärm 4.

Mätvall 2 i sektion 34 m färdigställdes i juli 2008 och därmed kunde mätningar göras av inflödet mellan denna och tunnelfront vid 49 m. Stabila flöden om 1,0 l/min uppmättes. Därefter genomfördes EDZ-uttaget med de 2,5 m långa kärnborrhålen längs den 8 m långa sträckan i tunnelvägg. Efter uttaget konstaterades att inflödet låg kvar på samma nivå som tidigare, 1,0–1,1 l/min. Inte heller injekteringen av skärm 5 påverkade inflödet. Mätvall 3 i sektion 50 m färdigställdes i november 2008 när stuffen låg vid sektion 65 m, och därmed avgränsades den aktuella sektionen av mätvall 2 och 3. Det mätta inflödet till sektionen under resten av förinjekteringsperioden, från uppförandet av mätvallen fram till mars 2009, låg på 0,7–0,8 l/min. Mätning skedde minst en gång i veckan när ostörda förhållanden rådde, antingen som en direkt mätning mellan mätvallarna 2 och 3 eller som en differensmätning. Diagram återfinns i figur 7-22.

Resultat av droppkaraktisering, sektion 34–50 m

Droppkaraktisering av sektionen 34–50 m utfördes under oktober 2008. Karteringen visade att det fanns 11 ställen varifrån det droppade eller rann i taket. Det totala takdroppet i sektionen var 0,006 l/min, se tabell 7-33. Takdroppet utgör en mycket liten del av det totala inflödet för sektionen.

Tabell 7-33. Resultat av droppkaraktisering mellan sektion 34 m och 50 m, mellan mätvall 2 och 3.

Grupp	Antal dropp [droppar/min]	Flöde [l/min]	Kategori
D1	–	0.00015	Fukt
D2	–	0.0043	Fukt med sporadiskt dropp
D3	11	0.0012	Kontinuerligt dropp
D4	–	0	Flödande
Total	11	0.0057	
Normerat	0,7 dropp/m tunneltak	0.0004 L/min/m tunneltak	

Resultat av droppkaraktisering, sektion 50–77 m

Droppkaraktisering av sektionen 50–77 m utfördes under februari 2009. Efter droppkaraktiseringen av tidigare sektion valdes att införa en grupp D0 för helt torra ytor, för att även få dessa tydligt representerade i utvärderingen. Karteringen visade att det fanns 8 ställen med fukt eller dropp i taket. Det totala takdroppet i sektionen var 0,003 l/min, se tabell 7-34.

Tabell 7-34. Resultat av droppkaraktisering mellan sektion 50 m och 77 m, mellan mätvall 3 och 4.

Grupp	Antal dropp [droppar/min]	Flöde [l/min]	Kategori
D0	–	0	Torrt
D1	2	0.00004	Fukt
D2	6	0.0028	Fukt med sporadiskt dropp
D3	0	0	Kontinuerligt dropp
D4	–	0	Flödande
Total	11	0.0028	
Normerat	0,4 dropp/m tunneltak	0.0001 L/min/m tunneltak	

Inflöde till sektion 50 m–81m, skärm 5 och 6

Mätvall 3 i sektion 50 m färdigställdes enligt ovan i november 2008 när stuffen låg vid sektion 65 m. Inflödet längs skärm 5 mättes till ca 0,3 l/min. När skärm 6 var borrarad tilläts den stå öppen och med tillskottsinflödet från borrhålen mättes 0,7 l/min. Injekteringen av skärm 6 återställde inflödet till 0,3 l/min. Direkt efter berguttag 6 (december 2008) med resulterande stuffläge 81 m, mättes inflödet till 0,4 l/min. I mars 2009 mättes flödet till 0,5 l/min. Diagram över mätta inflöden mellan december 2008 och januari 2009 återfinns i figur 7-23.

7.5 Arbetsetapp 4, avslutning av tunneldrivning

7.5.1 Etappmål och förutsättningar

När etappen startade var stuffen i sektion 81 m. Den ursprungliga planen var att följa upp den tidigare iakttagelsen att en oproportionerligt stor andel av inläckaget till tunneln föreföll komma från tunnelfronten (stuffen) och att därför göra ett ortavslut, d v s en särskild tätning av sista stuffläget vid tunnelavslut. Prognosen indikerade dock ett mycket tätt berg i det aktuella läget och kriterier för att genomföra skärm 7 med den särskilda stuffinjekteringen sattes upp. Resultatet av de hydrauliska testerna gav att tunneldrivningen skulle avslutas i aktuellt läge, d v s avslutande stuffinjektivering och skärm 7 kom aldrig till utförande.

7.5.2 Avslutning

Villkor för avslutning

För att bedöma om berget var så pass genomsläppligt att dels en särskild avslutande injektering av tunnelns slutgavel skulle behövas, dels en sådan åtgärd kunna utvärderas, borrades och testades fyra stufvhål. Flödet ur stufvhålen i de tidigare skärmarna för etapp 3 hade varit små, som mest 2,7 l/min i skärm 5. Om flödet ur ett av de fyra hålen var större eller lika med 1,5 l/min skulle hela skärm 7 borraras och injekteras som skärm 6. Därefter skulle en mätvall byggas för att kontrollera inläckaget från själva stuffen som grund för beslut om eventuell särskild stufftätning av tunnelns gavel, ”ortavslutet”, och sedan skulle berguttag 7 göras med en förhoppningsvis tät stuff som resultat. Kunskapen som hittills hade byggts upp med skärmar innanför kontur bedömdes som god och tillräcklig gällande injektering vid små inflöden. Nyttan av att utföra en ytterligare injekteringskärm skulle erhållas om flödet var större än i de tidigare skärmarna. Injektering av hela Skärm 7 skall endast göras om något av de fyra stufvhålen ger ett inflöde på mer eller lika med 1,5 l/min. Inflödena från stufvhålen ger oss således beslutet av att injektera skärm 7 eller att inte göra något mer berguttag och därmed slutar framdriften av tunneln.

Resultat och beslut om avslutning

För att snabbt kunna kvantifiera den del av inläckaget som kom från stuffen, inför beslut om nästa etapp, byggdes en provisorisk mätvall i sektion 78 m. Stuffläckaget bedömdes vara mycket litet. När en permanent mätvall senare uppförts i sektion 76 m verifierades inflödet till mindre än 0,01 l/min för stuff inklusive de innersta 5 m tunnel.

De fyra borrhålen borrades som stufvhålen i skärm 6 och testades hydrauliskt. Tre av hålen hade inget mätbart inflöde och det fjärde ca 0,001 l/min. Även vattenförlusten var liten, som mest 0,1 l/min.

Baserat på inflödena i stufvhålen beslutades att ingen skärm 7 skulle utföras och att tunneldrivningen skulle avslutas sedan stufvhålen injekterats med silica sol. Injekteringen utfördes med en geltid på 39 min och ett övertryck på 3 MPa. Den effektiva injekterade volymen blev mindre än en liter. En mätvall byggdes 2 m från stuff (sektion 78 m) för att möjliggöra särskild mätning av det eventuella inflöde som kommer från stuff.

Inläckaget i mätvall 4 mättes till 0,01 l/min och stuffen bedömdes som tät och således utfördes inte heller det särskilda ”ortavslutet”.

Resultat av droppkaraktärisering, sektion 77–81 m

Droppkaraktärisering av sektionen 50–77 m utfördes samtidigt som tidigare sektion, under februari 2009. Här redovisas även helt torra ytor. Karteringen visade att det även här fanns 8 ställen varifrån det kom fukt eller dropp i taket. Det totala takdroppet till sektionen om 5 m var 0,003 l/min på, se tabell 7-35.

Resultaten visar på små inflöden men att flödet från takdroppen är något större för denna sektion utslaget mer per meter tunnelsträcka.

Tabell 7-35. Resultat av droppkaraktärisering mellan sektion 77 m och 81 m, mellan mätvall 4 och stuff.

Grupp	Antal dropp [droppar/min]	Flöde [l/min]	Kategori
D0	–	0	Torrt
D1	4	0.00029	Fukt
D2	2	0.0013	Fukt med sporadiskt dropp
D3	2	0.0012	Kontinuerligt dropp
D4	–	0	Flödande
Total	8	0.0028	

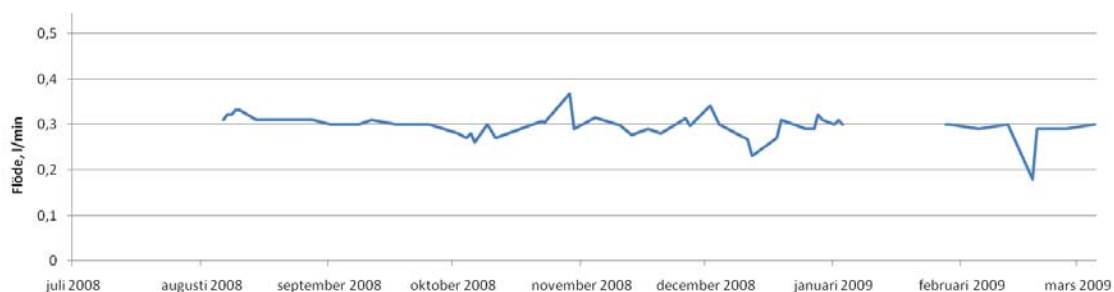
7.6 Resultierende inflöde

Inflödet till tunneln i mars 2009, efter avslutad förinjektering, redovisas i tabell 7-36 tillsammans med de tillåtna inläckagen.

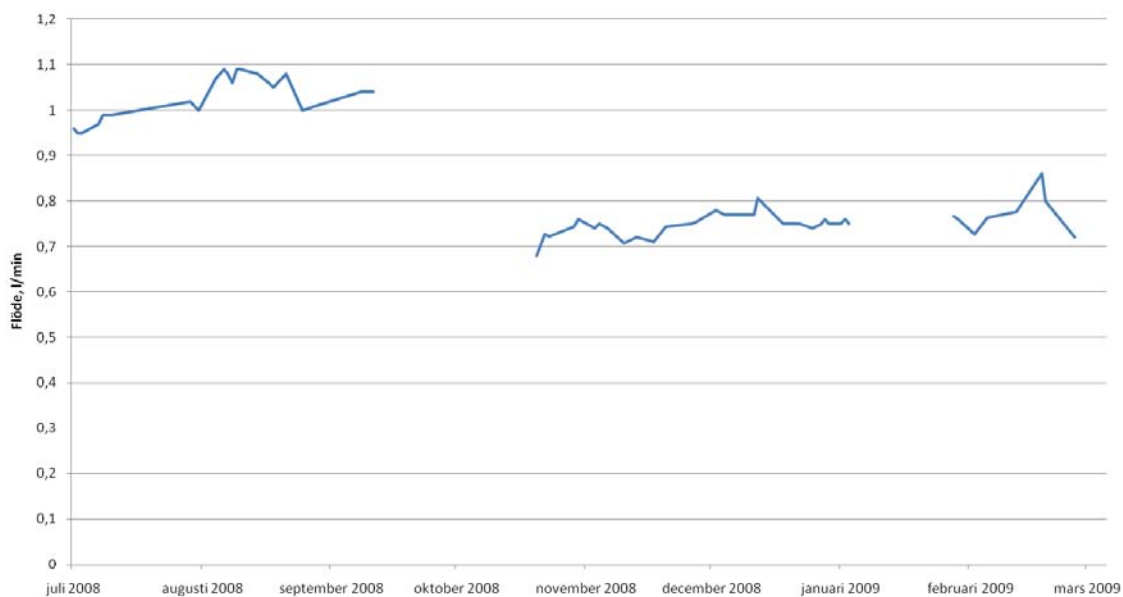
Tabell 7-36. Resultierende inflöde efter avslutad förinjektering mätt i mätvallarna.

Sektion	10–34 m Skärm 2 och 3 utanför kontur	34–50 m Skärm 4 innanför kontur	50–81 m Skärm 5 och 6 innanför kontur	10–81 m hela tunneln
Tillåtet inflöde [l/min]	0,4	0,3	0,5	1,2
Mätt inflöde [l/min]	0,3	0,8	0,4	1,5

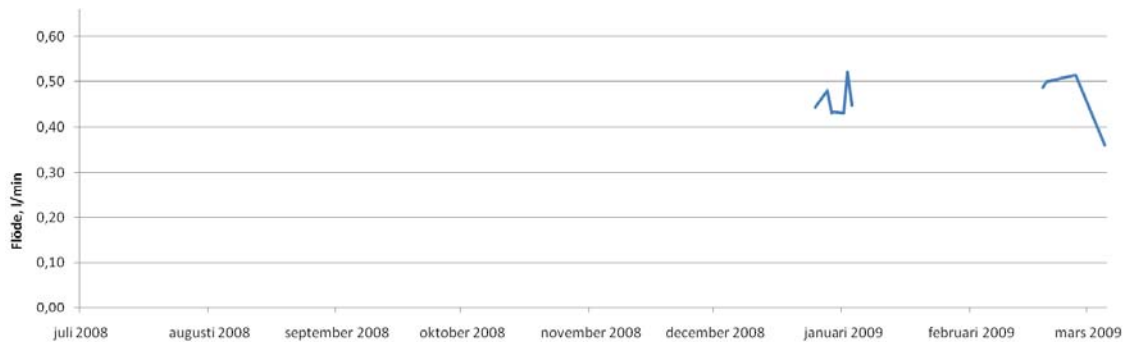
I figur 7-20, -21, -22 visas samtliga stabiliserade och bedömt ostörda (ventilationen av) mätvärden för respektive sektion fram till mars 2009.



Figur 7-21. Inflöden till sektion 10–34 m.



Figur 7-22. Inflöden till sektion 34–50 m.



Figur 7-23. Inflöden till sektion 50–81 m.

7.7 Övriga observationer och resultat

7.7.1 Borrhålsavvikelse

Verkligt läge på injekteringshålen kontrollerades, men användes inte som input för själva utförandet i aktuell borrhålsomgång. Om avvikelsen var större än 4% skulle justeringar av borrhålen göras i nästa injekterings-skärm. De metoder som användes för att bestämma det verkliga läget på injekteringshålen var

- inmätning av verklig ansättningspunkt samt riktningen på den första borrhålen av borrhålet,
- rakhetsmätning med Maxiborr II,
- inmätning av injekteringshålens position och riktning i tunnelfront efter salvuttag.

Inmätningen av verklig ansättningspunkt gjordes på alla borrhål i TASS-tunneln. Riktningen användes för att beräkna det teoretiska slutläget på borrhålet genom rätlinjig extrapolation.

Rakhetsmätning gjordes i skärmarna 2, 5 och 6 med Maxibor II. Maxibor är ett optiskt instrument som beräknar koordinaterna längs borrhålet baserat på optiska mätningar av riktningändringar och gravimetriska mätningar av stupningsändringar. Vid mätningen förs en sond in i hålet och sondens position i borrhålet registreras med jämna intervall.

För att ge information om riktigheten i rakhetsmätningen mättes injekteringshålens position in i tunnelfront i skärm 6. Skärm 6 bestod av injekteringshål innanför kontur och inmätning gjordes efter samtliga salvuttag.

I tabell 7-37 visas resultaten som en radiell borrhålsavvikelse mot planerat slutläge vilket ger information i absoluta termer om hur väl borrhålen är utförd. Radiell avvikelse räknas ut från den mätta vertikala och horisontella avvikelsen och är således hypotenusan för en rätvinklig triangel. Resultatet beror inte bara på avdriften under borrhålen utan även på hur bergytan är beskaffad där ansättningen ska göras. Exempelvis kan den planerade ansättningspunkten behöva justeras för att det är svårt eller inte lämpligt att göra ansättningen just i den teoretiska punkten. Orsak kan vara t ex en liten bergkam vilken skulle göra att borrhålet gled, och borrhålen bör inte heller starta i ett löst block. Borrigen programmeras med koordinaterna för ansättningspunkten och slutpunkten. Borraren styr sedan stålet för att kompensera för fel i ansättningen och avvikelser under borrhålen i syfte att nå slutpunkten. Styrningen görs framförallt genom att rikta bommen samt bestämma matartrycket.

Tabell 7-37. Resultat av rakhetsmätning. Borrhålsavvikelsen redovisas som medel och max för skärm 2, 5 och 6.

Borrning	Längd	Medel	Max	Kommentar
Injekteringshål, skärm 2	25	0,3	0,7	
Injekteringshål, skärm 5, innanför kontur	20	0,5	1,0	Notera att borrhålen ej skulle borrar parallellt med drivningsriktningen.
Injekteringshål, skärm 6, innanför kontur	20	0,4	0,9	Notera att borrhålen ej skulle borrar parallellt med drivningsriktningen.

Resultat Skärm 2

Rakhetsmätningen med Maxibor av sex stycken 25 m långa borrhål i skärm 2 visade att de första 20 m hade borrats mycket rakt medan de sista 5 m hade större avvikelse, även om den totala borrhålsavvikelsen var relativt liten, se figur 7-24. De sex hålen var jämnt spridda över skärmen och ingick i omgång A. Från detta resultat bedömdes att borrningen fungerade väl och att fortsatt borrning kunde ske utan justeringar. I medeltal var avvikelsen 0,3 m för de sex inmätta borrhålen.

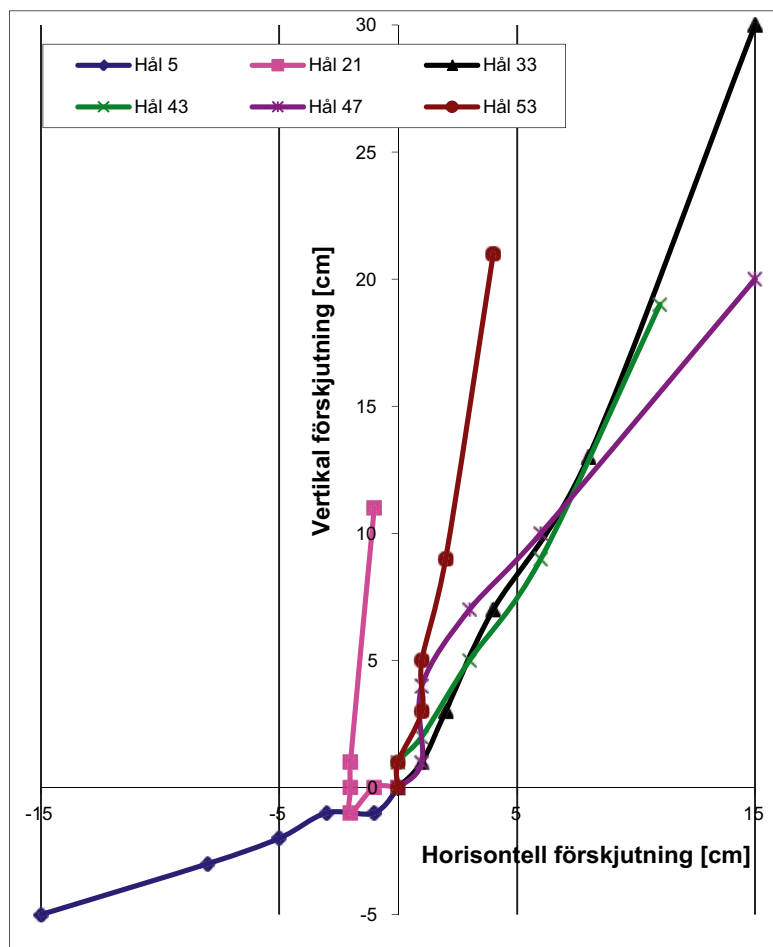
Från figuren ses att fem av sex hål kröktes uppåt och åt höger från sin avsedda bana.

Resultat skärm 5

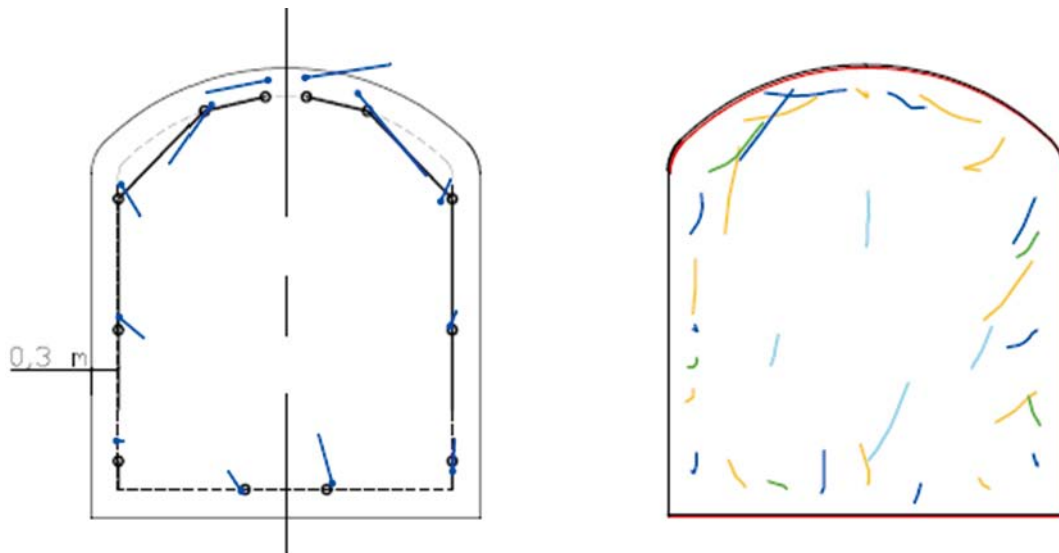
Skärm 5 borrades som en så kallad ”vriden” skärm. Planen var att det ena borrhålets slutpunkt skulle vara det närliggande borrhålets startpunkt projicerat på tunnelstuff. Borrhålen i mitten i sulan skulle borras parallellt med tunneln, figur 7-16.

Resultatet av inmätningen av ansättningspunkt och extrapolerad inriktning respektive raketmätning i skärm 5 visas i figur 7-25.

I figur 7-25 visas stuffen vid påslaget. Tunneln lutar 1% uppåt vilket gör att tunnelprofilen bör flyttas 20 cm uppåt (1% av 20 m) för att tolka om borrhålen hamnat utanför teoretisk tunnelprofil. Vi ser att ansättningen av de två takhålen är för hög i förhållande till planerad borrning samt att ett av takhålen gått utanför kontur enligt inmätningen. I sulan och vänster vägg avvek alla borrhål inåt tunneln.



Figur 7-24. Redovisning av raketmätningen av 6 borrhål i omgång A i skärm 2. Varje punkt anger avvikelsen från teoretiskt läge för punkten. Den horisontella krökningen visas på x-axeln där ett positivt värde betyder att borrhålet böjt av åt höger. Den vertikala förskjutningen visas på y-axeln där ett positivt värde betyder att borrhålet böjt av uppåt.



Figur 7-25. Vänster: omgång A:s borrhål i skärm 5. Blå linjer och blå prickar visar inmätningen, de svarta ringarna och strecken visar planerad borrning. Höger: resultat av rakhetsmätningen; turkos=stufhåll, blå= omgång A, orange=omgång B, grön=omgång C. Den i figuren redovisade ansättningspunkten är den teoretiska.

Inmätning och rakhetsmätning gav inte samstämmiga resultat, se exempelvis borrhålen i högra delen i taket där inmätningen ger att borrhålen avvikit snett upp åt höger medan rakhetsmätningen ger att de avvikit snett ner åt höger. Det var således svårt att dra några slutsatser om hur borrningen verkligen blev i skärm 5 och det beslöts därför att för skärm 6, förutom inmätning och rakhetsmätning, även göra inmätning av borrhålen efter varje salvuttag för att få direktinmätta punkter längs borrhålen.

Resultat skärm 6

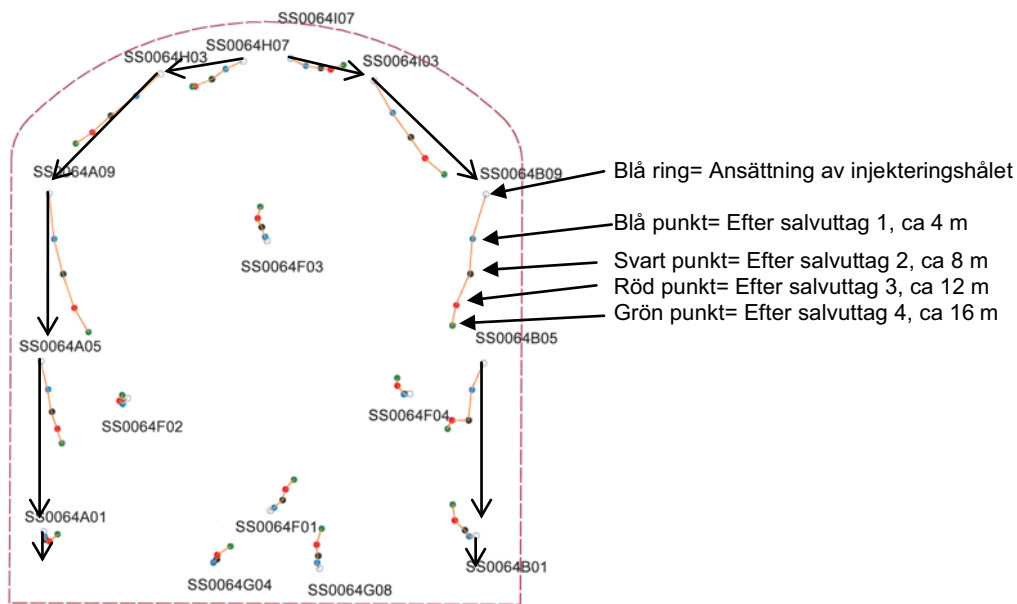
Resultaten från inmätningen av position i stuf för injekteringshål i skärm 6A redovisas i figur 7-26. Inmätning (position och riktning) gjordes efter varje salvuttag om ca 4 m. Totalt inklusive ansättningen för injekteringshållet gav detta 5 positioner.

Figuren indikerar att inget av borrhålen har gått utanför kontur. Flera av borrhålen har avvikit så att avståndet till tunnelkontur ökat jämfört med det planerade läget. Borrhålen i både nedre vänster och höger hörn visar på borrning uppåt vilket har att göra med att tunneln lutar 1 % uppåt. Ett beaktande som bör göras är att borrhålen är 20 m långa medan inmätningen bara visar positionen vid 16 m längd, alltså inte slutläget. Den största avvikelser mot teoretisk punkt var 0,88 m uppmätt med Maxibor 18 m in i borrhål SS0064A09 (vänster anfang).

För att jämföra resultatet från rakhetsmätningen med den inmätta punkten vid det sista salvuttaget jämförs en mätpunkt 16 m in längs borrhålet. Ett borrhål med relativt stor avvikelse där både rakhetsmätning och inmätning på stuf är utförd är borrhål SS0064B09 (höger anfang). Differensen är 0,17 m. Den största differensen mellan inmätningen och rakhetsmätningen var 0,19 m.

Summering borrhålsavvikelse

Med borrhål utanför kontur har den tillåtna borrhålsavvikelsen på 4 % (0,8 m för ett 20 m långt borrhål) i stort sett kunnat hållas, givet de metoder som använts för att mäta in borrhålen. 63 borrhål har både mätts in och rakhetsmätts. Mätningarna och utvärderingen var tidskrävande och att använda aktuella metoder för kontroll och justering under pågående borrning av en injekteringsvägg bedöms ej rimligt. Resultaten skulle eventuellt kunna användas för att påverka eller ändra borrningen i kommande skärm, detta har dock ej prövats i projektet. Huruvida inmätningen eller rakhetsmätningen ger pålitliga data med tillräcklig mättnoggrannhet är svårt att bedöma och en differens på som mest 20 cm mellan de båda metoderna har konstaterats för de totalt 6 kontrollerade borrhålen.



Figur 7-26. Inmätning av injektionshålerna i skärm 6A efter respektive salvuttag. Blå ring är den inmätta ansättningskoordinaten, blå punkt är läget efter första uttaget (4 m), svart punkt efter andra (8 m), röd punkt efter tredje (12 m) och grön punkt efter sista uttaget (16 m). Att notera är att skärm 6 skulle borras så att varje borrhåls startpunkt sett i sektionen, skulle vara intilliggande borrhåls slutpunkt, se pilarna som visar planerad borrning. De fyra mittersta borrhålen är stufvhålen som skulle borras parallellt med tunneln (1% uppåt mot horisontalplanet).

7.8 Geokemi

Prover togs i först i kärnborrhålen i syfte att utgöra referenssammansättning av kemin i grundvattnet i närområdet. Sedan togs prover i samband med de första injektionsborrhålen, främst i tunnelmyningen, och de första injektionsskärmarna (t o m maj 2008). Sedan togs prover i samband med sprängningsaktiviteter, och mätvallsmätningar samt även inflödande grundvatten från sprickor (ett par tidsserier finns provtagna samt analyserade t o m juni 2009). Prover togs också från en närliggande pumpgröp, från ett försök på 220 metersnivån samt ett borrhål (KA3110) beläget på -416 m nivån, borrat från A-tunneln.

Mycket få av de tagna vattenproverna visar på förhöjda halter kolloider. Endast i ett av 4 prover kunde kolloider detekteras med så pass hög koncentration att det var intressant att mäta storleksfördelningen av den kolloidala storleksfördelningen. De med högst halter kolloider motsvarar prover med konduktivitetsvärden på < 900–1 000 mSv vilket måste anses vara ett ”utspätt” grundvatten (utspätt pga spolvatten alternativt rent vatten från hydrotester) eller grundvatten som ligger på yttligare djup. Kiselhalterna (6.63–7.69 mg/L) var också relativt förhöjda vilket kan tyda på en extern källa (komponent i bentonit, cement eller silicasol), eller det kanske mest troliga borkax som finns kvar i borrhålet. Prov från injektionsborrhål (Skbnr. 14532) togs innan injektering och har en kloridhalt på 4 800 mg/L samt en kiselhalt på 4.24 mg/L. Andra intressanta parametrar i detta prov är Ca (1 270 mg/L) samt TOC/DOC (9.4/9.3 mg/L) vilket är högre än i de andra proverna som har höga kolloidhalter samt ett mycket högt pH på ca 11. Dessa halter kan härröra från injektionsmedel men det är inget som med säkerhet kan påvisas med dessa metoder. Metodutveckling krävs. Sammanfattningsvis kan sägas att den kemiska miljö som injekteringen ska appliceras och verka i har kloridhalter på ca 4 700 mg/L som ett medeltal på 400–500 meters djup. Kiselhalten på samma nivå ligger på ca 6 mg/L och det är svårt att säga om det något förhöjda kiselhalten kan härröras till silica sol injekteringen.

8 Diskussion

8.1 Det tätade berget

Kontrollhålen visar att bergmassan runt borrhålen som resultat av tre injekteringsomgångar blivit upp till 100–1 000 gånger tätare. Resultatet baserades på kontrollhål placerade mellan borrhål som i omgången innan läckt mycket vatten eller tagit mycket bruk eller på annat sätt visat på att tätningen var svår exempelvis sambandshål. Utbredningen av den tätade zonen i bergmassan utanför kranen av borrhål är dock inte verifierad.

Mätvallsresultaten visar att inläckaget är betydligt lägre än det som prognostiserades för det fall att ingen injektering skulle ha utförts. Prognosen visade på mellan 30 och 118 liter/min för 60 m av TASS tunneln utan injektering och mätvallsresultaten som täcker in 71 meter av tunneln visar på ca 1,5 l/min och alltså har injekteringen haft effekt.

Karteringen av TASS-tunneln efter injektering och berggutttag redovisas i /Hardenby och Sigurdsson 2010/. I rapporten redovisas orienteringen i magnetisk norr, i resonemanget nedan refereras till riktningarna efter att de omräknats till Äspö 96.

Karteringen av var omfattande. Stuffen karterades i samtliga lägen och upplösningen på karteringen var hög. Sprickor ner till 1,0 m i längd karterades men även kortare sprickor karterades om de förde vatten eller på annat sätt bedömdes viktiga.

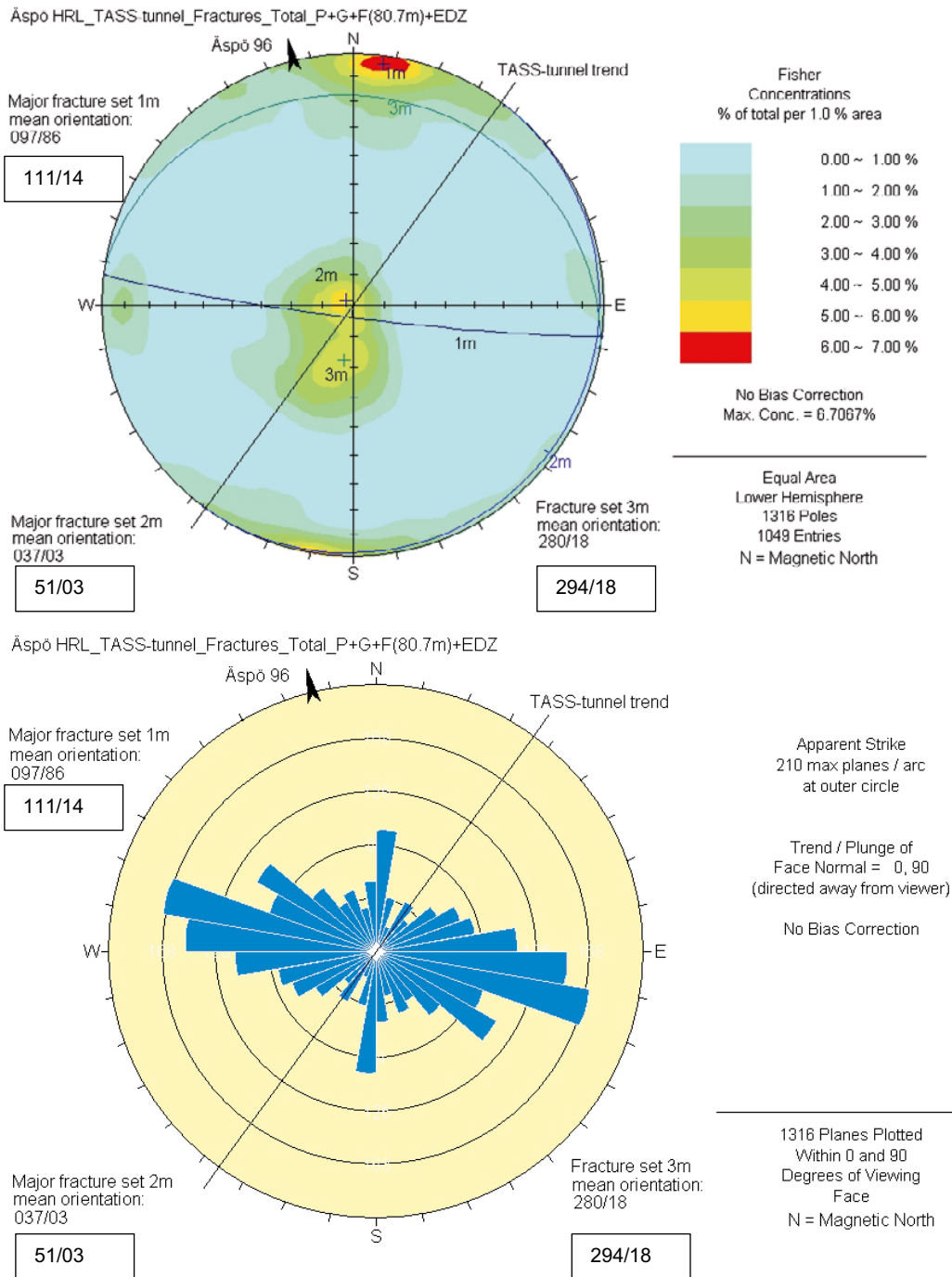
Ett grundantagande vid valet av tunneläge och riktning var att de mest vattenförande planen skulle vara de som sammanfaller med den generella huvudspänningsriktningen på Äspö, vilket med önskemålet att träffa dessa sprickor vinkelrätt också gav tunnelriktningen.

Enligt karteringen av slutläget (väggar och tak, sula och sista tunnelgavel i sektion 80,7 m) finns två dominerande sprickgrupper: en brant med orienteringen 111/86 och en subhorisontell med två undergrupper där orienteringen är 51/03 respektive 294/18, se figur 8-1. Om man ser till de vattenförande sprickorna domineras dessa av subhorisontella till svagt stupande sprickor; en i grupp som är i det närmaste horisontell 014/00 och en med orienteringen 311/28. Två mindre tydliga vattenförande sprickgrupper förekommer också med orienteringen 301/70 och 113/89, se figur 8-2. Strykningen är alltså ungefär densamma för de stupande och svagt stupande vattenförande sprickorna, de ligger inom ett intervall på 18 grader och i en vinkel mellan 63 och 81 grader mot tunneln. De sprickgrupper som är tydligast vattenförande efter injekteringen är alltså relativt flacka, om man ser till denna kartering.

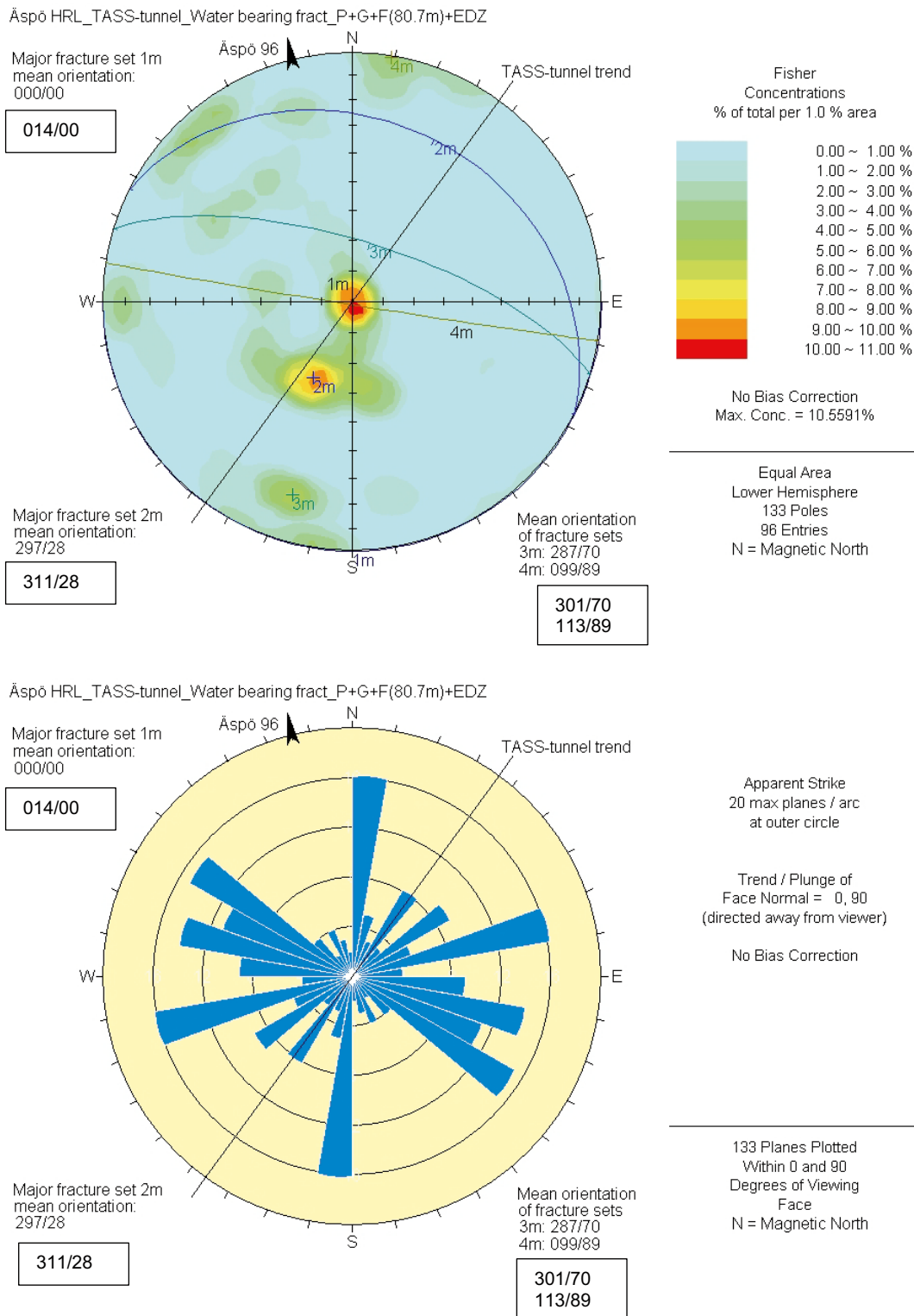
Huvuddelen av sprickorna stryker således ungefär VNV-OSO med brant stupning eller ingen till svag stupning. Huvudskillnaden mot omgivande tunnlar är att de brant stupande sprickorna inom TASS stryker mer i O-V än de i TASA- och Prototyp-tunneln. Det innebär också att TASS träffat dessa sprickor något brantare än vad som förutsågs och som angavs som utvärderingskriterium. TASS vinkel mot de karterade sprickorna var 61–85°, och kriteriet angav 70–90°. Det verkar också som om förekomsten av subhorisontella sprickor är mer uttalad i TASS. Det verkar också som att det är dessa subhorisontella sprickor som är de tydligaste vattenförande sprickorna efter utsprängningen.

Ser man till orienteringen inom respektive karteringsetapp, som alltså inkluderar även karteringen av tunnelstuff var fjärde meter, finns en mindre variation i sprickorienteringarna. Dessa redovisas i tabell 8-1 och 8-2. Noteras också att de redovisade karteringsetapperna inte sammanfaller med de i denna rapport redovisade injekteringsetapperna.

När man utgår från de etappvisa karteringarna enligt tabell 8-2, blir också bilden av den huvudsakliga orienteringen för de kvarvarande vattenförande sprickorna något varierad. Först ses att alla sprickorna ligger med mellan 63 och 89 graders vinkel mot tunneln, ett intervall på 26 grader och jämförbart med resultatet från karteringen av slutläget; sedan ses att för karteringsetapp 1 och 3 så är den huvudsakliga orienteringen för de kvarvarande vattenförande sprickorna brantstående och inte flacka som när slutläget presenteras ovan.



Figur 8-1. Orienteringen för samtliga sprickor i TASS, karterat i vägg, tak sula och slutlig tunnelgavel /Hardenby och Sigurdsson 2010/. Karteringen är orienterad i magnetisk norr och bilden är därför kompletterad med orienteringarna i Äspö 96, den svarta pilen indikerar norr.



Figur 8-2. Orienteringen för vattenförande sprickor i TASS, karterat i vägg, tak sula och slutlig tunnelgavel /Hardenby och Sigurdsson 2010/. Karteringen är orienterad i magnetisk norr och bilden är därför kompletterad med orienteringarna i Äspö 96, den svarta pilen indikerar norr.

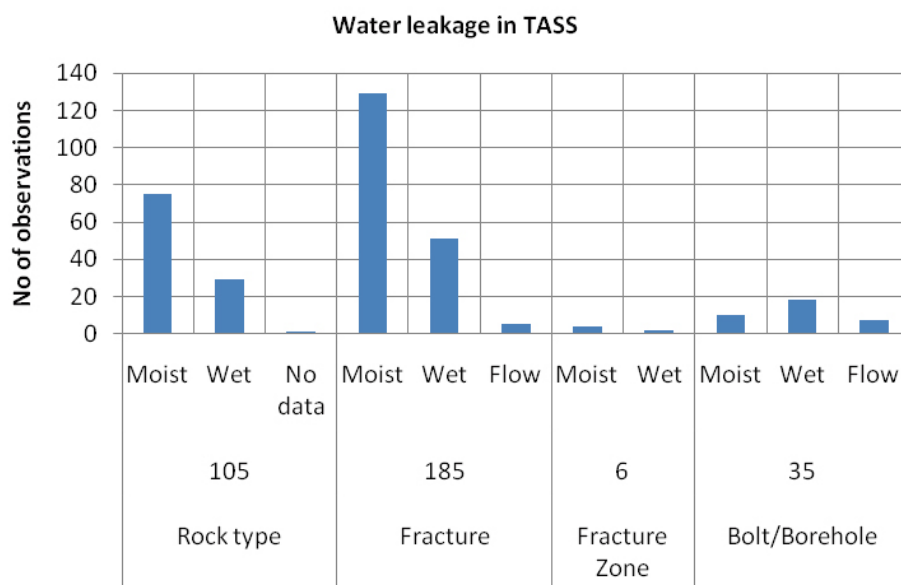
Tabell 8-1. Huvudsakliga sprickorienteringar, samtliga sprickor (väggar, tak, tunnelfronter och EDZ-nisch). Tabellen omräknad från magnetisk norr i /Hardenby och Sigurdsson 2010/ till Äspö 96.

Karteringetapp	Sektion	Motsvarar skärm	Huvudsaklig orientering (strykning/stupning)	Mindre tydlig orientering (strykning/stupning)
1	0–21 m	1, 2	111/87	374/78 127/07
2	21–49 m	3, 4	299/27 108/87 83/01	192/89
3	49–65 m	5	115/86 292/14	076/82
4	65–81 m	6, 7 (avslutning)	017/13	105/85 231/90

Tabell 8-2. Huvudsakliga sprickorienteringar, vattenförande sprickor (väggar, tak, tunnelfronter och EDZ-nisch). Tabellen omräknad från magnetisk norr i /Hardenby och Sigurdsson 2010/ till Äspö 96.

Karteringetapp	Sektion	Motsvarar skärm	Huvudsaklig orientering (strykning/stupning)	Mindre tydlig orientering (strykning/stupning)
1	0–21 m	1, 2	319/79 121/84	373/75 124/03
2	21–49 m	3, 4	114/00	–
3	49–65 m	5	113/83	–
4	65–81 m	6, 7 (avslutning)	293/28	24/30 128/90

I figur 8-3 visas en fördelning över hur inläckande vatten kommer in i TASS. Som synes finns en del observationer av otäta borrhål (vid karteringstillfället fanns inga bultar i tunneln). Med att vatten har kategoriserats till berget (Rocktype) menas att vattnet inte kan härröras till någon specifik spricka (fracture), sprickzon (fracture zone) eller bult/borrhål (Bolt/borehole) utan en mer diffus fuktig yta.

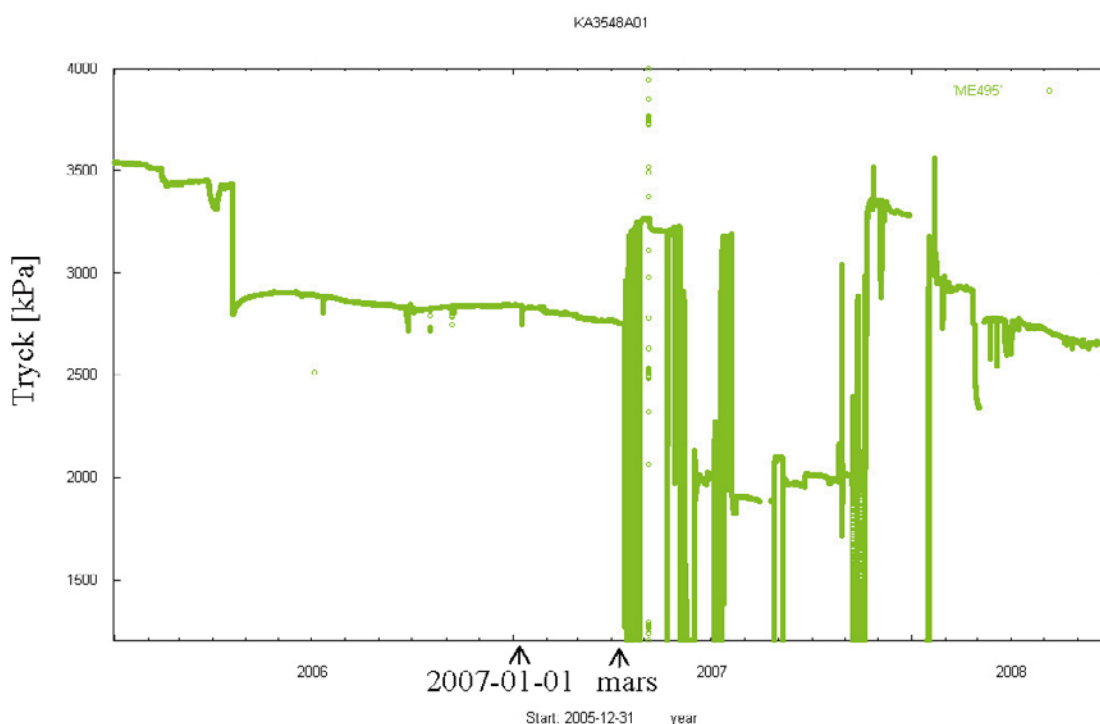


Figur 8-3. Fördelning av vattenläckagen in till TASS, samtliga stufflägen inkluderade.

I bilaga 5 redovisas resultaten av den droppkaraktärisering som gjordes. Inflödenas lägen är markerade på kartan som redovisar resultatet av den geologiska karteringen. Även storleken på flödet i respektive mätområde redovisas.

I /Hardenby och Sigurdsson 2010/ finns också statistik över karterade sprickors planhet. Hela 86% anges vara plana, och 11% anges var undulerande med en amplitud över 0,1 m. Vad gäller råhet har 51 % ingen synlig yta och kan därmed inte bedömas medan i stort sett alla som har en synlig yta bedöms som råa (46 % av totalen).

Vid ytligare förlagda tunnlar sätts kravet på täthet i en entreprenad ofta som ett maximalt tillåtet inläckage, som delvis är betingat av ett funktionskrav som anger en maximalt tillåten avsänkning av grundvattenytan (grundvattenytans trycknivå). Eftersom kopplingen mellan inläckage och avsänkning är svår att beskriva brukar mätningar av grundvattenytan därför göras för att kontrollera att funktionskravet innehålls. I fallet TASS angavs kravet på täthet som ett max tillåtet inläckage, utan något krav på att bevara trycksituationen runt tunneln. Tryckresponserna är dock intressanta och för bergmassan i Äspö pågår ständig registrering av grundvattentrycket genom HMS-systemet. Under själva utförandet registrerades tydlig tryckrespons i bergmassan kring TASS, se exempelvis figur 8-4 som visar trycknivån registrerad med HMS i ett närliggande borrhål som går från Prototyp nästan horisontellt mot den tänkta TASS-tunneln. I perioden från april fram till mars 2007 när arbetena i tunneln påbörjades var trycket relativt stabilt. Under perioden mars- juli borrades de tre förundersökningshål. Under denna period skedde stora trycksvängningar vilket var väntat i och med att borrhål stängdes och öppnades om varannat. I mitten av november, 2007 borrades den första injekteringsskärmen och testades med bland annat vattenförlustmätning; trycket steg. Injektering gjordes i flera omgångar och fortgick till början av december. I december 2007 var trycket högre än under perioden april 2006–mars 2007, men efter det första bergguttaget var trycket ungefär samma som innan förundersökningshålerna började borrar. Indikationer finns också att trycket runt TASS p g a arbetena varaktigt har såväl höjts som sänkts, beroende på vilken del av bergmassan som studeras.



Figur 8-4. Tryckrespons i kärnborrhål KA3548A01 under perioden när förundersökningshålerna gjordes och stora delar av tunneldrivningen.

8.2 Förundersökningen och den geohydrologiska prognosen

8.2.1 Undersökningsmetoderna

Den största hydrauliska sprickvidden beräknades dels för att välja injekteringsmedelstyp, dels för att teoretiskt kontrollera att spridningen av injekteringsmedel i sprickan med den största sprickvidden inte blir för lång. I den prognos som upprättades före entreprenadarbetenas start utgick beräkningen från inflödesmätningar med dubbelmanschett i 3-meterssektioner samt från PFL-mätningar med 0,1 m steglängd i kärnborrhålen. Under utförandet mättes i injekteringshålen det naturliga inflödet som helhålmätningar.

För KI0010B01 finns mätningar med såväl dubbelmanschett som PFL (PFL; Posivas flödeslogger, se avsnitt 3.3.1). I figur 8-5 redovisas en jämförelse av den hydrauliska sprickvidd som beräknades utifrån dessa mätningar. I enlighet med avsnitt 3.4.2 gjordes antagandet att flödet härrör från endast en vattenförande spricka inom mätsektionen. För PFL är det sprickvidden utifrån maxinflödet inom motsvarande 3-meterssektion som redovisas.

Figuren visar att den hydrauliska sprickvidden utvärderad från dubbelmanschettmätningen är större jämfört med från PFL-mätningen. Detta är i enlighet med förväntningarna eftersom det de facto är fler sprickor som bidrar till inflödet i varje 3-m sektion. Trendlinjen visar att där indikationen från dubbelmanschettmätning är en hydraulisk vidd om 125 μm så är indikationen från PFL 75 μm . Iakttagelsen är också att mätpunkterna ligger relativt väl samlade runt den anpassade trendlinjen.

Å ena sidan är det tydligt att mätsektionens längd spelar roll för de val som görs. Å andra sidan är metoden transparent och därmed finns en möjlighet att för en längre tunnel anpassa valet av injekteringsmedel efter de successivt erhållna erfarenheterna. Det största flödet med dubbelmanschett, beläget vid sektion 20 m, indikerade en spricka med hydraulisk sprickvidd över 150 μm , och cementbaserat bruk användes också, (baserat på inflödesmätningarna som också gav vidder större än 150 μm), trots att PFL – som spontant sett borde ge en sannare bild över den hydrauliska sprickvidden närmast borrhålet – indikerade endast 75 μm . För de större flödena som mäts med PFL stryps flödet vid 5 l/min vilket är den övre mätgränsen. För detta fall med sprickvidderna på 75 kontra 150 μm är det mätgränsen som ger skillnaden. För de mindre flödena beror skillnaden sannolikt på två orsaker nämligen att vid dubbelpackermätningarna mäts flödet över längre sektion och därav fångar upp fler sprickor än för PFL-mätningen och att vid dubbelpackermätningen blåses packerna upp till ett antaget formationstryck och därefter släpps flödet ut vilket skapar en transient i systemet. I båda fallen överskattas en tolkade maximala sprickvidden jämfört mot PFL-mätningen.

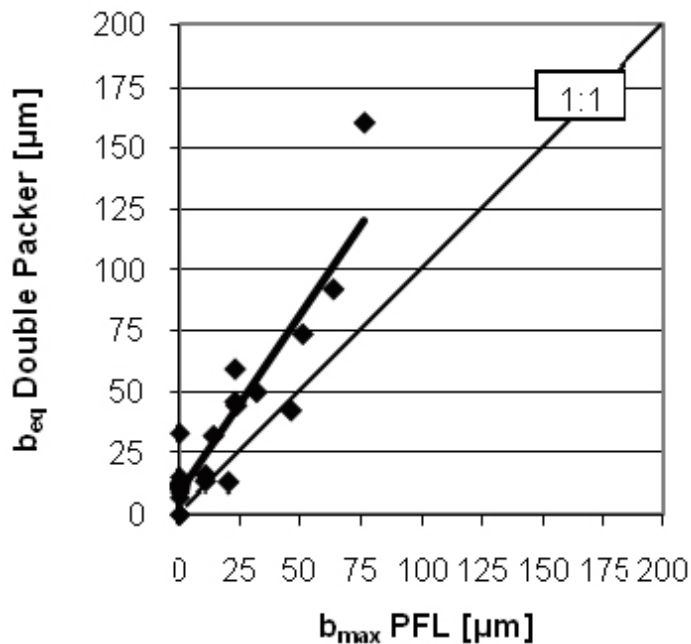
Totalt sett gör detta att den hydrauliska maximala sprickvidden överskattas något för den lokala sprickvidden vid dubbelpacker-mätningarna och den utvärderade transmissiviteten gäller för en större influensradie. Detta används för att prognosticera inflöden till tunneln. PFL ger mer tillförlitlighet och bör tillämpas för bruksvalet gällande penetrerbarheten.

Vid injekteringen av skärm 2 (sektion 8–33 m) förbrukades större mängder cementbruk, vilket tolkas som en bekräftelse att sprickor enligt den högre indikationen fanns. Frågeställningen om betydelsen av mätsektionens längd vid identifiering av största hydrauliska vidd bör studeras vidare.

Inflödesmätningar enligt ovan ger endast en uppfattning av förhållandena i bergmassan närmast hålet där mätningen görs. De tryckuppbyggnadstester som gjordes avsåg att ge input till designen i form av en tryckprofil med lokala direktuppmätta tryck längs borrhålet. Testerna visade sig dock ännu mer tidskrävande än vad som förutsetts, främst med hänsyn till de långa tiderna för stabilisering av trycket som det handlar om när bergmassan är tät. Lokala tryckvärden längs hålet erhöles därför inte och istället gjordes en utvärdering för att erhålla lokala värden /Hardenby et al. 2008/.

8.2.2 Prognosmetoderna

I det aktuella fallet valdes en sedan tidigare välundersökt plats där bergmassan beskrivs som genomsatt av huvudsakligen en sprickgrupp med vattenförande brant stupande parallella sprickor som ligger parallellt med den största huvudspänningsriktningen. Tunneln orienterades så att den skulle gå vinkelrätt mot dessa sprickor. Prognosmomentet att beskriva spricknätet/ sprickorienteringen ansågs därmed i stort sett avklarat redan när förundersökningen inleddes.



Figur 8-5. Förhållandet mellan utvärderad hydraulisk sprickvidd baserad på mätningar med dubbelmanschett med sektionslängd på 3 m respektive PFL med sektionslängd på 0,1 m för KI0010B01. Den tjocka linjen är en anpassning till de med romber markerade beräknade värdena.

Den antagna huvudsakliga sprickorienteringen innebar en stor chans att med såväl förundersökningsborrhål som injekteringshål träffa de dominerande vattenförande sprickorna. Det innebar också att antagandet om okonnekterade sprickor som enligt metodiken görs vid beräkningen av borrhålstransmissiviteten och inflödesprognosen i projektet bedömdes rimligt. För det fallet att fler och hydrauliskt konnekterade sprickgrupper finns, är metoden att summera de enskilda sprickornas transmissiviteter för att få borrhålens transmissivitet mindre bra. Situationen med flöde i konnekterade strukturer och behovet att justera inflödesekvationen (ekvation 3-7) för sådana situationer beskrivs i /Hernqvist 2009/. Vid karteringen konstaterades att förekomsten av subhorisontella och svagt stupande sprickplan var mer förekommande än i TASI och Prototyp och därmed än förväntat, och att dessa även representerade några av de huvudsakliga orienteringarna för kvarvarande vattenförande sprickor, se avsnitt 8.1. För att få en korrekt bild för vidare analys av tätade sprickor respektive kvarvarande otäta sprickor bör sprickriktningarna Terzhagikorrigeras samt normaliseras till ett riktningsmått. Detta görs inte i denna rapport men för bättre förståelse kring vilka sprickor som tätats bör detta göras. Med tre förundersökningshål som var parallella och i stort sett horisontella hade man inte kunnat förvänta sig att en ökad förekomst av subhorisontella och svagt stupande sprickor skulle indikeras.

Fördelningen av spricktransmissiviteter längs borrhålet är en av grundvalarna i metodiken. De beräkningar som görs för att generera en paretofördelning för sprickvidderna innehåller omfattande statistisk bearbetning. Omfattningen är sådan att det hade varit opraktiskt att utföra beräkningarna för hand och en icke allmänt tillgänglig Excelalgoritm användes för att lösa uppgiften. För den som själv vill tillämpa den i projektet använda metodiken bedöms fördelningsberäkningen vara den största beräkningsmässiga utmaningen.

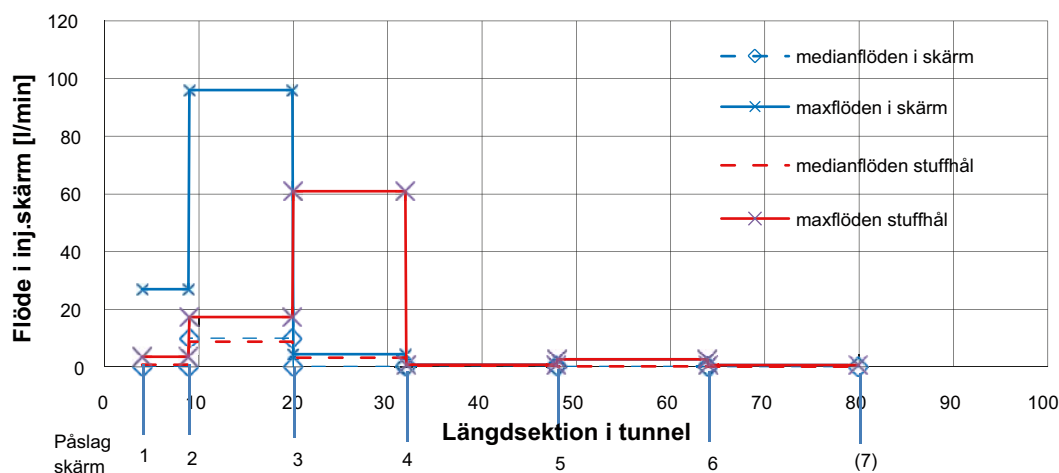
8.2.3 Förundersökningens omfattning och prognosen

Under förundersökningen detekterades tre stora inflöden; vid sektion 20, 55 och 75 m. Med antagandet om parallella, okonnekterade sprickplan vinkelrätt mot tunneln så var alltså förväntan att vid borringen av injekteringshål åter träffa på dessa inflöden. I fallet med inflödestoppen vid sektion 20 m med max uppmätt flöde om 42 l/min i ett av kärnborrhålen, infriades förväntningen eftersom största inflöde i omgång 2A uppmättes till 96 l/min och flera hål gav mellan 40 och 60 l/min. Det vid förundersökningen påträffade inflödet vid förundersökningen vid sektion 55 m, matchades dock inte av motsvarande inflöde vid borringen av injekteringshålen, se tabell 8-3. Noteras bör att två av inflödena vid sektion 55 m, de i kärnborrhålen KI0014B01 och KI0016B01, uppmättes i bergmassan

innanför framtida tunnelkontur. Det enskilt största inflöde som mättes vid förundersökningen, 48 l/min vid sektion 75 m som påträffades i det av kärnborrhålen som är borrar ca en meter utanför framtida tunnelkontur, gav sig ej heller till känna vid skärmborringen; största mätta inflöde var 0,7 l/min. En tolkning av att prognosen om större inflöden ej stämde är att antagandet om planparallella sprickplan ej speglade de verkliga förhållandena och att injekteringsmedel från tidigare skärmar via subhorisontella eller svagt stupande sprickplan kan ha tätat de vattenförande sprickorna. En annan möjlig förklaring är att stuffhålerna som borrades och injekterades ofta var kraftigt flödande vilket föranledde stora injekteringsvolymerna i vissa av dem. Den enskilda påverkan på tryck- och flödessituationen av att stuffhålerna injekterades är ej utredd (jämför figur 8-6). Som en kompletterande förklaring var att åtgärdande av ett av kärnborrhålen som visade sig vara ofullständigt fyllt, kan ha tätat bort stora delar av inflödena.

Påträffades då några större inflöden vid skärmborringen som inte ligger i samma längdsektion som de tre inflödestopparna från kärnborrhålen? I figur 8-6 visas max- och medianinflöden mätta i injekteringshål i respektive skärm. Dessa kan jämföras med inflödena i kärnborrhålen som redovisades i figur 4-6. Svaret blir ja; i skärm 1 omgång A (sektion 4-14 m) mättes inflöden om 13 respektive 27 l/min i två av injekteringsborrhålen, medan inflödet till samtliga kärnborrhål var mindre än 2 l/min. Effektiv injekterad volym var också avsevärd.

Indikationen på genomsläppligt berg för skärm 2 bekräftades av inflödesmätningarna före injektering som för såväl de fyra stuffhålerna som de 23 hålen i omgång A gav ett medianinflöde i storleksordningen 10 l/min. Trots omfattningen på datainsamlingen blev åtgången på bruk betydligt större än förväntat och under pågående injektering krävdes ett icke förberett beslut om hur detta skulle hanteras. Detta pekar på vikten av att komma ihåg att en matematisk prognos är just bara detta och att designen och de planerade åtgärderna inför utförandet bör täcka in även hanteringen av scenarier som man erfarenhetsmässigt vet kan inträffa; som t ex i detta fall betydligt större bruksåtgång än vad den matematiska prognosen indikerade.



Figur 8-6. Max- respektive medianinflöden vid inflödesmätning före injektering i respektive skärm.

Tabell 8-3 Maxinflöde [l/min] mätt vid hydrauliska tester i förundersökningen respektive i samband med injektering.

Kärnborrhål 3m-sektion vid 55 m			Skärm 4, helhål sektion 33–53 m		Skärm 5 helhål sektion 49–69 m	
KI0010B01	KI0014B01	KI0016B01	stuffhål	omgång A	stuffhål	omgång A
25	25	4	0,8	0,6	2,7	2,6

Ovanstående jämförelse mellan inflöden i förundersökningsborrhål och påträffade flöden under injekteringen ger anledning att förmoda att den ursprungliga uppfattningen att sprickorna antas vara planparallella och inte ha något hydrauliskt samband inte stämmer så väl, eller i varje fall att det fanns en tillräckligt stor förekomst av sprickplan utanför detta mönster för att ge ett betydelsefullt hydrauliskt samband mellan planen. Denna förmodan stöds av resultatet från tunnelkarteringen. Ytterligare en indikation på detta är mätningarna av inflöden till en skärm, även om tolkningen inte är uppenbart entydig. I tabell 8-4 sammanställs det totala inflödet till respektive skärmomgång dels som en summering av flödet mätt i varje hål när manschetterna i övriga hål är stängda, dels som en summering av flödet mätt när samtliga manschetter samtidigt är öppna. För samtliga skärmar konstateras att detta huvudsakligen gäller för stuffhålen, som är tre eller fyra till antalet. För injekteringshål i respektive omgång A gäller dock en minskning av summainflödet med en faktor 2–3, när vid mättillfället samtliga manschetter är öppna, vilket indikerar ett hydrauliskt samband mellan hålen.

Tabell 8-4. Det totala inflödet till respektive skärmomgång dels som en summering av flödet mätt i varje hål när manschetterna i övriga hål är stängda, dels som en summering av flödet mätt när samtliga manschetter samtidigt är öppna.

Skärmomgång	3 stuff	3 A	4 stuff	4 A	5 stuff	5 A	6 stuff	6 A
Summaflöde [l/min] Endast en manschett öppen	67	23	1,4	1,2	3,3	5,0	1,4	1,5
Summaflöde [l/min] Samtliga manschetter öppna	69	7	1,2	0,6	3,0	2,8	1,2	0,4

En förväntan fanns att träffa på sprickstrukturer som tidigare identifierats i TRUE, jämför figur 4-2. Förväntan uppfylldes i och med kartering och hydrauliska mätningar som indikerade de förväntade TRUE-strukturerna.

Bortsett från de mer förekommande subhorisontella till svagt stupande sprickplanen är uppfattningen sammantaget att förundersökningen ur utförandesynpunkt givit en god uppfattning om förhållandena framför stuff och att inga större överraskningar påträffats.

8.3 Designmetoden och designen

Som diskuterades i avsnitt 8.1 och 8.2 finns indikationer på att det i berget fanns betydelsefulla mer flacka vattenförande strukturer vid sidan av den förväntade mer vertikala sprickgruppen med planparallella sprickor. Ovan konstaterades att detta antagligen gett ett för högt beräknat inflöde för den hypotetiska situationen *utan* injektering. Beräkningsresultatet av hur små sprickor som måste tätas för att nå ner till det tillåtna inflödet påverkas rimligtvis också, eftersom beräkningsmetoden utgår från planparallella sprickor. Om denna påverkan var betydelsefull eller ej har inte analyserats. Generellt bedöms dimensioneringskriteriet dimensionerande hydraulisk sprickvidd, $d \leq s$ ”minsta hydrauliska sprickvidd som ska tätas”, som ett tilltalande mått eftersom det är ett mentalt greppbart mått att styra designen mot.

Två injekteringsmedelstyper fanns angivna redan i projektets målskrivning. De gränser som sattes var att cementbaserat medel skulle användas när en hydraulisk sprickvidd på mer än 150 μm indikerats vid inflödesmätning. Det är svårt att med hjälp av projektresultaten utvärdera det valda kriteriet för användning av cementbruket. I skärm 2 omgång A injekterades hela åtta hål med cement. Sex av dem, med inflöden på 54–96 l/min (motsvarar hydraulisk sprickvidd 168–204 μm) var samlade i tunnelns nedre högra hörn. De fem mellanliggande kontrollhålen i påföljande omgång gav alla avsevärt lägre inflöden: tre borrhål gav 0,08–0,44 l/min och två var under mätgränsen. Det är dock svårt att särskilja resultatet av injekteringen med cementbruket från resultatet av silica solen där endera injekteringsmedlet skulle kunna stå för en viss del av den totala tätningen. Upplägget för injekteringen var att injektera från botten och upp. De två cementhålen i sulan injekterades först, därefter injekterades resterande sulhål med silica sol, därefter resterande hål i aktuellt hörn med cement och därpå övriga hål. Först därefter borrades och mättes omgång B. Om det största mätta inflödet i omgång 2B får representera den största otätade spricka som finns kvar efter den cement- och silica solinjekterade omgång 2A, kan

konstateras att denna spricka har den hydrauliska vidden ca 50 μm (1,2 l/min vid 3 MPa tryck). Flödet mättes intill de cementinjekterade hålen i högra hörnet. Kombinationen av injektering med cement och silica sol var således effektiv. Det med ovanstående resonemang sökta belägget för var cementbrukets gräns för tillämpning går, uttryckt som minsta hydrauliska sprickvidd, är dock svårångat.

Inget har dock iakttagits som indikerar att gränsen 150 μm för cement skulle vara för lågt satt. Syftet med den satta gränsen var att främst att få testa silica solen men även till viss del cement. De två av cementhålen som injekterades först hade bruksåtgång på 860 respektive 261 liter. Injekteringsmedlet kunde alltså utan problem tränga in i sprickorna, bruksåtgången 860 liter utgörs dessutom delvis av ett styvare bruk, som blandades för att få stopp på flödet. Ett tydligare resultat finns från korset. Före injektering med cement i ett hål bedömdes den hydrauliska sprickvidden i ett intilliggande hål till 151 μm , efter injekteringen bedömdes den till 108 μm . För försöken i korset var hållängderna 7 m. I skärm 2 var hållängden 25 m, och när inflödet längs hela borrhålet hänfördes till en enda spricka bedömdes sprickvidderna i de hål som skulle cementinjekteras till 168–204 μm . Sprickvidden 168 μm beräknades utifrån inflödet 54 l/min. Om inflödet i själva verket skulle härröra från endast tre sprickor som är lika stora skulle sprickvidden för dessa bli 117 μm . Med valet 150 μm som gräns för att välja cementbaserat bruk verkar det således finnas en marginal med hänsyn till att gränsen för brukets inträngningsförmåga tidigare indikerats vara väl under 100 μm .

I designen ansattes att det teoretiska överlappet av inträngningslängden mellan två hål ska vara 50%. Detta baserades på resonemanget om parallella borrhål som skär plana sprickor under som mest en vinkel om 40 grader. Vid denna vinkel kommer teoretiskt sett bruket från två intilliggande borrhål att precis mötas när överlappet är 50%. Karteringen visade att majoriteten av sprickorna var plana. Antagandet om som mest 40 graders vinkel synes också vara rimligt. Karteringen av tunneln visar att de flesta av de utpekade orienteringarna för såväl icke vattenförande som vattenförande sprickor ligger inom ett intervall av 30 grader, räknat från tunnelriktningen. Sett till ett av de två utpekade huvudsakligt vattenförande sprickgrupperna ligger dock en sprickgrupp i det närmaste horisontellt och det skulle därmed vara stor risk att inget överlapp erhålls. För att ge en annan infallsvinkel på risken att inget överlapp erhålls kan vi se vad som beräkningsmässigt händer om den aktuella hydrauliska sprickvidden som ska tätas är bara lite större, säg 13 μm istället för 10 μm . Eftersom vi räknar med att injektera så pass länge att maxinträngningen erhålls, och maxinträngningen är proportionell mot den hydrauliska vidden (ekvation 3-8), blir beräkningsmässigt inträngningen i 13 μm sprickan 30 % längre än i 10 μm sprickan. Detta innebär att det teoretiska överlappet för 13 μm sprickan vid vinkelrät orientering ökar till 100%, jämför figur 6-1. Det faktum att inträngningen och överlappet blir större i större sprickvidder gör att även begreppet tätad zon behöver uppmärksammas. När storleken på den minsta hydrauliska sprickvidd som måste tätas för TASS räknats fram med inflödesekvationen (ekvation 3-7) har en tätad zon på 5 m ansatts. Vid designen har sedan pumptryck och tid styrts mot överlapp, som krävt kortare inträngning än vad som krävs för zontjockleken 5 m. Detta gör att inflödet beräkningsmässigt sett blir större. Detta motverkas dock av att bergmassans genomsläpplighet (i ekvationen representerad av T_{grout}) utanför den zon där den dimensionerande sprickvidden tätats också har blivit tätare än den ursprungliga (i ekvationen representerad av T_{tot}). Effekterna har ej kvantifierats, men resonemanget indikerar att begreppen överlapp och tätad zon behöver studeras vidare. I sammanhanget konstateras också att vid små mått på inträngningslängden blir även den verkliga sprickgeometrin intressant.

Förhållandet mellan effektiv injekteringstid och geltid valdes till 4/5 efter de inledande testerna i korset som indikerade att erosion kunde ha inträffat. Villkoren för erosion med tillhörande parametervärden innehåller flera osäkerheter; för parametervärdena främst viskositetstillväxten för solen vid olika blandningar samt den gradient som verkar eroderande på medlet. I projektet har identifierats läckande borrhål vilket är detsamma som läckande berg, vilket kan tolkas som att erosion har skett, fastän villkoren har iakttagits. Det är ej uppenbart om det faktiskt är erosion och än mindre om det hänger ihop med att modellerna för erosion inte är tillfredsställande, alternativt om det är viskositeten eller gradienten som har missbedömts.

För injekteringstekniken med det cementbaserade medlet var kriteriet för att inte få bakåtflyde dimensionerande. För att använda kriteriet behövs sambanden som används för att beräkna den dimensionslösa inträngningen. Kriteriet gav med givet bruk såväl långa pumptider som stora inträngningslängder. Det vore önskvärt att bättre kunna utvärdera sambanden för att kunna minska pumptiderna. Bland annat tas inte hänsyn till den hållfasthetstillväxt som sker.

Inträngningsmodellerna och beräkningarna förutsätter att flödet sker i 2D. Det innebär för ett enskilt sprickplan att flöde sker i hela planet. För sprickplan med många kontaktytor (stor råhet), d v s sprickplan som har partier som inte släpper igenom något flöde kan, vid utvärdering av hydrauliska tester, detta istället tolkas som en spricka med liten sprickvidd. I en sådan här spricka är flödet mer kanallikt. Kanalflöde, eller flöde i 1D, innebär att inträngningslängden blir större än i 2D. I så fall finns här en i varje fall beräkningmässig marginal till den önskvärda inträngningslängden. Tidigare konstaterades att inga större överraskningar dykt upp jämfört med vad den geohydrologiska prognosen angav. Ur ett designperspektiv är det dock inte omedelbart uppenbart vad som skulle ha gjorts annorlunda i designen i det fall man hade haft en bättre kännedom om de mer horisontella sprickorienteringarna. Dock kan konstateras att beräkningarna av inflöde utan injektering antagligen har gett ett för högt värde.

Villkoret för att jacking ej skulle inträffa på grund av för högt injekteringstryck var enligt ekvation 3-17 med marginal uppfyllt. Dock beaktar det uppställda villkoret ej risken för att lokalt påverka bergmassan (uppspräckning, jacking, lyftning etc) närmast tunneln. Knaken som hördes i tunneln vid en ytligt satt manschett indikerade att det valda injekteringstrycket låg på gränsen till vad som var lämpligt.

Allt fanns inte beskrivet i designmodellen. Så t ex gjordes en observation av fördelningen av inflödet mellan mätvallen vid sektion 10 m och stuff. En koncentration av inflödet till stuff och den innersta delen av tunneln noterades. Iakttagelsen utgör ett motiv till användningen av stuffhål även i slutstuffen; där behövs stuffhål inte för att ta ner gradienten inför kommande skärm, utan för att faktiskt bidra till tätheten i stuff. Att stuffhålens bidrag till tätheten ibland varit avsevärd kan ses i inflödesdiagrammen för för varje skärm, t ex i figur 7-12, och teorier som styrker ändeffekten redovisas i bilaga 1.

Vissa parametrar kan mätas noggrant (små inflöden) medan andra är svårare att fastställa (grundvattentryck). Små variationer i indata ger också stort utfall i utdata, t ex dimensionerande hydraulisk sprickvidd. Vissa val ger också stort utfall. Exempelvis tummades på överlappsmarginalen om 50% när dimensionerande hydraulisk sprickvidd valdes till 10 μm (baserat på data från ett befintligt kärnborrhål), fastän utvärderingen av en större datamängd (de tre förundersökningshålen) angav att dimensionerande sprickvidd var 8 μm . Utfallet i täthet är möjligen en aspekt som med raden av antaganden och den kontinuerliga uppföljningen saknar betydelse. Praktisk betydelse om istället 8 μm hade valts, skulle emellertid ha varit en kraftigt förlängd injekteringstid. Denna skulle för en inträngningslängd om 1,6 m ha ökat med en faktor 2, från 30 minuter till 60 minuter (geltid 39 respektive 75 minuter), när trycket var begränsat till 5 MPa. Förutom att injekteringen skulle ha behövt ännu mer tid, skulle också inträngningen i sprickan med den största vidden blivit oacceptabel. Ett teoretiskt alternativ skulle ha varit att öka antalet hål. Hålavståndet hade redan minskats från basdesignens 2 m till 1,5 m. Frågan är hur små hålavstånd som är rimliga. Det är heller inte helt självklart hur man ska förhålla sig till det motsatsförhållande som upplevs mellan de antaganden som görs och de mycket små variationer i parametrar som ger stora utslag.

I använd metodik görs således ett antal relativt stora förenklingar i beskrivningen av verkligheten som ligger till grund för ett antal samband (ekvationer) som användes i designarbetet. Stora datamängder inhämtades med största noggrannhet och alla värden hanterades under designarbetet i stort sett utan avrundning. På så vis är det möjligt att spåra det som gjordes, vilket var ett grundläggande krav i projektet. Databasen är unik i sitt slag och utgör en god datakälla för en ytterligare utvecklad förståelse av styrande mekanismer.

Det är i detta sammanhang viktigt att påminna att vid injektering är ett renodlat teoretiskt angreppssätt inte något att rekommendera. Sättet att arbeta, där prognosen om vad som finns framför stuff kontinuerligt uppdateras och likaså resultatet följs upp, är både ett nödvändigt och praktiskt sätt att hantera detta, och i projektet har det även lett till goda täthetsresultat. Som en del av arbetssättet inleddes också injekteringsarbetena med en testinjektering, där korset och injekteringsskärm nr 1 syftade till att verifiera samband för inträngning samt att kontrollera funktionen och rutiner för arbete på stuff, innan själva drivningen startade.

Projektet har visat att vid design av en injektering bör uppgiften angripas utifrån flera fundament. Dessa fundament är teoretisk förståelse, erfarenhet samt ett upplägg för utförandet som innefattar tillämpning av observationsmetoden.

8.4 Styrningen under injektering

8.4.1 Styrning med kontrollhål

I projektet borrades kontrollhål dels för att påvisa ökad täthet i bergmassan, dels för att utgöra injekteringshål. Medianvärdet på mätresultatet ansågs vara representativt för tätheten i hela den kontrollerade bergmassan. Två möjligheter finns att erhålla medianvärdet; antingen väljs det mätta medianvärdet, eller så anpassas en log-normalkurva till de mätta värdena varefter medianvärdet kan erhållas. Medianvärde som mått är praktiskt när man väljer att gå på de enskilda mätvärdena, eftersom det finns en mätgräns som ligger relativt högt i förhållande till de inläckagevärden som är intressanta. I stort sett hälften av mätvärdena kan alltså ligga under mätgränsen, och ändå erhålls ett medianvärde. Problemet infinner sig om mer än hälften av värdena, d v s även medianvärdet ligger under mätgränsen. Detta inträffade t ex i omgång 4C, se figur 7-15. I projektet användes dock metoden med anpassad log-normalkurva. På så vis erhöles alltid en kurva, även om den baserades på ett flertal för höga värden, och kurvans medianvärde kunde bestämmas.

Inflödet till kontrollhålen används som ställföreträdande kriterium för att inläckaget till tunneln kommer att vara tillräckligt lågt. Inläckaget beror emellertid också av utbredningen på den resulterande tätade zonen. Denna kan normalt sett inte verifieras med kontrollhål, eftersom dessa då skulle behöva borrar även utanför zonen och på så vis skulle förstöra tätningen genom att utgöra nya inläckagevägar in till tunneln. Vikten av att inte bara få en tät skärm i bergmassan utan också att få en tillräcklig utbredning på zonen kan visas genom att jämföra kontrollhålsresultaten från skärmarna 4, 5 och 6 som alla är borrade innanför kontur. Medianvärdet på inflödet i den slutliga kontrollomgången i skärmarna 4, 5 och 6, omgång C, hamnade i samma storleksordning ($\leq 0,001$ l/min) som för skärmarna utanför kontur. Samtliga delar av tunneln klarade inflödeskravet utom sträckan längs skärm 4. I efterhand var det inte överraskande att inläckaget längs skärm 4 var för högt; beräkningsmässigt nådde den tätade zonen ut i bergmassan utanför tunnelkontur, men utbredningen var alldeles för liten.

Hål i omgång B och C sattes där den tidigare omgångens hål visat stort inflöde eller samband med andra hål. Även om dessa hål kompletterades med mer geometriskt neutralt placerade hål, innebar detta att medianvärdet med stor sannolikhet blev högre än om alla hål fördelats ut jämnt runt konturen. Noteras också att inflödet till kontrollomgång C ej representerar den slutligt uppnådda tätheten, eftersom efterföljande injektering gjordes i samtliga hål.

Basdesignen redovisade tre injekteringsomgångar och minst två omgångar skulle alltid göras i varje skärm. Antalet hål och deras placering i den andra och tredje omgången styrdes utifrån utvärdering av inflödet till hålen borrade i omgången innan. Projektets kriterium för att betrakta ett borrhål som tätt var ett inflöde mindre än 0,1 l/min. Det förhållandevis stora antalet borrhål/omgångar gjordes dels för att öka sannolikheten att klara täthetsmålen, dels för att samla data.

Kriteriet för utförande av omgång C, 0,1 l/min enligt ovan, var överslagsmässigt satt. Av skärmarna 2, 3, 5 och 6 var det endast skärm 3 som uppvisade en tydlig minskning, (en faktor 7) av mediantransmissiviteten efter injektering av omgång B, d v s lägre värde från hålen i omgång C än i omgång B. Övriga visade en minskning eller en marginell ökning (50%) som bedöms som icke signifikant. Denna information tillsammans med informationen att sträckorna längs nämnda skärmar blev täta, innebär om man hårdrar metoden, att omgångarna B och C i skärm 1, 5 och 6 skulle ha varit onödiga om man bara sett till täthetskravet. Samtidigt kan man begrunda det faktum att diagnosen till och med kan bli att tätheten i bergmassan minskat efter en injekteringsomgång. Detta är en påminnelse om att sprickplanen innehåller såväl täta partier (kontaktytor) som mer genomsläppliga. Risken att alla hål hamnar i de täta partierna, och därmed att beslutet om behovet av ytterligare tätningsinsatser blir felaktigt, ökar ju färre kontrollhålen är.

För TASS valdes att göra minst fem kontrollhål som underlag för bedömning huruvida ytterligare injektering skulle behövas. I ett vanligt projekt är det givetvis av intresse att minimera antalet kontrollhål. I artikeln /Gustafson et al. 2010/ härleds och föreslås en metod som liksom i TASS utgår från inflöde till sonderings- och kontrollhål. Metoden syftar till att begränsa antalet inflödesmätningar och att definiera konfidensnivån för att inflödet blir under det tillåtna. Den föreslagna metoden bygger på att beräkna sannolikheten för att bergmassans transmissivitet är lägre än den kritiska som en funktion av antalet stickprov (av det totala antalet stickprov) som har en lägre transmissivitet än den kritiska. Artikeln redovisar en överslagsmässig metod för att bedöma den kritiska transmissivitet som motsvarar det tillåtna inflödet till en tunnel med viss geometri. Metoden bygger på en välgrundad gissning att

bergmassans transmissivitet kan sättas lika med medianvärdet för ett antal oberoende stickprov på bergmassans transmissivitet. Metoden förutsätter också att stickproven de facto är oberoende, vilket normalt sett inte är helt sant. Data från kontrollhål i TASS-tunneln används som illustration till metoden, men för att utvärdera metoden behöver den användas som verkligt beslutsstöd i ett flertal projekt. En tänkbar utveckling är att använda metoden inom ramen för observationsmetoden i syfte att optimera antalet kontrollhål för aktuellt berg.

8.4.2 Alternativa täthetsmått

Som visades i tabell 8-4, skiljer inflödesresultatet beroende på om flöde tillåts i övriga borrhål när mätningen görs eller ej. Bedömningen av täthetsresultatet med kontrollhål enligt den metod som användes och som redovisas i avsnitt 6.2.7 utgår från mätning när ett hål i taget är öppet och fokuserar på medianinflödet. Ett annat täthetsmått fås om man tar summaflödet när samtliga manschetter samtidigt är öppna. Frågan är dock hur detta mått ska tolkas och dess signifikans för att bedöma det resulterande inflödet till utpräglad tunnel.

8.4.3 Tolkning och styrning baserat på övriga observationer

Den använda designmetodiken bygger på att sätta en erforderlig inträngningslängd för att skapa en tät bergmassa mellan injekteringsborrhålen. Med skärmar innanför kontur behövde även hänsyn tas till att skapa en tillräcklig utbredning av den tätade zonen. Detta var dock en lärdom som gjordes under projektiden. Inträngningslängden är en funktion av bl a flödesdimensionen. Vid beräkning av inträngningslängden antogs i projektet att flödet är två-dimensionellt. Antagandet är väsentligt eftersom den erforderliga längden ej uppnås om flödesdimensionen är högre. Genom att studera produktionsdata där flödet redovisas mot tiden kan den verkliga flödesdimensionen uppskattas, se /Kobayashi et al. 2008/. Mjukvaruutveckling för att kunna bedöma erforderlig inträngningslängd under pågående pumpning pågår, men även en efteranalys efter avslutad skärm är intressant. Om flödesdimensionen bedöms vara en annan än den antagna bör man rimligtvis överväga att ändra designen, om de påträffade flödesförhållandena antas vara gällande även för den fortsatta drivningen. I projektet togs täta kontrollhål som en intäkt för att den eftersträfvade täta zonen hade skapats och någon analys av flödeskurvorna gjordes inte. Vid en fortsatt analys av data från projektet kan en sådan analys av flödesdimensionen vara intressant.

Under injekteringen användes resultat från vattenförlustmätningarna för att inför tillblandningen uppskatta åtgången av injekteringsmedel. Detta har tidigare inte gjorts för silica sol. Att minska spillet var i sig inte ett uttryckt projektmål, men är givetvis eftersträvansvärt ur såväl ekonomisk som miljömässig synpunkt. En första bedömning är att mängderna förefaller kunna uppskattas rätt väl vid små vattenförluster. Detta utnyttjades i projektet genom att satsstorlekarna minskades när vattenförlusten var liten, mindre än ca 4 l/min vid ett övertryck på 0,5 MPa.

En noggrann rensning av sulan med noggrann uppsamling och mätning av inflödande vatten i vägg och sula mellan sektion 10 och 33 m gjordes för att identifiera läckagepunkter. Ett läckande borrhål identifierades och injekterades. Resultatet av injekteringen var gott; inflödet mätt i mätvallen reducerades med ett flöde motsvarande läckaget i borrhålet, ca 0,3 l/min. Insatsen var omfattande, men avgörande för att täthetskravet skulle uppnås på sträckan. Detta visar att omfattande uppföljningsinsatser kan vara nödvändiga om inflödeskraven är stränga.

8.4.4 Inflödesbestämning

Mätning av inflödena med hjälp av mätvallar var arbetskrävande; det gällde både byggandet av mätvallarna med de tätningar och justeringar som behövdes och själva mätningarna som krävde ostörda förhållanden för att få stabiliserade värden. Det innebar dels att inga arbeten kunde utföras under stabiliseringsperioden, dels att ventilationen stängdes av. Inverkan av ventilationsluftens påverkan på inflödena genom att den har en varierande och annan relativ fuktighet än tunnelluften diskuterades, men inga tydliga svar gavs.

Principen för mätning var att fylla på vatten innanför mätvallen och att bestämma det sökta inflödet när balans nåtts mellan inflödet till tunneln och flödet ut genom mätvallen, se metodbeskrivningen i avsnitt 3.4.1. I samband med att den första mätvallen var uppförd konstaterades att ett sulmaterial

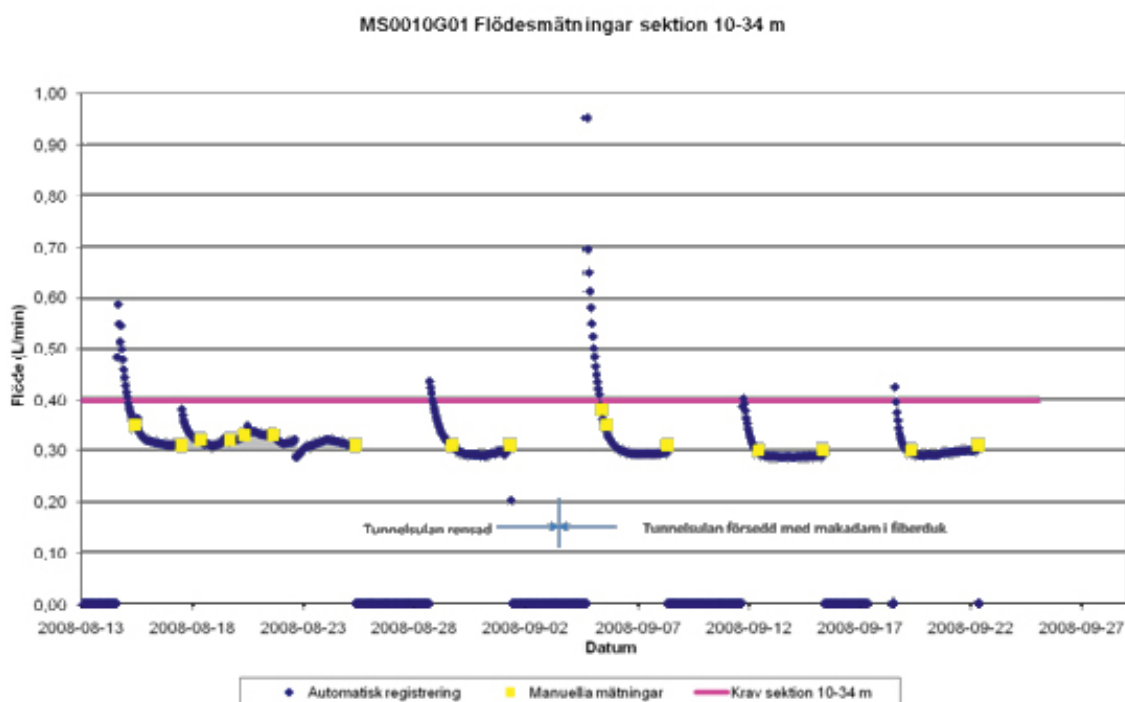
bestående av sprängsten ger ett alltför trögt stabiliseringsförlopp. Den första åtgärden för att snabba på stabiliseringen var att gräva ett dränerande dike. Detta var inte tillräckligt, men med en konstruktion bestående av makadam inlindad i fiberduk erhöles både stabila värden och en körbar tunnelbotten. Att det var stabila värden som mättes verifierades när lika värden erhöles med helt rensad sula och med fiberduks-makadamkonstruktionen. I figur 8-7 visas stabiliseringsförloppen för respektive situation.

Mätvallskonstruktionen var förberedd med borrhål för kontaktinjektering. Dessa behövde inte användas; tätning av de små läckage som uppkom kunde åtgärdas med bentonitpulver och bentonitmatta. Den sammantagna bedömningen är att den konstruktion och den mätteknik som använts har fungerat och givit stabila värden med en noggrannhet på minst nivå 0,1 l/min.

Resultaten av droppkarteringen, insamlingen och mätningen av inflödet med hjälp av sågade slitsar och uppsamlingsbleck monterade i tunnelvägg samt mätningarna i pölar i sulan gav tillsammans en bra bild av hur inflödet var fördelat i tunneln. Summeringen av de mätta delinflödena stämde väl överens med det flöde som mättes i mätvallarna.

8.5 Skärmtyp

Syftet med injekteringen är ju att skapa en tätad zon med tillräcklig utbredning och täthet runt den planerade öppningen i berget. Det innebär att när injekteringshålen placeras innanför kontur så måste inträngningen vara längre än när hålen är placerade ute i den bergmassa som ska tätas. Detta blev uppenbart i och med den första skärmen innanför kontur, skärm 4, där designkriteriet för inträngning endast var överlapp mellan borrhålen och resultatet inte heller blev bra. När för projektet tillräcklig utbredning i berget runt tunneln sattes som det avgörande kriteriet för erforderlig inträngningslängd för skärm 5 och 6 (sektion 50–81 m) och designen därmed ändrades, blev det resulterande inläckaget under det tillåtna. Frågan om tillräcklig utbredning beror av både den omgivande bergmassans genomsläpplighet och den tätade bergmassans genomsläpplighet. Ju genomsläppligare berget är desto större utbredning på den tätade zonen behövs. Ju mindre inträngningslängden är, desto väsentligare är det också att beakta sprickornas verkliga orientering. För TASS var det omgivande berget ganska tätt och den använda utbredningen var tillräcklig.



Figur 8-7. Förlopp vid stabilisering av flödet genom mätvallen i sektion 10 m.

Ytterligare en förändring gjordes. Injekteringshålen i skärm 4 hade borrrats parallellt med tunnelriktningen. Hålen i skärm 5 och 6 orienterades så att det ena hålets ansättning motsvarade det andra borrhålets slutpunkt projicerat på tunnelstuff, vilket skulle ge en ”vriden” skärm. Motivet var att detta ansågs öka möjligheten att penetrera även de flackt lutande sprickplanen som prognostiserats (se figur 6-2).

Teoretiskt sett måste två villkor vara uppfyllda för att möjligheten att träffa de flacka sprickorna ska öka. Villkor 1 för nytta med lutande (här i betydelsen avvikande från tunnelriktningen) injekteringshål är att de måste borras i olika riktningar. Detta villkor är endast delvis uppfyllt, eftersom borrhålen alla är parallella med eller nedåtriktade i tunnelns längdriktning. Nedåtriktningen var dock betingad av indikationen att de flacka planen var uppåtriktade i tunnelns längdriktning. Rent generellt – om man vill undvika parallella hål – erhålls en bättre spridning i lutning om ena sidans hål är uppåtriktade och den andra sidans nedåtriktade, Villkor 2 är att sprickorna ska ha sådan utbredning att de träffas av antingen det ena (nedåtriktade) eller det andra (uppåtriktade) borrhålet och att inträngningslängden för injekteringsmedlet är tillräcklig. Eftersom borrhålen alla är nedåtriktade med ungefärligen lika lutning, inses att en spricka som inte har den prognostiserade lutningen kan ”smita emellan” borrhålen. I det fall att hålen hade varit såväl nedåtriktade som uppåtriktade skulle chanserna till träff av sprickor med varierande orientering vara större, och det finns även en rimlig sannolikhet att sprickornas utbredning är minst lika med aktuellt avstånd mellan ansättningslinjerna d v s 3,6 m.

Den begränsade tunnelarean innebär att lutningen på borrhålen i den virdna skärmen blev begränsad. Borrhålsavståndet var 1,2 m. Borrhålen riktades så att de efter den totala längden 20 m skulle träffa intilliggande borrhåls projicerade startpunkt. 1,2 m på 20 m ger en vinkel om 3,5 grader. Toleranskravet för borringen om 4 % motsvarar 2 grader och vid ofördelaktig avvikelse kan lutningen reduceras till $3,5 - 2 = 1,5$ grader med fortfarande godkänt borrningsresultat. Med nedåt- och uppåtriktade hål blir den inbördes skillnaden mellan hålen 7 grader och den ur toleranssynpunkt acceptabla skillnaden $7 - 2 - 2 = 3$ grader. Frågan som skulle behöva utredas tydligare är hur stor betydelse vriden skärm har för resultatet och om det är värt besväret.

Borringen är av särskilt intresse för skärmar innanför kontur, även när borrhålen orienteras parallellt med tunneln. Den generellt tillåtna avvikelser är satt till 4%, vilket motsvarar 80 cm avvikelse i botten på ett 20 m långt hål. Borrhålen i skärm 4 skulle ansättas i en linje 60 cm från teoretisk tunnelkontur, för att inte negativt påverka berguttaget. För att uppnå den långa inträngning som behövdes för att uppfylla villkoret om tätad zon för skärmarna 5 och 6, behövdes en avsevärd höjning av såväl injekteringstid som tryck. För att i någon mån begränsa tryck och tid behövde också ansättningslinjen för injekteringshålen flyttas närmare teoretisk tunnelkontur, så att en större del av injekteringsmedlets spridning skulle vara i det kvarstående berget. Ansättningslinjen placerades 30 cm från teoretisk kontur.

Här inses att borringstoleransen 4% inte var relevant; med fullt ”utnyttjad” tolerans skulle borrhålens botten hamna 50 cm utanför kontur. De successiva inmätningarna i stuff av injekteringshålen i skärm 6 indikerar en medvetenhet om detta och en ambition att styra borringen med en marginal mot tunnelkontur – i stort sett samtliga hål har en avvikelse in mot mitten på tunneln. Förutom att hålen verkligen är ”innanför kontur” finns inga borrhål närmare teoretisk kontur än 30 cm vilket var på gränsen för vad som bedömdes acceptabelt för berguttaget. Med inmätta avvikelser konstateras dock också att verkligt avstånd till tunnelkontur ökat med upp till 30 cm – vilket innebär att utbredningen av den tätade zonen teoretiskt blev för liten – även om den fortfarande är betydligt större än den tätade zonen vid skärm 4.

En ytterligare notering är att ett borrhål i skärm 6 borrades ihop med ett borrhål från skärm 5. När använd skärmgeometri betraktas inses att risken för att detta ska ske torde vara stor särskilt med skärmar innanför kontur, och särskilt med vriden skärm.

Anledningen till att skärmar innanför kontur prövades, var det starka önskemålet från långsiktig säkerhetssynpunkt, att inte i onödan störa den kvarvarande bergmassan. Skärmar innanför kontur har nu visat sig kunna vara ett fungerande alternativ, även om frågorna om precision och borringstolerans förtjänar ytterligare överväganden. För att lyckas med skärmar innanför kontur behövs också en tydligare analys om vilken utbredning som krävs för den tätade zonen, där en stor utbredning kräver långa pumptider samt höga tryck. I och med det positiva resultatet vore det också intressant att jämföra produktionseffektiviteten i termer av injekteringsmedelsvolym, tid och kostnad.

8.6 Utrustning och material

8.6.1 Utrustningen

Kraven på borrutrustningen var ställda utgående från de höga kraven på borrning för berguttagen. Därmed fanns en utrustning som medgav mycket hög precision, men för injekteringen ställdes ej krav som var högre än de normalt förekommande. Behovet av en ökad borrhingsprecision diskuteras i avsnitt 8.5.

Med hänsyn till de höga trycken ställdes likaledes mycket höga krav på utrustningen, särskilt injekteringsmanschetterna, för att säkerställa arbetsutförandet såväl som arbetsmiljön. Den typ av utrustning som togs i bruk används normalt sett inte i Sverige. Anläggningens allmänt högt ställda krav på materialets långtidsbeständighet (korrosion) ledde till mycket höga kostnader för manschetter som ju är ett förbrukningsmaterial.

Injekteringsutrustningen specialanpassades för att klara den höga precision som krävdes speciellt för invägningen av olika komponenter för blandning av injekteringsmedlet. Efter inledande injektering och utvärdering blev det ändå uppenbart att det krävdes manuell invägning och tillsättning av superplastiseraren till cementbruket för att ge repeterbara blandningar. Ett generellt problem är precision vid flödesmätning av små flöden, när mätintervallet är stort. Därför gjordes också manuella registreringar vid såväl injektering som vattenförlustmätning. Omröraren stod på lastceller. Bestämningen gjordes genom att injekteringsmedlet/vattnet i omröraren vägdes före respektive efter injektering/vattenförlustmätning. Kontroller på injekteringsmedlena gjordes löpande.

8.6.2 Silica solen

Geltiderna var styrbara, detta bekräftades redan i korset, men även med den längre geltid (89 min) som användes i skärmarna 5 och 6 för att erhålla tillräckligt stor utbredning av den tätade zonen, kunde repeterbara geltider erhållas. Dock kan geltiderna variera när gelen kommer från olika batcher, så en kontroll av geltiden inför varje omgång och av varje leverans rekommenderas.

Ett av de ursprungligen uppsatta delmålen var att identifiera gränserna för silica sols användbarhet vad gäller hydrauliska sprickvidder. I projektet hanterade man emellertid frågan genom att anta att det fanns ett överlapp (uttryckt i hydraulisk sprickvidd) där både cementbaserat bruk och silica sol kunde användas.

8.6.3 Det cementbaserade bruket

Provningsen av det i fält blandade bruket gav repeterbara resultat när manuell invägning och tillsättning av superplastiseraren gjordes. En speciell arbetsinstruktion upprättades som beskrev i detalj hur superplastiseraren skulle hållas för att få de repeterbara resultaten.

Cementbruket har goda egenskaper för injektering där grundvattentrycket är högt. Om man utgår från villkoret för erosion genom bakåtlöde som valts att följa i detta projekt, jämför ekvationerna 8-9–8-15 och avsnitt 8.3, vore det dock en fördel att ha ett ännu styvare bruk (högre skjuvhållfasthet utan att viskositeten ökar), än det som givits. I övrigt finns få kommentarer om bruket, det har varit hanterbart och inget finns som tyder på att det ej fyllt sin funktion.

8.6.4 Hantering av ej förbrukat material

Avsevärda mängder silica sol fick kasseras, eftersom silica solens egenskaper varierar i tiden och en ny sats därför blandades för varje hål. Att minska mängden spill är givetvis angeläget och diskuteras i avsnitt 8.7.3, där volymsprognoser är ett spår att förbättra.

8.7 Övriga genomförandefrågor

8.7.1 Arbetsutförandet och resultatet

I projektet lades stor vikt vid att informera entreprenören om projektets syften och motiven till de krav som gällt. Projektet gav även utförarna i tunneln en utbildning i syfte att ge en förståelse för injekteringsdesignen, de valda injekteringsparametrarna och betydelsen av att utföra ett omsorgsfullt arbete, rapportera observationer och i detalj följa givna specifikationer. Det är i efterhand också uppfattningen att de icke i förväg specificerade åtgärder som vidtagits under pågående injektering har varit överenskomna med arbetsledningen och delprojektledare injektering.

Under projektet har vid flera tillfällen upptäckts borrhål som läcker efter injektering. Inflöde i tunneln från borrhål innebär att vatten från en fortfarande vattenförande spricka via borrhålet förs in i tunneln, dvs de sprickor som avsågs tätas har ej blivit täta. Ett exempel var det borrhål som identifierades och injekterades på nytt i samband med sulrensning i sektionen 10–34 m. Med injekteringen minskade inflödet med 0,3 l/min. Detta visar att det är väsentligt att omsorgsfullt injektera *varje* injekterings- och kontrollhål och att inte lämna några hål med tveksam tätning. Att fundera på hur man praktiskt måste genomföra en injektering där borrhålen står i kontakt med ytliga sprickor i tunnelvägg eller som ger återflöden är en viktig aspekt för lyckad injektering. Betydelsen på tätningseffekten vid ytliga sprickor med återflöden måste också utredas.

Huruvida ett enskilt läckande borrhål beror på något i själva handhavandet eller på att något i de uppsatta sambanden saknas eller inte duger är inte självklart att avgöra. Arbetsmoment som bedöms som avgörande är dock rengöring från borrhåll, avluftning och tömning av borrhålet på vatten. De metoder som traditionellt används för avluftning och tömning bedömdes vid de initiella testerna inte ge tillfredsställande resultat på aktuellt djup eller var mycket tidskrävande. Den utrustning och metod för vakuumpumpning som användes fortsättningsvis i projektet bedömdes som förhållandevis robust.

Redan i korset konstaterades att injekteringen i ett av borrhålen inte gett någon ordentlig borrhållsplugg. Den möjliga orsak som då pekades ut var att vattenflödet i den relativt stora sprickan (bedömd hydraulisk vidd 140–150 µm) kunde ha eroderat solen. Injektering skulle göras till dess att 2/3 av geltiden var uppnådd. Beslutet var att fortsättningsvis använda en effektiv injekteringstid på 4/5 av geltiden. I efterhand har information erhållits från tillverkaren att geltider understigande 15 minuter ej rekommenderas p g a oförutsägbarhet i gelningförloppet. Geltider ner mot 10 minuter användes vid vissa åtgärder. Vad som var den verkliga orsaken – eller kombinationen av orsaker – till att ingen borrhållsplugg bildades är oklart. Klart är dock att det i projektet fanns ett behov av såväl kortare som längre geltider än det som förutsattes när basdesignen gjordes.

Timingen vid utförandet är viktig. I projektet har eftersträvat att få avluftningen klar samtidigt som injekteringsmedlet är färdigblandat. Idealt skulle direkt därefter injekteringspumpen och registreringsutrustningen slås på. Vid korta geltider minskar toleransen för avvikelser från ovanstående. Samtidigt motsvarar tiden för tryckupbyggnaden till designtrycket en större andel av geltiden jämfört med vid längre geltider. Detta innebär att starten av den effektiva injekteringen (dvs pumpning med uppnått designtryck) kommer att förskjutas så att sluttidpunkten riskerar att hamna mycket nära uppnådd geltid. Hur silica solen påverkas av att pumpas vid uppnådd geltid är okänt. En sådan ”försenad” start innebär också att en större tidsandel av den effektiva injekteringen görs efter det att gelinduktionstiden uppnåtts och den kraftiga viskositetshöjningen inträtt, och även efter det att halva geltiden uppnåtts och inträngningen anses ha upphört helt. Försenad start innebär därför att inträngningslängden blir kortare. Denna minskning bedöms marginell vid längre geltider men får en betydande påverkan om t ex geltiden är 15 minuter och effektiv injektering startar efter 5 minuter, dvs då gelinduktionstiden redan är uppnådd.

Läckage genom sambandshål och ytläckage var ett problem främst för att man inte kom upp i designtryck. I sådana fall flyttades manschetter längre in, respektive manschetterades sambandshålet, varefter vid behov en ny sats med kortare geltid blandades och pumpades med lägre tryck. Vid redan korta geltider finns liten marginal för denna typ av åtgärder och det vore i lägen där korta geltider krävs intressant att försöka att redan före injektering genom vattenförlustmätning identifiera sambandshål och ytläckage och att vidta motsvarande åtgärder. Om detta skulle ge lyckat resultat skulle såväl en mer kontrollerad injektering som mindre spill bli resultatet.

Borningsprecisionen är såväl en utrustnings- som utförande fråga. Behovet av precision och betydelsen av att utförarna är medvetna om motivet till toleransen diskuteras i avsnittet om skärmtyp, avsnitt 8.5. Också i /Karlzén och Johansson 2010/ avhandlas arbetsutförandets betydelse för resultatet.

Slutligen konstateras att, trots projektets fokus på kommunikation och dokumentation, kan det brista. Ett exempel är skärm 2 vars längd diskuterades vid flera tillfällen. Det slutliga valet var att behålla basskärmens längd 20 m, men ändå kom skärmen att borras 25 m lång.

8.7.2 Arbetsmiljö

Vattentrycken var höga på aktuellt djup och i projektet användes höga pumptryck (upp till 10 MPa). Det var nödvändigt för att klara de dimensionerande inträngningslängderna, speciellt för de i projektet använda cementbaserade bruksblandningarna.

De specialbeställda manschetterna hade tre gummipackningar för att säkert kunna spännas upp mot berget och stå emot de höga trycken. Som en extra säkerhet kopplades manschetterna ihop med en stålkatting.

Trots specialutrustningen, krävdes ett medvetet och omdömesgillt agerande. De höga trycken medförde att berget ibland ”knakade”. För att minska risken för uttryckning av ytberget, fördes manschetterna längre in i borrhålet. Att inför applicering av höga injekteringstryck provtrycka berget genom att successivt gå upp i tryck under vattenförlustmätningen bedöms som en praktisk metod att diagnosticera stabiliteten.

Silica sol som sitter kvar på borrhållsväggarna bildar en glatt yta som avsevärt minskar manschetternas förmåga att stanna kvar i hålen. Under injektering uppstod problem med manschetter som började tryckas ut. Manschetter bör därför inte installeras i borrhål som tidigare injekterats med silica sol utan att en grundlig rengöring av borrhållsväggarna utförs, exempelvis med högtryckstvätt och iller (avloppsrensare).

De enda farliga egenskaper som nämns i säkerhetsdatabladet för silica sol är att materialet kan irritera ögonen. Silica sol är vattenlikt och också lätt att skölja av, till skillnad från cementbruk. Materialet uppfattas därför spontant lätt som harmlöst. Materialet består dock av nanopartiklar och det är viktigt att upprepat påminna om försiktighetsprincipen: Normal personlig skyddsutrustning ska användas och om silica sol kommer på huden ska huden tvättas noggrant.

8.7.3 Produktionseffektivitet

I projektet var resultat och förståelse i centrum och projektet innehöll inga effektivitetsmål. Det är emellertid uppenbart att för att ta metodiken i bruk i ett icke-forsknings-sammanhang, krävs omfattande effektivisering. En sådan effektivisering kräver en optimering av utförandet baserad på såväl en teoretisk som praktisk approach.

Betraktat ur ett tidsperspektiv är det främst två saker som har en tydlig potential för utveckling. Dels den tid som åtgår till ren pumpning, injekteringstiden. Dels det stora antalet kontroll- och injekteringshål som använts och de många mätningar som gjorts i dessa.

Rent fysikaliskt så krävs lång tid för ett injekteringsmedel att sprida sig i en liten spricka, och detta måste således accepteras i det fall ett mycket tätt berg eftersträvas. I projektet har dock hålen injekterats ett och ett. Genom att injektera flera hål samtidigt kan den totala injekteringstiden för en skärm minskas. Genom möjlighet till samtidig injektering erhålls ytterligare fördelar. När genom hydrauliska tester identifierade sambandshål injekteras samtidigt, förväntas täthetsresultatet bli bättre, spillet minskas och tid för extra rengöring av hål försvinna.

Mängden hål i varje skärm är stor och skärmen innehöll tre omgångar. Hålavståndet valdes utifrån principen att erhålla överlappande inträngning mellan intilliggande borrhål redan med första injekteringsomgången och de använda ”designfönstren” visade att detta skulle ha varit svårt att uppnå med större avstånd mellan borrhålen, dvs med färre borrhål. Den andra omgångens hål placerades där berget baserat på den första omgången bedömdes genomsläppligt. I och med den andra omgångens hål (split spacing) reducerades den önskvärda inträngningslängden till hälften. Därmed borde marginalen

till osäkerheter i designmetoden och variationen i bergmassan vara tillräcklig för att den tredje omgången skulle ha kunnat utelämnas – om detta inte hade varit ett forskningsprojekt. Besparingen skulle förutom ren borrning och injektering även ha inkluderat etableringen för respektive moment.

Om vi återgår till att beakta den andra omgågens hål, kan konstateras att tillämpningen och vidareutvecklingen av den sannolikhetsbaserade beräkningsmetodik för bedömning av lämpligt antal kontrollhål och resultat i dessa som presenteras i /Gustafson et al. 2010/, är av stort intresse för att reducera antalet hål. Den föreslagna metoden skulle också kunna användas för att baserat på ett visst antal sonderingshål avgöra om berget i aktuellt läge överhuvudtaget behöver injekteras. Noteras bör att det aldrig kommer att vara möjligt att ge svar i absoluta termer hur många sonderings- eller kontrollhål som krävs. I en tillämpning av metoden kommer det alltid att behövas en bedömning av vad som är en rimlig konfidensnivå – en bedömning som bör kopplas till hur stor konsekvensen blir om täthetsresultatet ej duger.

I injekteringshålen har gjorts flera typer av mätningar för att bedöma inflöde och injekteringsmedelsåtgång. En studie av resultaten från de olika metoderna för att undersöka vilka mätningstyper som bör prioriteras och om det är möjligt att reducera antalet mätningar bedöms intressant.

Ovanstående faktorer har givetvis stor inverkan också på det ekonomiska utfallet. Från ett rent miljö- och kostnadsperspektiv vore det mycket lönande att kunna minska mängden injekteringsmedel, särskilt silica sol, som kasseras. I projektet har viss korrelation kunnat konstateras mellan vattenförlustmätningarna och åtgången av silica sol. Till vilken nivå en korrelation faktiskt går att fastställa har dock inte undersökts. En annan ansats för att minska mängden kasserad silica sol vore att anpassa satsstorleken genom att blanda silica solen under pågående injektering. Nuvarande designmetodik och injekteringsteknik utgår dock från solens geltid och den föreslagna ansatsen skulle kräva betydande utveckling av teorierna och styrningen av ett redan komplicerat förlopp.

I avsnitt 8.5 diskuterades skärmtypen, ur perspektiven långsiktig säkerhet och resultat. Skärmar innanför kontur krävde långa tider och höga tryck och det finns en gräns när dessa blir så höga att de blir orimliga. Det vore därför intressant undersöka under vilka förhållanden som skärmar innanför kontur är ett verkligt alternativ i termer av tid och kostnad.

9 Slutsatser

9.1 Har målen uppnåtts?

Resultaten baseras på sex skärmar och 81 m tunnel. Inflödesmätningarna som refereras till nedan avser inläckaget innan efterinjekteringen utfördes. Viktigt att observera är att projektet också definierade ett antal förutsättningar för val av plats i bergmassan, vilket har beskrivits i förundersökningen/karaktäriseringen. Dessa förutsättningar inkluderade krav på antalet vattenförande sprickor, vinkeln under vilken tunneln mötte dessa sprickor samt ett vattentryck motsvarande trycket på djupet för ett framtida slutförvar. Nedan bedöms, för varje uppsatt delmål, huruvida delmålet uppfyllts.

1. Bekräftelse av silica sols användbarhet vid det vattentryck som är aktuellt för deponeringstunnlar i slutförvaret.

Injekteringen har till övervägande del utförts med silica sol. När sprickor med bedömt större sprickvidder ($> 150 \mu\text{m}$) har förelegat, har silica solinjekteringen föregåtts av injektering med cementbaserat injekteringsmedel. Resultaten visar att silica sol fungerar för tunneltätning på detta djup, inom redovisade gränser. Aktuellt vattentryck har legat på 3,0–3,5 MPa och tätade sprickor har haft en hydraulisk sprickvidd på 10 till mer än 200 μm . Flödet i kontrollhålen har gett en omedelbar information om ökad täthet i bergmassan.

2. Bekräftelse att det på förvarsdjup är möjligt att uppnå en täthet motsvarande ett maximalt inläckage på 1 l/min och 60 m tunnel med för slutförvaret tillämpbara bruk.

Inläckaget i mätvallarna mäts sektionvis, kravet på 1 l/min och 60 m tunnel proportioneras till sektionen. För sektion 10–34m och 50–81 m ligger inläckaget mätt i mätvallen under det maximalt tillåtna. För sektion 34–50 m ligger inläckaget över det maximalt tillåtna. I denna sektion har en felaktig dimensionering av injekteringen resulterat i en allt för kort inträngningslängd i sprickor med den dimensionerande minsta hydrauliska sprickvidden. Det totala inläckaget till tunneln är 1,5 l/min. Maximalt tillåtet inläckage för hela tunneln är 1,2 l/min.

- I. Bekräfta modeller för inträngning och att ökad täthet erhålls.

I den bergmassa som fälttestet utförts har en ökad täthet uppnåtts. Modellerna för inträngningslängd samt anpassning av utförandet med inträngningslängden som grund har gett eftersträvat resultat.

- II. Visa att täthet kan erhållas med injekteringsskärmar utanför konturen.

Skärmarna 1, 2 och 3 borrades utanför kontur. Det största inflödet före injektering mätt i kontrollhål i skärm 2 var 96 l/min. Ökad täthet har påvisats genom jämförelse mellan medianinflöde i kontrollhål före och efter injektering. Medianflödet i omgång 2A, alltså efter stuffinjektering var 7,7 l/min, motsvarande en mediantransmissivitet på $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Medianinflödet i omgång 2B, alltså efter injektering av omgång A, var 0,007 l/min. Detta innebär att tätheten i bergmassan ökade med en faktor 1 000 med en enda injekteringsomgång.

Även i skärm 3 erhöles ökad täthet. Tätheten från injekteringen av omgång 3A ökade här med en faktor 10. Med omgång 3B ökade tätheten ytterligare med knappt en faktor 10. Att täthetsökningen är mindre beror på att ursprungstätheten var högre. Det största inflödet före injektering mätt i kontrollhål i omgång 3A var 4,5 l/min och medianinflödet var 0,14 l/min motsvarande en mediantransmissivitet på $7 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ i utgångsläget.

För samtliga 3 skärmar utanför kontur var efter första omgångens injektering medianvärdet från log-normalfördelningarna lägre eller lika med 0.1 l/min.

Mätning av inläckaget efter injektering i mätvall nr 1, som ger inflödet till tunneln längs skärmarna 2 och 3, ger ett inflöde på 0,3 l/min, vilket är i stort samma som det tillåtna inflödet på 0,4 l/min för mätsträckan som är 23 m lång.

- III. Visa att täthet kan erhållas med injektering innanför konturen.

Skärmarna 4, 5 och 6 borrades innanför kontur. Ökad täthet i bergmassan mellan injekteringsborrhålen har påvisats genom jämförelse mellan medianinflöde i kontrollhål före och efter injektering, på samma sätt som för skärmarna utanför kontur. Den största ökningen av tätheten har injekteringen av stufhålen stått för; om dessa inräknas ökade tätheten totalt sett med en faktor mellan 250 och 1 500, sett till samtliga skärmar. Mellan injektering av omgång A ökade tätheten med en faktor som mest 20, och med injektering av omgång B ökade den med ytterligare en faktor som mest 10.

För samtliga skärmar ger den sista omgångens kontrollhål ett medianinflöde lika litet som för skärmarna utanför kontur (0,001 l/min). Kontrollhålen är dock belägna inom kontur och det intressanta är tätheten i bergmassan kring tunneln. Inflöde i mätvall är därför den enda metoden för verifiering av uppnådd täthet. Detta blev tydligt i tunnelsträckningen längs skärm 4, som beräkningsmässigt har en alltför liten utbredning av den tätade zonen i bergmassan kring tunneln. Sedan denna sträcka avgränsats med en extra mätvall konstaterades att inflödet 0,8 l/min var större än det tillåtna 0,3 l/min. Inflödet längs skärmarna 5 och 6 har uppmätts till 0,4 l/min, vilket är i stort samma som det tillåtna inflödet på 0,5 l/min för den 31 meter långa mätsträckan. Inflödet till tunneln längs skärm 5 och 6 kan också jämföras med inflödet mätt till borrhål före injektering. Det stufhålet längs skärm 5 som hade det största inflödet hade ett inflöde om 2,7 l/min och motsvarande för skärm 6 var 0,7 l/min.

IV. Visa att efterinjektering ger ökad täthet.

Efterinjekteringen avrapporteras i en kommande rapport.

V. Visa att dropp kan tätas bort.

Någon särskild droppätning är ej utförd i projektet.

VI. Identifiera gränserna för silica sols användbarhet vad gäller hydrauliska sprickvidder vid det grundvattentryck som är aktuellt för deponeringstunnlar i slutförvaret.

En gräns på hydraulisk sprickvidd har ej identifierats. I projektet har som förutsättning den övre gränsen för att använda silica sol satts till 150 µm räknat som hydraulisk sprickvidd. Sprickan med den största identifierade hydrauliska sprickvidd som säkert tätats med silica sol återfinns i omgång 3A, där ett inflöde om 4,5 l/min vid 3,5 MPa grundvattentryck motsvarar en hydraulisk sprickvidd på 70 µm. I omgång 2A fanns ett borrhål som gav 27 l/min, vilket motsvarar vidden 130 µm och för vilket silica sol valdes. Aktuellt hål ligger dock 3 m från ett hål som injekterades med cement mellan det att inflödet 27 l/min mätts och att hålet injekterades, varför det ej säkert går att säga att silica sol tätat den aktuella vidden.

VII. Identifiera de särskilda krav på genomförande och utrustning som krävs för att silica sol ska vara användbart.

Etapp 1 resulterade i en utrustningslista för projektet samt principer för hur injekteringen skall utföras. Utrustning som använts finns huvudsakligen på marknaden. Vissa anpassningar av utrustning har genomförts för projektet. Injekteringsutrustningen kompletterades med ett vågsystem med tre lastceller samt med utrustning för automatisk blandning av silica sol. Den automatiska blandningen för det cementbaserade bruket fick tas bort. Den manschetttyp som använts i detta projekt används sedan tidigare framförallt i Norge där höga injekteringstryck är vanliga. Avluftningen av borrhålen är av yttersta vikt både ur säkerhetsaspekt och som effektivitetsåtgärd. ”Yield stick” för att kontrollera flytgränsen på det cementbaserade bruket fungerade enligt kravspecifikationen.

VIII. Vinna övriga erfarenheter, bl a om genomförande och handhavande, som krävs för ett kontrollerat och effektivt utförande.

Arbets sättet som har använts ger kvalitetssäkrade data men kräver en stor arbetsinsats. Resultaten för varje injekteringskärm kan följas och uppdateringar utföras om det anses nödvändigt. För varje injekteringskärm har resultatet från kontrollhålen varit godkänt innan berguttaget startat.

Projektet är ett forskningsprojekt där stor vikt lades vid fullständiga och kvalitetssäkrade data samt ett noggrant specificerat utförande. Målet var att skapa underlag för förståelse för injekteringsprocessen och i förlängningen ge möjlighet för optimering och effektivisering i verklig produktion.

9.2 Övriga observationer och slutsatser

- Kärnborrhålen har kunnat användas för att förutsäga de hydrogeologiska förhållanden som krävs som indata för utförande av injekteringsdesignen. Läge och storlek på flöde samt hydraulisk sprickvidd har utvärderats. Den ursprungliga prognosen om förhållandena höll huvudsakligen, men indikationer finns att förekomsten av flacka sprickplan underskattats. Totalt sett synes detta dock ej ha inverkat menligt på det slutliga täthetsresultatet. Sättet att arbeta, med kontinuerliga kontroller och observationer med därpå följande åtgärder och anpassningar har varit nödvändigt för att uppnå de goda täthetsresultaten.
- Designmetodiken, som är baserad på den minsta hydrauliska sprickvidden som måste tätas mellan borrhålen i en skärm, har tillsammans med observationer och därpå vidtagna åtgärder fungerat. Utifrån beräkningar kunde borrhålsavstånd och inträngningslängd väljas. Det teoretiskt beräknade inflödet till tunneln stämmer bra med det faktiskt uppmätta. Geltiderna för silica sol har kunnat styras, vilket är en förutsättning för att kunna utföra ett kontrollerat arbete. Gelningsförloppet och hållfasthetstillväxten, särskilt vid korta geltider, samt nyttan av en högre initiell viskositet behöver belysas bättre.
- Bland projektets uppsatta mål finns inga mål som avser att visa på silica sols beständighet, men frågan är intressant. I föreliggande rapport redovisas inläckagemätningar fram till mars 2009. Aktuell mätperiod är dock för kort för att utifrån mätningarna kunna uttala sig om beständigheten hos den åstadkomna tätheten.
- Det cementbaserade bruket med lågt pH har fungerat, och repeterbarhet i blandningarna har kunnat uppnås. Möjligheten att ta fram ett styvare bruk (högre flytgräns, τ_0 utan att viskositeten, μ_g , ökar) bör undersökas, för att reducera injekteringstiden utan risk för erosion.
- Utrustningen som använts har inte fungerat helt enligt specifikationen vilket inneburit avsevärt mer manuellt arbete. Det bedöms inte ha påverkat resultat och noggrannhet i utförande, men har gjort analysen av injekteringsdata mer tidskrävande.
- Mätvallar är viktiga att bygga så snart drivningen tillåter, de ger det bästa värdet på verkligt inläckage till tunneln.
- Vid designen av skärmar innanför kontur måste inträngningslängden sättas så att tillräcklig inträngning sker i den kvarvarande bergmassan. Täthet i kontrollhålen är i denna geometri ej en lämplig kontrollmetod eftersom den mätta bergmassan sprängs bort.
- Särskilt för skärmar innanför kontur är borrhålsprecisionen viktig. Dels för att erhålla en tillräcklig utbredning av den tätade zonen, dels för att inte störa konturen vid berguttaget. Med satt tolerans om 4 % borrhålsavvikelse, 20 m långa borrhål, borrhål som går parallellt med tunnelkontur och en ansättningslinje som ligger 30 cm från teoretisk kontur, kan borrhålen hamna 50 cm utanför kontur, med innehållet toleranskrav.
- Bemanningen på stuff underskattades kraftigt i projektstarten. En heltidsresurs krävdes på stuff för att dokumentera och leda injekteringsarbetet.
- Fundamenten för injekteringsdesign har konstaterats vara teoretisk förståelse, erfarenhet samt ett upplägg för utförandet som innefattar tillämpning av observationsmetoden. Det förtjänar att påtalas att även systemet för ersättning till injekteringsentreprenören måste vara konstruerat för en situation där förundersökningen inte ger en helt korrekt bild och anpassningar sker efter gjorda observationer. Om fel incitament finns inbyggda i ersättningsformen kan såväl projektekonomi, framdrift som det slutliga täthetsresultatet äventyras.

9.3 Rekommendationer för fortsatt arbete

Det är viktigt att fortsätta öka kunskapen om injektering med silica sol för fintätning på stort djup. SKB har i detta hänseende en unik uppgift. Det är endast SKB som kommer att kunna utveckla denna teknik vidare inför byggandet av slutförvaret. Det är även viktigt att fortsätta den generella utvecklingen av injektering under stora tryck, vilket även inkluderar cementbaserade injekteringsbruk. Projektet har identifierat följande områden som måste vidareutvecklas:

Produktionsanpassning, vilket inkluderar produktionsanpassning av injekteringskonceptet, kontrollmetoder, verifiering av uppnådda resultat, utveckling av utrustning (flerhålsinjektering, pumpar, manschetter, avluftning m m).

Kriterier/metoder för att kunna veta om berget är/har blivit tillräckligt tätt. Detta möjliggör en effektivisering av borrhåls- och injekteringsinsatsen.

Går det att prognostisera om förinjektering krävs? Kan förinjektering slopas vid tätt berg och efterinjektering utföras om bedömningen var felaktig?

Underlag för att bedöma åtgång av injekteringsmedel.

Den databas som är framtagen för detta projekt bör användas för att öka förståelsen kring injektering på stort djup. Underlaget är noggrant framtaget och omfattande vilket möjliggör analyser av specifika injekteringsborrhål med tillhörande sprickplan. Vidare kan databasen ytterligare belysa problematiken kring inflödesprognoser samt utfall då inflödet ur injekteringsborrhålen är mätt både med stängda manschetter samt med alla manschetter öppna samtidigt. Detta påverkar också trycksituationen vid stufv vilket i sin tur påverkar inflödet.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer.

- Alberts C, Gustafson G, 1983.** Undermarksbyggande i svagt berg – Del 4 Vattenproblem och tätningsåtgärder. BeFo Rapport 106, Stiftelsen Bergteknisk Forskning.
- Andersson P, Byegård J, Dershowitz B, Doe T, Hermansson J, Meier P, Tullborg EL, Winberg A, 2002.** Final Report of the TRUE Block Scale Project, 1. Characterisation and model development. SKB TR-02-13, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Axelsson M, 2009.** Prevention of Erosion of Fresh Grout in Hard Rock. Doktorsavhandling. Ny serie. 2915. Chalmers tekniska högskola.
- Bodén A, Sievänen U, 2005.** Low-pH injection grout for deep repositories – Summary report form a cooperation project between NUMO (Japan), Posiva (Finland) and SKB (Sweden). SKB R-05-40, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Butron C, Axelsson M, Gustafson G, 2007.** Silica Sol for Rock Grouting – Tests on Mechanical Properties. Report – Department of Civil and Environmental Engineering, Chalmers University of Technology, ISSN 1652-9162; nr 6.
- 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.
- Carlsson L, Gustafson G, 1991.** Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik. Rapport R:66. Byggforskningsrådet.
- Cooper H H, Jacob C E, 1946.** A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history. American Geophysical Union Transactions 27:526-534.
- Doe T W, Geier J E, 1990.** Interpretation of Fracture System Geometry Using Well Test Data. SKB, Stripa project Technical Report 91-03, Stockholm.
- Eklund D, 2002.** Penetrability for cementitious injection grouts. Licentiatavhandling. Institutionen för Jord- och Bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan.
- Emmelin A, Brantberger M, Eriksson M, Gustafson G, Stille H, 2007.** Rock grouting – Current competence and development for the final repository. SKB R-07-30, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Eriksson M, Stille H, 2005.** Cementinjektering i hårt berg. SveBeFo Rapport K22.
- Eriksson M, 2002.** Prediction of grout spread and sealing effect. A probabilistic approach. Doktorsavhandling. Institutionen för Jord- och Bergmekanik, Kungliga Tekniska Högskolan.
- Fransson Å, 2002.** Nonparametric method for transmissivity distributions along boreholes. Ground Water, Vol. 40, no. 2, pp 201–204. Academic Research Library.
- Fransson Å, Gustafson G, 2006.** Efterinjektering: Inläckageprognos och design, förslag till analys. Svebefo rapport 75. Stockholm.
- Fransson Å, 2008.** Grouting design based on characterization of the fractured rock – Presentation and demonstration of a methodology. SKB R-08-127, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Funehag J, 2005.** Sealing of Narrow Fractures in Hard Rock – A Case Study in Hallandsås, Sweden. Tunneling and Underground Space Technology, incorporating Trenchless Technology Research, 19 (4–5) s H12.
- Funehag J, Fransson Å, 2005.** Sealing Narrow Fractures with a Newtonian Fluid: Model Prediction for Grouting Verified by Field Study. Tunneling and Underground Space Technology, 21 492–296.
- Funehag J, Gustafson G, 2005.** Grouting with silica in the Törnskog Tunnel – Grouting design for silica sol in full production. Report 2005:12. Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola.
- 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.

- Funehag J, 2008.** Injekteringen av TASS-tunneln – Delresultat t o m september 2008. SKB R-08-123, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Gustafson 1986.** Geohydrologiska förundersökningar i berg. Stiftelsen Bergteknisk Forskning, BeFo 84:1/86. Stockholm.
- Gustafson G, Hernqvist L, Fransson Å, Funehag J, 2010.** The use of proxy parameters in pre-investigation, design and construction of tunnels with application to grouting. Bergmekanikk i Norden, Kongsberg juni 2010.
- Gustafson G, 2009.** Hydrogeologi för bergbyggare. T2:2009. Forskningsrådet Formas.
- Gustafson G, Funehag J, 2008a.** Design of grouting with silica sol in hard rock – New methods for calculation of penetration length, Part I. Tunnelling 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. Tunnelling and underground space technology, 23 (2008) (1) s 9–17.
- Gustafson G, Fransson Å, 2005.** The use of the Pareto distribution for fracture transmissivity assessment. Hydrogeology Journal, 1435–0157.
- Gustafson G, Stille H, 2005.** Stop criteria for cement grouting. Felsbau, Vol. 23, No. 3, pp. 62–68.
- Gustafson G, Fransson Å, Funehag J, Axelsson M, 2004.** Ett nytt angreppssätt för bergbyggare och analysprocess för injektering. Väg- och vattenbyggaren, nr 4, SVR. Stockholm.
- Gustafson G, Krasny J, 1994.** Crystalline Rock Aquifers – Their Occurrence, Use and Importance. Hydrogeology Journal, Vol. 2, Issue 2, pp. 64–75. Springer Link.
- Hardenby C, Sigurdsson O, Hernqvist L, Bockgård N, 2008.** The TASS-tunnel project “Sealing of tunnel at great depth”, Geology and hydrogeology – Results from the pre-investigations based on the boreholes KI0010B01, KI0014B01 and KI0016B01. SKB IPR-08-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hardenby C, Sigurdsson O, 2010.** Äspö HRL, The TASS-tunnel, Geological mapping. SKB R-10-35, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Hernqvist L, Fransson Å, Gustafson G, Emmelin A, Eriksson M, Stille H, 2009.** Analyses of the grouting results for a section of the APSE tunnel at Äspö Hard Rock Laboratory. International Journal of Rock Mechanics and Mining Services, vol 46, issue 3, April 2009.
- Hernqvist L, 2009.** Characterization of the fracture system in hard rock for tunnel grouting. Licentiatavhandling. Institutionen för geologi och geoteknik, Chalmers tekniska högskola.
- Karlzén R, Johansson E, 2010.** Slutrapport från drivningen av TASS-tunneln/ SKB R-10-31, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kobayashi S, Stille H, Gustafson G, Stille B, 2008.** Real Time Grouting Control Method. Development and application using Äspö HRL data. SKB R-08-133, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- de Marsily G, 1986.** Quantitative Hydrogeology. Groundwater Hydrology for Engineers. Academic Press, Inc., Orlando, USA.
- Meier P M, Carrera J, Sánchez-Vila X, 1999.** A numerical study on the relationship between transmissivity and specific capacity in heterogeneous aquifers. Ground Water, Vol. 37, No. 4, July-August 1999.
- Olsson M, Markström M, Pettersson A, Sträng M, 2009.** Examination of the Excavation Damaged Zone in the TASS tunnel, Äspö HRL. SKB R-09-39, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Rhén I, Gustafson G, Wikberg P, 1997.** Äspö HRL – Geoscientific evaluation 1997/4. SKB TR 97- 05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Sievänen U, Raivio P, Vuorinen U, Hansen L, Norokallio J, Syrjänen P, 2006.** Optimisation of the Technical Properties of Low pH Cementitious Injection Grout, Laboratory tests and pilot field test 3. Working Report 2006-85. Posiva Oy.
- SS-EN 1997-1.** Eurokod 7: Dimensionering av geokonstruktioner – Del1: Allmänna regler. Swedish Standards Institute.

Gradienter kring oinjekterade och injekterade tunnlar

B1.1 Problemställning

Grundvattentrycket utanför en tunnel orsakar en hydraulisk gradient in mot tunneln. Det strömmande grundvattnet kan erodera färskt injekteringsbruk och grundvattentrycket kan pressa bruket tillbaka in i tunneln (Axelsson 2009). Båda problemen kan karakteriseras med utgångspunkt från gradienten hos det strömmande grundvattnet i tunnelns närhet. I det följande härleds några enkla uttryck för gradienten kring och framför en tunnel baserade på kontinuumteori. Dessa kan användas som tumregler för analys av erosion och återflöde av färskt injekteringsbruk. Vidare ges en rekommendation av lämpliga strategier för skärmdesign och injektering för att minska risken för brukserosion baserat på den utförda analysen.

B1.2 Den hydrauliska gradienten

Den hydrauliska gradienten, dh/dl , är ett mått på energiförlusten längs ett strömrör (flödesbana) i ett grundvattenflöde. Energinivån mäts här som en potential, h , som fysiskt är lika med grundvattennivån enligt:

$$h = p_w/\rho_w g + z \quad (\text{B1-1})$$

Här är p_w grundvattentrycket i en mätpunkt och ρ_w vattnets densitet.

Den hydrauliska gradienten definieras av Darcy's lag (se exempelvis /Fetter 1988/):

$$Q = -dh/dl \cdot K \cdot A \quad (\text{B1-2})$$

Här är Q flödet genom tvärsnittet A och K är den hydrauliska konduktiviteten. Det kan påpekas att den hydrauliska gradienten är dimensionslös [m/m] och att det *inte* är gradienten som driver flödet. Den är i stället motsatsen – ett mått på energiförlusten längs flödesbanan. Det är bara grundvattennivåerna (-trycken) och styrkan hos källorna och sänkorna som driver flödet.

B1.3 Inflöden och gradienter kring en tunnel

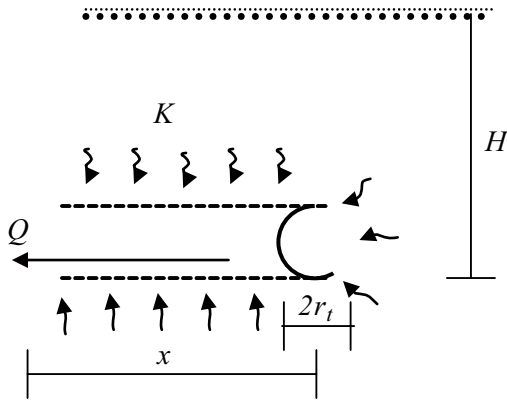
Inläckaget till tunneln uppträder dels som ett radiellt tvådimensionellt (2D) flöde längs tunneln och ett nära sfäriskt (3D) flöde in mot drivningsfronten, se figur B1-1. Det totala flödet in mot tunneln kan då delas upp i ett inflöde Q_T för sträckan x och ett inflöde från tunnelns front Q_F . Flödet till tunneln längs x är $Q_T = q \cdot x$. Här är q [$\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ eller $\text{l}/\text{min} \cdot 100 \text{ m}$] inflödet per längdenhet. Vanligen anges det tillåtna inläckaget för tunneln som ett gränsvärde för q .

Vid tunnelns front sker en koncentration av flödet som medför att inflödet, Q_F , här blir proportionsvis ganska stort. Detta ger därmed höga gradienter som kan ge erosion av injekteringsbruket. Denna analys kommer därför att delas upp i två delar, ett fall som gäller inflödet till en redan utsprängd tunnelsträcka, dels ett fall som gäller tunnelns front. I båda fallen analyseras situationen både med och utan injektering.

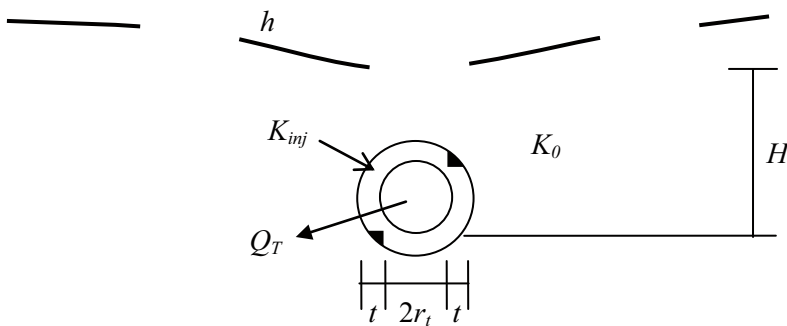
En viktig följd av förinjektering och stuffinjektering är att vi reducerar gradienterna utanför den injekterade zonen där de stora sprickorna är öppna och det färska injekteringsbruket lätt kan erodera. I den injekterade zonen ökar vi gradienterna men om injekteringen är väl utförd återstår endast små sprickor där bruket inte eroderas så lätt.

B1.3.1 Inflödet till en tunnelsträcka

Grundvatteninflödet till en tunnel kan till stora delar behandlas analogt med inflödet till en horisontell brunn, se figur B1-2.



Figur B1-1. Inflödet till en tunnel under utsprängning.



Figur B1-2. Inflödet kring en injekterad tunnel.

För att förenkla problemet antar vi att tunneln har ett cirkulärt tvärsnitt med radien $r_t = \sqrt{A/\pi}$, där A är tvärsnittsarean. En tunnel har vanligtvis inte cirkulärt tvärsnitt vilket ger en viss, men i stort sett försumbar skillnad i inflödesmönstret jämfört med en brunn. Injekteringen antas ha tjockleken t . Den hydrauliska konduktiviteten antas vara K_0 i berget och i den tätade zonen K_{inj} . För sträckan x i figur B1-1, får vi därmed transmissiviteterna $T_0 = K_0 \cdot x$ och $T_{inj} = K_{inj} \cdot x$. Vi antar vidare att avsänkning av grundvattenytan, h , är liten och vilande grundvatten nivå över tunneln är H . Avsänkning av vattentrycket vid tunnelns botten motsvarar därför i stort sett förläggingsdjupet, H .

Vid inflöde till en tunnel (eller en brunn) kan avsänkningskillnaden, s_{1-2} , mellan två punkter på avstånden r_1 och r_2 beräknas med Thiems brunnsekvation /Thiem 1906/:

$$s_{1-2} = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) \quad (B1-3)$$

För tunneln kan vi alltså beräkna avsänkning från grundvattenytan till utsidan av injekteringen som:

$$s_{H-(r+t)} = \frac{Q_T}{2\pi T_0} \cdot \ln\left(\frac{2H}{r+t}\right) \quad (B1-4)$$

Här är $2H$ influensradien beräknad med spegelbrunnsteori /Carlsson och Gustafson 1984/. Avsänkning från injekterings utsida till tunnelväggen blir:

$$s_{t-r} = \frac{Q_T}{2\pi T_{inj}} \cdot \ln\left(\frac{r+t}{r_t}\right) \quad (B1-5)$$

Slutligen brukar man lägga till en ytterligare avsänkning nära tunnelväggen som beror på en kombination av hydrokemiska utfällningar, luftinträde i sprickorna och bergdeformationer. Denna kvantifieras vanligen med en skinfaktor, ξ så att:

$$s_\xi = \frac{Q_T}{2\pi T_0} \cdot \xi \quad (\text{B1-6})$$

Summerar vi dessa termer får vi hela avsänkningen som är lika med avståndet upp till grundvattenytan eftersom det är atmosfärstryck i tunneln.

$$s_{tot} = H = \frac{Q_T}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{T_0} \ln\left(\frac{2H}{r_{t+t}}\right) + \frac{1}{T_{inj}} \ln\left(\frac{r_t+t}{r_t}\right) + \frac{\xi}{T_0} \right] \quad (\text{B1-7})$$

Efter en del räknande får man fram den numera ganska välkända inflödesekvationen för en tunnelsesträcka som:

$$Q_T = \frac{2\pi T_0 H}{\ln(2H/r_t) + (T_0/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1+t/r_t) + \xi} \quad (\text{B1-8})$$

Skrivet på denna form finner man att den första termen i nämnaren representerar tunneln utan injektering, den andra inverkan av injekteringen samt den tredje övrigt inflödesmotstånd. Speciellt gäller att dålig tätning, $T_0/T_{inj} \approx 1$, eller liten tjocklek på den injekterade zonen, $t/r_t \approx 0$, inte medför någon minskning av inläckaget.

Vidare har vi antagit att vi har ett 2D flödesmönster in mot tunneln så att vi kan välja en godtycklig längd på den sträcka, x , vi analyserar. (Speciellt kan vi välja den så kort att transmissiviteten endast representerar en spricka eller en sprickzon eftersom flödet längs tunneln är noll i och med 2D-antagandet).

B1.3.2 Gradienten kring tunneln

Ett högt tryck på ett kort avstånd från tunneln ger en hög gradient och vice versa. Gradienten påverkas också av om tunneln är injekterad eller oinjekterad. Tunnelstuffens framdrift ger också en viss påverkan eftersom det tar ett tag att uppnå ett stationärt tillstånd. Den följande analysen baseras på ett antagande om stationärt flöde. För att beskriva detta kan Darcys lag användas där gradienten, $-dh/dr$ på ett avstånd r från tunnelcentrum är:

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{Q_T}{2\pi T(r) \cdot r} \quad (\text{B1-9})$$

Kombineras ekvationerna B1-8 och B1-9 får vi:

$$-\frac{dh}{dr} = \frac{H}{r} \cdot \frac{T_0}{T(r)} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_t) + (T_0/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1+t/r_t) + \xi} \quad (\text{B1-10})$$

Man kan alltså speciellt notera att gradienten enbart är en funktion av randvillkoren och tätningsfaktorn T_0/T_{inj} . Detta gör ekvationen förhållandevis robust.

B1.3.3 Gradienten kring en oinjekterad tunnel

För den oinjekterade tunneln har gradienten sitt största värde omedelbart innanför tunnelväggen, $r \approx r_t$. Vidare gäller $T(r) = T_0 = T_{inj}$. Detta ger:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) = \frac{H}{r_t} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_t) + \xi} \quad (\text{B1-11})$$

B1.3.4 Gradienter kring en injekterad tunnel

I detta fall är två punkter av intresse, dels omedelbart innanför tunnelväggen i den injekterade zonen, $r \approx r_t$, samt dels omedelbart utanför den injekterade zonen, $r \approx r_t + t$. I den injekterade zonen finner vi:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) = \frac{H}{r_t} \cdot \frac{T_0}{T_{inj}} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_t) + (T_0/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1+t/r_t) + \xi} \quad (\text{B1-12})$$

I det oinjekterade berget omedelbart utanför zonen blir gradienten:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t + t) = \frac{H}{r_t + t} \cdot \frac{1}{\ln(2H/r_t) + (T_0/T_{inj} - 1) \cdot \ln(1+t/r_t) + \xi} \quad (\text{B1-13})$$

I båda fallen är gradienten beroende av tätningseffekten, T_0/T_{inj} . Av ekvationerna B1-12 och B1-13 följer att för att en injektering ska anses lyckat bör den vara i storleksordningen 10–100. Detta beror på att betydelsen av tätningsfaktorn, T_0/T_{inj} , i nämnaren annars blir försumbar. Av detta följer att gradienten i den injekterade zonen vanligtvis är mångdubbelt högre än strax utanför.

B1.3.5 Parametervärden och tumregler

För att överslagsmässigt beräkna gradienterna kring tunneln kan ekvationerna förenklas. Detta redovisas dels för en typisk transport/kommunikationstunnel på måttligt djup, dels för en tunnel i ett slutförvar. I båda fallen förutsätts att inverkan från andra tunnlar är ringa till ingen alls samt att för den injekterade tunneln $T_0/T_{inj} > \ln(2H/r_t) + \xi$. Typiska värden för parametrarna ges i tabell B1-1.

Tabell B1-1. Typiska värden för tunnelgeometrin för beräkning av tumregler.

Tunnel	H [m]	r_t [m]	$\ln(2H/r_t)$ [-]	t [m]	$\ln(1+t/r_t)$ [-]	ξ [-]
Trafiktunnel	50	5	3,0	10	1,1	5
Förvarstunnel	450	3	5,7	5	1,0	5

Som man finner i tabellen medför ln-funktionen att termerna i nämnaren i ekvationerna B1-9–B1-11 inte förändras särskilt mycket för de två fallen.

B1.3.5.1 Gradienter vid de oinjekterade tunnlarna

Värdena i tabellen ger för den oinjekterade trafiktunneln:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) \approx \frac{H}{8r_t} \quad (\text{B1-14})$$

För förvarstunneln finner vi:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) \approx \frac{H}{11r_t}$$

Trots de stora skillnaderna i förläggningsdjup och tunnelgeometri är skillnaderna mellan ekvationerna små. Detta motiverar att de förenklade uttrycken kan användas som utgångspunkt för injekteringsdesign.

B1.3.5.2 Gradienter vid de injekterade tunnlarna

För att injektering ska ha effekt måste en tätningsfaktor, T_0/T_{inj} , som är i storleksordningen 50–100 uppnås. Med en tätningsfaktor på 10 ger ekvation nr 8 ovan, att skillnaden mellan oinjekterad och injekterad tunnel hälften ett halverat inläckaget. Med en faktor på hundra minskar inläckaget med en

faktor 12; alltså för en lyckad injektering bör T_0/T_{inj} åtminstone vara av en storleksordning (50-100). Av detta kommer den dominerande termen i nämnaren av ekvationerna B1-10 och B1-11 att vara just tätningsfaktorn. Detta innebär att vi kan sätta upp samma uttryck för båda tunneltyperna. I den injekterade tunneln kan vi uppskatta gradienten omedelbart innanför tunnelväggen till:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) \approx \frac{H}{r_t} \quad (\text{B1-15})$$

Omedelbart utanför den injekterade zonen blir gradienten:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t + t) \approx \frac{H}{r + t} \cdot \frac{K_{inj}}{K_0} \quad (\text{B1-16})$$

Av ekvationerna framgår att gradienten i den injekterade zonen ökas en storleksordning och minskas med en storleksordning omedelbart utanför jämfört med den oinjekterade tunneln.

B1.3.6 Betydelse för injekteringsdesign och utförande

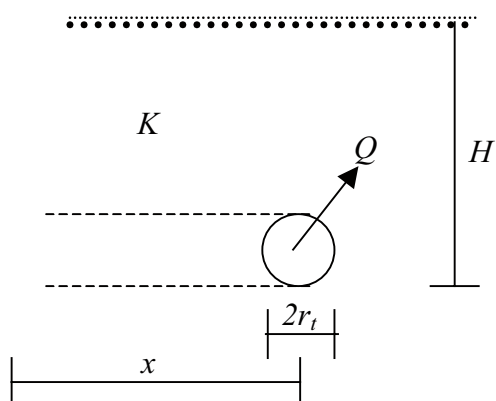
Gradienterna runt tunneln har särskilt stor betydelse för efterinjektering. Problemet är att färskt injekteringsbruk riskeras att brytas ned genom läckvatteninflöde och man får återflöden in i tunneln. För båda problemen är gradienten en av de styrande faktorerna. En annan viktig faktor är sprickvidden i de nyligen injekterade sprickorna. För att undvika erosion gäller:

$$-\frac{dh}{dx} \cdot b < \frac{2\tau_0}{\rho_w g} \quad (\text{B1-17})$$

Här är b sprickvidden och τ_0 flytgränsen hos det färskta injekteringsbruket och ρ_w vattnets densitet. En hög gradient kan alltså kompenseras av en liten sprickvidd och vice versa. I den tidigare injekterade zonen återstår, om injekteringen är väl utförd, endast små sprickor vilket medför att erosionsrisken är måttlig. Utanför den tidigare injekterade zonen är gradienten mycket lägre vilket innebär att risken för erosion här är låg. Analysen ovan visar att förinjektering bör vara framgångsrik och den metod man främst bör använda. Efterinjektering bör inrikta sig mot gränsszonen mellan omgivande berg och tidigare injektering, alltså strax utanför den tätade zonen för att nå bäst framgång. En alltför ytlig manschetsättning medför risk för återflöden och brukserosion i den sprängskadade zonen.

B1.4 Inflödet till tunneln

När läckage uppträder mot en tunneln kan vi anta att området kring stoffen kan approximeras med en halvsfär med samma radie som tunneln, se figur B1-3.



Figur B1-3. Inflödet till området kring tunneln.

Om vi känner gradienten, $-dh/dr$, på avståndet r från helsfären kan inflödet beräknas som:

$$Q = -4\pi r^2 \cdot dh/dr \cdot K \quad (\text{B1-18})$$

Här är K bergets hydrauliska konduktivitet. Om vi på samma sätt som i ekvation B1-5 integrerar grundvattennivån från stoffen, $h = 0$, till grundvattenytan, $h = H$, och radien från tunnelradien, r_t , till influensradien R_0 får vi:

$$H = \int_{r_t}^{R_0} \frac{Q}{4\pi K} \cdot \frac{dr}{r^2} = \frac{Q}{4\pi K} \cdot \left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{R_0} \right) \cong \frac{Q}{4\pi K r_t} \quad (\text{B1-19a})$$

Detta gäller eftersom $R_0 \approx 2H > r_t$. Vi kan alltså beräkna flödet som:

$$Q \cong 4\pi K H r_t \quad (\text{B1-19b})$$

Här förutsätts att den vänstra halvan av helsfären kan ersättas av den redan utsprängda tunneln.

B1.4.1 Gradienter vid en oinjekterad front

Kombinerar vi ekvationerna B1-18 och B1-19b finner vi att gradienten vid en oinjekterad tunnelfront blir:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) \cong \frac{H}{r_t} \quad (\text{B1-20})$$

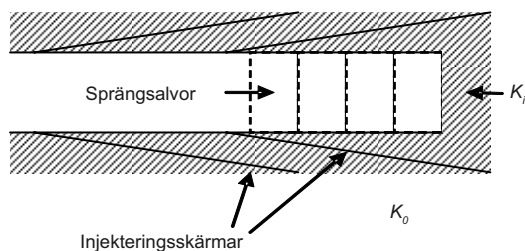
Man kan konstatera att gradienten vid fronten är ungefär en storleksordning större än längs en oinjekterad tunnel. Risken för brukserosion och återflöden är därmed i motsvarande grad större.

B1.4.2 Gradienter vid en injekterad tunnelfront

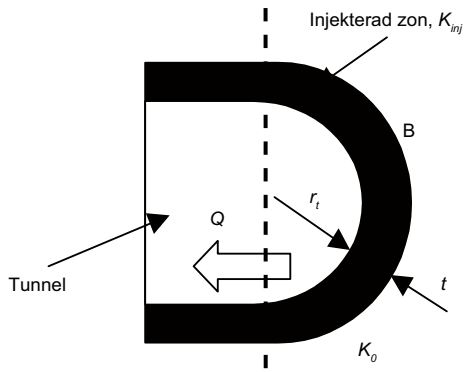
En injekterad tunnel omges av en zon där den ursprungliga hydrauliska konduktiviteten, K_0 , har reducerats till K_{inj} , se figur B1-4.

Vi approximerar området kring stoffen med en halvsfär med tjockleken t på den injekterade zonen. Radien på tunneln är r_t och tjockleken på zonen t , enligt figur B1-5. Två punkter har speciellt intresse:

- A. Omedelbart innanför tunnelfronten i den injekterade zonen. Här är gradienten högst men de största spräckorna är injekterade vilket gör att motståndet mot erosion och återflöde är bättre.
- B. Omedelbart utanför den injekterade zonen i den opåverkade bergmassan.



Figur B1-4. Den tätade zonen runt en förinjekterad tunnel.



Figur B1-5. Inflödet till en injekterad tunnelstuff.

Inflödet till halvsfären kan enligt ekvation B1-19b beräknas som:

$$Q = 2\pi r_t^2 \cdot -\frac{dh}{dr}(r_t) \cdot K_{inj} = 2\pi(r_t + t)^2 \cdot -\frac{dh}{dr}(r_t + t) \cdot K_0 \quad (B1-21)$$

Om vi betecknar avsänkningen från grundvattenytan till över den injekterade zonen med Δh_B och avsänkningen genom den injekterade zonen med Δh_A kan vi i analogi med ekvation B1-4 och B1-5 beräkna:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) = \frac{H}{r_t} \cdot \frac{K_0(r_t + t)}{K_0 t + K_{inj} r_t} \quad (B1-22a)$$

$$-\frac{dh}{dr}(r_t + t) = \frac{H}{r_t + t} \cdot \frac{K_t r_t}{K_0 t + K_{inj} r_t} \quad (B1-22b)$$

Också här gäller $2H \gg r_t + t$. Summan av dem blir hela avsänkningen H vilket ger:

$$H = \Delta h_A + \Delta h_B = \frac{Q}{2\pi K_0} \left[\frac{K_0}{K_{inj}} \cdot \left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_t + t} \right) + \frac{1}{r_t + t} \right] \quad (B1-22c)$$

Detta kan utvecklas till:

$$Q = 2\pi K_0 H \cdot \frac{K_{inj}(r_t + t)r_t}{K_0 t + K_{inj} r_t} \quad (B1-23)$$

Insatt i ekvation B1-21 får vi:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) = \frac{H}{r_t} \cdot \frac{K_0(r_t + t)}{K_0 t + K_{inj} r_t} \quad (B1-24a)$$

$$-\frac{dh}{dr}(r_t + t) = \frac{H}{r_t + t} \cdot \frac{K_t r_t}{K_0 t + K_{inj} r_t} \quad (B1-24b)$$

B1.4.3 Parametervärden och tumregler

På samma sätt som för gradienterna kring tunneln kan vi med i princip samma antaganden, $K_{inj} < K_0$, beräkna approximativa värden för gradienterna vid stuff. För gradienten omedelbart innanför bergytan får vi:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) \approx \frac{H}{r_t} \cdot \left(1 + \frac{r_t}{t} \right) \quad (B1-25a)$$

Om $r_t \approx t$ som brukar vara vanligt får vi:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t) \approx 2 \frac{H}{r_t} \quad (\text{B1-25b})$$

Det kan vara intressant att se att gradienten i berget omedelbart innanför stuff inte går mot oändligheten utan enbart i stort sett fördubblas.

Omedelbart utanför den injekterade zonen blir gradienten med samma antaganden:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t + t) = \frac{H}{r_t + t} \cdot \frac{K_{inj} r_t}{K_0 t} \quad (\text{B1-26a})$$

Här ser vi att tätningsfaktorn, K_0/K_{inj} har ett mycket stort inflytande. Om vi på samma sätt som ovan antar att $r_t \approx t$ finner vi:

$$-\frac{dh}{dr}(r_t + t) \approx \frac{H}{r_t} \cdot \frac{K_{inj}}{2K_0} \quad (\text{B1-26b})$$

B1.4.4 Betydelse för injekteringsdesign och utförande

Som framgår av analysen ovan är gradienterna vid en tunnelfront högre än de som råder kring tunneln när fronten passerat. Det överensstämmer med erfarenheten att återflöden av injekteringsmedel till stuff inte är ovanligt och att det är speciellt vanligt om grundvattentrycket är högt. För att undvika detta kan man utföra stuffinjektering. Som ekvation B1-26b visar är detta ett effektivt sätt att minska gradienterna vid förinjektering då man får en kontinuerlig sluten injekteringszon runt både tunnel och front, se figur B1-4. Speciellt viktigt är detta vid injektering med bruk med låg flytgräns eller silica sol. Tekniken för att göra detta är att vid varje stuff inleda med injektering av ett begränsat antal stuffhål (3–4) som också kan användas som sondhål för att avgöra hur injekteringen av skärmen skall genomföras (val av injekteringsklass). På detta sätt finns en effektiv stufftätning när nästa skärm skall påbörjas.

Utdrag ur ”Arbetsinstruktion injektering skärm 3”

Författare: Henrik Svensson

B2 Arbetsmetod

1. Gerry Johansson skickar ritning på injekteringsborrplan till Jens Andersson, Bergteamet. Jens skapar borrplan som skickas till Stellan vilken laddar ner denna på minneskort och lämnar till Björn och Daniel.
2. Borra stuffinjekteringshål.
3. Samtliga borrhål renspolas från borrhåll med borrhåll direkt efter borring. Hål spolats tills spolvattnet är fritt från föroreningar alternativt under minst en minut med fullt vattenflöde.
4. Inmätning av borrhålen. Henrik kontakter Gerry Johansson och bestämmer lämplig tid för inmätning.
5. Manschettering av borrhålen. Manschetter spänns upp med dubbelpackern ca 0,3 m in i borrhålet från tunnelvägg, borrhålet vattenfylls och ventilen stängs.
6. När alla manschetter är satta skall de efterdras, börja efterdra den manschetter som sattes först och gå varvet runt. Följ säkerhetsinstruktionerna för arbete med manschetter. Under första åtdragningen ska de dras åt så att de håller tätt, under andra åtdragningen ska de minst dras åt till de nedanstående totala gänglängderna. För en borrhålsdimension på 63 mm ska manschetter dras åt minst 25 mm, för en dimension på 66 mm ska den dras åt minst 30 mm. 76 mm manschetter dras åt och förankras i berget.
7. Etablering av injekteringsutrustning.
8. Utför kompletterande hydrotester i två borrhål på höger vägg. Mät inflöde under 1 minut från borrhålen och sprickorna på väggen. Gör vattenförlustmätningar med 3 bars övertryck alternativt 10 bars totaltryck om inget grundvatten tryck kan mätas. Utför en mätning med det andra hålet öppet och en med det andra hålet stängt. Mät flödet från sprickorna vid hålen under vattenförlustmätningen.
9. Hydrotester i stuffinjekteringshål. Grundvatten tryck och naturligt inflöde i samtliga borrhål. Vattenförlustmätning i samtliga borrhål med injekteringsriggen. Protokoll från hydrotesterna lämnas till Henrik direkt.
10. Injektering av stuffinjekteringshålen enligt PM Injektering skärm 3, arbetsinstruktion injektering skärm 3 samt injekteringsprotokoll. Henrik förser entreprenören med ovanstående dokument samt håller en kort genomgång av ev. förändringar från föregående skärm innan injektering.
11. Mät inflöden från borrhål och sprickor på högervägg.
12. Borra borrhålen i borrhållsömgång A. Borrhålen skall passa till manschetter med en ytterdiameter på 62 mm. Maximal borrhållsdimension får ej överstiga 66 mm. Borrprotokoll lämnas till arbetsledaren. Markera borrhålen med en gul märkfärg.
13. Samtliga borrhål renspolas från borrhåll med borrhåll direkt efter borring. Hål spolats tills spolvattnet är fritt från föroreningar alternativt under minst en minut med fullt vattenflöde.
14. Inmätning av borrhålen. Henrik kontakter Gerry Johansson och bestämmer lämplig tid för inmätning.
15. Rakhetsmätning av borrhålen. Entreprenören ansvarar för att Ulf Domeij kontaktas i god tid innan borring är klar och avtalar lämplig tid för mätning. Minst 6 borrhål kommer att mätas, 2 i tak, 2 i sula samt 1 i vardera väggen. Mätningar utöver dessa beslutas av Henrik i samråd med Johan Funehag. Data från mätningen skickas till Johan (johan.funehag@chalmers.se).
16. Manschettering av borrhålen. Manschetter spänns upp med dubbelpackern ca 0,3 m in i borrhålet från tunnelvägg, borrhålet vattenfylls och ventilen stängs.

17. När alla manschetter är satta skall de efterdras, börja efterdra den manschett som sattes först och gå varvet runt. Följ säkerhetsinstruktionerna för arbete med manschetter. Under första åtdragningen ska de dras åt så att de håller tätt, under andra åtdragningen ska de minst dras åt till de nedanstående totala gänglängderna. För en borrhålsdimension på 63 mm ska manschetten dras åt minst 25 mm, för en dimension på 66 mm ska den dras åt minst 30 mm.
18. Hydrotester: Grundvattentryck, antal hål som ska testas avgörs av Henrik i samråd med Johan. Naturligt inflöde i samtliga borrhål. Vattenförlustmätning i samtliga borrhål med injekteringsriggen. Protokoll från hydrotesterna lämnas till Henrik direkt.
19. Injektering av injekteringshålen enligt PM Injektering skärm 3, arbetsinstruktion injektering skärm 3 samt injekteringsprotokoll vilket tas fram efter analys av ovanstående hydrotester. Henrik förser entreprenören med ovanstående dokument samt håller en kort genomgång av ev. förändringar från föregående skärm innan injektering.
20. Mät inflöden från borrhål och sprickor på högervägg.
21. Borrning av injekteringshål omgång B. Hur många hål som borrar i den andra omgången injekteringshål beror på inflöden, vattenförluster och mängden injekterat bruk i första omgången. Detta beslutas av delprojektledaren efter analys. Markera borrhålen med en gul märkfärg.
22. Samtliga borrhål renspolas från borrkax med borrarigen direkt efter borrning. Hål spolas tills spolvattnet är fritt från föroreningar alternativt under minst en minut med fullt vattenflöde.
23. Inmätning av borrhålen. Henrik kontaktar Gerry Johansson och bestämmer lämplig tid för inmätning.
24. Rakhetsmätning av borrhålen. Minst 1/5 av borrhålen i omgång B ska mätas. Mätningar utöver dessa beslutas av Henrik i samråd med Johan Funehag. Data från mätningen skickas till Johan (johan.funehag@chalmers.se).
25. Manschettering av borrhålen. Manschetten spänns upp med dubbelpackern ca 0,3 m in i borrhålet från tunnelvägg, borrhålet vattenfylls och ventilen stängs.
26. När alla manschetter är satta skall de efterdras, börja efterdra den manschett som sattes först och gå varvet runt. Följ säkerhetsinstruktionerna för arbete med manschetter. Under första åtdragningen ska de dras åt så att de håller tätt, under andra åtdragningen ska de minst dras åt till de nedanstående totala gänglängderna. För en borrhålsdimension på 63 mm ska manschetten dras åt minst 25 mm, för en dimension på 66 mm ska den dras åt minst 30 mm.
27. Hydrotester: Grundvattentryck, antal hål som ska testas avgörs av Henrik i samråd med Johan. Naturligt inflöde i samtliga borrhål. Vattenförlustmätning i samtliga borrhål med injekteringsriggen. Protokoll från hydrotesterna lämnas till Henrik direkt.
28. Injektering av injekteringshålen enligt PM Injektering skärm 3, arbetsinstruktion injektering skärm 3 samt injekteringsprotokoll vilket tas fram efter analys av ovanstående hydrotester. Henrik förser entreprenören med ovanstående dokument samt håller en kort genomgång av ev. förändringar från föregående skärm innan injektering.
29. Mät inflöden från borrhål och sprickor på högervägg.
30. Borrning av injekteringshål omgång C. Hur många hål som borrar i den tredje och sista omgången injekteringshål beror på inflöden, vattenförluster och mängden injekterat bruk i andra omgången. Detta beslutas av delprojektledaren efter analys. Markera borrhålen med en blå märkfärg.
31. Samtliga borrhål renspolas från borrkax med borrarigen direkt efter borrning. Hål spolas tills spolvattnet är fritt från föroreningar alternativt under minst en minut med fullt vattenflöde.
32. Inmätning av borrhålen. Henrik kontaktar Gerry Johansson och bestämmer lämplig tid för inmätning.
33. Rakhetsmätning av borrhålen. Minst 1/5 av borrhålen i omgång C ska mätas. Mätningar utöver dessa beslutas av Henrik i samråd med Johan Funehag. Data från mätningen skickas till Johan (johan.funehag@chalmers.se).
34. Manschettering av borrhålen. Manschetten spänns upp med dubbelpackern ca 0,3 m in i borrhålet från tunnelvägg, borrhålet vattenfylls och ventilen stängs.

35. När alla manschetter är satta skall de efterdras, börja efterdra den manschett som sattes först och gå varvet runt. Följ säkerhetsinstruktionerna för arbete med manschetter. Under första åtdragningen ska de dras åt så att de håller tätt, under andra åtdragningen ska de minst dras åt till de nedanstående totala gänglängderna. För en borrhålsdimension på 63 mm ska manschetten dras åt minst 25 mm, för en dimension på 66 mm ska den dras åt minst 30 mm.
36. Hydrotester: Grundvattentryck, antal hål som ska testas avgörs av Henrik i samråd med Johan. Naturligt inflöde i samtliga borrhål. Vattenförlustmätning i samtliga borrhål med injekteringsriggen. Protokoll från hydrotesterna lämnas till Henrik direkt.
37. Injektering av injekteringshålen enligt PM Injektering skärm 3, arbetsinstruktion injektering skärm 3 samt injekteringsprotokoll vilket tas fram efter analys av ovanstående hydrotester. Henrik förser entreprenören med ovanstående dokument samt håller en kort genomgång av ev. förändringar från föregående skärm innan injektering.
38. Mät inflöden från borrhål och sprickor på högervägg.

Anpassningar och ändringar av ovanstående arbetsmetod beslutas av beställaren i samråd med entreprenören.

Protokoll från utförandet av injekteringsskärmar

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 1A

Sektion tunnel: 4,47

Verklig sektion inmätt: 4,47

Datum: 2007-11-19

Tid: 14:00

Vattentemp: 12,8 °C

Borrhåls diameter: 0,062 m

Mättid: 1 min

Antaget tryck: 30 bar

Uppmätt data							Beräknad data	
Borrhåls-namn [-]	Borrhåls-nummer [nr]	Borrhåls-längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Flödes-tid [min]	Volym [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]	
SS0004A01	1	8,5	30	1	13,2		13,2	
SS0004A05	3	8	0,4	1	2,4	Packer läcker i svetsen	2,4	
SS0004A09	5	8	0,1	1	4		4	
SS0004A13	7	8	0,1	1	0,016		0,016	
SS0004C01	9	8,5	0,1	1	0,014		0,014	
SS0004H03	11	9,5	12	1	0,1		0,1	
SS0004H07	13	10	1,7	1	0,13		0,13	
SS0004H11	15	10,5	8	1	0,09		0,09	
SS0004I07	17	10,5	9,2	1	1,2		1,2	
SS0004I03	19	10,5	9,3	1	0,8		0,8	
SS0004D01	21	11	10	1	0,08		0,08	
SS0004B16	23	11	10	1	4,4		4,4	
SS0004B12	25	11	9	1	0,19		0,19	
SS0004B08	27	11	9	1	1,1		1,1	
SS0004B04	29	11,5	7,5	1	1		1	
SS0004G01	31	11,5	7,5	1	0,65		0,65	
SS0004G05	33	11,5	0,8	1	0,3		0,3	
SS0004G09	35	11	1,5	1	0,015		0,015	
SS0004G13	37	11	1	1	0,055		0,055	
SS0004G17	39	11,5	1,5	1	0,068		0,068	
SS0004G21	41	11,5	29	1	27		27	
Antal	21	Max	30	Summa	56,808		max	27,0
							medel	2,7
							median	0,3

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med
 Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med
 Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Vattenförlustmätning

Skärm nr: 1A

Sektion tunnel: 4,47 Verklig sektion inmätt: 4,47

Datum: 2007-11-21

Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 13:00

Mättid: 5-10 min

Vattentemp: 14,3 °C

Injektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Injektions-tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
							Före	Efter			
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[liter]					[l/min]	[l/min]
SS0004A01	1	8,5	30	35	10	64	123,5	58,6		6,4	6,49
SS0004A05	3	8	0,4	5,4	5	1,4	158,3	156,5		0,28	0,36
SS0004A09	5	8	0,1	5	5	0,1	136,7	136,5		0,02	0,04
SS0004A13	7	8	0,1	5	5	0,1	116,3	116		0,02	0,06
SS0004C01	9	8,5	0,1	5	5	0,1	96	95,6		0,02	0,08
SS0004H03	11	9,5	12	17	5	1,1	73,9	72,2		0,22	0,34
SS0004H07	13	10	1,7	6,7	5	3,3	43,7	39,3		0,66	0,88
SS0004H11	15	10,5	8	13	5	0,1	240,4	240,3		0,02	0,02
SS0004I07	17	10,5	9,2	14,2	5	0,1	218,4	218,2	Registrerades i Logac som 15 igen pga felskrivning	0,02	0,04
"	"										
SS0004I03	19	10,5	9,3	14,3	5	9,2	211,5	200,8		1,84	2,14
SS0004D01	21	11	10	15	5	0,8	179,3	178,2		0,16	0,22
SS0004B16	23	11	10	15	5	15	163,7	146,3		3	3,48
SS0004B12	25	11	9	14	5	2,2	125,3	122,8		0,44	0,5
SS0004B08	27	11	9	14	5	3,9	117,4	111,2		0,78	1,24
SS0004B04	29	11,5	7,5	12,5	5	3,8	110,4	105,8		0,76	0,92
SS0004G01	31	11,5	7,5	12,5	5	1,7	103,7	101,4		0,34	0,46
SS0004G05	33	11,5	0,8	5,8	5	1	93,9	83		0,2	2,18
SS0004G09	35	11	1,5	6,5	5	0,1	78,9	78,8		0,02	0,02
SS0004G13	37	11	1	6	5	0,3	76,7	76,1		0,06	0,12
SS0004G17	39	11,5	1,5	6,5	5	0,1	73,9	73,5		0,02	0,08
SS0004G21	41	11,5	29	34	5	52	65	11,8		10,4	10,64
Antal	21		Max	30							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min, markeras med

Bilaga 3.1

R-10-39

Injektering

Skärm nr: **1A**

Sektion tunnel: **4,47** Verklig sektion inmätt: **4,47**

Datum: 2007-11-26-29

Antaget grv tryck: 30 bar

Tid: _____

Brukstemp: 12,2 °C

Lufttemp: 11,9 °C

Borrhålsdata				Valda injektionsparametrar				
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Grv tryck borrhål	Injektions- tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio	Effektiv inj tid	Antal satser	
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min] Ratio [X:Y]		[-]	
SS0004A01	1	8,5	30	60	63 5,8:1	50,4	1	
SS0004A05	3	8	0,4	60	63 5,7:1	50,4	1	
SS0004A09	5	8	0	60	63 5,7:1	50,4	0,5	
SS0004A13	7	8	0	60	63 5,7:1	50,4	0,5	
SS0004C01	9	8,5	0	60	63 5,7:1	50,4	0,5	
SS0004H03	11	9,5	12	60	63 5,7:1	50,4	1	
SS0004H07	13	10	1,7	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004H11	15	10,5	8	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004I07	17	10,5	9,2	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004I03	19	10,5	9,3	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004D01	21	11	10	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004B16	23	11	10	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004B12	25	11	9	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004B08	27	11	9	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004B04	29	11,5	7,5	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004G01	31	11,5	7,5	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004G05	33	11,5	0,8	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004G09	35	11	1,5	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004G13	37	11	1	80	39 5,2:1	31,2	1	
SS0004G17	39	11,5	1,5	60	63 5,8:1	50,4	1	
SS0004G21	41*	11,5	29	60	21 4,4:1	16,8	1	

1 sats
240 kg
193-196 l

Geltid	Kg sol	kg salt
63	206	34
39	200	40
21	192	48

Blandning
5,7:1
5,0:1
4,4:1

Geltid	Kg sol	kg salt
63	199,5	35
39	200	40
21	176	40

* OBS sänkt gel tid då större sprickvidd

Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injektions tiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters geltid; vid ca 10 l kvar i kärlet, sänks flödet men med bibehållet tryck och sats blandas snabbt. Ny injektions tiden blir 4/5 av 21 min= 17 min.

Inj.volym hämtad från logacfilen för BH 1,3,5,7,13,19 och 25

OBS för BH 5 gick det in 143 l vid 1 m manchett placering sedan 30 liter i andra vid 3 m manchett placering

157

Borrhålsdata		Protokollföres under injektering					Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid, alltid vid Nej)
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[min]	[l]	[min]	
SS0004A01	1	1,45	Ja	2,50	135	68	Glömde stoppa Logac innan rengöring
SS0004A05	3	1,58	Nej	-	322	63	Stora sprickor i väggen. Fick blanda en sats 4,4:1 med geltid 21min, kom aldrig upp i 60 bar.
SS0004A09	5	1,25	Nej	2,40	181	39	Stort återslag vid första försöket. Försöker med längre manschett, 3m in i hålet och nu går det bättre, fast manschetten läcker ca 0,4 l/min får in totalt 30l. Sätter sedan en plugg utanför med kort geltid, 35:1 och 10 min geltid.
"	"						
"	"						
SS0004A13	7	1,47	Ja	2,20	70	65	Glömde stoppa Logac innan rengöring
SS0004C01	9	1,36	Ja	2,23	25	64	Ytliga slag i taket läcker, blandar en sats till 4,4:1 med geltid 17min.
SS0004H03	11	2,39	Ja	3,10	43	65	Läckage i Gurlita koppling. Packning byts till nästa inj. Läckaget mäts till ca 10 l totalt.
SS0004H07	13	2,40	Nej	3,23	303	40	Ytliga spickor+ en extra sats blandad
SS0004H11	15	1,48	Ja	2,25	32	34	
SS0004I07	17	2,28	Ja	3,20	45	46	
SS0004I03	19	2,50	Ja	3,30	69	39	Glömde stoppa Logac innan rengöring
SS0004D01	21	1,45	Ja	2,25	40	38	
SS0004B16	23	1,27	Nej	2,30	96	23	Avbröt ty för snabb gelning
SS0004B12	25	2,05	Ja	2,40	33	33	Glömde stoppa Logac innan rengöring
SS0004B08	27	2,05	Ja	2,43	35	39	Glömde stoppa Logac innan rengöring
SS0004B04	29	1,30	Ja	2,30	50	38	Geltiden blev alldeles för kort, oklart varför.
SS0004G01	31	1,30	Ja	2,04	18	40	Startade Logac lite för sent, ca 40s vilket gör att volymen inte riktigt stämmer.
SS0004G05	33	2,00	Nej	2,45	275	41	Samband till 35, 37 och KS0005F01. Blandade en extra sats 4:1 med geltid 17 min
SS0004G09	35	2,00	Ja	2,40	25	41	
SS0004G13	37	1,50	Ja	2,25	30	35	
SS0004G17	39	1,00	Ja	1,30	50	70	Pumptid 60min, Samband med KS0005F06 och KS0006F01
SS0004G21	41*	1,30	Nej	2,30	240	21	Blandade 243 kg i första satsen men fick komplettera med 148 kg till och dessutom gå ner i tryck och flöde. Sats 2 med geltid 21 min
"	"						
Summa					2117		Teoretisk borrhålsvolym : 573,6 Effektivt inj volym = 1543,2

Protokollförare: Daniel Lignell och Henrik Svensson

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: **1B**
 Sektion tunnel: **4,47** Verklig sektion inmätt: **4,47**

Datum: 2007-12-04 Borrhåls diameter: 0,06 m
 Tid: 07:00 Mättid 1 min
 Vattentemp: 11,9 °C Antaget tryck: 30 bar

Uppmätt data							Beräknad data
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Flödes tid [min]	Volym [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]
SS0004A03	2	10	31	1	3,8		3,8
SS0004A07	4	8	1	1	0,0049	70 droppar	0,0049
SS0004A15	8	8	0,1	1	0,00196	28 droppar	0,00196
SS0004H09	14	10	0,1	1	0,00588	84 droppar	0,00588
SS0004I01	20	10,5	0,1	1	0,00336	48 droppar	0,00336
SS0004B14	24	11	10	1	0,09		0,09
SS0004B02	30	11,5	17	1	0,03		0,03
SS0004G03	32	11,5	0,1	1	0,0001		0,0001
SS0004G07	34	11,5	0,5	1	0,00777	111 droppar	0,00777
SS0004G11	36	11	0,1	1	0,08		0,08
SS0004G15	38	11	0,1	1	0,00728	104 droppar	0,00728
SS0004G19	40	11,5	29	1	0,56		0,56
SS0004G23	42	11,5	31	1	8,4		8,4
Antal	13	Max	31	Summa	12,99		max 8,400
							medel 0,999
							median 0,008

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

VattenförlustmätningSkärm nr: **1B**Sektion tunnel: **4,47** Verklig sektion inmätt: **4,47**Verklig sektion (inmätt): 4,47Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 10:00Mättid: 5 minVattentemp: 11,9 °CInjektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Injektions- tryck [bar]	Flödes tid [minuter]	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare [l/min]	Flöde via våg [l/min]
							Före	Efter			
SS0004A03	2	10	31	36	5	12			Vikt ej mätt, glömde	2,4	
SS0004A07	4	8	1	6	5	0,1	362	362	Manschett placeras 3m in pga slag	0,02	0
SS0004A15	8	8	0,1	5,1	5	0,1	314	314	Manschett släpper. Vfl görs om	0,02	0
SS0004H09	14	10	0,1	5,1	5	0,1	284	284		0,02	0
SS0004I01	20	10,5	0,1	5,1	5	0,1	256	256		0,02	0
SS0004B14	24	11	10	15	5	0,1	238,3	238,3		0,02	0
SS0004B02	30	11,5	17	22	5	0,1	365	365		0,02	0
SS0004G03	32	11,5	0,1	5,1	5	0,1	367	367		0,02	0
SS0004G07	34	11,5	0,5	5,5	5	0,1	369	369		0,02	0
SS0004G11	36	11	0,1	5,1	5	0,1	374,4	374,4		0,02	0
SS0004G15	38	11	0,1	5,1	5	0,1	374	374		0,02	0
SS0004G19	40	11,5	29	34	5	0,7			Vikt ej mätt, glömde	0,14	
SS0004G23	42	11,5	31	36	5	26			Vikt ej mätt, glömde	5,2	
Antal	0	Max	31								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min, markeras med

Bilaga 3.1

R-10-39

Injektering

Skärm nr: **1B**

Sektion tunnel: **4,47** Verklig sektion inmätt: **4,47**

Verklig sektion (inmätt): 4,47 Antaget grv tryck: 30 bar
 Datum: 2007-12-04 Brukstemp: 11,9 °C
 Tid: 14:48 Lufttemp: 14,6 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar				
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd alt sektions-längd	Grv tryck borrhål	Injekterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser
[-]	[nr]		[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]
SS0004A03	2	10	30	60	63	5,8:1	50,4	1,5
SS0004G19	40	11,5	29	50	21	4,4:1	16,8	1,5
SS0004G23	42	11,5	31	50	21	4,4:1	16,8	1,5
SS0004A03	2	3		5 bar + grv P	21	4,4:1	16,8	1
SS0004G19	40	3		5 bar + grv P	21	4,4:1	16,8	1
SS0004G23	42	3		5 bar + grv P	21	4,4:1	16,8	1
Övriga täta hål								
SS0004A07	4	8	1	60	39	5,2:1	31,2	1
SS0004A15	8	8	0	60	39	5,2:1	31,2	1
SS0004H09	14	10	0	60	39	5,2:1	31,2	1
SS0004I01	20	10,5	0	60	39	5,2:1	31,2	1
SS0004B14	24	11	10	60	39	5,2:1	31,2	1
SS0004B02	30	11,5	17	60	39	5,2:1	31,2	1
SS0004G03	32	11,5	0	60	39	5:1	31,2	1
SS0004G07	34	11,5	0,5	60	39	5:1	31,2	1
SS0004G11	36	11	0	60	39	5:1	31,2	1
SS0004G15	38	11	0	60	39	5,2:1	31,2	1

1 sats 240 kg 193-196 l	Geltid	kg sol	kg salt
	63	206	34
	39	200	40
	21	192	48

Blandning	Geltid	kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injekteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters geltid; vid ca 10 l kvar i kärlet, sänks flödet men med bibehållet tryck och sats blandas snabbt. Ny injekteringstiden blir 4/5 av 21 min = 17 min.

161

Borrhålsdata		Protokollföres under injektering						Kommentarer
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Manchett placering från borrhåls-vägg	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid, alltid vid Nej)
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	[m]	
SS0004A03	2	2,12	JA	2,45	40	56	3	Samband 1
SS0004G19	40	1,25	JA	2,10	18	21	3	
SS0004G23	42	1,28	JA	2,00	76	21	3	
SS0004A03	2	1,4	JA	1,5	7,9	21	1	Liten volym dock såg slag från skärm 1B
SS0004G19	40	1,3	JA	1,5	6,9	21	1	Liten volym dock såg slag från skärm 1B
SS0004G23	42	1,4	JA	2,13	5,5	21	1	Liten volym dock såg slag från skärm 1B
Övriga täta hål								
SS0004A07	4	1,50	JA	2,10	15	40	1	
SS0004A15	8	1,38	JA	2,10	22	39	1	Samband 7
SS0004H09	14	1,58	JA	2,22	29	40	1	
SS0004I01	20	1,50	JA	2,50	54	39	1	Samband 19
SS0004B14	24	2,10	JA	2,50	31	36	1	
SS0004B02	30	2,20	JA	3,00	40	35	1	Samband 29
SS0004G03	32	2,50	JA	3,23	50	32	1	Samband 33
SS0004G07	34	2,10	JA	2,40	47	32	1	Samband 33
SS0004G11	36	1,53	JA	2,37	25	32	1	Manschett släpp. Hålet var fyllt när loggning startade därför bör denna volym adderas till inj. volym.
"	"							
SS0004G15	38	1,49	JA	2,30	20	37	1	

Protokollförare: Daniel Lignell

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 1C
 Sektion tunnel: 4,47 Verklig sektion inmätt: 4,47

Datum: 2007-12-06 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 16:00 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 11,9 °C Antaget tryck: 30 bar

Uppmätt data						Beräknad data	
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym	Inflöde, Q	
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[l/min]	
SS0004A02	50	8	0,1	1	0,0001	0,0001	
SS0004I02	68	10,5	0,1	60	0,38	0,0063	
SS0004G22	90	11,5	30	1	2,2	2,2	
SS0004G24	91	8	0,1	1	0,0001	0,0001	
Antal	4	Max	30	Summa	2,5802	max	2,200
						medel	0,552
						median	0,003

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

VattenförlustmätningSkärm nr: **1C**Sektion tunnel: **4,47** Verklig sektion inmätt: **4,47**Datum: 2007-12-06Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 17:00Mättid: 5 minVattentemp: 11,9 °CInjektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Injektions- tryck [bar]	Flödes tid [minuter]	Volym under injektion [l]	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare [l/min]	Flöde via våg [l/min]
							Före	Efter			
SS0004A02	50	8	0,1	5,1	5	18,5	42,3	23,2	Samband hål 2	3,7	3,82
SS0004I02	68	10,5	0,1	5,1	5	0,1	172,3	172,3	Samband hål 19	0,02	0
SS0004G22	90	11,5	30	35	5	1,7	104,28	101,9		0,34	0,476
SS0004G24	91	8	0,1	5,1	5	0,1	119,2	119,4		0,02	-0,04
Antal	4	Max	30								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min, markeras med

Injekttering

Skärm nr: **1C**
 Sektion tunnel: **4,47** Verklig sektion inmätt: **4,47**

Datum: 2007-12-07
 Tid: 10:15

Antaget grv tryck: 30 bar
 Bruktemp: 14,8 °C
 Lufttemp: 13,3 °C (Temp. togs efter halva geltiden)

Borrhålsdata				Valda injektionsparametrar				
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd alt sektions-längd	Grv tryck borrhål	Injektions-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser
[-]	[nr]		[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]
SS0004A02	50	8	0	60	39	5,2:1	31,2	1
SS0004I02	68	10,5	0	60	39	5,2:1	31,2	1
SS0004G22	90	11,5	30	60	39	5,2:1	31,2	1
SS0004G24	91	8	0	60	39	5,2:1	31,2	1

1 sats	Geltid	kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Blandning	Geltid	kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

Borrhålsdata		Protokollföres under injekttering						
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Manchett placering från borrhåls-vägg	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid, alltid vid Nej)
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	[m]	
SS0004A02	50	1,39	JA	2,07	165	40	1	Samband med 2
SS0004I02	68	3,30	JA	4,10	70	39	1	Samband med 19
SS0004G22	90	1,38	NEJ	1,50	248	40	1	Samband med 41. Tryck minskas till 50 bar eftersom närliggande manschetter börjar tryckas ut. När 160 l sol gått åt efter 29 min sänks tryck & flöde varefter sats på 4,4:1 med geltid 20min. Efter 34min uppe i ett tryck på 50 bar igen.
"	"							
SS0004G24	91	3,06	JA	3,31	25	40		Samband med 1

Protokollförare: Daniel Lignell och Henrik Svensson

Inflödes- och tryckmätningarSkärm nr: **2 Stuffinj**Sektion tunnel: **8,47** Verklig sektion (inmätt): **8,60**Datum: 2008-01-02Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 14:30Mättid: 1 minVattentemp: 14,2 °CAntaget tryck: bar

Uppmätt data							Beräknad data	
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls-längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Flödes tid [min]	Volym [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]	Inflöde enbart stuffinjekteringshålen [l/min]
SS0008F01	1	20	29,5	1	8,5		8,5	8,5
SS0008F02	2	20	26	1	4,1		4,1	4,1
SS0008F03	3	20	31	1	17,4	Obshål	17,4	
SS0008F04	4	20	31	1	9,2		9,2	9,2
Antal	4	Max	31	Summa	39,2		max	9,2
							medel	7,3
							median	8,5

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Efter stuffinjektering

Datum: 2008-01-09 11:00

SS0008F03	3	20	30,5	1	5,4	Obshål			5,4
-----------	---	----	------	---	-----	--------	--	--	-----

När borrhålet öppnas igen efter stuffinjekteringen (2008-01-09 10:25) kommer färgat vatten ut, troligen silica sol.

Efter injekteringsomgång A

Datum: 2008-01-28 07:30

SS0008F03	3	20	21,7	1	0,3	Obshål			0,3
-----------	---	----	------	---	-----	--------	--	--	-----

Efter injekteringsomgång B

Datum: 2008-02-04 08:30

SS0008F03	3	20	21	1	0,14	Obshål			0,14
-----------	---	----	----	---	------	--------	--	--	------

Efter injekteringsomgång C

Datum: 2008-01-28 07:30

SS0008F03	3	20	19	1	0,11	Obshål			0,11
-----------	---	----	----	---	------	--------	--	--	------

Vattenförlustmätningar

Skärm nr: 2 Stuffinj

Sektion tunnel: 8,47 Verklig sektion (inmätt): 8,60

Datum: 2007-11-21

Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 13:00

Mättid: 5-10 min

Vattentemp: 14,3 °C

Injektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls-längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Injektions-tryck [bar]	Flödes tid [min]	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare [l/min]	Flöde via våg [l/min]
							Före	Efter			
SS0008F01	1	20	29,5	35	5	41				8,2	0
SS0008F02	2	20	26	31	5	7,5				1,5	0
SS0008F03	3	20	31	36	5	6,9			Obs hålet	1,38	0
SS0008F04	4	20	31	36	5	17			Aterslag i ett gammalt korset hål, 5F05?	3,4	0
Antal	4	Max	31								

Efter stuffinjektering

Datum: 2008-01-09 11:12

SS0008F03	3	20	30,5	35,5	5	15			Obs hålet			3	0
-----------	---	----	------	------	---	----	--	--	-----------	--	--	---	---

Efter injekteringsomgång A

Datum: 2008-01-09 11:12

SS0008F03	3	20	21,7	27	5	0	242	242	Obs hålet			0	0
-----------	---	----	------	----	---	---	-----	-----	-----------	--	--	---	---

Efter injekteringsomgång B

Datum: 2008-01-09 11:12

SS0008F03	3	20	21	26	5	0,1	317	317,85	Obs hålet			0,02	-0,17
-----------	---	----	----	----	---	-----	-----	--------	-----------	--	--	------	-------

Efter injekteringsomgång C

Datum: 2008-01-09 11:12

SS0008F03	3	20	19	24	5	0			Obs hålet			0	0
-----------	---	----	----	----	---	---	--	--	-----------	--	--	---	---

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min, markeras med

InjekteringSkärm nr: **2 Stuffinj**Sektion tunnel: **8,47**Verklig sektion (inmätt): **8,60**Datum: 2008-01-08 (F01)Antaget grv tryck: 31 barDatum: 2008-01-09 (F02 och 4)Brukstemp: °CLufttemp: 13,0 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar				
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål	Injekterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]		[-]
SS0008F01	1	20	29,5	81	Recept 1		45	1
SS0008F02	2	20	26	71	25	4,5:1	20	1
SS0008F03	3	20	31	--	--	--	--	--
SS0008F04	4	20	31	71	25	4,5:1	20	1

1 sats	Geltid	Kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Löpande provning, LP görs för cementen. Skrivs på separat protokoll

Cement injektering*Cement egenskaper*

Aperture, b 152 mm
Yield stress 20 Pa
Viscosity 25 mPas

Cement design

Grouting time 45 min
Delta P 5 Mpa
Ger l_d>pw/deltaP
l2-D= 12,5 m

Silica sol injektering

Gel tid 25 min
tG 8 min
Delta P 40 bar
Ger l max (150 mym)= 17 m
Ger l max (10 mum)= 1,125 m

Recept 1 viktförhållande

Vatten 1,68
Cement 1
Groutaid 1,37
SP 0,07

2 säckar**För en sats**

67,2 kg
40 kg
54,8 kg
2,8 kg

Protokollföres under injektering							Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej OBS Ja om vaccumpump)
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid/löpa nde provnin g	
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
SS0008F01	1	0,00	Ja	1,10	167	LP	Återslag i KI0014B01, 0,85 cm från hålet ca 3 min efter det att injekteringen startade. Efter ca 40 min pumptid rinner rent vatten ur KI0014B01.
"	"						
SS0008F02	2	2,20	Ja	2,50	88	26	Gammalt hål till höger om F02 var manschetterat men manschetten trycktes ut under injekteringen, trycket minskades och manschetten byttes ut. Trycket byggdes upp igen. Den nya manschetten började även den tryckas ut och ventilen öppnades därför något för
"	"						
"	"						
"	"						
SS0008F03	3						
SS0008F04	4	2,20	Ja	2,50	191	26	Återslag i KI0016B01 och KI0005F05 samt att även denna injektering trycker ut manschett som vid injektering i F02.

Protokollförare: Henrik Svensson och Daniel Lignell

Inflödes- och tryckmätningarSkärm nr: **2A**Sektion tunnel: **8,47** Verklig sektion (inmätt): **8,60**Datum: 2008-01-16Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 08:00Mättid: 1 minVattentemp: 13,4 °CAntaget tryck: 30 bar

Uppmätt data								Beräknad data
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym en manch. öppen	Volym alla öppna	Kommentarer	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]
SS0008A04	1	25	28	1	14	0		14
SS0008A08	3	25	29	1	8,8	0		8,8
SS0008A12	5	25	28	1	0,8	0		0,8
SS0008A16	7	25	25	1	1,1	0,08		1,1
SS0008A20	9	25	12	1	0,6	0,00035	5 droppar	0,6
SS0008A24	11	25	0	1	0,2	0,00308	44 droppar	0,2
SS0008C01	13	25	27	1	0,3	0,00665	95 droppar	0,3
SS0008H02	15	25	28	1	4,2	0,3		4,2
SS0008H06	17	25	29	1	1,7	0,1		1,7
SS0008H10	19	25	28	1	0,8	0,1		0,8
SS0008H14	21	25	28	1	3,2	0,2		3,2
SS0008I18	23	25	29	1	9	1,2		9
SS0008I14	25	25	29	1	24	0,00637	91 droppar	24
SS0008I10	27	25	29	1	44	2,2		44
SS0008I06	29	25	28	1	17	1,1		17
SS0008I02	31	25	29	1	10	1,6		10
SS0008D01	33	25	29	1	60	0,2		60
SS0008B24	35	25	27	1	23,5	0,2		23,5
SS0008B20	37	25	29	1	25,5	3,2		25,5
SS0008B16	39	25	29	1	64	1		64
SS0008B12	41	25	26	1	56	0		56
SS0008B08	43	25	28	1	63	3,5		63
SS0008B04	45	25	29	1	57	5		57
SS0008G01	47	25	26	1	96	12		96

Bilaga 3.2

Uppmätt data								Beräknad data
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Flödes tid [min]	Volym en manch. öppen [liter]	Volym alla öppna [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]
SS0008G05	49	25	29	1	54	3,2		54
SS0008G09	51	25	26	1	0,4	0,00112	16 droppar	0,4
SS0008G13	53	25	26	1	1,1	0		1,1
SS0008G17	55	25	29	1	5	0,53		5
SS0008G21	57	25	29	1	7	0,18		7
SS0008G25	59	25	28	1	27	7,5		27
SS0008G29	61	25	29	1	23	0,63		23
Antal	31	Max	29	Summa	702,2	44,0376	max	96,0
							medel	22,7
							median	10,0

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

VattenförlustmätningSkärm nr: **2A**Sektion tunnel: **8,47** Verklig sektion (inmätt): **8,60**

Datum: 08-01-16 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 17:00 Mättid: 5 min
 Vattentemp: 13,3 °C Injektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Injektions- tryck [bar]	Flödes tid [min]	Volym under injektion [liter]	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare [l/min]	Flöde via våg [l/min]
							Före	Efter			
SS0008A04	1	25	28	33	5	30	318	287		6	6,2
SS0008A08	3	25	29	34	5	18	270	251		3,6	3,8
SS0008A12	5	25	28	33	5	2,7	238	233		0,54	1
SS0008A16	7	25	25	30	5	3,8	222	217		0,76	1
SS0008A20	9	25	12	17	5	1	181	180		0,2	0,2
SS0008A24	11	25	0,1	5,1	5	8,2	164	156		1,64	1,6
SS0008C01	13	25	27	32	5	2,8	152	150		0,56	0,4
SS0008H02	15	25	28	33	5	11	143	133		2,2	2
SS0008H06	17	25	29	34	5	7,8	125	117		1,56	1,6
SS0008H10	19	25	28	33	5	8,4	271	262		1,68	1,8
SS0008H14	21	25	28	33	5	23	258	235		4,6	4,6
SS0008I18	23	25	29	34	5	59	227	164		11,8	12,6
SS0008I14	25	25	29	34	5	61	145	77		12,2	13,6
SS0008I10	27	25	29	34	5	53	60	7,1		10,6	10,58
SS0008I06	29	25	28	33	5	66	82	17		13,2	13
SS0008I02	31	25	29	34	5	44	251	208		8,8	8,6
SS0008D01	33	25	29	34	5	142	198	49		28,4	29,8
SS0008B24	35	25	27	32	5	48	381	329		9,6	10,4
SS0008B20	37	25	29	34	5	71	291	215		14,2	15,2
SS0008B16	39	25	29	34	5	81	486	407		16,2	15,8
SS0008B12	41	25	26	31	5	82	399	318		16,4	16,2
SS0008B08	43	25	28	33	5	120	240	113		24	25,4
SS0008B04	45	25	29	34	5	172	258	82		34,4	35,2
SS0008G01	47	25	26	31	5	166	259	89		33,2	34

Bilaga 3.2

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Injektions-tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]	Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0008G05	49	25	29	34	5	147	180	30		29,4	30
SS0008G09	51	25	26	31	5	1	228	227		0,2	0,2
SS0008G13	53	25	26	31	5	3,4	244	239		0,68	1
SS0008G17	55	25	29	34	5	9	255	246	Ytliga sprickor	1,8	1,8
SS0008G21	57	25	29	34	5	26	280	256		5,2	4,8
SS0008G25	59	25	28	33	5	64	353	285		12,8	13,6
SS0008G29	61	25	29	34	5	85	450	368	Ytliga sprickor i högerväggen, läcker ut där	17	16,4
Antal	31		Max	29							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med

Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min, markeras med

Protokollförelare: Daniel Lignell

InjektteringSkärm nr: **2A**Sektion tunnel: **8,47** Verklig sektion (inmätt): **8,60**Datum: 2008-01-22Tid: 07:40Antaget grv tryck: 30 barBruktemp: 12,7 °CLufttemp: 12,2 °C

Borrhålsdata				Valda injektionsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Grv tryck borrhål	Injektions- tryck	Vald gellid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ord ning
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	
SS0008A04	1	25	28	60	39	5,2:1	31,2	1,5	13
SS0008A08	3	25	29	60	39	5,2:1	31,2	1,5	14
SS0008A12	5	25	28	60	39	5,2:1	31,2	1	15
SS0008A16	7	25	25	60	39	5,2:1	31,2	1	16
SS0008A20	9	25	12	60	39	5,2:1	31,2	1	19
SS0008A24	11	25	0	60	39	5,2:1	31,2	1	20
SS0008C01	13	25	27	60	39	5,2:1	31,2	1	23
SS0008H02	15	25	28	60	39	5,2:1	31,2	1	24
SS0008H06	17	25	29	60	39	5,2:1	31,2	1	27
SS0008H10	19	25	28	60	39	5,2:1	31,2	1	28
SS0008H14	21	25	28	60	39	5,2:1	31,2	1,5	29
SS0008I18	23	25	29	60	39	5,2:1	31,2	3	30
SS0008I14	25	25	29	70	25	4,5:1	20,0	3	31
SS0008I10	27	25	29	100	recept 1	--	45,0		22
SS0008I06	29	25	28	60	39	5,2:1	31,2	3	26
SS0008I02	31	25	29	60	39	5,2:1	31,2	2	25
SS0008D01	33	25	29	100	recept 1	--	45,0		21
SS0008B24	35	25	27	70	25	4,5:1	20,0	2	18
SS0008B20	37	25	29	70	25	4,5:1	20,0	3	17
SS0008B16	39	25	29	100	recept 1	--	45,0		12
SS0008B12	41	25	26	100	recept 1	--	45,0		11
SS0008B08	43	25	28	100	recept 1	--	45,0		10
SS0008B04	45	25	29	100	recept 1	--	45,0		9
SS0008G01	47	25	26	100	recept 1	--	45,0		2
SS0008G05	49	25	29	100	recept 1	--	45,0		1
SS0008G09	51	25	26	60	39	5,2:1	31,2	1	3
SS0008G13	53	25	26	60	39	5,2:1	31,2	1	4
SS0008G17	55	25	29	60	39	5,2:1	31,2	1	5
SS0008G21	57	25	29	60	39	5,2:1	31,2	1,5	6
SS0008G25	59	25	28	80	39	5,2:1	31,2	2	7
SS0008G29	61	25	29	60	39	5,2:1	31,2	3,5	8

antal 25 min 3
 antal 39 min 20
 antal cement 8

Blandning	Gellid	Kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats 240 kg 193-196 l	Gellid	Kg sol	kg salt
	63	206	34
	39	200	40
	21	192	48

Bilaga 3.2

R-10-39

Borrhålsdata		Protokollföres under injektering					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annan tid, annan inj ordning)
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
SS0008A04	1	2,15	Ja	2,30	67	39	VP. Två försök innan Vakum sugning lyckas. Gelad silica från tidigare inj förmodligen i hål 61 har fyllt hålet. En del åker ut vid avluftning men mycket blir kvar.
"	"						
SS0008A08	3	2,20	Ja	2,38	21	39	VP. Gelad silica från tidigare inj förmodligen i hål 61 har fyllt hålet. En del åker ut vid avluftning men mycket blir kvar. Återslag i KI0016B01, 5F03 och 4F01 (korset), Stuffinjhål 1, utanför manschett i hål 1. KI0014B01 börjar läcka vatten igen under i
"	"						
SS0008A12	5	2,08	Ja	2,29	119	39	VP. Återslag i KI0016B01, 5F03 och 4F01 (korset), Stuffinjhål 1, utanför manschett i hål 1.
SS0008A16	7	3,07	Ja	3,48	92	39	VP. Återslag i KI0016B01, 5F03 och 4F01 (korset), Stuffinjhål 1, utanför manschett i hål 1.
SS0008A20	9	1,44	Ja	2,53	122	39	VP. Återslag i KI0016B01, 5F03 och 4F01 (korset), Stuffinjhål 1, utanför manschett i hål 1.
SS0008A24	11	1,55	Ja	3,10	131	39	VP
SS0008C01	13	2,30	Ja	3,34	67	38	VP
SS0008H02	15	2,35	Ja	3,46	86	39	VP
SS0008H06	17	2,07	Ja	3,20	91	39	VP. obs glömde stoppa logac
SS0008H10	19	3,20	Ja	4,40	102	39	VP
SS0008H14	21	2,20	Ja	3,05	39	39	Fyllt med cement och silica sol som till viss del rann ur hålet, uppskattningsvis en tredje del av borrhålsvolymen (25l) rann ut. Hålet injekterades trots detta. Glömde stoppa logac.
"	"						
SS0008I18	23	1,59	Ja	2,45	64	39	VP
SS0008I14	25	1,55		3,03	72		VP
SS0008I10	27		Ja		311		
SS0008I06	29	Fullt med cement och silica sol, härdat & stelnat som en tjock massa. Cement har tidigare inj i hål 27 och sol i hål 31 precis intill. Hålet inj ej & lämnas stängt.					
SS0008I02	31	2,15	Ja	3,20	79	38	VP
SS0008D01	33		Ja		?		VP, fel i logac
SS0008B24	35	2,41	Ja	3,10	38	39	VP. Mycket cement i hålet vid avluftning. Skulle vara en GT på 25 min men glömde.
SS0008B20	37	2,30	Ja	2,55	29	39	VP. Mycket cement i hålet vid avluftning. Först efter mycket jobb med slangen går den längre in i hålet. Skulle vara GT25 min men glömde
"	"						
SS0008B16	39				37		VP. PVC slang kunde föras in 15 m.
SS0008B12	41				35		VP. PVC slang kunde föras in 11,5 m.
SS0008B08	43				44		VP
SS0008B04	45				34		VP. Vakumslang kunde föras in 20 m.
SS0008G01	47		Ja		261		Kom bara upp i 95 bar
SS0008G05	49		Nej		860		Stor åtgång. Blandar stoppsats enligt recept för fyllnadsbruk fast med UF 16 för att få stopp på flödet. Trycker totalt i 60 min men med lägre tryck.
"	"						
SS0008G09	51	3,1	Ja	4,2	46	38	VP
SS0008G13	53	2	Ja	2,53	55	38	VP
SS0008G17	55	2,2	Ja	2,2	147	38	VP. Silica sol kommer ut när hålet öppnas för inj.
SS0008G21	57	1,48	Ja	4,48	120	38	VP. Silica sol kommer ut när hålet öppnas för inj.
SS0008G25	59	1,33	Ja	1,33	143	39	VP. Silica sol kommer ut när hålet öppnas för inj.
SS0008G29	61	1,31	Ja	1,31	99	39	VP. Silica sol kommer ut när hålet öppnas för inj. Silica tränger ut utanför manschett i hål 1, i sprickor ovanför hål 59. Det bubblar från cementplugg i 5F01 (korset)
"	"						

175

Cerment design

		2 säckar	
Recept 1 viktförhållande		För en sats	
Vatten	1,68	67,2 kg	
Cement	1	40 kg	
Groutaid	1,37	54,8 kg	
SP	0,07	2,8 kg	

Design parametrar

Aperture, b	152 mm
Yield stress	15 Pa
Viscosity	25 mPas
Grouting time	45 min
Delta P	7 Mpa
Ger Id>pw/deltaP	

Silica sol design

b<130 mym		130<b<150 mym	
Gel tid	39		25 min
tG	13		8 min
Delta P	30		40 bar
Ger I max (150 mym)=	17		17 m
Ger I min (10 mym)=	1,24		1,1 m

Silica sol *Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injekteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters gellid; vid ca 10 liter kvar i kärlet, sänks flödet men med bibehållet tryck och satsen blandas snabbt. Ny injekteringstiden blir 4/5 av 21 min= 17 min.*

Cement Löpande provning, LP görs för cementen. Skrivs på separat protokoll, blandning görs löpande

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 2B
 Sektion tunnel: 8,47 Verklig sektion (inmätt): 8,60

Datum: 2008-01-29 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 08:00 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 13,4 °C Antaget tryck: 30 bar

Uppmätt data							Beräknad data
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym en manch. öppen	Volym alla öppna	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]	[l/min]
SS0008A02	2	25	0,1	1	0,06	0,06	0,06
SS0008A10	6	25	0,1	1	0,0001	0	0,0001
SS0008A18	10	25	0,1	1	0,05	0,02	0,05
SS0008C03	16	25	0,1	1	0,005	0,001	0,005
SS0008H08	20	25	0,1	1	0,02	0,02	0,02
SS0008I16	26	25	0,1	1	0,01	0,01	0,01
SS0008I12	28	25	0,1	1	0,004	0,003	0,004
SS0008I08	30	25	0,1	1	0,005	0,005	0,005
SS0008D03	34	25	0,1	1	0,24	0,24	0,24
SS0008B22	38	25	20	1	0,26	0,26	0,26
SS0008B18	40	25	20	1	1,2	1,06	1,2
SS0008B14	42	25	18	1	0,23	0,23	0,23
SS0008B10	44	25	18	1	0,08	0,16	0,08
SS0008B06	46	25	0,1	1	0,0001	0	0,0001
SS0008B02	48	25	27	1	0,44	0,42	0,44
SS0008G03	50	25	0,1	1	0,0001	0	0,0001
SS0008G15	56	25	0,1	1	0,0001	0	0,0001
SS0008G23	60	25	0,1	1	0,0001	0	0,0001
SS0008G27	62	25	0,1	1	0,0001	0	0,0001
Antal	19	Max	27	Summa	2,6046	2,489	max
							medel
							median

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med
 Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med
 Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

VattenförlustmätningSkärm nr: **2B**Sektion tunnel: **8,47** Verklig sektion (inmätt): **8,60**Datum: 2008-01-29Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 14:00Mättid: 5 minVattentemp: 13,3 °CInjektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Injektions-tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]	Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0008A02	2	25	0,1	5	5	0,05	456	456		0,01	0
SS0008A10	6	25	0,1	5	5	1,5	438	436	samband 3-5-8	0,3	0,4
SS0008A18	10	25	0,1	5	5	0,05	382	382		0,01	0
SS0008C03	16	25	0,1	5	5	2,3	328	327		0,46	0,2
SS0008H08	20	25	0,1	5	5	0,05	266	266	samband med 19	0,01	0
SS0008I16	26	25	0,1	5	5	7,6	218	212		1,52	1,2
SS0008I12	28	25	0,1	5	5	0,05	101	101		0,01	0
SS0008I08	30	25	0,1	5	5	0,05	108	108		0,01	0
SS0008D03	34	25	0,1	5	5	0,05	102	102		0,01	0
SS0008B22	38	25	20	25	5	0,1	94	94		0,02	0
SS0008B18	40	25	20	25	5	0,2	92	92		0,04	0
SS0008B14	42	25	18	23	5	0,4	89	89		0,08	0
SS0008B10	44	25	18	23	5	0,05	86	86		0,01	0
SS0008B06	46	25	0,1	5	5	0,05	83	83		0,01	0
SS0008B02	48	25	27	32	5	0,8	82	81		0,16	0,2
SS0008G03	50	25	0,1	5	5	0,05	57	57		0,01	0
SS0008G15	56	25	0,1	5	5	0,05	61	61		0,01	0
SS0008G23	60	25	0,1	5	5	0,05	31	31		0,01	0
SS0008G27	62	25	0,1	5	5	0,05	33	23		0,01	2
Antal	19	Max	27								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med Vid mätt volym under injektion på 0 liter är volymen antagen till 0,5 liter, markeras med

Protokollförare: Daniel Lignell

Bilaga 3.2

R-10-39

Vattenförlustmätning

Skärm nr: 2B (2)

Sektion tunnel: 8,47 Verklig sektion (inmätt): 8,60

Datum: 2008-01-30

Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 07:40

Mättid: 5 min

Vattentemp: 13,5 °C

Injektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn [-]	Borrhål nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Injektions- tryck [bar]	Flödes tid [min]	Volym under injektion [liter]	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare [l/min]	Flöde via våg [l/min]
							Före	Efter			
SS0008A02	2	25	4	35	2	0,5	359,7	359,3		0,25	0,2
SS0008A10	6	25	0	35	2	3,9	357,1	353,1		1,95	2
SS0008A18	10	25	5	35	2	0,02	277,2	277,2		0,01	0
SS0008C03	16	25	7	35	2	0,7	282,5	281,8		0,35	0,35
SS0008H08	20	25	0	35	2	16	308,8	293,3		8	7,75
SS0008I16	26	25	11	35	2	0,02	374	374	OBS logac fil saknas, går ej att hämta ut från logac.	0,01	0
"	"										
SS0008I12	28	25	18	35	2	0,6	380,5	379,7		0,3	0,4
SS0008I08	30	25	22	35	2	0,02	387,5	387,5		0,01	0
SS0008D03	34	25	26	35	2	0,6	395,7	394,8	OBS logac filen heter nr 36	0,3	0,45
SS0008B22	38	25	21	35	2	1	402,7	401,8		0,5	0,45
SS0008B18	40	25	28	35	2	2,2	411,8	408,8		1,1	1,5
SS0008B14	42	25	26	35	2	0,2	419,8	419,5		0,1	0,15
SS0008B10	44	25	21	35	2	0,2	425,2	424,5		0,1	0,35
SS0008B06	46	25	20	35	2	0,1	428,8	428,7		0,05	0,05
SS0008B02	48	25	22	35	2	0,2	292,2	291,9		0,1	0,15
SS0008G03	50	25	19	35	2	0,02	297,3	297,3		0,01	0
SS0008G15	56	25	18	35	2	0,02	303,3	303,3		0,01	0
SS0008G23	60	25	4	35	2	4,7	312,8	307,8		2,35	2,5
SS0008G27	62	25	4	35	2	19	349,6	329,8	OBS logac filen heter nr 10	9,5	9,9
Antal	19		Max	28							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med

Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min, markeras med

Vid mätt volym under injektion på 0 liter är volymen antagen till 0,02 liter, markeras med

Protokollförelse: Daniel Lignell

179

InjekteringSkärm nr: **2B**Sektion tunnel: **8,47** Verklig sektion (inmätt): **8,60**Datum: 2008-01-29
Tid: 09:10Antaget grv tryck: 30 bar
Brukstemp: 13.1 °C
Lufttemp: 14.5 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Grv tryck borrhål	Injekterings- tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ord ning
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	
SS0008A02	2	25	0	80	25	4,5:1	20	1	6
SS0008A10	6	25	0	80	25	4,5:1	20	1	10
SS0008A18	10	25	0	80	25	4,5:1	20	1	13
SS0008C03	16	25	0	80	25	4,5:1	20	1	15
SS0008H08	20	25	0	80	25	4,5:1	20	1	17
SS0008I16	26	25	0	80	25	4,5:1	20	1	19
SS0008I12	28	25	0	80	25	4,5:1	20	1	18
SS0008I08	30	25	0	80	25	4,5:1	20	1	16
SS0008D03	34	25	0	80	25	4,5:1	20	1	14
SS0008B22	38	25	20	80	25	4,5:1	20	1	12
SS0008B18	40	25	20	80	25	4,5:1	20	1	11
SS0008B14	42	25	18	80	25	4,5:1	20	1	9
SS0008B10	44	25	18	80	25	4,5:1	20	1	8
SS0008B06	46	25	0	80	25	4,5:1	20	1	7
SS0008B02	48	25	27	80	25	4,5:1	20	1	5
SS0008G03	50	25	0	80	25	4,5:1	20	1	3
SS0008G15	56	25	0	80	25	4,5:1	20	1	1
SS0008G23	60	25	0	80	25	4,5:1	20	1	2
SS0008G27	62	25	0	80	25	4,5:1	20	1	4

Blandning	Geltid	Kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats 240 kg 193-196 l	Geltid	Kg sol	kg salt
	63	206	34
	39	200	40
	21	192	48

Silica sol Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injekteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters geltid; vid ca 10 liter kvar i kärlet, sänks flödet men med bibehållet tryck och satsen blandas snabbt. Ny injekteringstiden blir 4/5 av 21 min= 17 min.

Protokollförare: Daniel Lignell

Bilaga 3.2

Protokollföres under injektering							
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annan tid, annan inj ordning)
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
SS0008A02	2	1,34	JA	2,25	74	25	Stora återslag. Silican pumpas ut i närliggande hål från omgång A.
SS0008A10	6	1,36	JA	2,39	128	25	Samb. 3,5,9
SS0008A18	10	2,09	JA	3,23	67	24	
SS0008C03	16	1,09	JA	3,10	66	25	
SS0008H08	20	2,10	JA	3,30	137	25	Samband med 17,19,21. Stora inflöden. Sänkte flödet på riggen och trycket till ca 17-18 bar.
"	"						
SS0008I16	26	2,11	JA	3,20	70	25	
SS0008I12	28	1,50	JA	3,02	69	25	
SS0008I08	30	1,41	JA	3,17	97	25	
SS0008D03	34	3,10	JA	4,50	76	25	
SS0008B22	38	1,50	JA	3,25	73	25	
SS0008B18	40	1,35	JA	3,10	111	25	
SS0008B14	42	2,20	JA	3,45	58	25	
SS0008B10	44	1,10	JA	2,35	60	25	
SS0008B06	46	2,08	JA	3,03	49	24	Mycket gelad sol i hålet vid avluftning osäkert om allt kom ut
SS0008B02	48	2,17	JA	3,10	70	25	
SS0008G03	50	1,40	JA	2,30	51	25	
SS0008G15	56	2,55	JA	3,35	34	38	
SS0008G23	60	1,59	JA	2,45	94	24	Samband 62,57
SS0008G27	62	1,38	JA	2,30	140	24	Stort samband med hål 61. all sol som pumpas in åker ut igen. Ett lågt tryck(5-10 bar) bibehålls tiden ut. Mycket gelad sol trycks ut ur hål 61.
"	"						

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 2C
 Sektion tunnel: 8,47 Verklig sektion (inmätt): 8,60

Datum: 2008 02 04 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 19:30 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 12,5 °C Antaget tryck: 30 bar

Uppmätt data								Beräknad data
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym en manschett öppen	Volym alla manschetter öppna	Kommentarer	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]
SS0008A13	70	25		1	0,059	0,064		0,059
SS0008H07	83	25		1	0,033	0,037		0,033
SS0008D02	98	25		1	0,188	0,178		0,188
SS0008B19	103	25		1	0,044	0,054		0,044
SS0008B17	104	25		1	0,079	0,057		0,079
SS0008B01	112	25		1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0008G28	126	25		1	0,0001	0,0001		0,0001
Antal	7	Max	0	Summa	0,4032	0,3902	max	0,188
							medel	0,058
							median	0,044

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Vattenförlustmätning

Skärm nr: 2C

Sektion tunnel: 8,47 Verklig sektion (inmätt): 8,60

Datum: 2008-02-04

Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 18:30

Mättid: 5 min

Vattentemp: 12,5 °C

Injektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data										Beräknad data	
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Injektio ns- tryck [bar]	Flödes tid [minuter]	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemäta re [l/min]	Flöde via våg [l/min]
							Före	Efter			
SS0008A13	70	25		35	5	9,4	147,6	137,9	Samband med hål nr. 5, 6, 7	1,88	1,94
SS0008H07	83	25		35	5	12	245,4	232,3	Samband med hål nr. 20, Sol plugg trycks ut.	2,4	2,62
SS0008D02	98	25		35	5	0,7	65,6	64,3		0,14	0,26
SS0008B19	103	25		35	5	0,7	131	129,8	Läcker lite runt manschett, troligen långsgående spricka	0,14	0,24
SS0008B17	104	25		35	5	4,8	206,9	201	Samband med hål nr. 40	0,96	1,18
SS0008B01	112	25		35	5	0,1	290,8	290,8		0,02	0
SS0008G28	126	25		35	5	55	241,3	185,6	Samband med hål nr. 1, 61, 62. Sol-plugg trycks ut ur 61, 62.	11	11,14
Antal	7		Max	0							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min, markeras med

InjekteringSkärm nr: **2C**Sektion tunnel: **8,47** Verklig sektion (inmätt): **8,60**Datum: 2008-02-05Antaget grv tryck: 30 barTid: 17:40Brukstemp: 14,2 °CLufttemp: 12,3 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd alt sektions-längd	Grv tryck borrhål	Injekterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ordning
[-]	[nr]		[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]		[-]	
SS0008A13	70	25		80	25	4,5:1	20	1	5
SS0008H07	83	25		80	25	4,5:1	20	1	6
SS0008D02	98	25		80	25	4,5:1	20	1	7
SS0008B19	103	25		80	25	4,5:1	20	1	4
SS0008B17	104	25		80	25	4,5:1	20	1	3
SS0008B01	112	25		80	25	4,5:1	20	1	2
SS0008G28	126	25		80	25	4,5:1	20	1	1

Protokollföres under injektering							
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Start inj [Tid]	Stoppat vid fullgjord tid [Ja/Nej]	Uppnått tryck efter start inj [Tid]	Inj. volym [l]	Gel tid [min]	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej)
SS0008A13	70	2,17	JA	3,40	122	24	Samband med 5,7,8. Manschett i 5 och 7, 5 var stängd under hela inj, i 7 monterades manchett under inj, flödet stoppades helt när denna stängdes.
"	"						
SS0008H07	83	2,33	JA	3,50	128	24	Samband med 20, stort inflöde, fick sänka tryck och flöde manschetten i 20 pressades ut.
"	"						
SS0008D02	98	2,37	JA	4,00	82	25	Kom sol ur sprickor mellan 98 och 34, sol-plugg trycks ut ur 34.
SS0008B19	103	2,00	JA	3,10	70	25	
SS0008B17	104	1,30	JA	2,50	ca 150	25	Glömde starta logac. Samband med 40, manschetten ville åka ut men kunde till slut stängas.
"	"						
SS0008B01	112	1,50	JA	2,50	73	24	Samband med 48, ingen manchett, sol-plugg trycks ut.
SS0008G28	126	2,06	JA	3,20	106	24	Samband med 1,2,61,62,59, manschetter installerade i alla hål förutom nr 1, det var bara lite flöde ur det.
"	"						

1 sats
240 kg
193-196 l

Geltid	Kg sol	kg salt
63	206	34
39	200	40
21	192	48

Blandning
5,7:1
5,0:1
4,4:1

Geltid	Kg sol	kg salt
63	199,5	35
39	200	40
21	176	40

Protokollförelse: Daniel Lignell

Inflödes- och tryckmätningarSkärm nr: **3 Stuffinj**Sektion tunnel: **20,47** Verklig sektion (inmätt): **20,74**Datum: 2008-03-25Borrhåls diameter: 0,062/0,076 mTid: 19:00Mättid: 1 minVattentemp: 12,8 °CAntaget tryck: bar

Uppmätt data							Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym En mansche tt öpen i taget	Volym Alla manscheter öppna	Kommentarer	Inflöde, Q	
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]	
KI0014B01	1	20	32	1	61	67		61	
SS0020F01	2	20	0	1	0,4	0,2	Litet flöde gör troligen att trycket byggs upp långsamt.	0,36	
SS0020F02	3	20	0	1	3,4	0,17	Litet flöde gör troligen att trycket byggs upp långsamt.	3,4	
SS0020F03	4	20	32	1	3	2,1		3	
Antal	4	Max	32	Summa	67,76	69,47		max	61,00
								medel	16,94
								median	3,20

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Protokollförare: Henrik Svensson

Bilaga 3.3

Vattenförlustmätningar

Skärm nr: 3 Stuffinj

Sektion tunnel: 20,47 Verklig sektion (inmätt): 20,74

Datum: 2008-03-25

Borrhåls diameter: 0,062/0,076 m

Tid: 16:30

Mättid: 5 min

Vattentemp: 12,8 °C

Injektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhåls namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Injektions-tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]	Före	Efter		[l/min]	[l/min]
KI0014B01	1	20	32	37	5	2,5	125,7	123,4		0,5	0,46
SS0020F01	2	20	0	37	5	2	128,9	125,9		0,4	0,6
SS0020F02	3	20	0	37	5	0,6	61,9	61,1		0,12	0,16
SS0020F03	4	20	32	37	5	2,2	108,9	106,6		0,44	0,46
Antal	4	Max	32								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Protokollförelse: Henrik Svensson

Injektering

Skärm nr: **3 Stuffinj**
 Sektion tunnel: **20,47** Verklig sektion (inmätt): **20,74**

Datum: 2008-03-25 och 26 Antaget grv tryck: 32 bar
 Tid: 20:30 Brukstemp: 13,3 °C
 Lufttemp: 12,8 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar				
Borrhål namn	Borrhålsnummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål	Injekterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]		[-]
KI0014B01	1	20	32	100	Recept 1		45	
SS0020F01	2	20	0	100	Recept 1		45	
SS0020F02	3	20	0	100	Recept 1		45	
SS0020F03	4	20	32	100	Recept 1		45	

1 sats
 240 kg
 193-196 l

Geltid	Kg sol	kg salt
63	206	34
39	200	40
21	192	48

Löpande provning, LP görs för cementen. Skrivs på separat protokoll

Protokollföres under injektering							
Borrhål namn	Borrhålsnummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid/löpande provning	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej OBS Ja om vaccumpump)
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
KI0014B01	1	0,00	Nej		451	LP	Stort flöde, kommer inte upp i tryck. Stoppsats blandas och efter 343 l inj.volym pumpas denna istället. Trycket sjönk under ca 2,5 min pga av att stoppsatsen inte var färdigblandad. Trycket hölls under inj vid ung 70 bar. Total pumptid 28 min.
"	"						
"	"						
SS0020F01	2	0,00	Ja	4,00	66	LP	Ja
SS0020F02	3	0,00	Ja	1,20	64	LP	Ja
SS0020F03	4	0,00	Ja	2,30	72	LP	Ja

Protokollförelse: Henrik Svensson och Daniel Lignell

Bilaga 3.3**Cement injektering***Cement egenskaper*

Aperture, b	152 mm
Yield stress	20 Pa
Viscosity	25 mPas

Cement design

Grouting time	45 min
Delta P	5 Mpa
Ger l _d >pw/deltaP	
l ₂ -D=	12,5 m

Silica sol injektering

Gel tid	25 min
tG	8 min
Delta P	40 bar
Ger l max (150 mym)=	17 m
Ger l max (10 mum)=	1,125 m

Recept 1 viktförhållande

Vatten	1,68	67,2 kg
Cement	1	40 kg
Groutaid	1,37	54,8 kg
SP	0,07	2,8 kg

2 säckar**För en sats**

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 3A
 Sektion tunnel: 20,47 Verklig sektion (inmätt): 20,74

Datum: 2008-03-31 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 09:00 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 14 °C Antaget tryck: 35 bar

Uppmätt data							Beräknad data
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym en manch. öppen	Volym alla öppna	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]	[l/min]
SS0020A04	1	20,6	29	1	2,6	1,5	2,6
SS0020A08	3	20,6	31	1	0,9	0,09	0,9
SS0020A12	5	20,6	28	1	4,5	1,9	4,5
SS0020A16	7	20,6	31	1	3,5	0,52	3,5
SS0020A20	9	20,6	34	1	3,4	0,07	3,4
SS0020A24	11	20,6	22	1	0,11	0,00154	0,11
SS0020C01	13	20,6	27	1	0,27	0	0,27
SS0020H02	15	20,6	24	1	0,22	0,016	0,22
SS0020H06	17	20,6	17	1	0,09	0,00245	0,09
SS0020H10	19	20,6	9	1	0,09	0,00427	0,09
SS0020H14	21	20,6	12	1	0,1	0,0021	0,1
SS0020I18	23	20,6	20	1	0,33	0,017	0,33
SS0020I14	25	20,6	22	1	0,28	0,077	0,28
SS0020I10	27	20,6	23	1	0,37	0,057	0,37
SS0020I06	29	20,6	22	1	0,37	0,99	0,37
SS0020I02	31	20,6	22	1	0,43	0,15	0,43
SS0020D01	33	20,6	23	1	0,47	0,21	0,47
SS0020B24	35	20,6	16	1	0,16	0,029	0,16
SS0020B20	37	20,6	28	1	1,8	0,047	1,8
SS0020B16	39	20,6	28	1	1	0,55	1
SS0020B17	41	20,6	22	1	0,0001	0,011	0,0001
SS0020B08	43	20,6	24	1	0,0001	0,00098	0,0001
SS0020B04	45	20,6	3	1	0,00077	0	0,00077
SS0020G01	47	20,6	0,1	1	0,00154	0,00063	0,00154

Bilaga 3.3

Uppmätt data							Beräknad data		
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls-längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Flödes tid [min]	Volym en manch. öppen [liter]	Volym alla öppna [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]	
SS0020G05	49	20,6	22	1	0,058	0,014		0,058	
SS0020G09	51	20,6	28	1	0,018	0,00119	17 droppar	0,018	
SS0020G13	53	20,6	24	1	0,074	0,024		0,074	
SS0020G17	55	20,6	28	1	0,24	0,033		0,24	
SS0020G21	57	20,6	23	1	0,38	0,12		0,38	
SS0020G25	59	20,6	27	1	0,13	0,015		0,13	
SS0020G29	61	20,6	32	1	1,25	0,5		1,25	
Antal	31	Max	34	Summa	23,14251	6,95316		max	4,5
								medel	0,7
								median	0,3

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Protokollförare: Björn Stjärnström, Daniel Lignell, Henrik Svensson

Vattenförlustmätningar

Skärm nr: **3A**
 Sektion tunnel: **20,47** Verklig sektion (inmätt): **20,74**

Datum: 08-03-31 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 15:30 Mättid 3 min
 Vattentemp: °C Injektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls-längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Injektions-tryck [bar]	Flödes tid [min]	Volym under injektion [liter]	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare [l/min]	Flöde via våg [l/min]
							Före	Efter			
SS0020A04	1	20,6	29	39	3	6,3	205	197,4	provtryck 100 bar	2,10000	2,53333
SS0020A08	3	20,6	31	39	3	1	211,1	209,5		0,33333	0,53333
SS0020A12	5	20,6	28	39	3	14	249,4	234,7	provtryck 100 bar ok	4,66667	4,90000
SS0020A16	7	20,6	31	39	3	13	272,8	260,3	provtryck 100 bar ok flyttar dock in manchett lite	4,33333	4,16667
SS0020A20	9	20,6	34	39	3	13	160,6	148,7		4,33333	3,96667
SS0020A24	11	20,6	22	39	3	0,3	138,6	138,4	provtryck ej ok se nedan	0,10000	0,06667
SS0020C01	13	20,6	27	39	3	1	195,9	194,8		0,33333	0,36667
SS0020H02	15	20,6	24	39	3	1,9	64,5	62,7		0,63333	0,60000
SS0020H06	17	20,6	17	39	3	0,3	117,8	117,2	provtryck 100 bar ok	0,10000	0,20000
SS0020H10	19	20,6	9	39	3	1	120,3	119,4		0,33333	0,30000
SS0020H14	21	20,6	12	39	3	3,3	183,3	174,9		1,10000	2,80000
SS0020I18	23	20,6	20	39	3	0,6	261,7	261	provtryck 100 bar ok	0,20000	0,23333
SS0020I14	25	20,6	22	39	3	1	118,4	117,1		0,33333	0,43333
SS0020I10	27	20,6	23	39	3	0,7	22,7	21,2		0,23333	0,50000
SS0020I06	29	20,6	22	39	3	7,3	84,9	76,2	provtryck 100 bar ok	2,43333	2,90000
SS0020I02	31	20,6	22	39	3	9,9	130,3	119,9		3,30000	3,46667
SS0020D01	33	20,6	23	39	3	4,7	190,2	184,6		1,56667	1,86667
SS0020B24	35	20,6	16	39	3	1,3	115,7	114,3	provtryck 100 bar ok	0,43333	0,46667
SS0020B20	37	20,6	28	39	3	5	177,8	170,9		1,66667	2,30000
SS0020B16	39	20,6	28	39	3	7,5	228,6	220,1		2,50000	2,83333
SS0020B17	41	20,6	22	39	3	0,5	270,7	269,7	provtryck 100 bar ok	0,16667	0,33333
SS0020B08	43	20,6	24	39	3	0,4	273,3	272,7		0,13333	0,20000
SS0020B04	45	20,6	3	39	3	1	274,5	274,6		0,33333	-0,03333

Bilaga 3.3

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls-längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Injektions-tryck [bar]	Flödes-tid [min]	Volym under injektion [liter]	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare [l/min]	Flöde via våg [l/min]
							Före	Efter			
SS0020G01	47	20,6	0,1	39	3	0,1	280,7	280,3	provtryck 100 bar ok	0,03333	0,13333
SS0020G05	49	20,6	22	39	3	0,3	282,7	282,4		0,10000	0,10000
SS0020G09	51	20,6	28	39	3	0,2	284,9	284,4		0,06667	0,16667
SS0020G13	53	20,6	24	39	3	0,7	291,9	291,1	provtryck 100 bar ok	0,23333	0,26667
SS0020G17	55	20,6	28	39	3	1	294,6	293,5		0,33333	0,36667
SS0020G21	57	20,6	23	39	3	1,3	298,3	290,7		0,43333	2,53333
SS0020G25	59	20,6	27	39	3	0,7	302,4	301,8	provtryck 100 bar ok	0,23333	0,20000
SS0020G29	61	20,6	32	39	3	9,1	316,5	305,9		3,03333	3,53333
Antal	31	Max	34								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Bh 11: Stoffen knäpper till lite och sen väller vatten ut ur en spricka mitt i stuff. Först trycks cement ut och sedan kommer vatten. Det börjar pysa i bh 7 och vatten läcker ut vid manschetten; troligen trycks vatten ut mellan enkel och dubbelpackern. Va

Protokollförelse: Henrik Svensson

Injekttering

Skärm nr: **3A**
 Sektion tunnel: **20,47** Verklig sektion (inmätt): **20,74**

Datum: 2008-04-01 Antaget grv tryck: 37 bar (från TUT i stuffinjekteringshål)
 Tid: 10:00 Bruktemp: 18,2 °C
 Lufttemp: 14,7 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål	Injekterings-tryck	Vald giltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ord ning
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	
SS0020A04	1	20,6	29	40+37	25	4,5:1	20	0,7	12
SS0020A08	3	20,6	31	77	25	4,5:1	20	0,7	13
SS0020A12	5	20,6	28	77	25	4,5:1	20	0,7	14
SS0020A16	7	20,6	31	77	25	4,5:1	20	0,7	18
SS0020A20	9	20,6	34	77	25	4,5:1	20	0,7	19
SS0020A24	11	20,6	22	77	25	4,5:2	20	0,7	20
SS0020A24	11 (2)	20,6	22	60	14	3,5:1	11	1	32
SS0020C01	13	20,6	27	77	25	4,5:1	20	0,7	24
SS0020H02	15	20,6	24	77	25	4,5:1	20	0,7	25
SS0020H06	17	20,6	17	77	25	4,5:1	20	0,7	26
SS0020H10	19	20,6	9	77	25	4,5:1	20	0,7	27
SS0020H14	21	20,6	12	77	25	4,5:1	20	0,7	30
SS0020I18	23	20,6	20	77	25	4,5:1	20	0,7	31
SS0020I14	25	20,6	22	77	25	4,5:1	20	0,7	29
SS0020I10	27	20,6	23	77	25	4,5:1	20	0,7	28
SS0020I06	29	20,6	22	77	25	4,5:1	20	0,7	23
SS0020I02	31	20,6	22	77	25	4,5:1	20	0,7	22
SS0020D01	33	20,6	23	77	25	4,5:1	20	0,7	21
SS0020B24	35	20,6	16	77	25	4,5:1	20	0,7	17
SS0020B20	37	20,6	28	77	25	4,5:1	20	0,7	16
SS0020B16	39	20,6	28	77	25	4,5:1	20	0,7	15
SS0020B17	41	20,6	22	77	25	4,5:1	20	0,7	11
SS0020B08	43	20,6	24	77	25	4,5:1	20	0,7	10
SS0020B04	45	20,6	3	77	25	4,5:1	20	0,7	9
SS0020G01	47	20,6	0,1	77	25	4,5:1	20	0,7	8
SS0020G05	49	20,6	22	77	25	4,5:1	20	0,7	7
SS0020G09	51	20,6	28	77	25	4,5:1	20	0,7	4
SS0020G13	53	20,6	24	77	25	4,5:1	20	0,7	3
SS0020G17	55	20,6	28	77	25	4,5:1	20	0,7	1
SS0020G21	57	20,6	23	77	25	4,5:1	20	0,7	2
SS0020G25	59	20,6	27	77	25	4,5:1	20	0,7	5
SS0020G29	61	20,6	32	77	25	4,5:1	20	0,7	6

Blandning	Geltid	Kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats	Geltid	Kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Bilaga 3.3

R-10-39

Borrhållsdata		Protokollföres under injektering					
Borrhål namn	Borrhålls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annan tid, annan inj ordning)
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
SS0020A04	1	1,35	Ja	2,3	43	25	Vid första inj försöket har förmodligen vakumsugningen inte fungerat som den ska eftersom endast 20 l går in. Injekteringen avbryts och görs om med bättre resultat.
SS0020A08	3	1,1	Ja	2,2	54	25	
SS0020A12	5	1,1	Ja	2,1	70	25	
SS0020A16	7	2	Ja	2,5	72	25	
SS0020A20	9	1,5	Nej	2,45	141	25	När 80l gått in blandas en stoppsats med 10 min gelltid. Återslag i slag i stuff och utanför lång manschett i hål 11.
SS0020A24	11	1,35	Ja	2,35	54	25	Injektering med enkel manschett placerad 4m in i hålet pga av ytliga slag.
SS0020A24	11 (2)	2,02	Ja	2,3	12	11	Injektering av yttersta sektionen.
SS0020C01	13	1,5	Nej	2,58	151	25	Satsen tog slut. Blandade en ny stoppsats (3,5:1) gelltid 12 min. Samband med hål nr 11 där det läcker ut utanför lång manschett. Återslag i slag i stuff.
SS0020H02	15	2,1	Ja	3,2	72	25	
SS0020H06	17	1,45	Ja	2,53	63	25	
SS0020H10	19	1,55	Ja	3,25	78	25	
SS0020H14	21	2,26	Ja	3,3	63	25	
SS0020I18	23	2,35	Ja	3,4	63	25	
SS0020I14	25	1,45	Ja	3	66	25	
SS0020I10	27	1,5	Ja	3,1	61	25	
SS0020I06	29	1,48	Ja	2,5	51	25	
SS0020I02	31	2,4	Nej	3,5	115	25	Satsen tog slut. Blandade en ny stoppsats (3,5:1) gelltid 11min.
SS0020D01	33	3,1	Ja	4,3	77	25	
SS0020B24	35	1,3	Ja	2,27	78	25	
SS0020B20	37	1,35	Ja	2,38	50	25	Approx. 50 ty missade att starta Logac.
SS0020B16	39	1,5	Nej	2,5	137	25	Satsen tog slut. Blandade en ny stoppsats (3,5:1) gelltid 13min.
SS0020B17	41	1,38	Ja	2,3	48	25	
SS0020B08	43	2,02	Ja	2,55	46	25	
SS0020B04	45	1,4	Ja	2,3	45	25	
SS0020G01	47	1,46	Ja	2,32	42	25	
SS0020G05	49	1,15	Ja	2	42	25	
SS0020G09	51	2,4	Ja	3,2	39	25	
SS0020G13	53	2,25	Ja	3,15	47	25	
SS0020G17	55	3,2	Ja	4,02	38	25	
SS0020G21	57	2,25	Ja	3,1	44	25	
SS0020G25	59	2,15	Ja	3	43	25	
SS0020G29	61	3,3	Ja	4,09	58	25	

195

Cement design

		2 säckar	
Recept 1 viktförhållande		För en sats	
Vatten	1,68	67,2 kg	
Cement	1	40 kg	
Groutaid	1,37	54,8 kg	
SP	0,07	2,8 kg	

Design parametrar

Aperture, b	152 mm
Yield stress	15 Pa
Viscosity	25 mPas
Grouting time	45 min
Delta P	7 Mpa
Ger Id>pw/deltaP	

Silica sol design

b<130 mym	Ökar tryck sänker geltid än tidigare
Gel tid	25 min
tG	8 min
Delta P	40 bar
Ger I max (150 mym)=	17 m
Ger I min (10 mym)=	1,1 m

Vid ytliga slag, använd Geltid=14 min.

Silica sol: Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injekteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters geltid; vid ca 10 liter kvar i kärlet, sänks flödet men med bibehållet tryck och satsen blandas snabbt. Ny injekteringstiden blir 4/5 av 21 min= 17 min.

Cement: Löpande provning, LP görs för cementen. Skrivs på separat protokoll, blandning görs löpande

Protokollförare: Daniel Lignell

Inflödes- och tryckmätningarSkärm nr: **3B**Sektion tunnel: **20,47** Verklig sektion (inmätt): **20,74**Datum: 2008-04-07Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 08:00Mättid: 1 Min

Vattentemp: _____ °C

Antaget tryck: 30 bar

Uppmätt data								Beräknad data
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym en manch. öppen	Volym alla öppna	Kommentarer (uppmätt data)	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]
SS0020A06	4	19,5	3	1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0020A10	6	19,5	4	1	0,0001	0,015	slumphål	0,0001
SS0020A18	10	19,5	16	1	0,28	0,0001		0,28
SS0020A22	12	19,5	22	1	0,23	0,35		0,23
SS0020A26	14	19,5	14	1	0,042	0,012		0,042
SS0020C03	16	19,5	10	1	0,1	0,015	slumphål	0,1
SS0020I04	32	19,5	19	1	0,24	0,045		0,24
SS0020D03	34	19,5	14	1	0,15	0,1	slumphål	0,15
SS0020B26	36	19,5	20	1	0,04	0,024		0,04
SS0020B22	38	19,5	1	1	0,21	0,016		0,21
SS0020B18	40	19,5	21	1	0,94	1,9		0,94
SS0020B14	42	19,5	31	1	1,8	0,26		1,8
SS0020B10	44	19,5	4	1	0,0001	0,006	slumphål	0,0001
SS0020G15	56	19,5	10	1	0,0001	0,007	slumphål	0,0001
SS0020G19	58	19,5	0,1	1	0,0001	0,01		0,0001
Antal	15	Max	31	Summa	4,0325	2,7602	max	1,800
							medel	0,269
							median	0,100

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Protokollförelse: Björn Stjärnström

VattenförlustmätningSkärm nr: **3B**Sektion tunnel: **20,47** Verklig sektion (inmätt): **20,74**Datum: 2008-04-07Tid: 10:00

Vattentemp: _____ °C

Borrhåls diameter: 0,062 mMättid 3 MinInjektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Injektions- tryck [bar]	Flödes- tid [min]	Volym under injektion [liter]	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare [l/min]	Flöde via våg [l/min]
							Före	Efter			
SS0020A06	4	19,5	3	36	3	0,2	417,3	416,7		0,067	0,2
SS0020A10	6	19,5	4	36	3	0,6	411,5	410,7		0,2	0,267
SS0020A18	10	19,5	16	36	3	3,1	352,9	348,4		1,033	1,5
SS0020A22	12	19,5	22	36	3	1,5	303,2	302,3	Flödet ur slag i stuffen ökar	0,5	0,3
SS0020A26	14	19,5	14	36	3	0,6	249,2	248,8		0,2	0,133
SS0020C03	16	19,5	10	36	3	0,6	194,8	194,0		0,7	0,267
SS0020I04	32	19,5	19	36	3	2,1	334,5	330,6		0,833	1,3
SS0020D03	34	19,5	14	36	3	2,5	278,0	274,9		0,4	1,033
SS0020B26	36	19,5	20	36	3	1,2	220,4	219,1		0,5	0,433
SS0020B22	38	19,5	1	36	3	1,5	166,2	165,0		0,3	0,4
SS0020B18	40	19,5	21	36	3	0,9	299,7	298,2		0,067	0,5
SS0020B14	42	19,5	31	36	3	0,2	294,7	294,2		0,1	0,167
SS0020B10	44	19,5	4	36	3	0,3	290,6	290,1		0,1	0,167
SS0020G15	56	19,5	10	36	3	0,3	431,3	431,0		0,1	0,1
SS0020G19	58	19,5	0,1	36	3	0,1	428,0	425,6		0,033	0,8
Antal	15		Max	31							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markeras med
 OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Protokollförelse: Daniel Lignell

Injekttering

Skärm nr: **3B**
 Sektion tunnel: **20,47** Verklig sektion (inmätt): **20,74**

Datum: 2008-04-07
 Tid: 16:03

Antaget grv tryck: 30 bar
 Brukstemp: 13,3 °C
 Lufttemp: 14,2 °C

Borrhålsdata				Valda injektteringsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål	Injektterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ordning
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	[-]
SS0020A06	4	19,5	3	77	25	4,5:1	20	0,7	6
SS0020A10	6	19,5	4	77	25	4,5:1	20	0,7	7
SS0020A18	10	19,5	16	77	25	4,5:1	20	0,7	8
SS0020A22	12	19,5	22	77	11	3,5:1	9	1	13
SS0020A26	14	19,5	14	77	25	4,5:1	20	0,7	14
SS0020C03	16	19,5	10	77	25	4,5:1	20	0,7	15
SS0020I04	32	19,5	19	77	25	4,5:1	20	0,7	12
SS0020D03	34	19,5	14	77	25	4,5:1	20	0,7	11
SS0020B26	36	19,5	20	77	25	4,5:1	20	0,7	10
SS0020B22	38	19,5	1	77	25	4,5:1	20	0,7	9
SS0020B18	40	19,5	21	77	25	4,5:1	20	0,7	5
SS0020B14	42	19,5	31	77	25	4,5:1	20	0,7	4
SS0020B10	44	19,5	4	77	25	4,5:1	20	0,7	2
SS0020G15	56	19,5	10	77	25	4,5:1	20	0,7	1
SS0020G19	58	19,5	0	77	25	4,5:1	20	0,7	3

Blandning	Geltid	Kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats	Geltid	Kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Silica sol design**b<60 mym**

Gel tid	25
tG	8
Delta P	50
Ger I max (150 mym)=	18
Ger I min (10 mym)=	1,3

Borrhålstdata		Protokollföres under injektering					Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annan tid, annan inj ordning)
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid [Ja/Nej]	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
SS0020A06	4	1,40	Ja	2,25	51	25	
SS0020A10	6	1,48	Ja	2,40	49	24	
SS0020A18	10	1,37	Nej	2,28	177	25	Återslag i stuff på vänster sida, blandade en stoppsats med gelltid 11 min
SS0020A22	12	1,25	Ja	2,45	102	11	Återslag i stuff och utanför manschett i hål nr 11. Stoffen knakar till två gånger under inledningen av injekteringen, trycket sänks och stoffen kontrolleras men inga bomma partier hittas och injekteringen fortsätter med lägre tryck.
SS0020A26	14	1,38	Nej	2,30	237	26	Återslag i stuff + vänster vägg, blandade en stoppsats med gelltid 12 min.
SS0020C03	16	1,40	Ja	3,10	57	25	
SS0020I04	32	1,25	Ja	2,40	63	24	
SS0020D03	34	1,20	Ja	2,30	74	25	
SS0020B26	36	1,33	Ja	2,35	59	25	
SS0020B22	38	1,50	Ja	2,50	54	24	Fullt med silica sol i hålet vid avluftning, troligen från en tidigare inj i hål bredvid.
SS0020B18	40	1,36	Nej	2,20	83	25	Stort flöde i början, fick blanda en stoppsats med gelltid 10 min.
SS0020B14	42	2,40	Ja	3,20	53	26	
SS0020B10	44	1,37	Ja	2,20	47	25	
SS0020G15	56	2,08	Ja	2,55	46	25	
SS0020G19	58	2,30	Ja	3,20	40	26	

Silica sol Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injekteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 11 minuters gelltid; vid ca 10 liter kvar i kärlet, sänks flödet men med bibehållet tryck och satsen blandas snabbt. Ny injekteringstiden blir 4/5 av 11 min= 9 min.

Protokollförelse: Daniel Lignell

Bilaga 3.3

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 3C
 Sektion tunnel: 20,47 Verklig sektion (inmätt): 20,74

Datum: 2008 04 08 Inflöde en manchett öppen och tryck
 Tid: 18:40 mätt den 9 april på förmiddagen.
 Vattentemp: 14 °C

Borrhåls diameter: 0,062 m
 Mättid: 1 Min
 Antaget tryck: 30 bar

Uppmätt data							Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym en manchett öppen [liter]	Volym alla manschetter öppna [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q	
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]	
SS0020A09	69	18,5	0	1	0,0001	0,0001	slumphål	0,0001	
SS0020A21	75	18,5	0	1	0,067	0,015		0,067	
SS0020A23	76	18,5	0	1	0,000021	0,016	3 droppar	0,000021	
SS0020H05	81	18,5	15	1	0,047	0,0075	slumphål	0,047	
SS0020I03	96	18,5	0	1	0,023	0,02	slumphål	0,023	
SS0020B09	108	18,5	10	1	0,0001	0,0001	slumphål	0,0001	
SS0020G12	119	18,5	0	1	0,021	0,018	slumphål	0,021	
Antal	7	Max	15	Summa	0,158221	0,0767		max	0,067
								medel	0,023
								median	0,021

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Protokollförare: Björn Stjärnström

VattenförlustmätningSkärm nr: **3C**Sektion tunnel: **20,47** Verklig sektion (inmätt): **20,74**Datum: 2008-04-08Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 19:25Mättid 5 MinVattentemp: 13,2 °CInjektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Injektions- tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[minuter]		Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0020A09	69	18,5		37	3	0	362	361,7		0	0,1
SS0020A21	75	18,5		37	3	0,2	249,1	248,9		0,067	0,067
SS0020A23	76	18,5		37	3	0,4	133	132,8	Problem med att få manschett att stanna kvar. Stoppar in längre manschett ca 3 m in i hålet och då går det bättre.	0,133	0,067
SS0020H05	81	18,5		37	3	0,2	192,8	192,6		0,067	0,067
SS0020I03	96	18,5		37	3	2,9	256	253,8	Återslag i hål 32, monterar manschett i hål 32 och gör en ny VFL	0,967	0,733
SS0020I03	96:2	18,5		37	3	1,2	57,1	55,8	Inget återslag längre.	0,4	0,433
SS0020B09	108	18,5		37	3	0	181,6	181,6		0	0
SS0020G12	119	18,5		37	3	0,2	370,3	369,7			
Antal	7		Max	0							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Protokollförelse: Henrik Svensson

Bilaga 3.3

R-10-39

Injekttering

Skärm nr: **3C**
 Sektion tunnel: **20,47** Verklig sektion (inmätt): **20,74**

Datum: 2008-04-09 Antaget grv tryck: 30 bar
 Tid: 10:45 Brukstemp: 11,9 °C
 Lufttemp: 12,5 °C

Blandning	Geltid	Kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

Borrhålsdata				Valda injektteringsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd alt sektion-längd	Grv tryck borrhål	Injektterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ordning
[-]	[nr]		[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]		[-]	
SS0020A09	69	18,5	0	77	25	4,5:1	20	1	4
SS0020A21	75	18,5	0	77	25	4,5:1	20	1	5
SS0020A23	76	18,5	0	77	25	4,5:1	20	1	6
SS0020H05	81	18,5	15	77	25	4,5:1	20	1	7
SS0020I03	96	18,5	0	77	25	4,5:1	20	1	3
SS0020B09	108	18,5	10	77	25	4,5:1	20	1	2
SS0020G12	119	18,5	0	77	25	4,5:1	20	1	1
SS0020A22	12	19,5		77	12	3,5:1			8

1 sats
240 kg
193-196 l

Geltid	Kg sol	kg salt
63	206	34
39	200	40
21	192	48

Ominjekttering

Protokollföres under injekttering							
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej)
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
SS0020A09	69	1,32	Ja	2,10	45	29	Lite lång geltid, kompenserar med längre pumptid. Justerad blandning pga av lång geltid i förra hålet.
SS0020A21	75	3,10	Ja	4,22	74	28	"
SS0020A23	76	1,45	Ja	2,38	95	25	"
SS0020H05	81	1,50	Ja	2,40	57	25	
SS0020I03	96	1,35	Ja	2,40	75	29	Lite lång geltid, kompenserar med längre pumptid.
SS0020B09	108	1,33	Ja	2,30	37	27	
SS0020G12	119	1,44	Ja	2,38	52	26	
SS0020A22	12	2	Ja	2,3	58	11	Ominjekttering från skärm 3B. Läckte genom ytliga sprickor i vänsterväggen.

Protokollföres: Daniel Lignell

203

Inflödes och tryckmätningar

Skärm nr: **4 Stuffinj**
 Sektion tunnel: **32,47** Verklig sektion (inmätt): **32,94**

Datum: 2008-05-21 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 07:20 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 14 °C Antaget tryck: bar

Uppmätt data								Beräknad data
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym En manschett öppen i taet [liter]	Volym Alla manschetter öppna [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]				
SS0032F01	1	20	29	1	0,8	0,74		0,8
SS0032F02	2	20	28	1	0,1	0,059		0,095
SS0032F03	3	20	24	1	0,52	0,36		0,52
Antal	3	Max	29	Summa	1,415	1,159	max	0,800
							medel	0,472
							median	0,520

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Protokollförare: Henrik Svensson

VattenförlustmätningarSkärm nr: **4 Stuffinj**Sektion tunnel: **32,47** Verklig sektion (inmätt): **32,94**Datum: 2008-05-21Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 07:50Mättid: 3 MinVattentemp: 12,8 °CInjektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhåls namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Injektio ns- tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
							Före	Efter			
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]				[l/min]	[l/min]
SS0032F01	1	20	29	36	3	1,8			ej mätt vikten, ty packning under blandare läcker	0,6	0
SS0032F02	2	20	28	36	3	0,2			ej mätt vikten, ty packning under blandare läcker	0,067	0
SS0032F03	3	20	24	36	3	0,8			ej mätt vikten, ty packning under blandare läcker	0,267	0
Antal	3		Max	29							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Protokollförare: Henrik Svensson

Injekttering

Skärm nr: 4 Stuffinj
 Sektion tunnel: 32,47 Verklig sektion (inmätt): 32,94

Datum: 2008-05-21 Antaget grv tryck: 32 bar
 Tid: 08:00 Brukstemp: 19,3 °C
 Lufttemp: 17,9 °C

Borrhålsdata				Valda injektteringsparametrar			
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål	Injektterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio	Effektiv inj tid	Antal satser
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min] Ratio [X:Y]		[-]
SS0032F01	1	20	29	100	Recept 1	45	
SS0032F02	2	20	28	100	Recept 1	45	
SS0032F03	3	20	24	100	Recept 1	45	

1 sats	Geltid	Kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Löpande provning, LP görs för cementen. Skrivs på separat protokoll

Protokollföres under injekttering					
Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid/löpande provning	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej OBS Ja om vaccumpump)
[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
	Ja		80		Ja
	Ja		63		Ja Cementfärgat vatten kom ut ur borrhålet vid vakuumpumpning.
	Ja		66		Ja Pumpen stängdes av misstag av under ett par minuter, trycket sjönk då till 45 bar innan det uppmärksammades och pumpen kom igång igen. Pumpningen fortsatte ytterligare några minuter över tiden för att kompensera för detta.

Protokollförare: Daniel Lignell och Henrik Svensson

Cement injektering

<i>Cement egenskaper</i>	mm
Aperture, b	152 Pa
Yield stress	20 mPas
Viscosity	25

<i>Cement design</i>	min
Grouting time	45 Mpa
Delta P	5
Ger $l_d > p_w / \Delta P$	m
$l_2 - D =$	12,5

2 säckar

Recept 1 viktförhållande		För en sats
Vatten	1,68	67,2 kg
Cement	1	40 kg
Groutaid	1,37	54,8 kg
SP	0,07	2,8 kg

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 4A
 Sektion tunnel: 32,47 Verklig sektion (inmätt): 32,94

Datum: 2008-05-21 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 22:00 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 14 °C Antaget tryck: 32 bar

Borrhålsdata								Beräknad data
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym en manch. öppen	Volym alla öppna	Kommentarer	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]
SS0032A02	1	20	22	1	0,6	0,16		0,6
SS0032A06	3	20	24	1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0032H01	5	20	21	1	0,06	0,044		0,06
SS0032H05	7	20	19	1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0032I01	9	20	23	1	0,18	0,12		0,18
SS0032B06	11	20	25	1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0032B02	13	20	26	1	0,12	0,126		0,12
SS0032G03	15	20	24	1	0,051	0,041		0,051
SS0032G07	17	20	28	1	0,22	0,15		0,22
Antal	9	Max	28	Summa	1,2313	0,6413	max	0,600
							medel	0,137
							median	0,060

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Protokollförare: Björn Stjärnström

VattenförlustmätningarSkärm nr: **4A**Sektion tunnel: **32,47** Verklig sektion (inmätt): **32,94**Datum: 08-05-21Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 22:50Mättid: 3 minVattentemp: 14 °CInjektionsövertryck: 5 bar

Borrhålsdata									Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Injektions- tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]	Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0032A02	1	20	22	36	3	0,4	239,82	239,30		0,1333	0,1733
SS0032A06	3	20	24	36	3	0,3	155,10	154,54		0,1	0,1867
SS0032H01	5	20	21	36	3	0,4	212,60	212,26		0,1333	0,1133
SS0032H05	7	20	19	36	3	0,8	275,30	271,48		0,2667	1,2733
SS0032I01	9	20	23	36	3	0,8	329,20	328,60		0,2667	0,2
SS0032B06	11	20	25	36	3	2,8	368,52	365,58		0,9333	0,98
SS0032B02	13	20	26	36	3	1	64,60	63,40		0,3333	0,4
SS0032G03	15	20	24	36	3	0,7	120,56	119,90		0,2333	0,22
SS0032G07	17	20	28	36	3	0,4	180,14	179,56		0,1333	0,1933
Antal	9	Max	28								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Protokollförelse: Daniel Lignell

Injektoring

Skärm nr: **4A**
 Sektion tunnel: **32,47** Verklig sektion (inmätt): **32,94**

Datum: 2008-05-22 Antaget grv tryck: 32 bar
 Tid: 10:00 Bruktemp: 14 °C
 Lufttemp: 14,7 °C

Borrhålsdata				Valda injektionsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål	Injektions-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ordning
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	
SS0032A02	1	20	32	62	39	5,2:1	31	0,7	3
SS0032A06	3	20	32	62	39	5,2:1	31	0,7	4
SS0032H01	5	20	32	62	39	5,2:1	31	0,7	7
SS0032H05	7	20	32	62	39	5,2:1	31	0,7	9
SS0032I01	9	20	32	62	39	5,2:1	31	0,7	8
SS0032B06	11	20	32	62	39	5,2:1	31	0,7	6
SS0032B02	13	20	32	62	39	5,2:1	31	0,7	5
SS0032G03	15	20	32	62	39	5,2:1	31	0,7	2
SS0032G07	17	20	32	62	39	5,2:1	31	0,7	1

* Trycket ej mätt, antaget som stationärt tryck

Blandning	Geltid	Kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats 240 kg 193-196 l	Geltid	Kg sol	kg salt
	63	206	34
	39	200	40
	21	192	48

Protokollföres under injektoring					
Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annan tid, annan inj ordning)
[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
1,42	Ja	2,37	65	39	
1,30	Ja	2,25	57	39	
2,10	Ja	3,10	62	39	
1,50	Ja	2,45	61	40	
1,45	Ja	3,00	64	39	
1,45	Ja	2,50	62	40	
1,58	Ja	2,56	63	39	
1,39	Ja	2,41	65	41	Pga av lite kort geltid i hål 17 ökades mängden Silica sol något till 5,6:1
1,36	Ja	2,40	66	36	Blandningsförhållande 5,5:1, logacen startades innan avluftningen var klar detta har dock dragits bort från den injekturerade volymen.

Silica sol *Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injekteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters giltid; vid ca 10 liter kvar i kärlet, sänks flödet men med bibehållet tryck och satsen blandas snabbt. Ny injekteringstiden blir 4/5 av 21 min= 17 min.*

Protokollförare: Daniel Lignell och Henrik Svensson

Silica sol design

b<130 mym		130<b<150 mym	
Gel tid	39		25 min
tG	13		8 min
Delta P	30		40 bar
Ger I max (150 mym)=	17		17 m
Ger I min (10 mym)=	1,24		1,1 m

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: **4**
 Sektion tunnel: **32,47** Verklig sektion (inmätt): **32,94**

Datum: 2008-05-26 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 15:10 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 14,2 °C Antaget tryck: bar

Borrhålsdata							Beräknad data	
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Flödes tid [min]	Volym en manch. öppen [liter]	Volym alla öppna [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]
SS0032A04	2	19		1	0,067	0,046		0,067
SS0032A08	4	19		1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0032H03	6	19		1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0032I03	8	19		1	0,016	0,016		0,016
SS0032B08	10	19		1	0,00105	0	15 droppar	0,00105
SS0032B04	12	19		1	0,41	0,39		0,41
SS0032G01	14	19		1	0,025	0,024		0,025
SS0032G05	16	19		1	0,045	0,053		0,045
SS0032G09	18	19		1	0,29	0,27		0,29
Antal	9	Max	0	Summa	0,85425	0,7992	max	0,410
							medel	0,095
							median	0,025

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markeras med

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Protokollförelse: Björn Stjärnström

VattenförlustmätningSkärm nr: **4B**Sektion tunnel: **32,47** Verklig sektion (inmätt): **32,94**Datum: 2008-05-26Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 16:10Mättid: 3 MinVattentemp: 14,2 °CInjektionsövertryck: 5 bar

Borrhålsdata									Beräknad data		
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Injektions- tryck [bar]	Flödes tid [min]	Volym under injektion [liter]	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemät [l/min]	Flöde via våg [l/min]
							Före	Efter			
SS0032A04	2	19		36	3	0,9	431,18	429,64		0,3	0
SS0032A08	4	19		36	3	0,1	218,2	217,94		0,0333333	0
SS0032H03	6	19		36	3	0,0001	275,58	275,39		3,333E-05	0
SS0032I03	8	19		36	3	0,6	331,22	331		0,2	0
SS0032B08	10	19		36	3	0,4	386,32	385,98		0,1333333	0
SS0032B04	12	19		36	3	1,7	214,28	212,5		0,5666667	0
SS0032G01	14	19		36	3	0,3	268,02	261,92		0,1	0
SS0032G05	16	19		36	3	0,6	322,4	321,36		0,2	0
SS0032G09	18	19		36	3	0,3	379,6	278,8		0,1	0
Antal	9		Max	0							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är volymen antagen till 0,0001 l, markerat med **Protokollförelse:** Daniel Lignell och Henrik Svensson

Injekttering

Skärm nr: **4B**
 Sektion tunnel: **32,47** Verklig sektion (inmätt): **32,94**

Datum: 2008-05-26 Antaget grv tryck: 32 bar
 Tid: 18:00 Brukstemp: 14,7 °C
 Lufttemp: 16,7 °C

Borrhålsdata				Valda injektteringsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål*	Injektterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ordning
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	
SS0032A04	2	19	32	62	39	5,4:1	31	0,5	4
SS0032A08	4	19	32	62	39	5,4:1	31	0,5	6
SS0032H03	6	19	32	62	39	5,4:1	31	0,5	8
SS0032I03	8	19	32	62	39	5,4:1	31	0,5	9
SS0032B08	10	19	32	62	39	5,4:1	31	0,5	7
SS0032B04	12	19	32	62	39	5,4:1	31	0,5	5
SS0032G01	14	19	32	62	39	5,4:1	31	0,5	3
SS0032G05	16	19	32	62	39	5,4:1	31	0,5	2
SS0032G09	18	19	32	62	39	5,4:1	31	0,5	1

Blandning	Geltid	Kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats 240 kg 193-196 l	Geltid	Kg sol	kg salt
	63	206	34
	39	200	40
	21	192	48

Protokollföres under injekttering					
Start inj	Stoppat vid fullgjord tid [Ja/Nej]	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annan tid, annan inj ordning)
[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
1,29	Ja	2,30	64	39	Glömde starta logac direkt, inj volym är ca 64 liter (avlåst på väg).
1,36	Ja	2,35	58	38	
1,25	Ja	2,20	53	40	
1,20	Ja	2,15	55	39	
1,23	Ja	2,25	59	39	
2,20	Ja	3,55	67	36	
1,38	Ja	2,33	61	39	
1,30	Ja	2,28	62	39	
1,48	Ja	2,49	64	32	Snabb geltid, oklart varför, satsen efter är bättre.

Silica sol design

b<130 mym		130<b<150 mym
Gel tid	39	25 min
tG	13	8 min
Delta P	30	40 bar
Ger l max (150 mym)=	17	17 m
Ger l min (10 mym)=	1,24	1,1 m

Silica sol Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injektteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters geltid; vid ca 10 liter kvar i kärlet, sänks flödet men med bibehållet tryck och satsen blandas snabbt. Ny injektteringstiden blir 4/5 av 21 min= 17 min.

* Antaget grundvattenryck

Protokollföres: Daniel Lignell

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 4C
 Sektion tunnel: 32,47 Verklig sektion (inmätt): 32,94

Datum: 2008 05 27 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 14:30 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 14,2 °C Antaget tryck: 31 bar

Uppmätt data								Beräknad data
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer* [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Flödes tid [min]	Volym en manschett öppen [liter]	Volym alla manschetter öppna [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]
SS0032A05	52	18		1	0	0		0,0001
SS0032H02	55	18		1	0	0		0,0001
SS0032I02	58	18		1	0	0		0,0001
SS0032B05	61	18		1	0,1	0,1		0,1
SS0032G06	66	18		1	0,029	0,028		0,029
Antal	5	Max	0	Summa	0,129	0,128	max	0,100
							medel	0,026
							median	0,0001

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l

Om flödet mäts i droppar antas en droppe vara 0,070 milliliter

Vattenförlustmätning

Skärm nr: 4C

Sektion tunnel: 32,47 Verklig sektion (inmätt): 32,94

Datum: 2008-05-27

Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 15:00

Mättid 3 min

Vattentemp: 14,2 °C

Injektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Injektions-tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[minuter]		Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0032A05	52	18		36	3		449,50	449,50		0	0
SS0032H02	55	18		36	3		393,50	393,46		0	0,0133
SS0032I02	58	18		36	3		335,62	335,60		0	0,0067
SS0032B05	61	18		36	3		284,82	283,96		0	0,2867
SS0032G06	66	18		36	3		228,16	227,86		0	0,1
Antal	5		Max	0							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Bilaga 3.4

Injekttering

Skärm nr:

4C

Sektion tunnel:

32,47 Verklig sektion (inmätt): 32,94

Datum:

2008-05-27

Antaget grv tryck: 32 bar

Tid:

07:00

Brukstemp: 15,1 °C

Lufttemp: 15,8 °C

Borrhålsdata				Valda injektteringsparametrar									
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd alt sektionens-längd	Grv tryck borrhål*	Injektterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ord ning	Borrhålsnummer	Silica sol i blandaren före injekttering	Silica sol i blandaren efter injekttering	Injektterad vikt
[-]	[nr]		[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]		[-]					
SS0032A05	52	18	32	62	39	5,4:1	31	1	4	52	169,86	101,64	68,22
SS0032H02	55	18	32	62	39	5,4:1	31	0,5	5	55	165,48	108,74	56,74
SS0032I02	58	18	32	62	39	5,4:1	31	0,5	3	58	156,08	87,6	68,48
SS0032B05	61	18	32	62	39	5,4:1	31	0,5	2	61	170,02	102,42	67,6
SS0032G06	66	18	32	62	39	5,4:1	31	0,5	1	66	160,48	85,32	75,16

* Antaget stationärt grundvattentryck

Blandning	Geltid	Kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats	Geltid	Kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Protokollföres under injekttering					
Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej)
[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]	
1,20	Ja	2,25	54	39	
1,57	Ja	2,45	44	38	
1,10	Ja	2,30		39	Loggningen fungeade inte så vikten avlästes istället
1,22	Ja	2,10		38	Loggningen fungeade inte så vikten avlästes istället
1,55	Ja	3,00		38	Loggningen fungeade inte så vikten avlästes istället

Protokollföres: Daniel Lignell

Inflödes och tryckmätningar

Skärm nr: 5Sektion tunnel: 48,47 Verklig sektion (inmätt): 48,67Datum: 2008-08-26
Tid: 08:00
Vattentemp: 16,4 °CBorrhåls diameter: 0,062 m
Mättid: 1 min
Antaget tryck: 35 bar

Uppmätt data

Beräknad data

Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym En mansche tt öpen i taget	Volym Alla manschetter öppna	Kommentarer	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]
SS0048F01	1	20	11	1	0,21	0,14		0,14
SS0048F02	2	20	0,1	1	0,055	0,043		0,043
SS0048F03	3	20	35	1	2,7	2,5		2,5
SS0048F04	4	20	33	1	0,36	0,34	litet läckage från gångorna på manschett	0,34
							max	2,50
							medel	0,76
							median	0,24

Protokollförare: Henrik

VattenförlustmätningarSkärm nr: 5 Sektion tunnel: 48 Verklig sektion (inmätt): 48,67Datum: 2008-08-26Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 08:40Mättid: 3 minVattentemp: 16,4 °CInjektionsövertryck: 5 bar**Uppmätt data**Antasget stationärt tryck = 35 bar**Beräknad data**

Borrhåls namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Injektions-tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
							Före	Efter			
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]				[l/min]	[l/min]
SS0048F01	1	20	11	40	3	2,4	244,2	240,4		0,800	1,267
SS0048F02	2	20	0,1	40	3	0,2	180,3	180,6		0,067	-0,100
SS0048F03	3	20	35	40	3	8,7	321,8	308,7		2,900	4,367
SS0048F04	4	20	33	40	3	0,3	358,4	357,8	Det droppar lite från gängorna på manschetten	0,100	0,200
Antal		4	Max		35						

Protokollörare: Daniel och Henrik

Injektering

Skärm nr: 5 Stuffinj
 Sektion tunnel: 48,47 Verklig sektion (inmätt): 48,67

Datum: 2008-08-26 Antaget grv tryck: 35 bar
 Tid: 12:30 Brukstemp: 16 °C
 Lufttemp: 19,1 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål	Injekterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj. ordn.
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	[-]
SS0048F01	1	20	11	75	39	5,8:1	31	0,5	1
SS0048F02	2	20	0,1	75	39	5,7:1	31	0,5	3
SS0048F03	3	20	35	75	39	5,7:1	31	2	2
SS0048F04	4	20	33	75	39	5,7:1	31	0,5	4

Cement injektering*Cement egenskaper*

Aperture, b 152 µm
 Yield stress 20 Pa
 Viscosity 25 mPas

Cement design

Grouting time 45 min
 Delta P 5 MPa
 Ger $l_d > p_w / \Delta P$
 $l_2 - D = 12,5$ m

Recept 1 viktförhållande **2 säckar**
För en sats

Vatten	1,68	67,2 kg
Cement	1	40 kg
Groutaid	1,37	54,8 kg
SP	0,07	2,8 kg

1 sats	Geltid	kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Borrhålsdata		Protokollföres under injektering							
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid/löpande provning	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej OBS Ja om vaccumpump)		
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]			
SS0048F01	1	1,44	Nej	2,55	235	42	Ja	Sats 1 tog slut & en 25 min sats (4,9:1) blandades, geltid blev 27 min. Justerar blandn till nästa hål (3) eftersom geltider var lite långa.	
"	"								
SS0048F02	2	1,35	Ja	2,45	64	39	Ja	När hålet öppnades för avluftn kom mkt silica sol ut, det fortsätter rinna färgat vatten ända tills vi ska injektera hålet (ca 10min senare), Sats 1 tog slut, blandade en 25 min sats (4,9:1). Geltiden blev 25 min.	
"	"								
SS0048F03	3	1,45	Nej	2,55	341	39	Ja		
SS0048F04	4	1,45	Ja	2,57	76	38	Ja		

Löpande provning, LP görs för cementen. Skrivs på separat protokoll
OBS! Manschett placeras så långt in i hålet som det går.

Protokollförare: Daniel Lignell

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: **5A** Sektion tunnel: **48** Verklig sektion (inmätt): **48,67**

Datum: 2008-08-28 Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 07:45 Mättid: 1 Min

Vattentemp: 16,8 °C Antaget tryck: 35 bar

Borrhålsdata

Beräknad data

Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Flödes tid [min]	Volym en manch. öppen [liter]	Volym alla öppna [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]	
SS0048A01	1	20	28	1	0,12	0,073		0,12	
SS0048A04	3	20	0,1	1	0,0001	0		0,0001	
SS0048A07	5	20	20	1	0,1	0,1		0,1	
SS0048H02	7	20	0,1	1	0,0001	0,0001		0,0001	
SS0048H04	9	20	0,1	1	0,0001	0,0001		0,0001	
SS0048I05	11	20	0,1	1	0,15	0,024		0,15	
SS0048I03	13	20	19	1	0,0001	0,0001		0,0001	
SS0048B06	15	20	14	1	0,071	0,07		0,071	
SS0048B04	17	20	34	1	0,0001	0,1	Vid mätning med en manschett öppen i taget kom mycket vatten direkt när hålet öppnades men slutade sedan helt att rinna, vi väntade ytterliggare 10 min men inget flöde.	0,0001	
SS0048B01	19	20	32	1	1,8	1,7		1,8	
SS0048G04	21	20	32	1	2,6	0,69		2,6	
SS0048G02	23	20	8	1	0,13	0,025		0,13	
En droppe antas vara 0,070 milliliter					Summa	4,9715	2,7823	Max	2,600
Vid mätt inflöde på 0 l/min eller tryck på 0 bar antas volymen vara 0,0001 l respektive 0,1 bar								Medel	0,414
								Median	0,086

Protokollförare: Daniel och Henrik

Vattenförlustmätningar

Skärm nr: 5A

Sektion tunnel: 48,47 Verklig sektion (inmätt): 48,67

Datum: 08-08-28

Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 10:00

Mättid: 3 min

Vattentemp: 17,5 °C

Injektionsövertryck: 5 bar

Borrhålsdata								Beräknad data			
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Injektions- tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Flöde via flödemätare	Flöde via våg	
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]	Före	Efter	[l/min]	[l/min]	
SS0048A01	1	20	28	40	3	0,1	249,20	249,08	0,0333	0,04	
SS0048A04	3	20	0,1	40	3	0,0001	211,80	211,20	0,0000	0,2	
SS0048A07	5	20	20	40	3	0,2	386,20	385,04	0,0667	0,3867	
SS0048H02	7	20	0,1	40	3	0,1	355,40	355,20	0,0333	0,0667	
SS0048H04	9	20	0,1	40	3	0,0001	442,60	442,50	0,0000	0,0333	
SS0048I05	11	20	0,1	40	3	0,2	377,50	376,90	0,0667	0,2	
SS0048I03	13	20	19	40	3	0,1	343,70	343,60	0,0333	0,0333	
SS0048B06	15	20	14	40	3	1,1	331,20	328,60	0,3667	0,8667	
SS0048B04	17	20	34	40	3	0,4	246,70	245,80	0,1333	0,3	
SS0048B01	19	20	32	40	3	3,4	241,20	236,30	1,1333	1,6333	
SS0048G04	21	20	32	40	3	3,5	229,70	225,20	1,1667	1,5	
SS0048G02	23	20	8	40	3	0,8	167,10	166,00	0,2667	0,3667	
Antal	12	Max	34								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markerat med

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är volymen antagen till 0,0001 l/min, markerat med

Protokollförelse: Daniel Lignell

Injekttering

Skärm nr: 5A
Sektion tunnel: 48,47 Verklig sektion (inmätt): 48,67

Datum: 2008-09-01 Antaget grv tryck: 35 bar
Tid: 10:00 Brukstemp: 16,8 °C Lufttemp: 17,2 °C

Borrhålsdata				Valda injektteringsparametrar						Protokollföres under injekttering					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Ant. Grv tryck borrhål	Injektterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satsar (1 sats = 240 kg)	Inj. ordning	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid [Ja/Nej]	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annan tid, annan inj ordning)
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	[-]	[Tid]		[Tid]	[l]	[min]	
SS0048A01	1	20	35	100	89	7,3:1	71	1	4	1,18	Ja	2,20	49	90	Silica sol kom ut vid avluftning
SS0048A04	3	20	35	100	89	7,3:1	71	1	5	1,47	Ja	2,49	47	93	Silica sol kom ut vid avluftning
SS0048A07	5	20	35	100	89	7,3:1	71	1	8	1,59	Ja	2,50	55	89	
SS0048H02	7	20	35	100	89	7,3:1	71	1	9	3,30	Ja	4,45	49	90	Silica sol kom ut vid avluftning
SS0048H04	9	20	35	100	89	7,3:1	71	1	12	2,05	Ja	2,55	47	89	Silica sol kom ut vid avluftning
SS0048I05	11	20	35	100	89	7,3:1	71	1	11	2,10	Ja	3,10	66	89	
SS0048I03	13	20	35	100	89	7,3:1	71	1	10	1,28	Ja	2,20	50	89	Silica sol kom ut vid avluftning
SS0048B06	15	20	35	100	89	7,3:1	71	1	7	1,25	Ja	2,10	60	92	Silica sol kom ut vid avluftning
SS0048B04	17	20	35	100	89	7,3:1	71	1	6	1,20	Ja	2,25	58	91	Silica sol kom ut vid avluftning
SS0048B01	19	20	35	100	89	7,3:1	71	2	3	5,10	Ja	5,30	118	92	Silica sol kom ut vid avluftning
SS0048G04	21	20	35	100	89	7,3:1	71	2	1	1,35	Ja	2,40	134	90	Silica sol kom ut vid avluftning
SS0048G02	23	20	35	100	89	7,5:1	71	1	2	1,45	Ja	2,55	85	99	Geltid för lång, justerar blandning

OBS! håll 19 ska slangfyllas

Silica sol Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injektteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters geltid; vid ca 15 kg kvar i kärlet, sänks flödet till nästintill 0 och satsen blandas snabbt. Ny injektteringstiden blir 4/5 av 21 min = 17 min.

Protokollföres: Daniel Lignell

Silica sol design:

b<130 mym

Gel tid	89	130<b<150 mym	25 min
tG	30		8 min
Delta P	65		40 bar
Ger l max (150 mym)=			17 m
Ger l min (10 mym)=	2,5		1,1 m

Geltider	Troliga recept
89	7,5:1
39	5,8:1
25	5,0:1
21	4,8:1

Blandning	Geltid	Kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats 240 kg 193-196 l	Geltid	Kg sol	kg salt
	63	206	34
	39	200	40
	21	192	48

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: **5B** Sektion tunnel: **48** Verklig sektion (inmätt): **48,67**Datum: 2008-09-03

Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 07:00

Mättid: 1 min

Vattentemp: 17,6 °C

Antaget tryck: 35 bar

Borrhålsdata

Beräknad data

Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Borrhåls- längd [m]	Tryck borrhål [bar]	Flödes tid [min]	Volym en manch. öppen [liter]	Volym alla öppna [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]
SS0048A03	2	19	0,1	1	0,1	0,1		0,1
SS0048A05	4	19	0,1	1	0,1	0,1		0,1
SS0048H01	6	19	0,1	1	0,1	0,1		0,1
SS0048H03	8	19	0,1	1	0,1	0,1		0,1
SS0048H05	10	19	0,1	1	0,1	0,04		0,1
SS0048I04	12	19	0,1	1	0,1	0,1		0,1
SS0048I01	14	19	0,1	1	0,1	0,017		0,1
SS0048B05	16	19	0,1	1	0,1	0,1		0,1
SS0048B02	18	19	2	1	0,1	0,1		0,1
SS0048G06	20	19	0,1	1	0,012	0,007		0,012
SS0048G03	22	19	0,1	1	0,026	0,02		0,026
SS0048G01	24	19	1	1	0,02	0,01		0,02
En droppe antas vara 0,070 milliliter					0,958	0,794	max	0,100
Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l							medel	0,080
							median	0,100

Protokollförelse: Björn

VattenförlustmätningarSkärm nr: **5B**Sektion tunnel: **48,47** Verklig sektion (inmätt): **48,67**Datum: 2008-09-02Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 09:00Mättid 3 minVattentemp: 17,6 °CInjektionsövertryck: 5 barAntaget tryck= 35 bar

Borrhålsdata									Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Injektions- tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]	Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0048A03	2	19	0,1	40	3	0	334	334		0	0
SS0048A05	4	19	0,1	40	3	0,1	307,4	307,3		0,033	0,033
SS0048H01	6	19	0,1	40	3	0	287,6	287,6		0	0
SS0048H03	8	19	0,1	40	3	0	260,8	260,8		0	0
SS0048H05	10	19	0,1	40	3	0,1	205,1	205,1		0,033	0
SS0048I04	12	19	0,1	40	3	0	164,2	164,2		0	0
SS0048I01	14	19	0,1	40	3	0,1	337,2	337,2		0,033	0
SS0048B05	16	19	0,1	40	3	0,9	327,2	326,2		0,300	0,333
SS0048B02	18	19	2	40	3	0,2	290,6	290,5		0,067	0,033
SS0048G06	20	19	0,1	40	3	0,8	229,6	227,7		0,267	0,633
SS0048G03	22	19	0,1	40	3	0,2	165,7	165,1		0,067	0,200
SS0048G01	24	19	1	40	3	0,5	107,2	105,2		0,167	0,667
Antal	12	Max	2								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Protokollförelse: Daniel Lignell

Injekttering

Skärm nr: 5B
 Sektion tunnel: 48,47 Verklig sektion (inmätt): 48,67

Datum: 2008-09-03
 Tid: 13:30

Antaget grv tryck: 35 bar
 Brukstemp: 16,2 °C

Lufttemp: 18,2 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar						Protokollföres under injekttering				
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål*	Injektterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ord ning	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid [Ja/Nej]	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]		[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]
SS0048A03	2	19	35	100	89	7,3:1	71	1	4	1,10	Ja	1,55	47	88
SS0048A05	4	19	35	100	89	7,3:1	71	1	5	1,26	Ja	2,13	41	89
SS0048H01	6	19	35	100	89	7,3:1	71	1	8	1,41	Nej	2,55	240	89
SS0048H03	8	19	35	100	89	7,3:1	71	1	9	2,15	Ja	2,55	49	88
SS0048H05	10	19	35	100	89	7,3:1	71	1	12	1,25	Ja	2,15	56	87
SS0048I04	12	19	35	100	89	7,3:1	71	1	11	2,20	Nej	6,40	150	88
SS0048I01	14	19	35	100	89	7,3:1	71	1	10	1,28	Ja	2,12	48	88
SS0048B05	16	19	35	100	89	7,3:1	71	1	7	1,32	Ja	2,10	39	89
SS0048B02	18	19	35	100	89	7,3:1	71	1	6	1,41	Ja	2,25	47	89
SS0048G06	20	19	35	100	89	7,3:1	71	1	3	1,32	Ja	2,28	88	88
SS0048G03	22	19	35	100	89	7,3:1	71	1	1	2,02	Ja	3,10	111	89
SS0048G01	24	19	35	100	89	7,3:1	71	1	2	1,20	Ja	2,20	61	87

Silica sol Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injektteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters geltid; vid ca 15 kg kvar i kärlet, sänks flödet till nästintill 0 och satsen blandas snabbt. Ny injektteringstiden blir 4/5 av 21 min = 17 min.

* Antaget grundvattentryck

Silica sol design

b<130 mym

Gel tid 89

tG 30

Delta P 65

Ger I max (150 mym)=

Ger I min (10 mym)= 2,5

130<b<150 mym

25 min

8 min

40 bar

17 m

1,1 m

Geltider	Troliga recept
89	7,5:1
39	5,8:1
25	5,0:1
21	4,8:1

Borrhålsdata		Protokollföres under injektering
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annan tid, annan inj ordning)
SS0048A03	2	
SS0048A05	4	
SS0048H01	6	Samband med hål 7, manschetten gled ut ur 7:an efter ca 15 min inj, satsen tog slut och en stoppsats blandades, med 25 min gellid, under tiden som en ny sats blandas installeras en ny manschett i 7:an. OBS två loggfiler.
"	"	
SS0048H03	8	Under inj kröp manschetten ut något, trycket släpptes och manschetten sattes in igen, pumpade vidare och höll trycket under 75 min. OBS två logac filer, säkringen gick till logac när det blev jordfel i en pump.
"	"	
SS0048H05	10	
SS0048I04	12	
"	"	Slangfyllde hålet eftersom vakuumpumpen hade gått sönder. Under inj löste en säkring ut så att logacen och vågsystemet stannade, pumpen fortsatte dock. Hålet pumpades ca 80 min. Försökte starta logac sen men den krånglade och behövde startas om, därför sa
"	"	
SS0048I01	14	
SS0048B05	16	
SS0048B02	18	
SS0048G06	20	Samband med hål 21
SS0048G03	22	
SS0048G01	24	

Protokollförare: Daniel Lignell

Inflödes och tryckmätningarSkärm nr: 5CSektion tunnel: 48Verklig sektion (inmätt): 48,67Datum: 2008 09 08Tid: 14:30Vattentemp: 17,3 °CBorrhåls diameter: 0,062 mMättid: 1 minAntaget tryck: 35 bar**Uppmätt data****Beräknad data**

Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym en mansch ett öppen [liter]	Volym alla mansche tter öppna [liter]	Kommentarer	Inflöde, Q [l/min]
SS0048A02	30	18	35	1		0,003		0,003
SS0048A06	33	18	35	1		0,0001		0,0001
SS0048I02	42	18	35	1		0,01		0,01
SS0048B03	46	18	35	1		0,0001		0,0001
SS0048G05	49	18	35	1		0,01		0,01
Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l						0,0232	max	0,010
							medel	0,005
							median	0,003

Protokollförare: Henrik

Vattenförlustmätningar

Skärm nr: 5C

Sektion tunnel: 48,47 Verklig sektion (inmätt): 48,67

Datum: 2008-09-08

Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 15:30

Mättid: 3 min

Vattentemp: 17,3 °C

Injektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Injektions-tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[minuter]		Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0048A02	30	18		40	3	0,1	141,40	141,20		0,033	0,067
SS0048A06	33	18		40	3	0,1	215,30	215,30		0,033	0
SS0048I02	42	18		40	3	0,1	205,50	205,50		0,033	0
SS0048B03	46	18		40	3	0,1	199,8	199,60		0,033	0,067
SS0048G05	49	18		40	3	0,1	239,6	239,60		0,033	0
Antal	5		Max	0							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min, markerat med **Protokollförare:** Daniel Lignell

Injektering

Skärm nr: **5C**
 Sektion tunnel: **48,47** Verklig sektion (inmätt): **48,67**

Datum: 08-09-09 Antaget grv tryck: 35 bar
 Tid: 14:00 Brukstemp: 18,1 °C Lufttemp: 17,5 °C

Borrhålsdata				Valda injektionsparametrar						Protokollföres under injektivering				
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd alt sektions-längd	Grv tryck borrhål*	Injektions-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ord ning	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	[-]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]
SS0048A02	30	18	35	100	25	5,0:1	20	0,7	4	2,45	Ja	3,55	58	27
SS0048A06	33	18	35	100	25	5,0:1	20	0,7	5	1,20	Ja	1,58	44	25
SS0048I02	42	18	35	100	25	5,0:1	20	0,7	3	1,33	Ja	2,20	40	25
SS0048B03	46	18	35	100	25	5,0:1	20	0,7	2	1,20	Ja	1,55	43	25
SS0048G05	49	18	35	100	25	5,0:1	20	0,7	1	1,35	Ja	3,40	86	26

* Antaget stationärt grundvattentryck

Borrhålsdata		Protokollföres under injektivering	
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej)	
[-]	[nr]		
SS0048A02	30		
SS0048A06	33		
SS0048I02	42		
SS0048B03	46		
SS0048G05	49	Samband med 21 och 20 där manschetter var installerade, de hålen var rensade och sedan vattenfyllda, när de öppnades efter injektivering innehöll de silica sol färgat vatten.	
"	"		

Blandning	Geltid	sol [kg]	salt [kg]
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats	Geltid	Kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Protokollförare: Daniel Lignell och Henrik Svensson

Inflödes- och tryckmätningarSkärm nr: **6 Stuffinj**Sektion tunnel: **64,47** Verklig sektion (inmätt): **64,46**Datum: 2008-11-04Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 08:00Mättid: 1 minVattentemp: 14,2 °CAntaget tryck: 36 bar

Borrhålsdata			Uppmätt data				Beräknad data	
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym, en manschett öppen i taget	Volym, alla manschetter öppna	Kommentarer	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]
SS0064F01	1	20	35	1	0,53	0,53		0,53
SS0064F02	2	20	36	1	0,110	0,072		0,11
SS0064F03	3	20	2	1	0,07	0,054		0,07
SS0064F04	4	20	36	1	0,7	0,57		0,7
Antal	4	Max	36	Summa	1,41	1,226		max
								medel
								median
								0,700
								0,353
								0,320

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

En droppe antas vara 0,070 milliliter

Protokollförare: Henrik Svensson

Vattenförlustmätningar

Skärm nr: 6 Stuffinj

Sektion tunnel: 64,47 Verklig sektion (inmätt): 64,46

Datum: 2008-11-04

Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 11:00

Mättid: 3 min

Vattentemp: 13,3 °C

Injektionsövertryck: 5 bar

Antaget stationärt tryck: 36 bar

Borrhålsdata			Uppmätt data						Beräknad data		
Borrhåls namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Injektions-tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödesmätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]	Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0064F01	1	20	35	41	3	1,6	362,7	359,2		0,53333333	1,16666667
SS0064F02	2	20	36	41	3	0,9	425,8	424,1		0,3	0,56666667
SS0064F03	3	20	2	41	3	0,6	268,3	267,2		0,2	0,36666667
SS0064F04	4	20	36	41	3	1,5	337,6	333,6		0,5	1,33333333
Antal	4	Max	36								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markerat med
 OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Protokollförare: Daniel Lignel

Injekttering

Skärm nr: **6 Stuffinj**
 Sektion tunnel: **64,47** Verklig sektion (inmätt): **64,46**

Datum: 2008-11-04
 Tid: 16:24

Antaget grv tryck: 36 bar
 Brukstemp: 13,1 °C
 Lufttemp: 16,8 °C

1 sats	Geltid	kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Borrhålsdata				Valda injektteringsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål	Injektterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj. ordn.
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	[-]
SS0064F01	1	20	35	76	39	5,8:1	31	1	1
SS0064F02	2	20	36	76	39	5,7:1	31	1	2
SS0064F03	3	20	2	76	39	5,7:1	31	0,5	3
SS0064F04	4	20	36	76	39	5,7:1	31	1	4

Borrhålsdata		Protokollföres under injekttering						
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid [Ja/Nej]	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid/löpande provning	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej OBS Ja om vaccumpump)	
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]		
SS0064F01	1	1,50	Ja	2,55	69	41	Ja	Samband med hål 2 och 3
SS0064F02	2	1,28	Ja	2,25	57	39	Ja	
SS0064F03	3	1,23	Ja	2,21	61	39	Ja	
SS0064F04	4	1,35	Ja	2,32	70	40	Ja	

Löpande provning, LP görs för cementen. Skrivs på separat protokoll
 OBS! Manschett placeras så långt in i hålet som det går.

Viktförh **2 säckar för ållande en sats**

Recept 1		
Vatten	1,68	67,2 kg
Cement	1	40 kg
Groutaid	1,37	54,8 kg
SP	0,07	2,8 kg

Protokollförare: Daniel Lignel

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 6A
 Sektion tunnel: 64,47 Verklig sektion (inmätt): 64,46

Datum: 2008-11-06 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 07:00 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 13,3 °C Antaget tryck: 36 bar

Borrhålsdata			Uppmätt data				Beräknad data
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym en manch. öppen	Volym alla öppna	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]	[l/min]
SS0064A01	1	20	33	1	0,116	0,051	0,116
SS0064A05	3	20	35	1	0,098	0,08	0,098
SS0064A09	5	16,5	36	1	0,7	0,057	0,7
SS0064H03	7	20	36	1	0,2	0,144	0,2
SS0064H07	9	20	34	1	0,0001	0,0001	0,0001
SS0064I07	11	20	28	1	0,3	0,023	0,3
SS0064I03	13	20	29	1	0,0001	0,026	0,0001
SS0064B09	15	20	34	1	0,0001	0,01	0,0001
SS0064B05	17	20	28	1	0,0001	0,0001	0,0001
SS0064B01	19	20	27	1	0,031	0,011	0,031
SS0064G08	21	20	26	1	0,0001	0,00196	0,0001
SS0064G04	23	20	19	1	0,047	0,00119	0,047
Antal	12	Max	36	Summa	1,4925	0,40535	max
				Max	0,7	0,144	medel
							median
							0,039

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markerat med

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markerat med

En droppe antas vara 0,070 milliliter

 Borrhålet kunde inte borras längre då styrstålet fastnade; beslut togs att inte borra om hålet. OBS! bh i omgång B skall placeras runt detta hål där även sektionsvisa flöden (16,5-20 m) mätas, om hela borrhålet har ett flöde > 0,1 l/min.

Protokollförare: Henrik Svensson, Björn Stjärnström

Vattenförlustmätningar

Skärm nr: 6A

Sektion tunnel: 64,47 Verklig sektion (inmätt): 64,46

Datum: 08-11-05

Borrhåls diameter: 0,062 m

Tid: 16:30

Mättid: 3 min

Vattentemp: 13,3 °C

Injektionsövertryck: 5 bar

Borrhålsdata			Uppmätt data						Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Injektions- tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]	Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0064A01	1	20	33	41	3	0,6	286,00	285,70		0,2000	0,1000
SS0064A05	3	20	35	41	3	0,7	282,00	281,10		0,2333	0,3000
SS0064A09	5	20	36	41	3	0,8	258,10	257,00		0,2667	0,3667
SS0064H03	7	20	36	41	3	0,3	253,50	252,80		0,1000	0,2333
SS0064H07	9	20	34	41	3	0,3	200,30	200,10		0,1000	0,0667
SS0064I07	11	20	28	41	3	0,0001	140,20	140,10		0,0000	0,0333
SS0064I03	13	20	29	41	3	0,1	281,70	281,60		0,0333	0,0333
SS0064B09	15	20	34	41	3	0,2	250,70	250,80		0,0667	-0,0333
SS0064B05	17	20	28	41	3	0,3	190,20	190,00		0,1000	0,0667
SS0064B01	19	20	27	41	3	0,2	72,60	72,40		0,0667	0,0667
SS0064G08	21	20	26	41	3	0,6	80,50	79,90		0,2000	0,2000
SS0064G04	23	20	19	41	3	0,5	65,60	65,90		0,1667	-0,1000
Antal	12	Max	36								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markerat med OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är volymen antagen till 0,0001 l/min, markerat med

Protokollförelse: Henrik Svensson

Bilaga 3.6

Skärm nr: **6A**
 Sektion tunnel: **64,47** Verklig sektion (inmätt): **64,46**

Datum: 2008-11-10 Antaget grv tryck: 36 bar
 Tid: 13:00 Brukstemp: 13,3 °C Lufttemp: 17 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar						Protokollföres under injektering					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Ant. Grv tryck borrhål	Injekterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satsar (1 sats ≈ 240 kg)	Inj. ordning	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid [Ja/Nej]	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annan tid, annan inj ordning)
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	[-]	[Tid]		[Tid]	[l]	[min]	
SS0064A01	1	20	36	100	89	7,1:1	71	1	4	1,25	Ja	2,32	54	88	
SS0064A05	3	16,5	36	100	89	7,1:1	71	1	5	1,58	Ja	2,40	45	88	Gångorna på styrstången går av efter att 16,5 m borrats vilket innebär att kronan ligger kvar längst in i borrhålet. Hålet kan därför inte fortsätta borras utan får stanna vid denna längd.
SS0064A09	5	20	36	100	89	7,1:1	71	1	8	1,48	Ja	2,42	60	90	
SS0064H03	7	20	36	100	89	7,1:1	71	1	9	1,35	Ja	2,32	60	89	
SS0064H07	9	20	36	100	89	7,1:1	71	1	12	1,40	Ja	2,32	40	89	
SS0064I07	11	20	36	100	89	7,1:1	71	0,5	11	1,34	Ja	2,35	57	89	
SS0064I03	13	20	36	100	89	7,1:1	71	0,5	10	1,33	Ja	2,44	56	92	
SS0064B09	15	20	36	100	89	7,1:1	71	0,5	7	1,25	Ja	2,28	60	87	
SS0064B05	17	20	36	100	89	7,1:1	71	0,5	6	1,33	Ja	2,22	48	89	
SS0064B01	19	20	36	100	89	7,1:1	71	0,5	3	1,27	Ja	2,30	55	88	Ihopborring med ett borrhål från skärm 5 gör att manschett inte sluter tätt, en 3m enkel manschett installeras istället och nu kommer packern så pass långt att det sluter tätt.
SS0064G08	21	20	36	100	89	7,3:1	71	1	1	1,43	Ja	2,45	58	93	
SS0064G04	23	20	36	100	89	7,2:1	71	0,5	2	1,35	Ja	2,40	62	90	

Silica sol Om det bedöms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injekteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters geltid; vid ca 15 kg kvar i kärlet, sänks flödet till nästintill 0 och satsen blandas snabbt. Ny injekteringstiden blir 4/5 av 21 min = 17 min.

Silica sol design:

b<130 mym

Gel tid	89	130<b<150 mym	25 min
tG	30		8 min
Delta P	65		40 bar
Ger I max (150 mym)=			17 m
Ger I min (10 mym)=	2,5		1,1 m

Geltider	Troliga recept
89	7,5:1
39	5,8:1
25	5,0:1
21	4,8:1

Blandning	Geltid	Kg sol	kg salt
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats	Geltid	Kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Protokollföres: Daniel Lignell

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 6B

Sektion tunnel: 64,47 Verklig sektion (inmätt): 64,46

Datum: 2008-11-13

Borrhåls diameter: 0,062 m


Tid: 13:40

Mättid: 1 min

Vattentemp: 15,3 °C

Antaget tryck: 36 bar

Borrhålsdata							Beräknad data	
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym en manch. öppen	Volym alla öppna	Kommentarer	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]
SS0064A03	2	19	0,1	1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0064A07	4	19	0,1	1	0,00084	0,0001	12 droppar	0,00084
SS0064H01	6	19	0,1	1	0,00049	0,015	7 droppar	0,00049
SS0064H05	8	19	0,1	1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0064H09	10	19	0,1	1	0,0001	0,006		0,0001
SS0064I05	12	19	2	1	0,00126	0,0001	18 droppar	0,00126
SS0064I01	14	19	0,1	1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0064B07	16	19	2	1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0064B03	18	19	0,1	1	0,00112	0,0001	16 droppar	0,00112
SS0064G10	20	19	22	1	0,020	0,017		0,02
SS0064G06	22	19	0,1	1	0,0001	0,0001		0,0001
SS0064G02	24	19	0,1	1	0,0001	0,008		0,0001
Antal	12	Max	22	Summa	0,02441	0,0468	max	0,020
				max	0,02	0,017	medel	0,002
							median	0,000

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markerat med Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markerat med 

En droppe antas vara 0,070 milliliter

Protokollförelse: Henrik Svensson

VattenförlustmätningarSkärm nr: **6B**Sektion tunnel: **64,47** Verklig sektion (inmätt): **64,46**Datum: 2008-11-13Tid: 12:00Vattentemp: 15,3 °CBorrhåls diameter: 0,062 mMättid 3 minInjektionsövertryck: 5 barAntaget tryck= 36 bar

Borrhålsdata									Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Injektions- tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]	Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0064A03	2	19	0,1	41	3	0,1	335,4	335,3		0,033	0,033
SS0064A07	4	19	0,1	41	3	0,2	281,1	281,1		0,067	0,000
SS0064H01	6	19	0,1	41	3	0,2	245,1	224,5	Manschett läcker något i gängorna	0,067	6,867
SS0064H05	8	19	0,1	41	3	0,1	230,3	230,2		0,033	0,033
SS0064H09	10	19	0,1	41	3	0,3	168,2	168,1		0,100	0,033
SS0064I05	12	19	2	41	3	0,1	333,6	333,5		0,033	0,033
SS0064I01	14	19	0,1	41	3	0,1	453,7	453,7		0,033	0,000
SS0064B07	16	19	2	41	3	0,7	399	398,9		0,233	0,033
SS0064B03	18	19	0,1	41	3	0,1	348,4	348,4		0,033	0,000
SS0064G10	20	19	22	41	3	0,2	353,6	353,5		0,067	0,033
SS0064G06	22	19	0,1	41	3	0,2	291,4	291,4		0,067	0,000
SS0064G02	24	19	0,1	41	3	0,1	231,4	230,8		0,033	0,200
Antal	12		Max	22							

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Protokolförare: Daniel Lignell

InjekteringSkärm nr: **6B**Sektion tunnel: **Verklig sektion (inmätt):**Datum: 2008-11-17Antaget grv tryck: 36 barTid: 09:00Brukstemp: 14,4 °CLufttemp: 17,9 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar						Protokollföres under injektering				
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Grv tryck borrhål*	Injekterings- tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ord ning	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]		[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]
SS0064A03	2	19	36	100	89	7,2:1	71	0,6	4	1,12	Ja	2,00	40	90
SS0064A07	4	19	36	100	89	7,2:1	71	0,6	5	1,25	Ja	2,30	57	89
SS0064H01	6	19	36	100	89	7,2:1	71	0,6	8	1,42	Ja	2,45	58	89
SS0064H05	8	19	36	100	89	7,2:1	71	0,6	9	1,44	Ja	2,30	43	90
SS0064H09	10	19	36	100	89	7,2:1	71	0,6	12	1,46	Ja	2,42	58	90
SS0064I05	12	19	36	100	89	7,2:1	71	0,6	11	1,45	Ja	2,43	57	89
SS0064I01	14	19	36	100	89	7,2:1	71	0,6	10	1,35	Ja	2,40	58	89
SS0064B07	16	19	36	100	89	7,2:1	71	0,6	7	2,40	Ja	3,35	57	90
SS0064B03	18	19	36	100	89	7,2:1	71	0,6	6	1,38	Ja	2,40	44	91
SS0064G10	20	19	36	100	89	7,1:1	71	0,6	3	2,10	Ja	3,15	60	87
SS0064G06	22	19	36	100	89	7,1:1	71	0,6	1	1,35	Ja	2,41	58	87
SS0064G02	24	19	36	100	89	7,1:1	71	0,6	2	1,25	Ja	2,23	57	87

Silica sol Om det bedoms att satsen kommer att ta slut innan den effektiva injekteringstiden är uppnådd skall en ny sats göras med 21 minuters geltid;

vid ca 15 kg kvar i kärlet, sänks flödet till nästintill 0 och satsen blandas snabbt. Ny injekteringstiden blir 4/5 av 21 min = 17 min.

* Antaget grundvattentryck

Silica sol design**b<130 mym**

Gel tid 89

tG 30

Delta P 65

Ger I max (150 mym)=

Ger I min (10 mym)= 2,5

130<b<150 mym

25 7,2:1

8 min

40 bar

17 m

1,1 7,2:1

Geltider	Troliga recept
89	7,5:1
39	5.8:1
25	5.0:1
21	4.8:1

Borrhålsdata		Protokollföres under injektering
Borrhål namn [-]	Borrhåls nummer [nr]	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annan tid, annan inj ordning)
	2	Detta borrhål vakuumsugdes totalt tre gånger men vid pumpning kom inte mer än 40 liter in någon gång. Mellan pumpningarna spolades borrhålet ur med vatten.
	4	
	6	
	8	Detta borrhål vakuumsugdes totalt två gånger men vid pumpning kom inte mer än 40-45 liter in någon gång. Mellan pumpningarna spolades borrhålet ur med vatten.
	10	
	12	
	14	
	16	
	18	Detta borrhål vakuumsugdes två gånger men vid pumpning kom inte mer än 40-45 liter in någon gång. Mellan pumpningarna spolades borrhålet ur med vatten.
	20	
	22	
	24	

Protokollförare: Daniel Lignell

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 6C
 Sektion tunnel: 64,47 Verklig sektion (inmätt): 64,46

Datum: 2008 09 08 Borrhåls diameter: 0,062 m
 Tid: 14:00 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 15,2 °C Antaget tryck: 36 bar

Borrhålsdata								Beräknad data
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål*	Flödes tid	Volym en manschett öppen	Volym alla manschetter öppna	Kommentarer	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]
SS0064A02	30	18	0,1	1	0,00049	0,00049	7 droppar	0,00049
SS0064A08	33	18	0,1	1	0,0001	0,0001	Trycket byggs upp för lå	0,0001
SS0064I02	42	18	0,1	1	0,0001	0,0001	Trycket byggs upp för lå	0,0001
SS0064B04	46	18	0,1	1	0,00084	0,00084	12 droppar	0,00084
SS0064G09	49	18	0,1	1	0,0001	0,0001	Trycket byggs upp för lå	0,0001
Antal	5	Max	0,1	Summa		0,00163	max	0,0008
				Max		0,00084	medel	0,0003
							median	0,0001

*Ej mätt=antaget till 35 bar

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l, markerat med

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

En droppe antas vara 0,070 milliliter

Protokollförare: Henrik Svensson

VattenförlustmätningarSkärm nr: **6C**Sektion tunnel: **64,47** Verklig sektion (inmätt): **64,46**Datum: 2008-09-08Borrhåls diameter: 0,062 mTid: 13:10Mättid 3 minVattentemp: 15,2 °CInjektionsövertryck: 5 bar

Uppmätt data									Beräknad data		
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål*	Injektions- tryck	Flödes tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödemätare	Flöde via våg
							Före	Efter			
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[minuter]					[l/min]	[l/min]
SS0064A02	30	18	36	41	3	0,1	352,6	352,6		0,033	0,0000
SS0064A08	33	18	36	41	3	0,1	89,3	89,2		0,033	0,0333
SS0064I02	42	18	36	41	3	0,1	104,6	104,6	Samband med hål 13	0,033	0,0000
SS0064B04	46	18	36	41	3	0,2	160,0	160,0	Samband med hål 18	0,067	0,0000
SS0064G09	49	18	36	41	3	0,1	191,6	191,6	Samband med hål 20	0,033	0,0000
Antal	5	Max	36								

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min, markerat med

Protokollförare: Daniel Lignell

Injektering

Skärm nr: 6C

Sektion tunnel: 64,47 Verklig sektion (inmätt): 64,46

Datum: 08-11-19

Antaget grv tryck: 36 bar

Tid: 17:00

Brukstemp: 14,4 °C

Lufttemp: 16 °C

Borrhålsdata				Valda injekteringsparametrar						Protokollföres under injektering				
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd alt sektions-längd	Grv tryck borrhål*	Injekter ings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj.ord ning	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	[-]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]
SS0064A02	30	18	36	100	25	4,5:1	20	0,5	4	1,20	Ja	2,22	43	25
SS0064A08	33	18	36	100	25	4,5:1	20	0,5	5	1,45	Ja	2,48	56	25
SS0064I02	42	18	36	100	25	4,5:1	20	0,7	3	2,08	Ja	2,58	89	24
SS0064B04	46	18	36	100	25	4,5:1	20	0,7	2	1,53	Ja	2,50	87	24
SS0064G09	49	18	36	100	25	4,5:1	20	0,7	1	1,25	Ja	2,27	115	25

* Antaget stationärt grundvattenstryck

Borrhålsdata		Protokollföres under injektering	
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej)	
[-]	[nr]		
SS0064A02	30		
SS0064A08	33		
SS0064I02	42	Samband med hål 13 där manschett var installerad, hålet var rensat och öppet under injekteringen, endast rent vatten rann ur hålet under injekteringen.	
SS0064B04	46	Samband med hål 18 där manschett var installerad, hålet var rensat och öppet under injekteringen, när ren silica sol började komma ut ur hålet stängdes det	
SS0064G09	49	Samband med hål 20 där manschett var installerad, hålet var rensat och öppet under injekteringen, när ren silica sol började komma ut ur hålet stängdes det	

Blandning	Geltid	sol [kg]	salt [kg]
5,7:1	63	199,5	35
5,0:1	39	200	40
4,4:1	21	176	40

1 sats	Geltid	Kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Protokollförelse: Daniel Lignell och Henrik Svensson

Inflödes- och tryckmätningar

Skärm nr: 7 Stuffinj
 Sektion tunnel: 80,47 Verklig sektion (inmätt):

Datum: 2009-01-20 Borrhåls diameter: 0,064 m
 Tid: 07:00 Mättid: 1 min
 Vattentemp: 12,6 °C Antaget tryck: 36 bar

Borrhålsdata			Uppmätt data				Beräknad data	
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls- längd	Tryck borrhål	Flödes tid	Volym, en manschett öppen i taget	Volym, alla manschetter öppna	Kommentarer	Inflöde, Q
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[min]	[liter]	[liter]		[l/min]
SS0080F01	1	16	0	1	0,00126	0,00126	18 droppar/min = 18 x 0,00007 = 0,00126 l/min	0,00126
SS0080F02	2	16	0	1	0	0		0
SS0080F03	3	16	0	1	0	0		0
SS0080F04	4	16	0	1	0	0		0
Antal	4	Max	0	Summa	0,00126	0,00126		max
								medel
								median
								0,000
								0,000
								0,000

Vid mätt inflöde på 0 l/min antas volymen vara 0,0001 l

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar

En droppe antas vara 0,070 milliliter

Protokollförare: Henrik Svensson

Vattenförlustmätningar

Skärm nr: 7 Stuffinj

Sektion tunnel: 80,47 Verklig sektion (inmätt):

Datum: 2009-01-20

Tid: 08:40

Vattentemp: 11,5 °C

Borrhåls diameter: 0,064 m

Mättid 3 min

Injektionsövertryck: 5 bar

Antaget stationärt tryck 36 bar

Borrhålsdata			Uppmätt data						Beräknad data		
Borrhålsnamn	Borrhålsnummer	Borrhåls-längd	Tryck borrhål	Injektions-tryck	Flödes-tid	Volym under injektion	Vikt i blandaren [kg]		Kommentarer	Flöde via flödesmätare	Flöde via våg
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	[liter]	Före	Efter		[l/min]	[l/min]
SS0080F01	1	16	0	41	3	0	110,2	110,2		0,000	0,000
SS0080F02	2	16	0	41	3	0,3	75,3	75,2		0,100	0,033
SS0080F03	3	16	0	41	3	0,1	118,3	118,2		0,033	0,033
SS0080F04	4	16	0	41	3	0	27,6	27,5		0,000	0,033
Antal		4	Max		0						

Vid mätt tryck på 0 bar antas trycket till 0,1 bar, markerat med
 OBS! Vid mätt flöde med flödesgivaren på 0 l/min är flödet antaget till 0,1 l/min.

Protokollförare: Daniel Lignell

Bilaga 3.7

Injekttering

Skärm nr: 7 Stuffinj
 Sektion tunnel: 80,47 Verklig sektion (inmätt):

Datum: 2009-01-20
 Tid: 13:30

Antaget grv tryck: 36 bar
 Brukstemp: 12 °C
 Lufttemp: 14,3 °C

1 sats	Geltid	kg sol	kg salt
240 kg	63	206	34
193-196 l	39	200	40
	21	192	48

Borrhålsdata				Valda injektteringsparametrar					
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Borrhåls-längd	Grv tryck borrhål	Injektterings-tryck	Vald geltid och ungefärlig ratio		Effektiv inj tid	Antal satser	Inj. ordn.
[-]	[nr]	[m]	[bar]	[bar]	[min]	Ratio [X:Y]	[min]	[-]	[-]
SS0080F01	1	16	0	76	39	5,2:1	31	0,5	1
SS0080F02	2	16	0	76	39	5,4:1	31	0,5	3
SS0080F03	3	16	0	76	39	5,4:1	31	0,5	2
SS0080F04	4	16	0	76	39	5,4:1	31	0,5	4

Borrhålsdata		Protokollföres under injekttering						
Borrhål namn	Borrhåls nummer	Start inj	Stoppat vid fullgjord tid [Ja/Nej]	Uppnått tryck efter start inj	Inj. volym	Gel tid/löpande provning	Kommentarer (samband, läckage, stoppat på annat än tid alltid vid Nej OBS Ja om vaccumpump)	
[-]	[nr]	[Tid]	[Ja/Nej]	[Tid]	[l]	[min]		
SS0080F01	1	2,58	Ja	3,40	46	35	Ja	Lite snabb geltid, justerar blandning
SS0080F02	2	1,50	Ja	2,44	44	39	Ja	Lite läckage från SS0064F02
SS0080F03	3	1,48	Ja	2,40	46	39	Ja	
SS0080F04	4	2,36	Ja	3,29	46	38	Ja	

Löpande provning, LP görs för cementen. Skrivs på separat protokoll
 OBS! Manschett placeras så långt in i hålet som det går.

Recept 1
 Viktförh 2 säckar för ållande en sats
 Vatten 1,68 67,2 kg
 Cement 1 40 kg
 Groutaid 1,37 54,8 kg
 SP 0,07 2,8 kg

Protokollförelare: Daniel Lignell

Brukstester under cementinjektering av skärm 1–5

Date [yymmdd-hh:mm]	Idcode [-]	Borehole number [-]	Fan [-]	Mudbalance			Marsh-cone		Yield stick			Comment [-]	
				Batch number [-]	Time epalsed [min]	Density [kg/m ³]	Time epalsed [min]	Flow time [s]	Time epalsed [min]	Test 1 [Pa]	Test 2 [Pa]		Test 3 [Pa]
20080122 07:40	SS0008D01	33	2	1	5	1325	5	39,5	5	10	9	9	
20080122 07:40	SS0008D01	33	2	1	60	1325	60	42,5	60	10	10	10	
20080122 07:40	SS0008D01	33	2	1+2	5	1340	5	40	5	12	13	12	
20080122 07:40	SS0008B16	39	2	1	0	1340	0	43	0	17	17	18	
20080122 07:40	SS0008B16	39	2	1	50	1340	52	44	54	19	19	20	
20080122 07:40	SS0008B17	41	2	1	0	1330	0	43	0	23	23	23	
20080122 07:40	SS0008B08	43	2	1	0	1330	0	40					Samma blandning som i hål 45 används vidare.
20080122 07:40	SS0008B04	45	2	1	8	1330	9	38	11	9	9	9	
20080122 07:40	SS0008B04	45	2	2	0	1330	0	48	0	10	10	10	
20080122 07:40	SS0008G01	47	2	1	0	1360	0	43	0	13	15	16	
20080122 07:40	SS0008G01	47	2	2+3	0	1340	0	38,3	0	12	11	12	Testen utfördes direkt efter att sats 3 var färdigblandad.
20080122 07:40	SS0008G05	49	2	1	5	1335	5	41	5	13	12	13	
20080122 07:40	SS0008G05	49	2	2	5	1334	5	43	5	10			
20080122 07:40	SS0008G05	49	2	4	5	1500			5	35	40		Recept som för fyllnadsbruk fast med UF 16, marsh-cone kan ej utföras på detta bruk eftersom det är för trögflytande.
20080122 07:40	SS0008G05	49	2	5	5	1500			5	40	50		Recept som för fyllnadsbruk fast med UF 16, marsh-cone kan ej utföras på detta bruk eftersom det är för trögflytande.
20080325 20:30	KI0014B01	1	3	1	5	1340	5	38	5	10	9	10	
20080325 20:30	SS0020F01	2	3	1	5	1335	5	36	5	10	10	10	
20080325 20:30	SS0020F02	3	3	1	5	1310	5	38,6	5	10	10	10	
20080325 20:30	SS0020F03	4	3	1	5	1330	5	37,1	5	10	10	10	Här användes satsen från hål nr. 3 plus en ny sats.
20080521 08:00	SS0032F01	1	4	1	5	1330	5	39	5	12	12	11	
20080521 08:00	SS0032F01	1	4	1+2	5	1330	5	41	5	13	12	11	Testen utfördes 5 minuter efter att sats 2 var färdig blandad.
20080521 08:00	SS0032F02	2	4	1+2	60	1320	60	41	60	13	13	11	Testen utfördes 60 minuter efter att sats 2 var färdig blandad.
20080521 08:00	SS0032F03	3	4	1+2+3	5	1330	5	42	5	12	12	11	Testen utfördes 5 minuter efter att sats 3 var färdig blandad. Ca 70 kg var kvar från injekteringen av hål 1 och 2.

Dripping characterisation results of section 10–33 m

B5.1 Introduction

The purpose of this PM is to present the result of the dripping characterisation conducted in Section B5.1 (10 to 33 m) of the TASS tunnel in order to characterise the seepage from the tunnel roof. These results include the recognition, localisation and quantification of the inflow from the tunnel roof in the specified section. This PM also includes the result from a previous pre-test carried out in order to assess the different suggested methods and have results to be compared. Results are categorised in four groups, each group identify a range of flow and the corresponding impression observed during the field work, see Table B5-1.

Table B5-1. Categorisation of the different dripping groups and field impression.

Group	Number of drops [drops/min]	Flow [l/min]	Field impression
D1	$N < 1$	$Q \approx 0$	Humid
D2	$1 < N < 6$	$0 < Q < 0.001$	Humid with sporadic dripping
D3	$6 < N < 200$	$0.001 < Q < 0.03$	Continuous dripping
D4	$N > 200$	$Q > 0.03$	Flow

The pre-test field work was carried out from the 17th to the 20th March, 2008 and a short section of the tunnel roof was characterised (8 to 20 m). Subsequently, the first complete characterisation was carried out from the 5th to the 16th of May, 2008 and the section of the tunnel roof characterised this time went from 8 to 33 m. The walls of the tunnel were not characterised since the method was not suitable.

B5.2. Method

Summarizing, the method covered an analysis of the tunnel mapping system as a first approach. Later, a source identification and group-flow division was conducted; this step gave the most suitable way to collect the inflow from the tunnel roof according to the specified ranges of inflow (Table B5-1), at the end the area where to put panels or use simple measuring glasses was selected. The complete method description can be found in the AP TD SU32516-07-062.

B5.3. Results

Figure B5-1 shows the location of the observed dripping spots and the estimated inflow after the pre-test conducted (8 to 20 m). Figure B5-2 shows the location of the recognised dripping spots and the estimated inflow after a complete characterisation conducted in Section B5.1 (8 to 33 m). Both figures show a representation of the tunnel ceiling as a horizontal plane divided in areas of 0.5·0.5 m. In addition the location of the weir and the tunnel entrance are shown.

Taking into account the dripping characterisation conducted in section 10 to 33 m and that the tunnel roof is divided in small areas of 0.5·0.5 m, the following cumulative distribution function could be obtained (see Figure B5-3). This distribution curve shows that approximately 70 % of the studied area does not give an inflow to the tunnel.

On the other hand, Figure B5-4 shows only the cumulative distribution and fitted log-normal distribution function of the dripping areas (30 % of the whole area). This fitted curve shows a median value of around $3.0 \cdot 10^{-05}$ L/min and that approximately 97 % of the located dripping spots give an inflow lower than $1.0 \cdot 10^{-03}$ L/min.

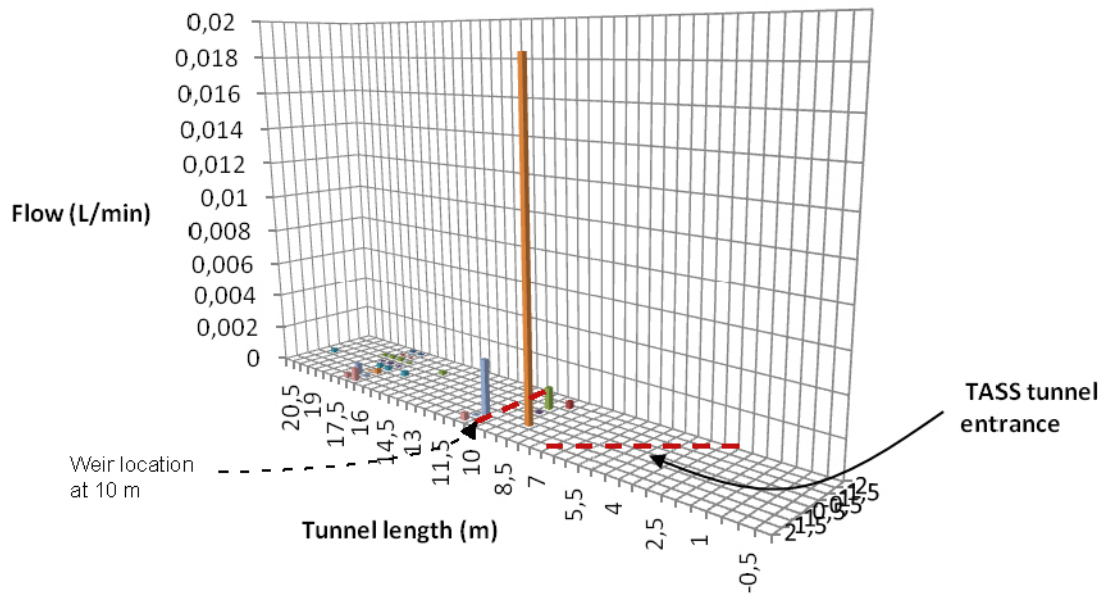


Figure B5-1. Dripping spots location and calculated inflow in section 8 to 20 m after the pre-test characterisation; the grid represents the tunnel roof.

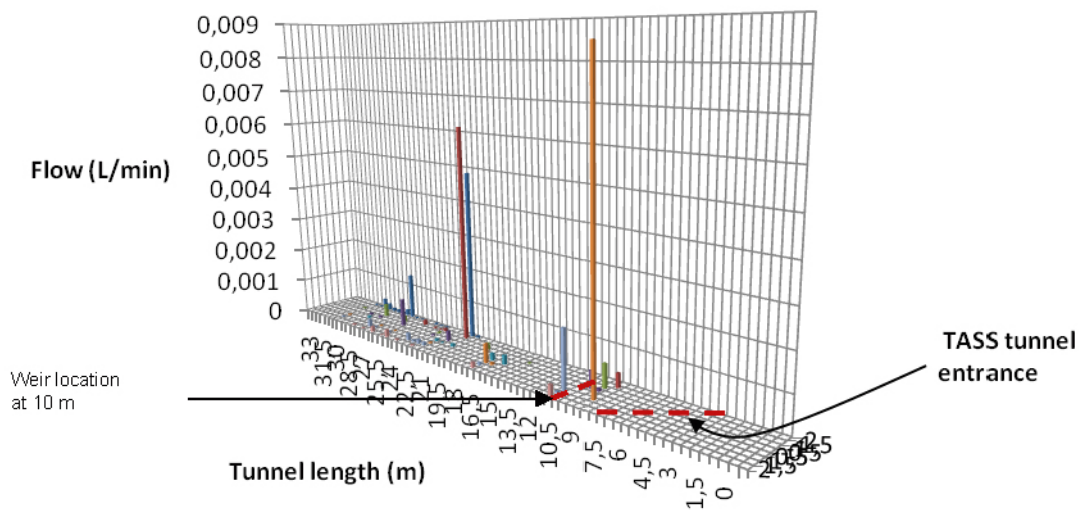


Figure B5-2. Dripping spots location and calculated inflow in section 8 to 33 m after the first dripping characterisation; the grid represents the tunnel roof.

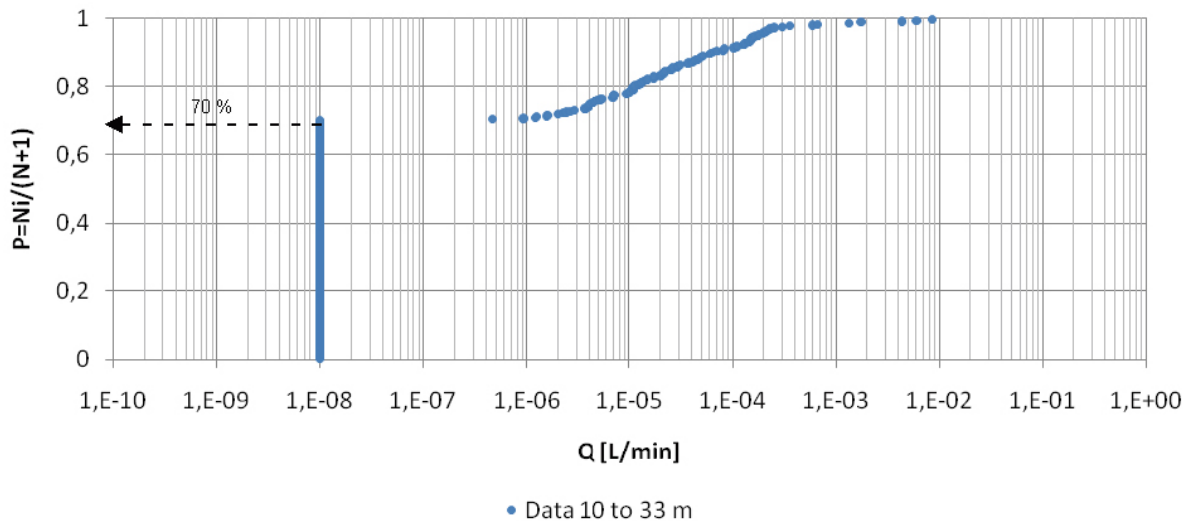


Figure B5-3. Cumulative distribution function for the whole studied area (dripping and non-dripping areas).

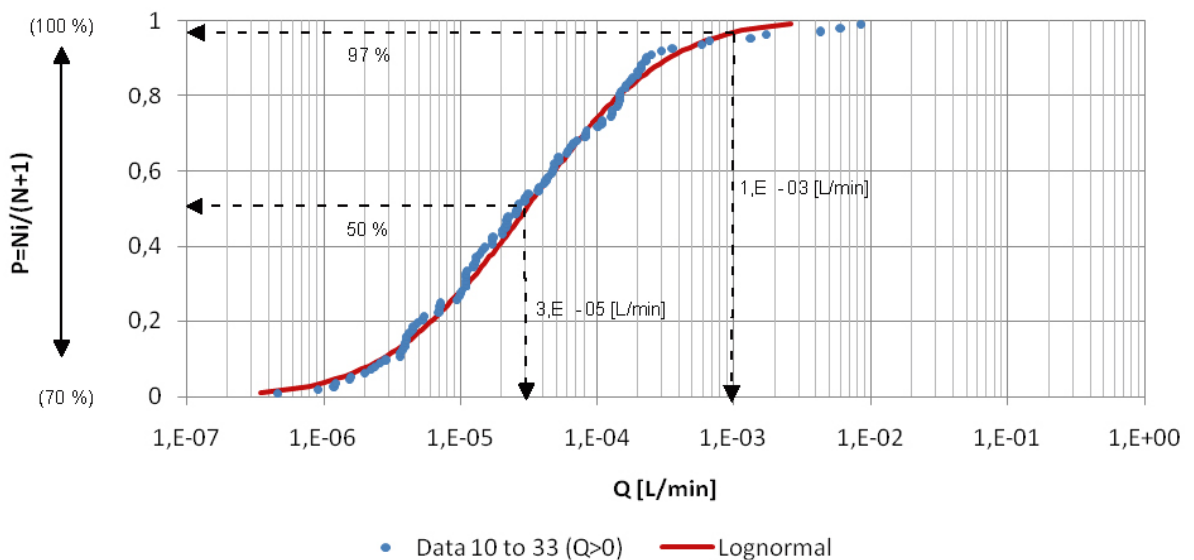


Figure B5-4. Cumulative distribution function for the dripping areas (tunnel roof). Take into account that this graph starts at 70% from Figure B5-3.

B5.4. Discussion and analysis

B5.4.1 Assessment of the method

Review of the data collection, daily logs and analysis through regular discussions between field-work and activity personal resulted in several recommendations for improvements to testing and categorisation of the inflow; no major changes on the method were done which indicates that the AP TD SU32516-07-062 can be used for further characterisations.

During the pre-test (section 8 to 20 m) the recorded ambient temperature was approximately 11°C and the relative humidity was around 99 %. Six absorbing blankets were used to measure the influence of the ambient humidity on the rest of the blankets during time; the average value obtained was $3.5 \cdot 10^{-6}$ L/min which was subtracted from each blanket measurement in order to get values without the additional volume given by the conditions of the tunnel during the testing period.

Further, during the first characterisation (10 to 33 m) 17 blankets were used to obtain the additional volume given by the ambient humidity during the testing period, as it was done during the pre-test. The recorded ambient temperature was approximately 11°C, and the relative humidity close to 99%.

The average value obtained from the 17 blankets was $4.6 \cdot 10^{-6}$ L/min which was subtracted from each blanket measurement for its posterior analysis. Comparing both results, pre and complete characterisation, it shows that on both occasion this value was similar. This could imply that when both characterisations were made the influence of the tunnel conditions on the absorbing blankets were the same meaning that both measurements may be comparable.

B5.4.2 Dripping characterisation in Section B5.1 (10 to 33 m)

Table B5-2 presents the results obtained from the dripping characterisation carried out in Section B5.1 (10 to 33 m) in which the boundaries are the weirs constructed at 10 m and 33 m. Pre-test values are included in this analysis. The total flow calculated in this section was 0.0299 L/min which was obtained from groups D1, D2 and D3. No group D4 was observed during the characterisation, neither during the pre-test. These results and the total inflow collect by the weir, i.e. from tunnel roof, walls and floor, will be used for a posterior analysis.

Table B5-2. Dripping characterisation result from Section B5.1 (10 m to 32 m).

Group	Number of drops [drops/min]	Flow [L/min]	Field impression
D1	–	0.0041	Humid
D2	–	0.0039	Humid with sporadic dripping
D3	122	0.0219	Continuous dripping
D4	–	0	Flow
Total		0.0299	

Results show that, the flow from each group can be calculated, and after field observations no further update of the AP TD SU32516-07-062 is needed before conducting the next dripping characterisation in Section B5.5 (33 to 64 m). The dripping hydraulic characteristics and time dependency will not be discussed in this PM.

Comparing the fracture with the dripping characterisation mapping, see Figure B5-5, it can be seen that the location of the dripping spots suggest which fractures were not completely sealed during the pre-excitation grouting. These fractures are marked with red colour, see Figure B5-5, and in some occasions the characterised dripping did not completely follow a fracture plane. But in general it shows a good correlation which is not so remarkable though. Structure 5 was also characterised and it is shown in the same figure.

From Figure B5-4 and Figure B5-5 can be seen that: 30% of the tunnel roofs gives a contribution to the total inflow in Section B5.1 (10 to 33 m). From this 30 % the median obtained value is around $3.0 \cdot 10^{-5}$ L/min and from there only 3 % correspond to inflows higher than $1.0 \cdot 10^{-3}$ L/min; and from Table B5-2 it can be seen that inflows categorised as D4 were not observed. Therefore, only 3 % of the total amount of dripping spots observed and measured are categorised as group D3 and give an inflow between 0.001 and 0.03 L/min. This inflow interval corresponds to a field impression of humid with sporadic dripping (1 to 6 drops/min).

An approach can be obtained if assuming that the gradient is nearly 1 around the tunnel (damaged zone) then the cubic law (equation 1) could be used to determine the median hydraulic aperture that corresponds to a flow (Q) of $3.0 \cdot 10^{-5}$ L/min (median value).

$$b = \sqrt[3]{\frac{Q * \mu * 12}{B * \rho * g}} \quad (\text{B5-1})$$

Assuming a water viscosity (μ) of $1.31 \cdot 10^{-3}$ kg/m s, a density (ρ) of 999.727 kg/m³, a gravity acceleration (g) of 9.81 m/s² and a section length (B) of 0.5 m (cell size), the median hydraulic aperture obtained for the dripping sections is approximately 12 μm . The same procedure can be used to calculate the median hydraulic aperture for an inflow of $1.0 \cdot 10^{-3}$ L/min which is approximately 38 μm .

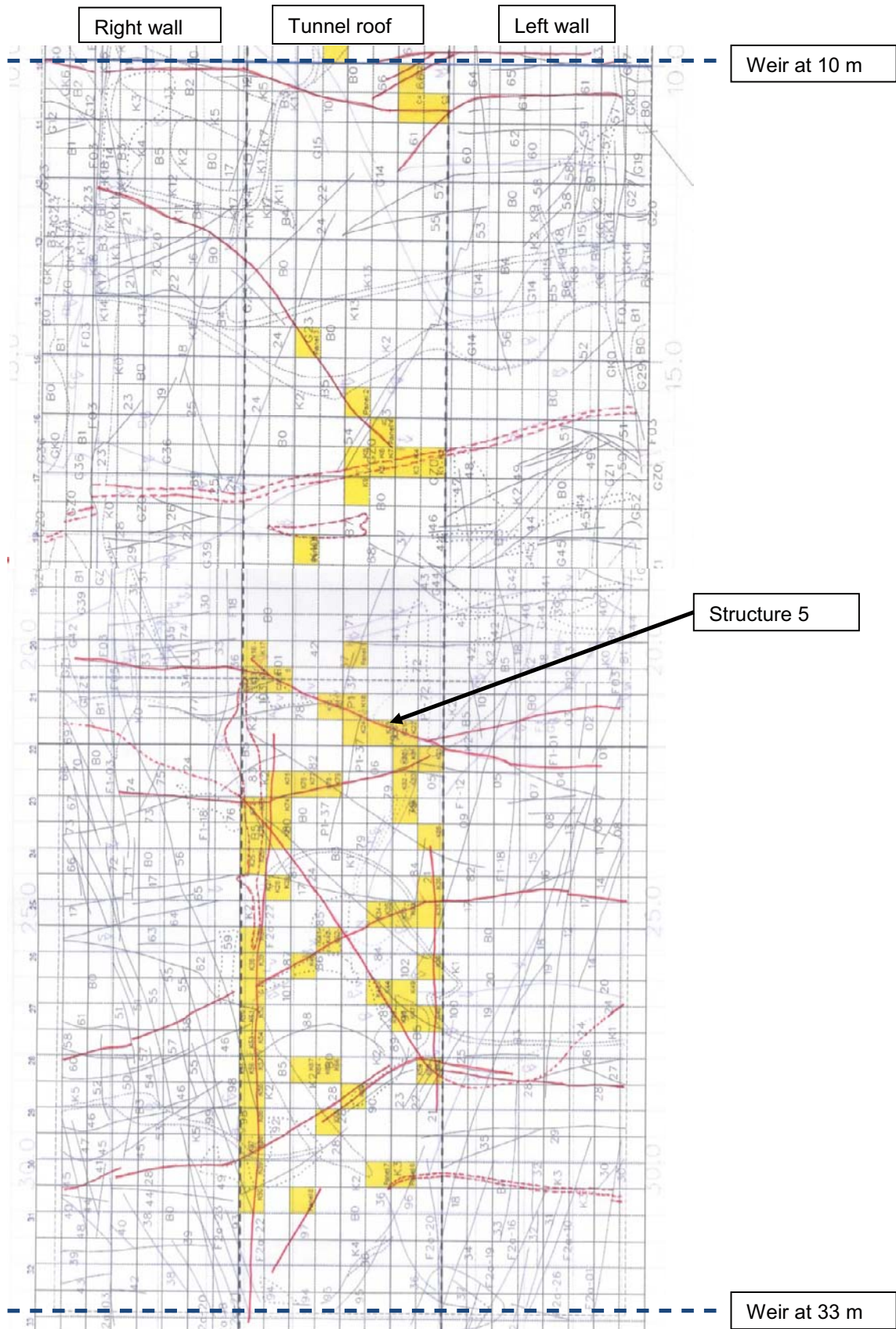


Figure B5-5. Comparison of the fracture mapping and the dripping characterisation mapping; TASS tunnel (10 to 33 m).

Dripping characterisation results of section 33–50 m

B5.5 Introduction

The purpose of this PM is to present the result of the dripping characterisation conducted in Section B5.5 (33 to 50 m) of the TASS tunnel, in order to characterise the seepage from the tunnel roof. The characterisation results include the recognition, localisation, and quantification of the inflow from the tunnel roof in the specified section. Results are categorised in four groups, each group identifies a range of flow and the corresponding impression observed during the fieldwork, see Table B5-3. It is important to mention that before conducting this dripping characterisation there were blocks taken from one of the walls in this tunnel section, which are part of the Excavation Damaged Zone investigation.

Table B5-3. Categorisation of the different dripping groups and field impression.

Group	Number of drops [drops/min]	Flow [L/min]	Field impression
D1	$N < 1$	$Q \approx 0$	Humid
D2	$1 < N < 6$	$0 < Q < 0.001$	Humid with sporadic dripping
D3	$6 < N < 200$	$0.001 < Q < 0.03$	Continuous dripping
D4	$N > 200$	$Q > 0.03$	Flow

The field work was carried out from the 20th to the 24th October, 2008 and the section of the tunnel roof characterised went from 33 to 50 m. The walls of the tunnel were not characterised.

B5.6 Method

The complete method description can be found in the AP TD SU32516-07-062 and consists of: an analysis of the tunnel mapping system, a source identification and group-flow division which gave the most suitable way to collect the inflow from the tunnel roof according to the specified ranges of inflow (Table B5-3), and placement of panels or use simple measuring glasses to collect the identified dripping.

B5.7 Results

Figure B5-6 shows the location of the recognised dripping spots and the estimated inflow after a complete characterisation conducted in Section B5.5 (33 to 50 m). The figure show a representation of the tunnel ceiling as a horizontal plane divided in areas of 0.5·0.5 m. In addition the locations of both weirs are shown.

Taking into account previous results, the following cumulative distribution function could be obtained, see Figure B5-7. This distribution curve shows that approximately 93 % of the studied area did not give an inflow to the tunnel during the testing period.

On the other hand, Figure B5-8 shows only the cumulative distribution and fitted log-normal distribution function of the dripping areas (7 % of the whole area). This fitted curve shows a median value of around $3.5 \cdot 10^{-04}$ L/min and that approximately 80 % of the located dripping spots give an inflow lower than 0.001 L/min.

B5.8 Discussion and analysis

In Figure B5-7 can be seen that 7% of the tunnel roof gives a contribution to the total inflow in Section B5.5 (33 to 50 m). Taken into account the 7% that gives inflow to the section characterised and assuming that the results follow a cumulative distribution function then the approximated median value is around $3.5 \cdot 10^{-04}$ L/min. From the same approximated cumulative distribution 20% corresponds to inflows higher than 0.001 L/min, see Figure B5-8.

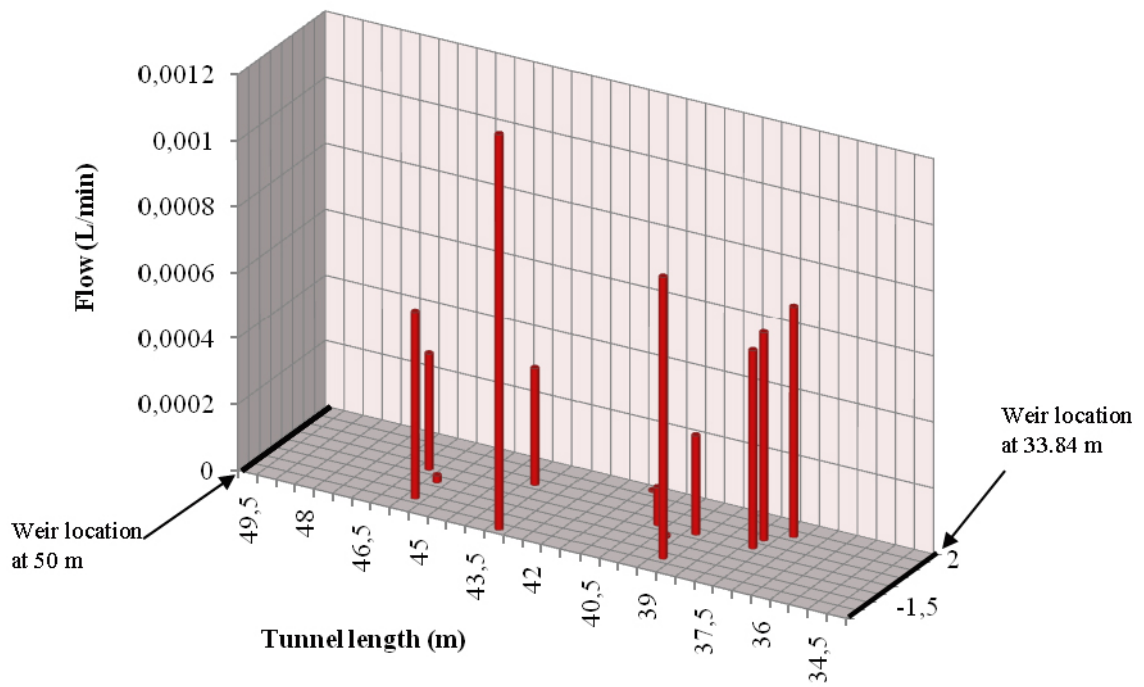


Figure B5-6. Dripping spots location and estimated inflow in section 33 to 50 m; the grid represents the tunnel roof.

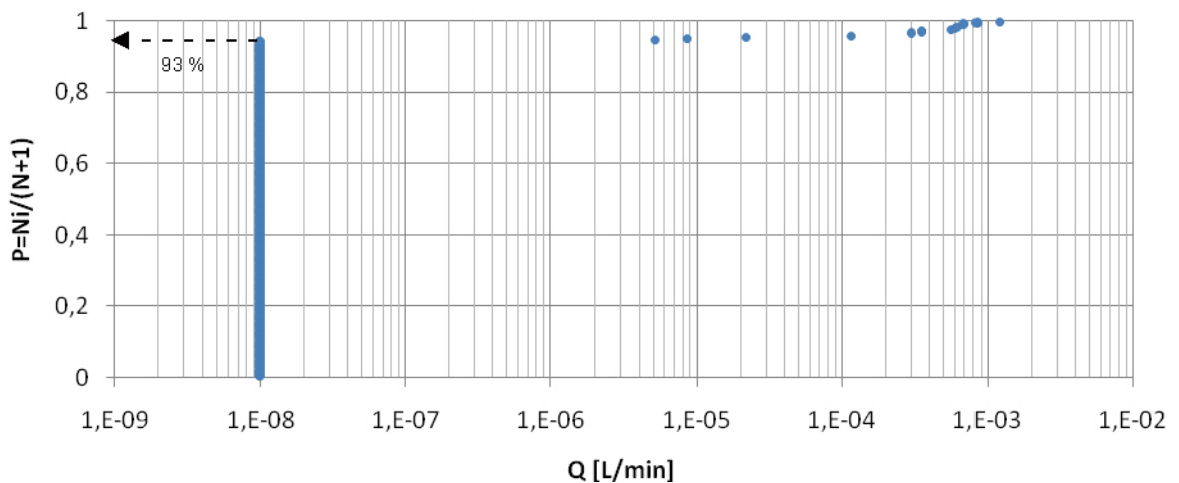


Figure B5-7. Cumulative distribution plot for the whole studied area (dripping and non-dripping areas).

Table B5-4 presents the results obtained from the dripping characterisation carried out in Section B5.5 (33 to 50 m) in which the boundaries are the weirs constructed at 33.84 m and 50 m. The total flow calculated in this section was around 0.0057 L/min in 16 m (0.036 L/min in 100 m) which was obtained from groups D1, D2, and D3. No group D4 was observed during the characterisation. These results and the total inflow collect by the weir, i.e. from tunnel roof, walls, and floor, will be used for a posterior analysis in combination with this results.

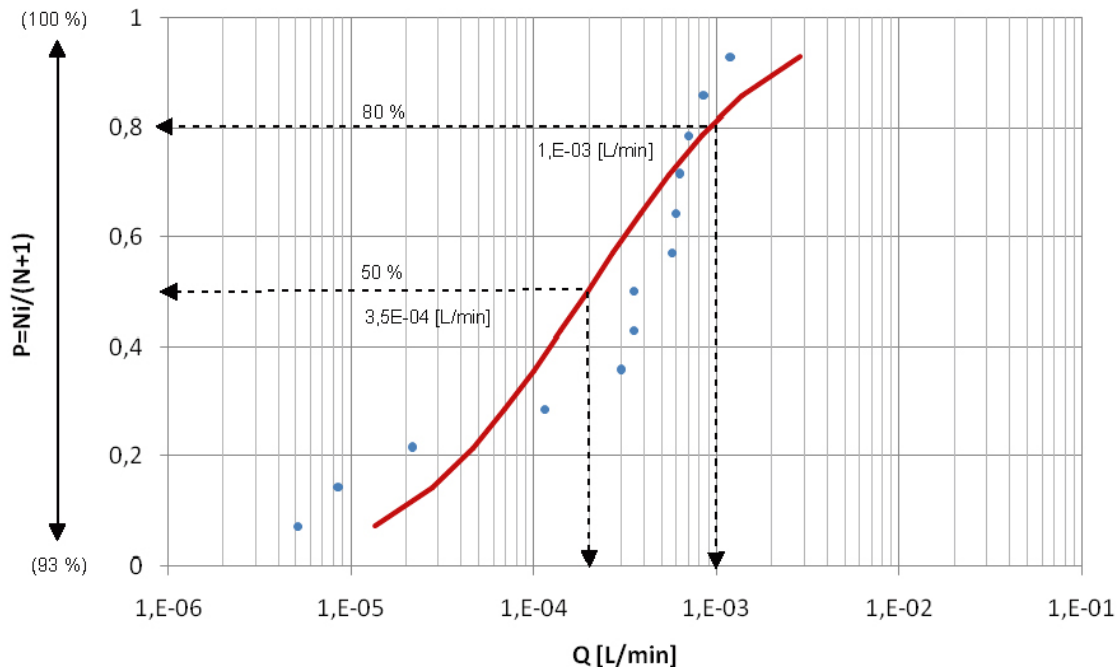


Figure B5-8. Cumulative distribution plot for the dripping areas (tunnel roof). Take into account that this graph starts at 93% from Figure B5-7.

Table B5-4. Dripping characterisation result from Section B5.5 (33 m to 50 m).

Group	Number of drops [drops/min]	Flow [L/min]	Field impression
D1	–	$1.5 \cdot 10^{-4}$	Humid
D2	–	$4.3 \cdot 10^{-3}$	Humid with sporadic dripping
D3	11	$1.2 \cdot 10^{-3}$	Continuous dripping
D4	–	0	Flow
Total (15 m)		$5.7 \cdot 10^{-3}$	

From Table B5-4 it can be seen that inflows categorised as D4 ($Q > 0.03$ L/min) were not observed. Therefore, from the cumulative distribution, 20% of the total amount of dripping spots observed and measured are categorised as group D3 giving an inflow between 0.001 and 0.03 L/min. This inflow interval corresponds to a field impression of continuous dripping (6 to 200 drops/min).

Comparing the fracture mapping with the dripping characterisation mapping it can be seen that the location of the dripping spots suggest which fractures (marked with red colour) were not completely sealed during the pre-excavation grouting, see Figure B5-9. In some occasions, the characterised dripping did not completely follow a fracture plane.

An approach or representation of the hydraulic aperture can be estimated if the cubic law (Equation B5-2) is used assuming that the gradient is nearly 1 around the tunnel (EDZ zone). This hydraulic aperture corresponds to a flow (Q) of $3.5 \cdot 10^{-4}$ L/min (median value of the cumulated distribution).

$$b = \sqrt[3]{\frac{Q \cdot \mu \cdot 12}{B \cdot \rho \cdot g}} \quad (B5-2)$$

Assuming a water viscosity (μ) of $1.31 \cdot 10^{-3}$ kg/m s, a density (ρ) of 999.727 kg/m³, a gravity acceleration (g) of 9.81 m/s² and a section length (B) of 0.5 m (cell size), the median hydraulic aperture obtained for the dripping sections is approximately 27 μ m (assuming that the results follow a cumulated distribution function). The same procedure can be used to calculate the hydraulic aperture for an inflow of 0.0012 L/min, which is approximately 38 μ m.

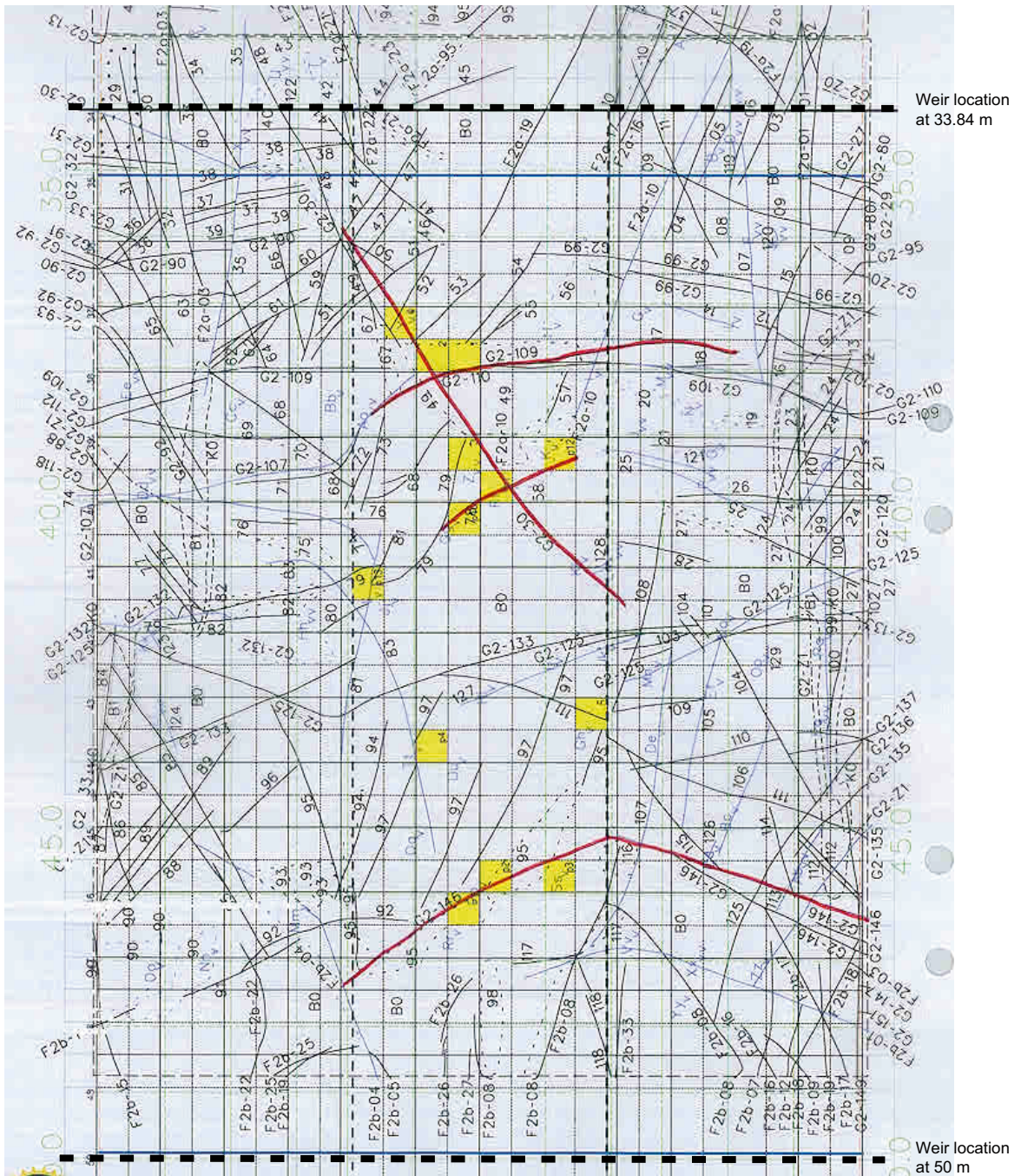


Figure B5-9. Comparison of the fracture mapping and the dripping characterisation mapping; TASS tunnel (33 to 50 m). The highlighted fractures (in red) correspond to fractures that could possibly give the located inflows (in yellow).

Update dripping characterisation 32–52 m

B5.9 Introduction

The purpose of this PM is to present an update of the dripping characterisation conducted in Section B5.5 (between the weirs at 34 and 50) prior the post-excitation grouting of this section. The update does not cover all places previously located, but all flows that were specified as groups D3 and D4 were characterised. The characterisation results include the quantification of the inflow from the tunnel roof on previously identified areas. The fieldwork was carried out the 26th of February 2009 and the section of the tunnel roof characterised went from 32 to 52 m (Section B5.5), which means 2 m before and 2 m after the constructed weirs at 34 m and 50 m respectively.

B5.10 Method

A full description of the method used for the characterisation can be found in the AP TD SU32516-07-062. In the case of this update a source identification and group-flow division was not necessary since it was already done previously. Thus a placement of panels or the use of simple measuring glasses to collect the identified inflows was the main work conducted in field.

B5.11 Results

Figure B5-10 show the comparison of the estimated inflow after a complete characterisation conducted in Section B5.5 (34 to 50 m, see PM 1192105) and the update of Section B5.5 (32 to 52 m) respectively. The figure show a representation of the tunnel ceiling as a horizontal plane divided in areas of 0.5·0.5 m. Each area shows two different values, values in red represent the first characterisation and values in blue represent the second characterisation (update). In addition, the locations of both weirs are shown. Take into account that not all the previous characterised areas were measured again. It was also observed that 2 m before the weir (section 34 to 36 m) no dripping was observed. The same was observed 2 m after the weir (section 50 to 52 m).

B5.12 Discussion and analysis

Assuming only the areas that are characterised twice, the first time in October 2008 and second time in February 2009, there is not significant change on the total estimated inflow, see Figure B5-10. The first characterisation shows a total estimated inflow of around $4.4 \cdot 10^{-3}$ L/min whereas the second characterisation (update) shows a total estimated inflow of around $3.9 \cdot 10^{-3}$ L/min. This implies that

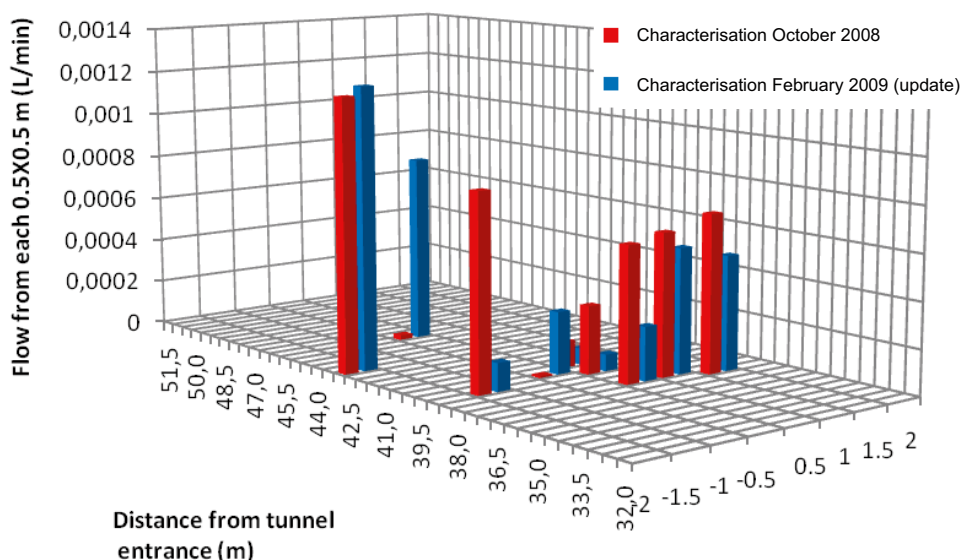


Figure B5-10. Comparison of the estimated inflows obtained from the first and second (update) characterisation in section 32 to 52 m. The grid represents the tunnel roof. Values in red are the first characterisation; values in blue are the update.

the first characterisation conducted in Section B5.5 can be used for comparing the seepage before and after the total post-excitation grouting of this section. One reason of this small variation could be that the tunnel was still being excavation. Another reason could be that these inflow values are very small and therefore susceptible to variations. Therefore, a comparison of the total inflow seems more beneficial than comparisons of isolated areas (0.5 m per 0.5 m).

Figure B5-11 shows fractures that were either leaking or humid during the second dripping characterisation. These fractures are marked with red, and they will be fully characterised after the completion of the post-excitation grouting (floor, walls and roof). The comparison of the map presented in Figure B5-11 (before post-excitation grouting) and one after the post-excitation grouting will show which fractures were sealed and which are not.

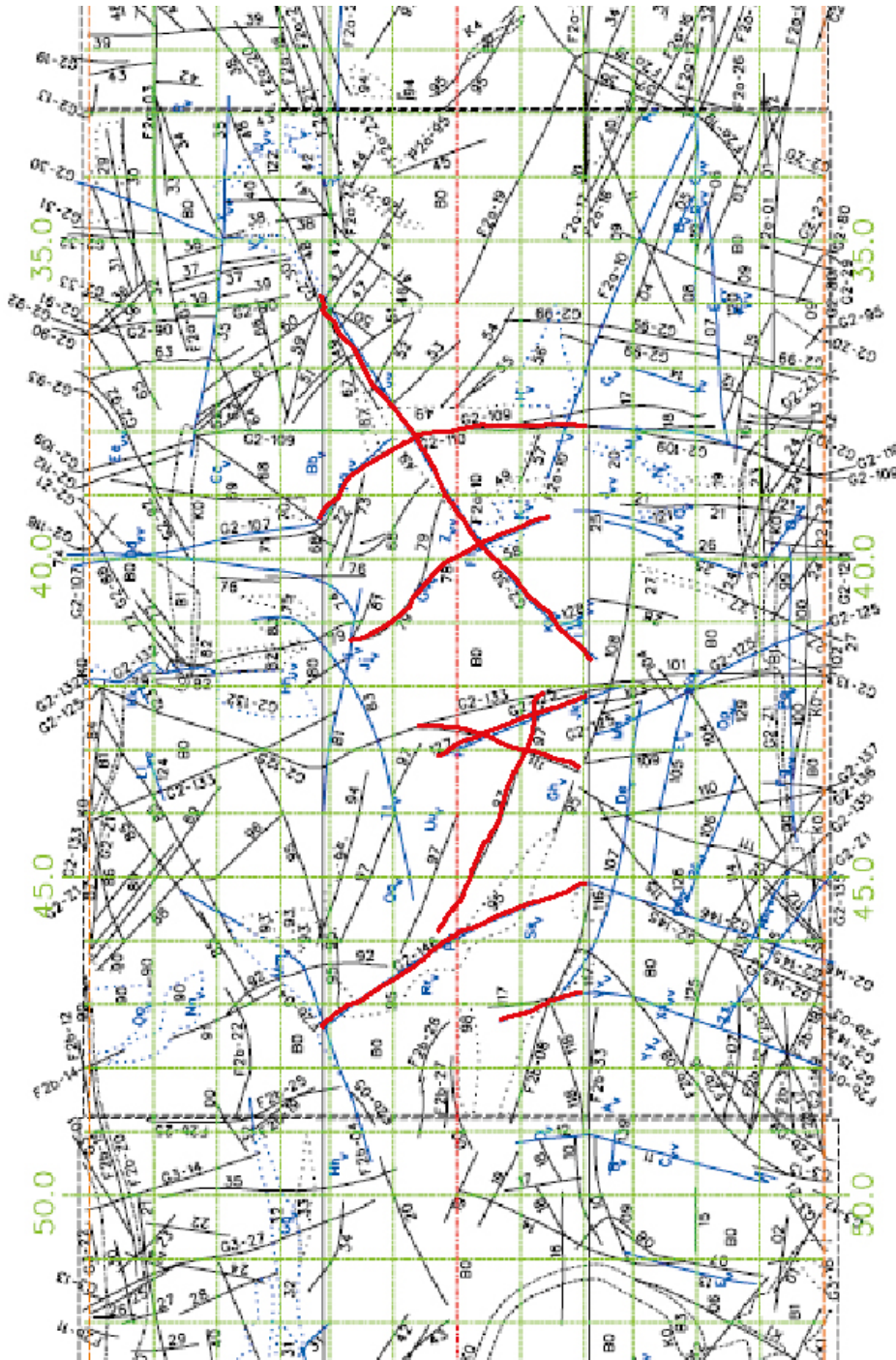


Figure B5-11. Observed humid or leaking fractures (marked with red) during the second dripping characterisation in section 32 to 52 m.

Dripping characterisation results of sections 50 to 76.5 m and 76.5 to 80.5 m

B5.13 Introduction

The purpose of this PM is to present the result of the dripping characterisation conducted in Sections B5.9 (50 to 76.5 m) and B5.13 (76.5 to 80.5 m) of the TASS tunnel, in order to characterise the seepage from the tunnel roof, and to improve the categorisation of the different dripping groups. The characterisation results include the recognition, localisation, and quantification of the inflow from the tunnel roof in the specified section. A group D0, which refers to dry sections in the tunnel roof, is introduced in the categorisation since they counted in the analysis and small inflows (1 drop per minute) are possible to be measured, see previous PMs. Thus, results are categorised in five groups, each group identifies a range of flow and the corresponding impression observed during the fieldwork, see Table B5-5. It is important to mention that the limits of each section are two weirs constructed along the tunnel (Section B5.9) and the tunnel ending face (Section B5.13).

Table B5-5. Categorisation of the different dripping groups and field impression.

Group	Number of drops [drops/min]	Flow [L/min]	Field impression
D0	$N = 0$	$Q = 0$	Dry
D1	$N < 1$	$0 < Q < 0.00017$	Humid
D2	$1 < N < 6$	$0.00017 < Q < 0.001$	Humid with sporadic dripping
D3	$6 < N < 200$	$0.001 < Q < 0.03$	Continuous dripping
D4	$N > 200$	$Q > 0.03$	Flow

The fieldwork was carried out from the 23rd to the 27th February 2009 and the sections of the tunnel roof characterised went from 50 to 76.5 m (Section B5.9) and 76.5 to 80.5 m (Section B5.13). The walls and floor of these sections in the tunnel were not characterised.

B5.14 Method

The complete method description can be found in the AP TD SU32516-07-062 and consists of: an analysis of the tunnel mapping system, a source identification and group-flow division which gave the most suitable way to collect the inflow from the tunnel roof according to the specified ranges of inflow (Table B5-5), and placement of panels or use simple measuring glasses to collect the identified dripping.

B5.15 Results

Figure B5-12 and Figure B5-13 show the location of the recognised dripping spots and the estimated inflow after a complete characterisation conducted in Section B5.9 (50 to 76.5 m) and Section B5.13 (76.5 to 80.5 m) respectively. The figure show a representation of the tunnel ceiling as a horizontal plane divided in areas of 0.5·0.5 m. In addition, the locations of both weirs and the ending face are shown.

Taking into account all different dripping categories, the following cumulative distribution function could be obtained for the two sections during the testing period. This distribution curves show that approximately 98% of the studied area did not give an inflow to the tunnel in Section B5.9 (50 to 76.5 m), see Figure B5-14. Figure B5-15 shows that approximately 89% of the studied area did not give an inflow to the tunnel in Section B5.13 (76.5 to 80.5 m). Take into account that on both cases a flow of 0 L/min is represented by a flow of $1 \cdot 10^{-8}$ L/min, just in order to be able to plot the values in a logarithmic scale.

On the other hand, Figure B5-16 and Figure B5-18 show only the cumulative distribution and fitted log-normal distribution function of the dripping areas 2% in Section B5.9 (50 to 76.5 m) and 11% in Section B5.13 (76.5 to 80.5 m). The fitted curve for Section B5.9 shows a median value of around $3.6 \cdot 10^{-4}$ L/min and that approximately 15% of the located dripping spots give an inflow higher than 0.001 L/min. In Section B5.13 the median value is around $2 \cdot 10^{-4}$ L/min and approximately 10% of the located dripping spots give an inflow higher than 0.001 L/min.

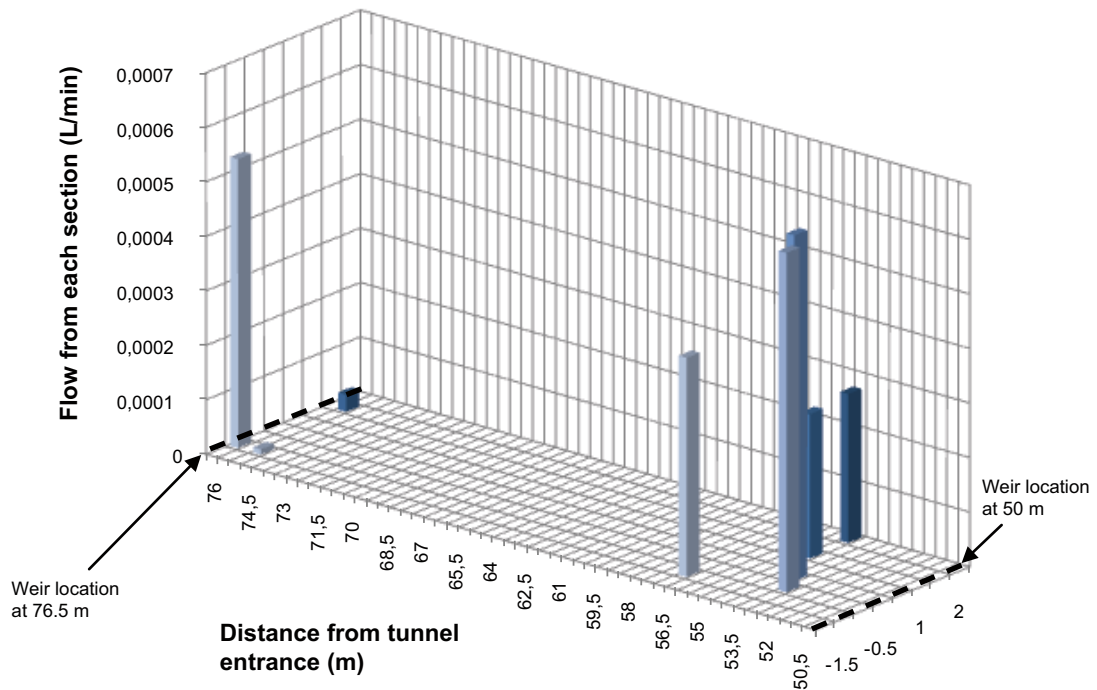


Figure B5-12. Dripping spots location and estimated inflow in Section B5.9 (50 to 76.5 m); the grid represents the tunnel roof.

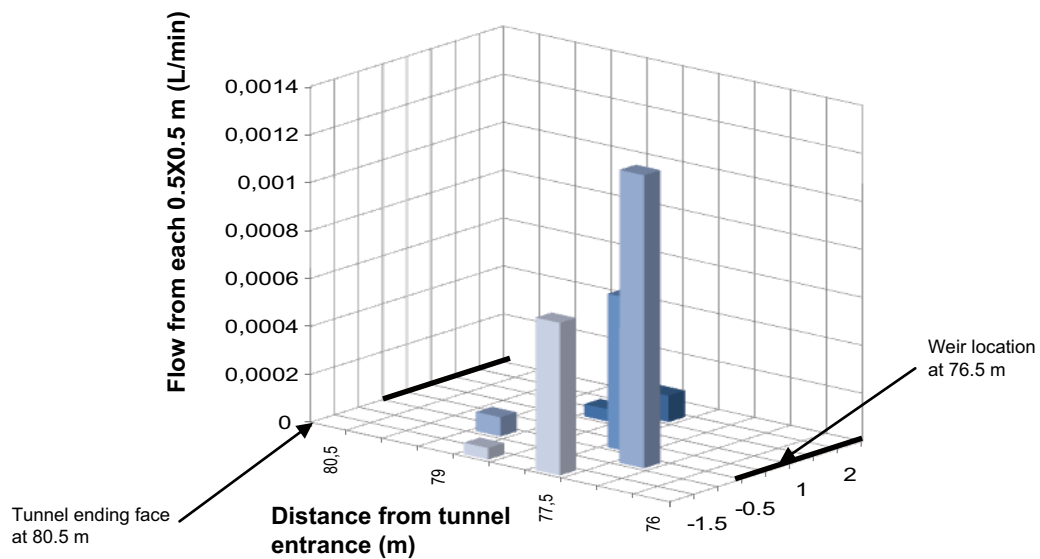


Figure B5-13. Dripping spots location and estimated inflow in Section B5.13 (76.5 to 80.5 m); the grid represents the tunnel roof.

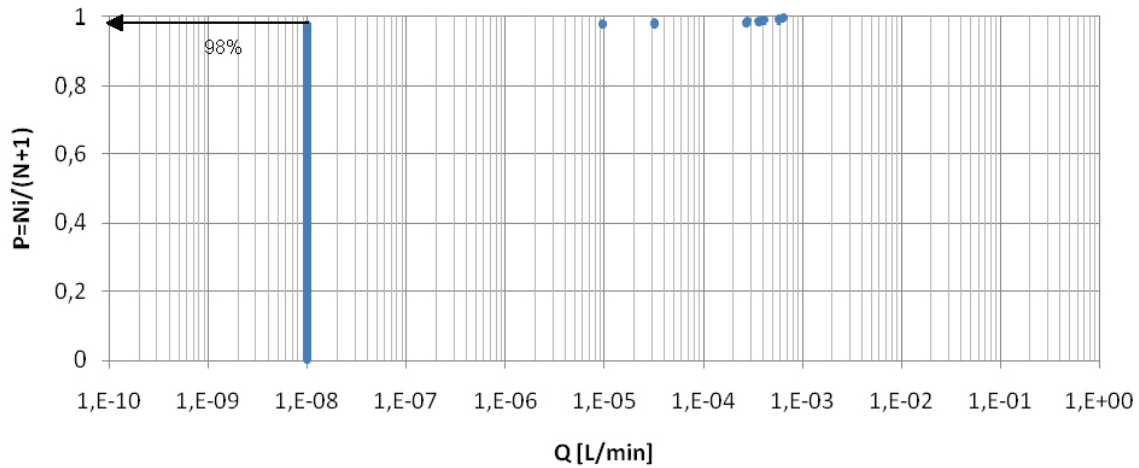


Figure B5-14. Cumulative distribution plot for Section B5.9 (50 to 76.5 m). The results include both dripping and dry areas (all five categories).

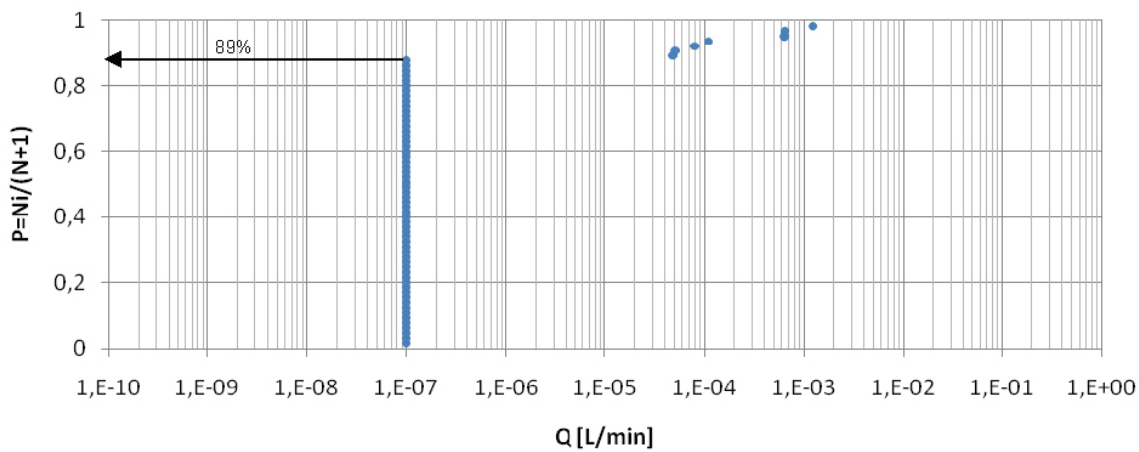


Figure B5-15. Cumulative distribution plot for Section B5.13 (76.5 to 80.5 m). The results include both dripping and dry areas (all five categories).

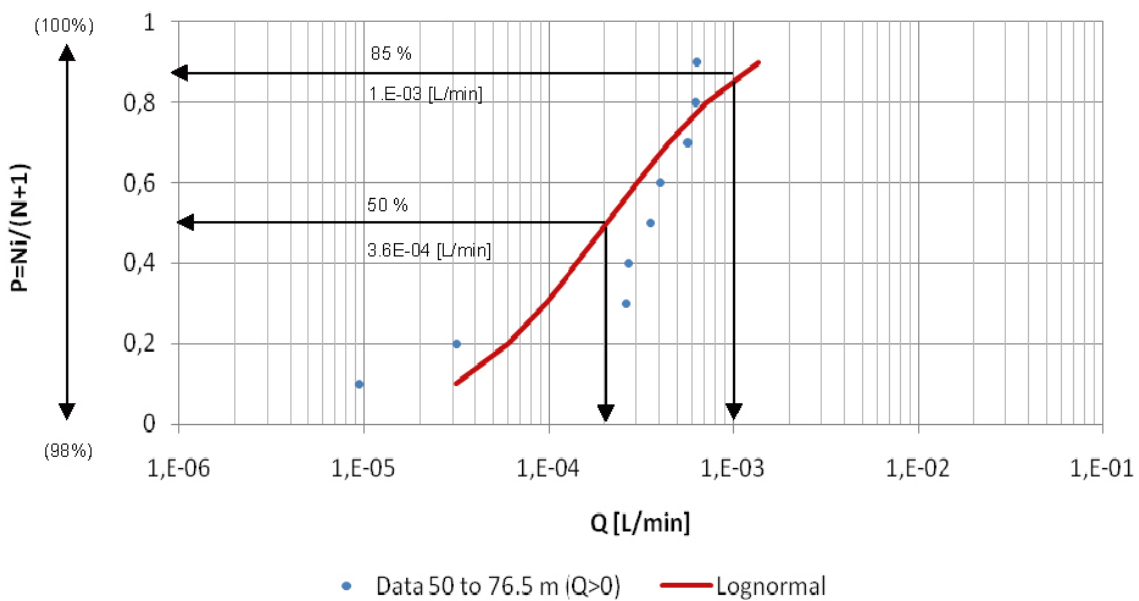


Figure B5-16. Cumulative distribution plot for the dripping areas (tunnel roof). Take into account that this graph starts at 98% from Figure B5-14 and refers to Section B5.9 (50 to 76.5 m).

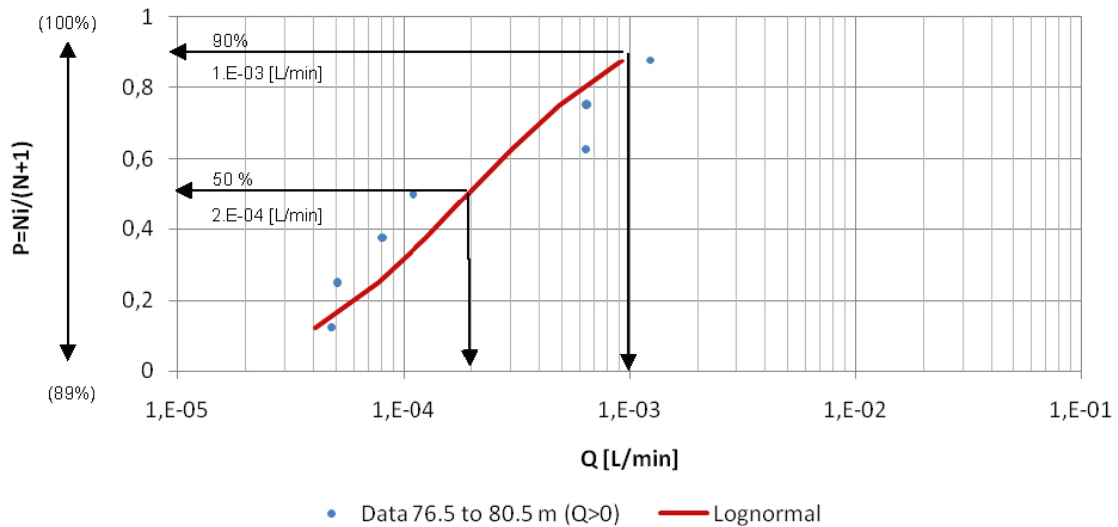


Figure B5-17. Cumulative distribution plot for the dripping areas (tunnel roof). Take into account that this graph starts at 89% from Figure B5-15 and refers to Section B5.13 (76.5 to 80.5 m).

B5.16 Discussion and analysis

In the introduction was stated that a new group was introduced for the analysis of the dripping characterisation from now on, since dry areas are also taken into consideration. Table B5-6 presents the results obtained from the dripping characterisation carried out in Section B5.9, in which the boundaries are the weirs constructed at 50 m and 76.5 m. The total flow calculated in this section was around $2.8 \cdot 10^{-3}$ L/min in 26.5 m ($1 \cdot 10^{-2}$ L/min in 100 m), which was obtained from groups D1 and D2. No groups D3 or D4 were observed during the characterisation. This implies that the inflow obtained corresponds to a field impression of humid areas and sporadic dripping. These results and the total inflow collect by the weir, i.e. from tunnel roof, walls, and floor; will be used for a posterior analysis in combination with these results.

Table B5-6. Dripping characterisation result from Section B5.9 (50 to 76.5 m).

Group	Flow [L/min]	Field impression
D0	0	Dry
D1	$4.1 \cdot 10^{-5}$	Humid
D2	$2.8 \cdot 10^{-3}$	Humid with sporadic dripping
D3	0	Continuous dripping
D4	0	Flow
Total (26.5 m)	$2.8 \cdot 10^{-3}$	

Table B5-7 presents the results obtained from the dripping characterisation carried out in Section B5.13, in which the boundaries are the weir constructed at 76.5 m and the ending face of the tunnel at 80.5 m. The total flow calculated in this section was around $2.8 \cdot 10^{-3}$ L/min in 4 m ($6.9 \cdot 10^{-2}$ L/min in 100 m), which was obtained from groups D1, D2, and D3. No group D4 was observed during the characterisation. These results and the total inflow collect by the weir, i.e. from tunnel roof, walls, and floor; will be used for a posterior analysis in combination with these results.

Table B5-7. Dripping characterisation result from Section B5.13 (76.5 to 80.5 m).

Group	Flow [L/min]	Field impression
D0	0	Dry
D1	$2.9 \cdot 10^{-4}$	Humid
D2	$1.3 \cdot 10^{-3}$	Humid with sporadic dripping
D3	$1.2 \cdot 10^{-3}$	Continuous dripping
D4	0	Flow
Total (4 m)	$2.8 \cdot 10^{-3}$	

Comparing the fracture mapping with the dripping characterisation in Sections B5.9 and B5.13 it can be seen that the location of the dripping spots suggest which fractures (marked with red colour) were not completely sealed during the pre-excitation grouting, see Figure B5-18. In some occasions, the characterised dripping did not completely follow an identified fracture.

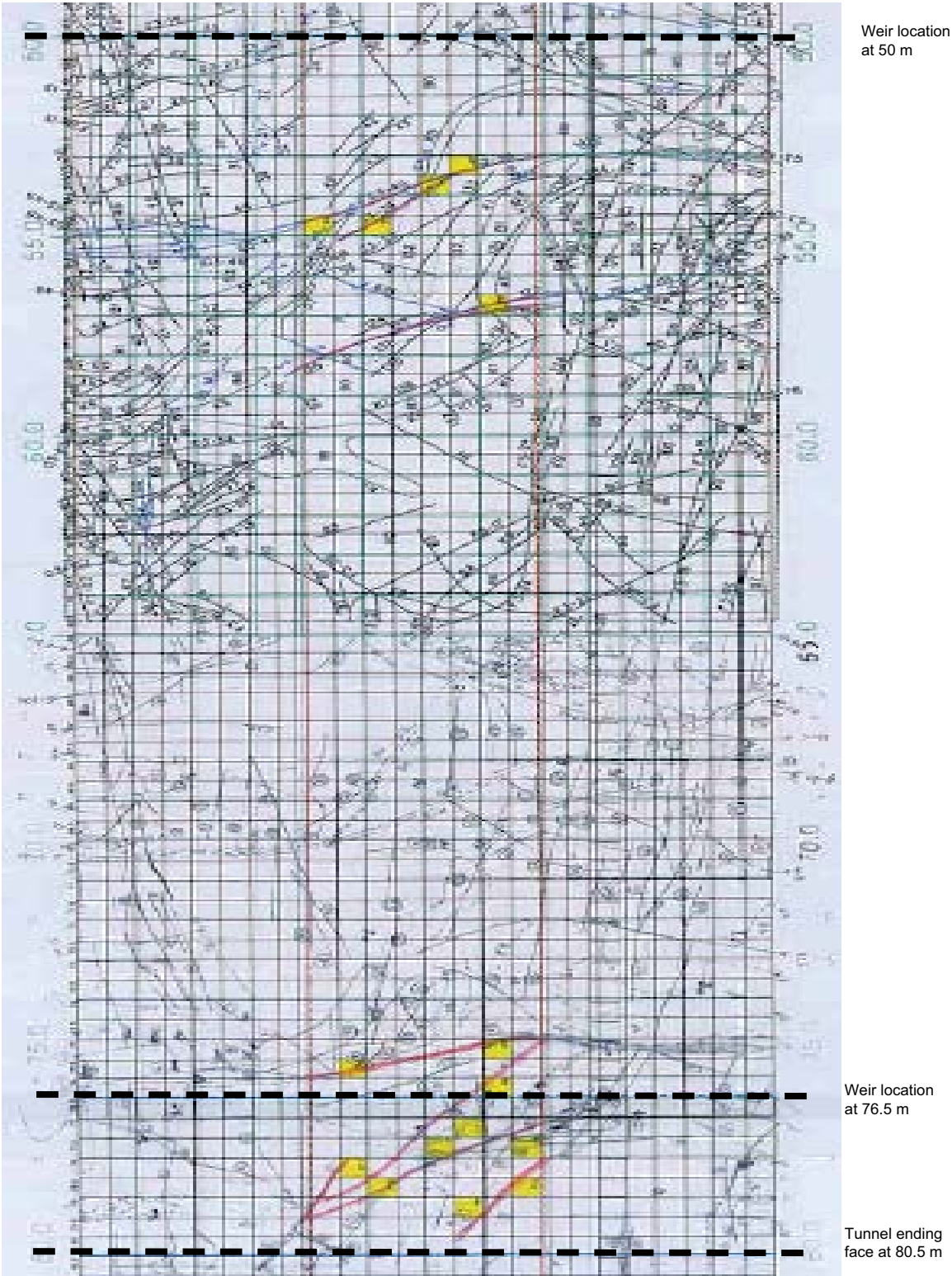


Figure B5-18. Comparison of the fracture mapping and the dripping characterisation mapping; TASS tunnel (50 to 80.5 m). The highlighted fractures (in red) correspond to fractures that could possibly give the located inflows (in yellow).