© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Underhållstätning av befintlig mediatunnel

Thomas Janson, Nils Granberg, Henrik Jonsson, Tyréns AB
Johan Funehag, Chalmers avd. Geologi och Geoteknik

Sammanfattning

I en trång och fullt installerad mediatunnel från början av 70-talet utfördes en efterinjektering under 2010. Syftet med projektet var att utveckla en metodik för efterinjektering, från design till utförandet, som anpassades till den befintliga tunneln. Både utrustning och injekterings-teknik har anpassats för att möjliggöra ett utförande. Under arbetets gång utvecklades designen och utförandet för att få ett mer rationellt förfarande. Resultatet blev att inläckaget reducerades från 3,8 till 1,3 l/min och 100 m, vilket är ett resultat som inte redovisats tidigare från en efterinjektering.

Projektet lyckades bland annat tack vare god samarbetsförmåga mellan ingående parter, dvs entreprenör, projektör, forskare och beställare. I planeringsskedet deltog samtliga parter och under entreprenaden deltog projektör och forskare aktivt. Resultatet möjliggjordes med en systematisk efterinjektering, med ett i förväg utarbetat beslutsunderlag som främst baserades på data från sonderingshål. Vidare utfördes löpande kontroller och etappuppföljningar för att säkerställa metodiken och anpassa detaljer vartefter. Den löpande uppföljningen bestod av; avläsning i mätvallar, droppkarteringar samt inflödes och vattenförlustmätningar i injekteringshål och kontrollhål. Uppföljningen av kvalitativa data från entreprenören till projektören och vidare analys gav ett resultat motsvarande förväntad prognos. Detta var möjligt tack vare att alla parter deltog tidigt och genom hela projektet engagerade sig.

Syfte och projektorganisation

Efterinjektering och förståelse för dess mekanismer har generellt ansetts som svårt och hopplöst. Under de senaste åren har vissa insatser gjorts för att förstå mekanismerna vid efterinjektering och upprätta en strategi för design och utförande (Fransson & Gustafson, 2006).

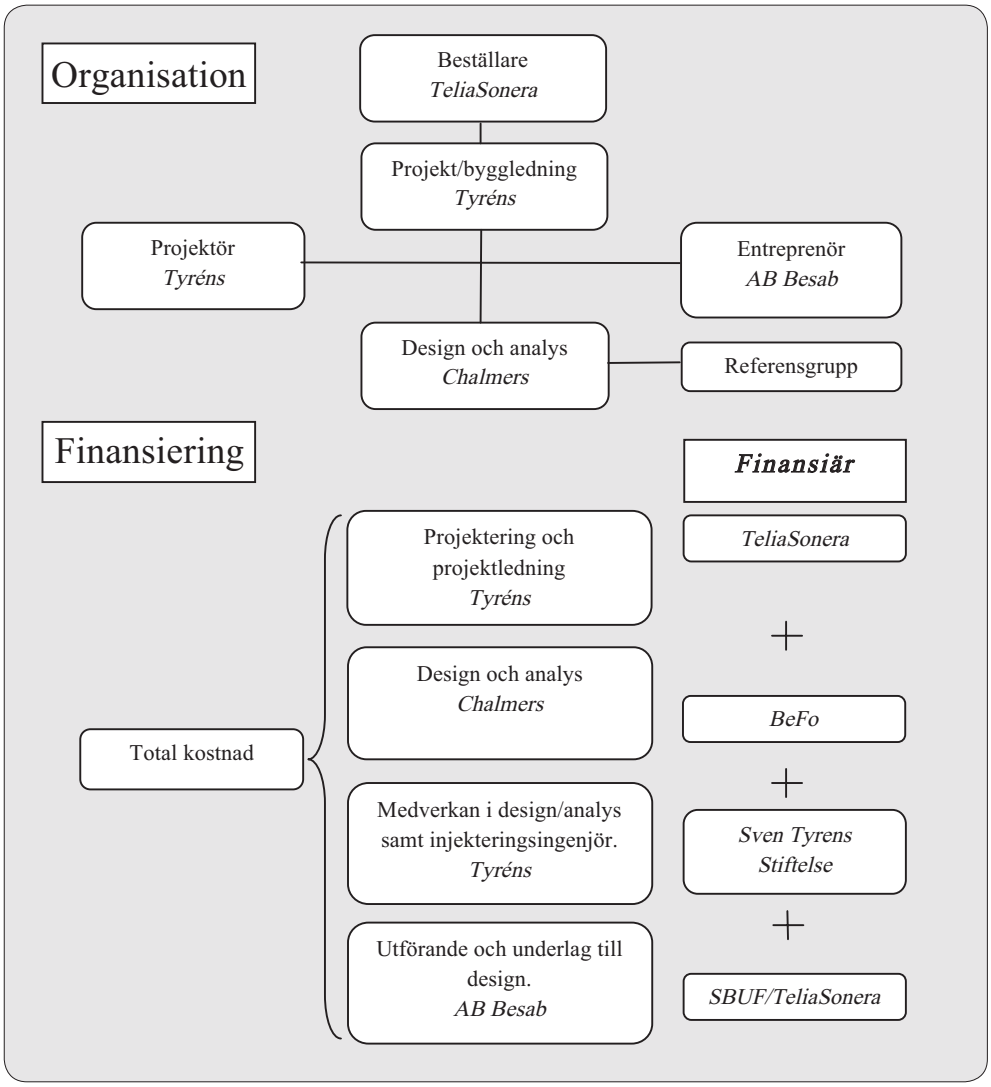
Syftet med detta projekt var att implementera och vidareutveckla en designmetod för efterinjektering av driftsatta tunnlar. Ett ytterligare syfte med projektet var att få tillgång till samtligas kunskaper inför designen och utförande, kunna göra förändringar under utförandet med bibehållen strategi och slutligen att alla delges de vunna erfarenheter från projektet.

De inblandade parterna var; TeliaSonera (tunnelägare), Chalmers, Avd för geologi och geoteknik (högskola), Tyréns (konsult) och AB Besab (bergentreprenör).

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Projektet är i huvudsak finansierat av TeliaSonera. Chalmers insats finansieras av BeFo och Tyréns utökade arbeten vid design och analys samt injekteringsingenjör på plats finansieras av Sven Tyrens stiftelse. Besabs utökade kostnader finansieras av SBUF och till viss del av TeliaSonera. Projektets organsiation och finansiering illustras i figuren nedan.

Projektet är slutredovisat i BeFo-rapport nr 105 (Janson et al, 2010).



Figur 1 Organisation och finansiering av projektet

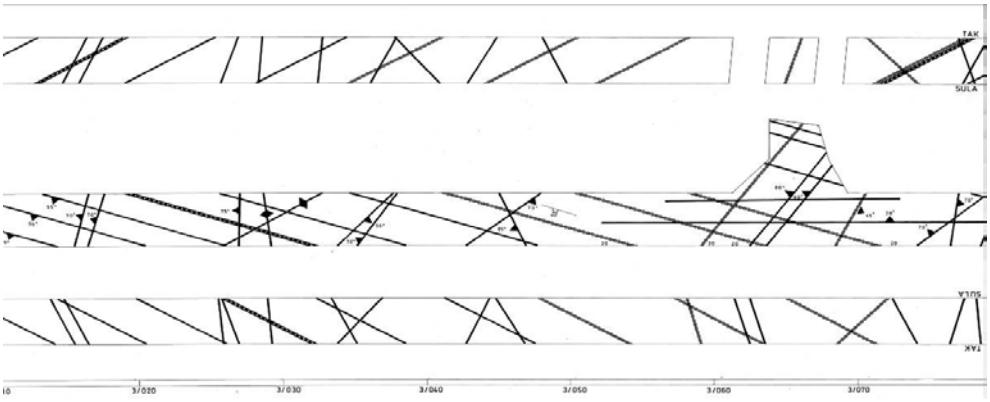
© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Bakgrund och lokalisering

TeliaSonera har ett antal bergtunnlar i Göteborgsregionen som byggdes under 60- och 70 talet. Dessa tunnlar läcker in olika mycket vatten och flera efterinjekteringsinsatser har gjorts under åren i dessa tunnlar och en viss minskning av inläckaget har uppnåtts. En av dessa tunnlar under centrala Göteborg användes till försöket. Denna tunnel har andra förutsättningar än nyproducerade infrastrukturtunnlar som efterinjekteras oftast i samband med nyproduktion. De andra förutsättningarna är bl.a. tunnelns ålder kan påverka vattenvägarna i spricksystemen, nyttan av äldre förinjekteringar samt utrymmet och fasta installationer som påverkar val av möjlig utrustning, injekteringshålens placering samt arbetsmetodik och logistik.

Drivningen av tunneln skedde i början av 70-talet genom borrning och sprängning med konventionell förstärkning. Handlingarna och andra uppgifter redovisar ett omfattande för- och efterinjekteringsarbete. Som injekteringsmedel användes i huvudsak ett cementbruk (typ och vct-tal är okänt) med tillsats av Intraplast-A (dvs en expanderande tillsats). Vidare kompletterades tunneln med ytterligare efterinjekteringsarbeten i början av 80-talet med syftet att minska inläckaget. Då användes också cement som injekteringsmedel men även ett talkbaserat medel/slurry med framgång.

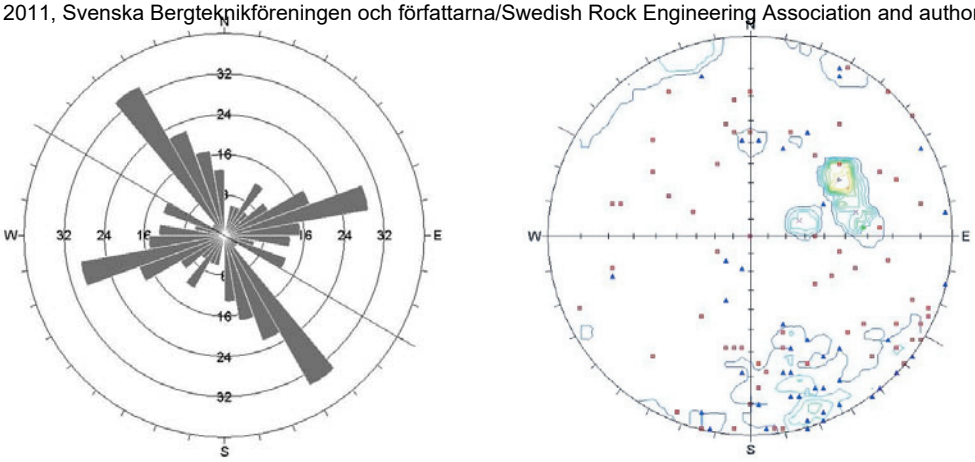
Bergarten kring tunneln domineras av en granitisk till tonalitisk ådergnejs med inslag av amfobolit och dioritisk grönsten samt vissa gångar av pegmatit. Exempel på sprickkarteringen från drivningen visas i figur 2. Dessa karteringar har bearbetats i en sprickros och steroplott, se figur 3, med drivningsriktningen inlagd (ca 128°).



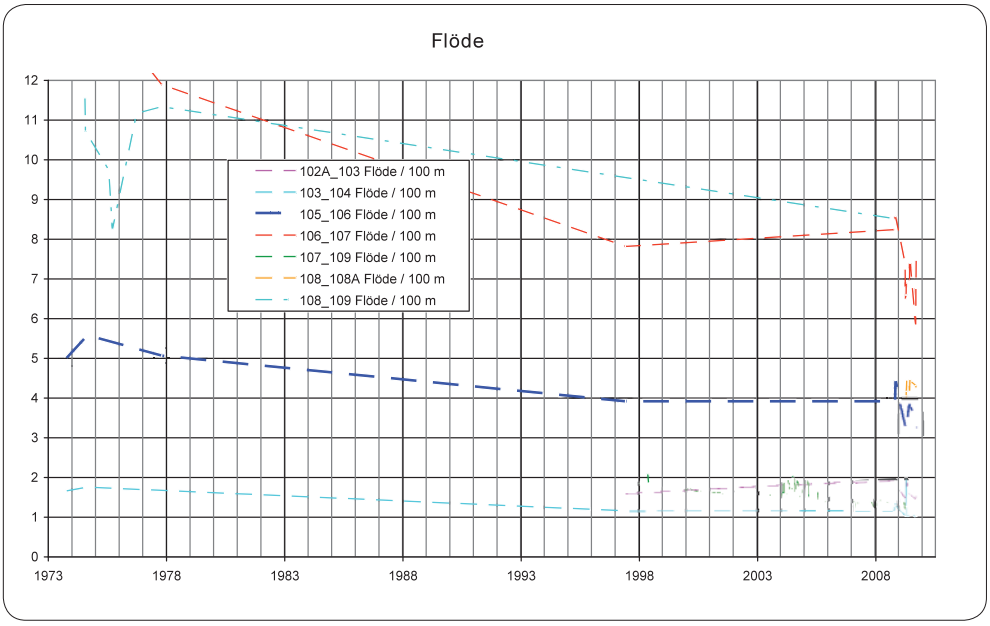
Figur 2 Exempel på redovisning från tunnelkarteringen.

Mätningar av inläckande vatten i mätvallar har gjorts sedan drivningen, dock har omkopplingar och igensättningar stört mätserierna. Återställande av omkopplingar gjordes och igensatta mätvallar rensades så att den ursprungliga indelningen från 70-talet återställdes. Mätvallsresultat från 1973 fram till hösten 2009 är sammanställt i figur 4.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 3 Sprickkartering från tunneldrivningen på sprickros respektive stereonät, strecket genom sprickrosen motsvarar tunnels riktning.



Figur 4 Resultat av mätningar i mätvallar från 1973 till hösten 2009.

Från inventeringen av befintligt material lokaliserades en ca 90 m tunnelsektion som lämplig för efterinjekteringsförsöken avgränsad mellan två mätvallar. Inflödet för sektionen låg mellan 5 till 6 l/min, 100 m under 70-talet, efter den kompletterande efterinjekteringsinsatsen i början av 80-talet sjönk det till strax under 5 l/min, 100 m och vid mätningen hösten 2009 vara inflödet ca 3,8 l/min, 100m.

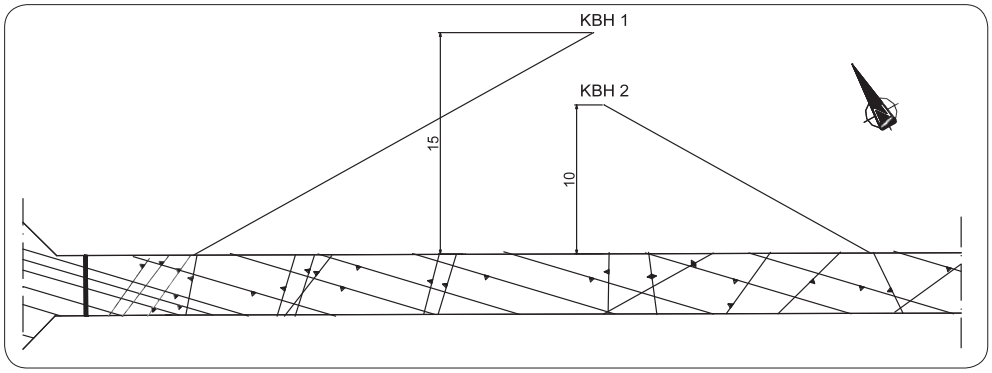
© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tunnelns typsektion är ca 12 m^2, varav större delen av båda väggarna är blockerade med installationer vilket starkt begränsar valet av borr- och injekteringsutrustning, se figur 8.

Lufttemperaturen i tunneln ca 20° och beror på uppvärmningen från installationerna. Däremot är temperaturen i bergmassan ca 8°. Denna skillnad påverkar designen på injekteringsmedlet.

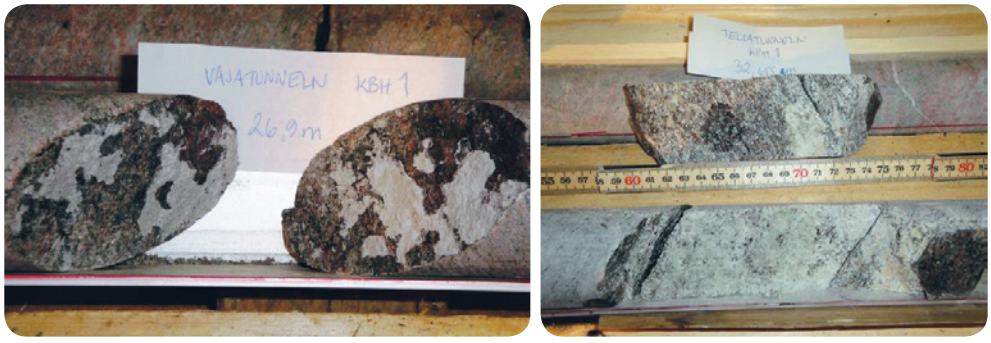
Kompletterande förundersökning

Två typer av kompletterande undersökningar gjordes, dels kärnborrning och dels droppkartering. Syftet med kärnborrningen var att få underlag till designen såsom sprickviddsfördelning och sprickfrekvens samt att verifiera den tätade förinjekteringszonen och dess gradient. Två kärnborrhål borrades, ett hål med riktning som tunneldrivningen (KBH1) och ett hål i riktning mot tunneldrivningen (KBH2), se figur 5.



Figur 5 Plan över tunnelsträckan med kartering och kärnborrhål KBH1 och KBH2.

De hydrauliska testerna för KBH1 visade på en tät bergmassa med inflöden inte förrän de sista metrarna av hålet samt spår av injekteringsbruk i sprickorna, se figur 6.



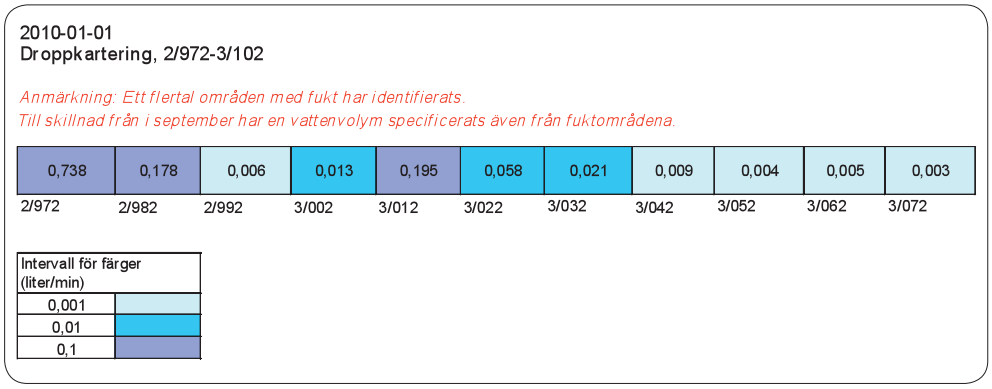
Figur 6 Exempel på injekteringsbruk i sprickorna, till vänster cement och till höger talk.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

De hydrauliska testerna i KBH 2 visade på ett obefintligt inläckage de första 10 metrarna, därefter erhölls ett antal läckande strukturer.

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

Syftet med droppkarteringen var att få ett underlag till designen för att utröna om det fanns stora variationer i inläckage längs den valda tunnelsträckan, samt att ge underlag till utvärderingen. I figur 7 redovisas droppkarteringen från januari 2010



Figur 7 Redovisning av droppkartering, januari 2010

Inför designen och utförande gjordes en riskanalys för projektet. Samtliga inblandade i projektet, beställare, entreprenör, forskare och projektörer, samlades för att identifiera risker. Totalt 121 risker identifierades, varav 12 st identifierades som hög.

Injekteringsteknik

Baserat på resultat från kärnborrningen valdes ett inläckagemål på ca 1 l/min, 100 m. Utifrån detta mål gjordes en basdesign med val av medel, borrhålsgeometri, tryck och tid. Under utförandet görs sedan etappanalyser och beroende på resultaten kan basdesignen justeras inför nästkommande etapp. Basdesignen följer ett antal steg som skall göras. Nedan görs en kort summering av de olika stegen.

Steg I: Prognos av inläckage och val av injekteringsmedel

I tabellen 1 på nästa sida visas vilken sprickvidd som måste tätas för att erhålla 1 l/min och 100 m.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Tabell 1 Beräkning av inläckaget beroende på minsta tätad spricka.

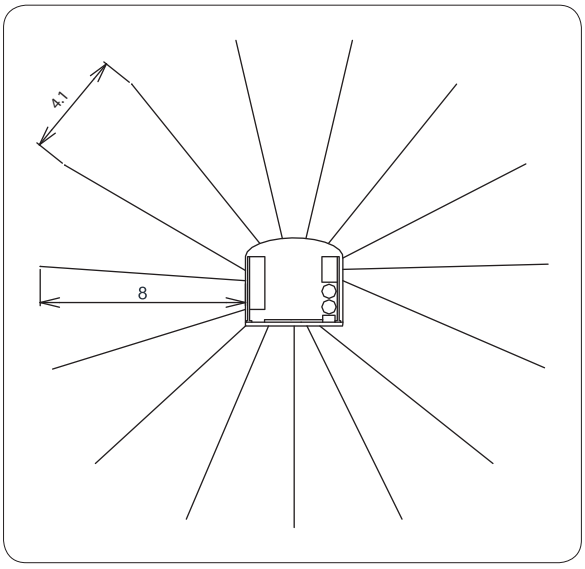
Minsta tätad spricka, b_{min} [µm]	Beräknat inläckage, [l/min 100 m]	T_{inj} [m²/s]	Kommentar
Ingen	3,8	2,4*10-6	Utan injektering
34	1,0	1,3*10-7	Kritisk dimensionerad sprickvidd

Enligt tabellen blir den dimensionerande sprickvidden ca 30 µm, vilket innebär att silica sol används som huvudsakligt injekteringsmedel i basdesignen.

Den maximala sprickvidden är uppskattad till ca 160 µm, varför ett cementbaserat injekteringsmedel skulle finnas i beredskap för de större inflödena i injekteringshålen. De kriterier som ställdes på det cementbaserade injekteringsmedlet var främst att flytgränsen, τ_o, skulle vara ca 2 till 5 Pa för att klara gradienten i den tätade zonen. Vidare var en marshcone tid på ca 35 s önskvärd för att få en relativ hög inträngningshastighet.

Steg II och III: Bestämning av tryck och inträngningslängd samt kontroll av gradientproblem

Innan tryck och inträngningslängd bestämdes, gjordes en preliminär skärmgeometrin. För att optimera borrningen vinklades borrhålen 40° ut från kontur, dvs med så stor vinkel som möjligt för att få kortaste möjliga hål. Samtliga borrhål borras mot förinjekteringen. Borrhålslängden valdes till 12,5 m, dvs ca 8 m vinkelrät ut från kontur och i den injekterade zonen. Efter en del omflyttande av kablar kunde en heltäckande skärm designas, se figur 8.

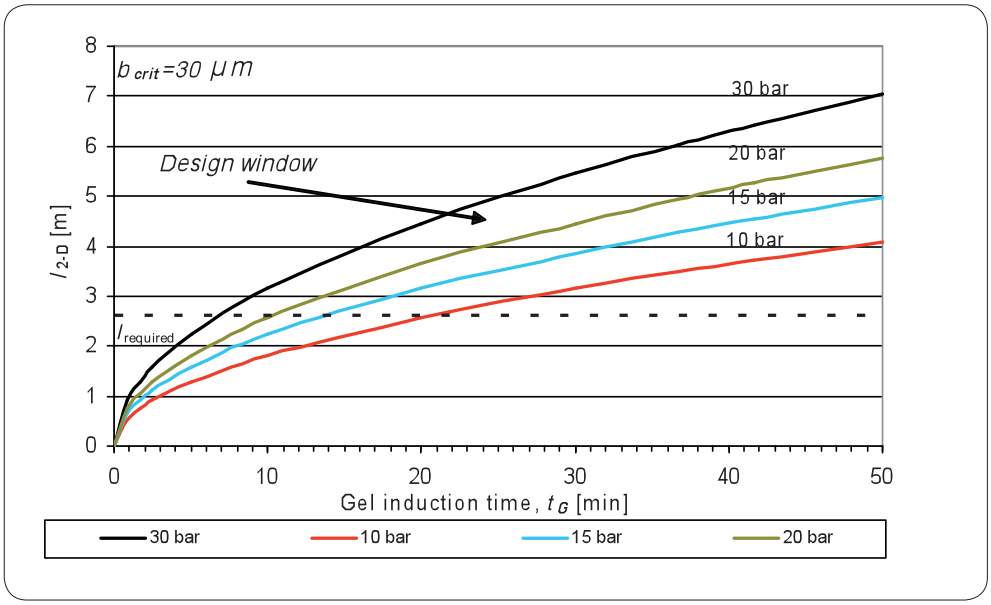


Figur 8 Skärmgeometri, där ansättningen har flyttats med hänsyn till installationer.

– Injekteringsteknik för silica sol

Med sambandet för inträngningslängd ($l_{max,\ 2D}$) (Funehag, 2007) fås ett förhållande mellan injekteringsövertryck och gelinduktionstid (t_G) vid en bestämd sprickvidd och inträngningslängd. I figur 9 redovisas de olika utfallen vid sprickvidden 30 µm.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 9 Bestämning av gelinduktionstiden, baserat på tryck och inträngningskrav.

Med en erforderlig längd på 2,6 m och ett övertryck på 20 bar fås en gelinduktionstid på 10 min. Detta ger en geltid på 30 min, dvs 3 gånger gelinduktionstiden (Funehag, 2007). Vid ytligt förlagda tunnlar och där risken för erosion är liten kan pumptiden sättas till ½ geltiden.

Hänsyn måste tas till temperaturskillnaden i tunneln och berget. Vid blandningen av medlet kommer silica solen att ha en temperatur på 20°C men i sprickorna på ca 8°C. För att få rätt gelinduktionstid valdes pumptiden som korrigeringsparameter. Med en pumptid på 2/3 av geltiden, för en blandning på 20°C, fås samma gelinduktionstid som för halva geltiden för en blandningen på 8°C.

De observationer som skall göras under injekteringen m.a.p injekteringsmedlet är:

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

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

Vid läckande borrhål flyttas först manschetten mer ytligt, kortare geltid användas samt att pumpa medlet till 4/5 av geltiden. Om inte den första lyckas, pluggas borrhålet med ett tjockt cementbruk. Om inte de två föregående åtgärderna lyckas, manschetteras borrhålet tillsvidare.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Den slutliga basdesignen för silica sol injekteringen blev:

- Maximalt injekteringstryck 30 bar
- Gelinduktionstid 10 min
- Övertryck 20 bar
- Pumptid 20 min

– Injekteringsteknik cement

Varje borrhål som hade en vattenförlust större än 10 l/min vid 3 bar skulle injekteras med cement. Detta antas motsvara en hydraulisk sprickvidd på 160 µm. För denna storlek på sprickvidd finns osäkerheter på silica solens funktion som injekteringsmedel.

Den blandningen som valdes var INJ30, vct 0,8+2 % setcontrol II med kända egenskaper sedan tidigare. Med ett övertryck på 15 bar, tid på 30 min och kända egenskaper erhölls en cementinträngning på ca 10 m i 160 µm sprickan.

– Injekteringskriterier

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

Kriterier, silica sol

Volymen för batchvis blandning kopplades mot vattenförlusten. En standardsats antogs vara ca 127 l (100 l sol och 26,7 l salt).

1. Injekteringen fortgår till full tid vid givet övertryck, ca 20 bar.
2. När en batch är slut blandas en ny och pumpas till 2/3 av geltiden
3. Vid en total inpumpad volym på 400 liter blandas en ny snabb sats (halva geltiden mot den tidigare) och pumpas 2/3 av geltiden.
4. Vid total volym på mer än 500 liter avbryts injekteringen med silica sol och borrhålet injekteras med cement.

Kriterier, cement

Blandningen av cement görs kontinuerligt.

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

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Utförande

Allmänt

Baserad på basdesignen upprättades en arbetsbeskrivning, där utförandet indelades i tre etapper. Efter varje etapp gjordes en avstämning och uppföljning för att eventuellt justera designen och arbetsbeskrivningen inför nästa etapp.

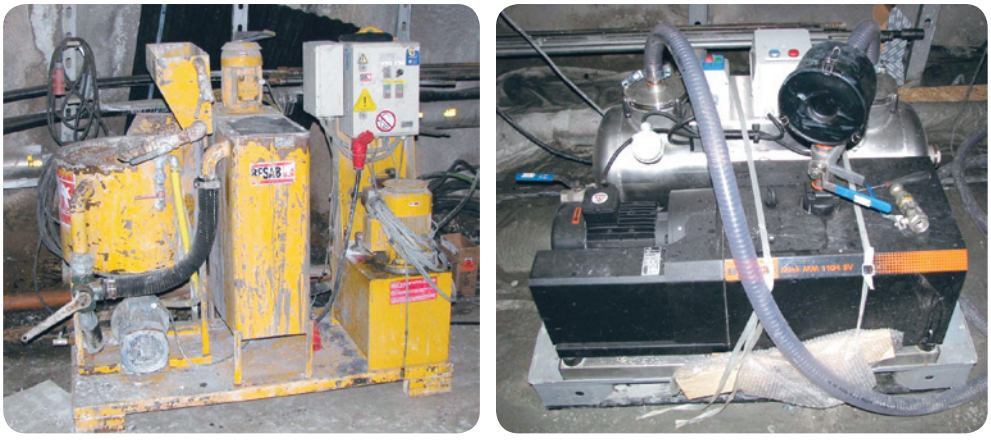
Under arbetets gång följde en så kallade injekteringsingenjör arbetet, vars uppgift var att förtydliga eventuella frågetecken i designen, följa och observera injekteringsförloppet, följa upp injekteringsresultaten samt ta beslut om åtgärder vid oväntade händelser.

Etablering

I etableringen ingick förprovning av medlen. För silica solen gjordes kopptester och för cementblandningen densitet, marshcone och flytgränstester. Förprovningen från fältblandaren uppnådde jämförbara resultat med labbprovning. Enligt handling skulle vakuumpump användas i nedåtlutande hål för att evakuera vatten och luft samt luft i uppåtlutande borrhål. Genomgång och testning av vakuumpump genomfördes utan problem. I figur 10 visas fältblandaren och vakuumpumpen.

Det största problemet vid etableringen var att hitta ”rätt” borrigg som klarade både kravspecifikationen, främst borrningskapacitet, och det begränsade tunnelutrymmet. Den ursprungliga planerade borriggen klarade inte kraven enligt kravspecifikationen och den efterföljande kom inte ner till aktuellt tunnelavsnitt, dvs fastnade på vägen ner trots kabelflytt och andra åtgärder. Slutligen hittades en borrigg som gick att transportera ner och som skulle uppfylla kraven.

Inför starten av arbetsetapp 1 genomfördes ett uppstartsmöte med alla inblandade i utförandet, för att förtydliga eventuella otydligheter i designen.

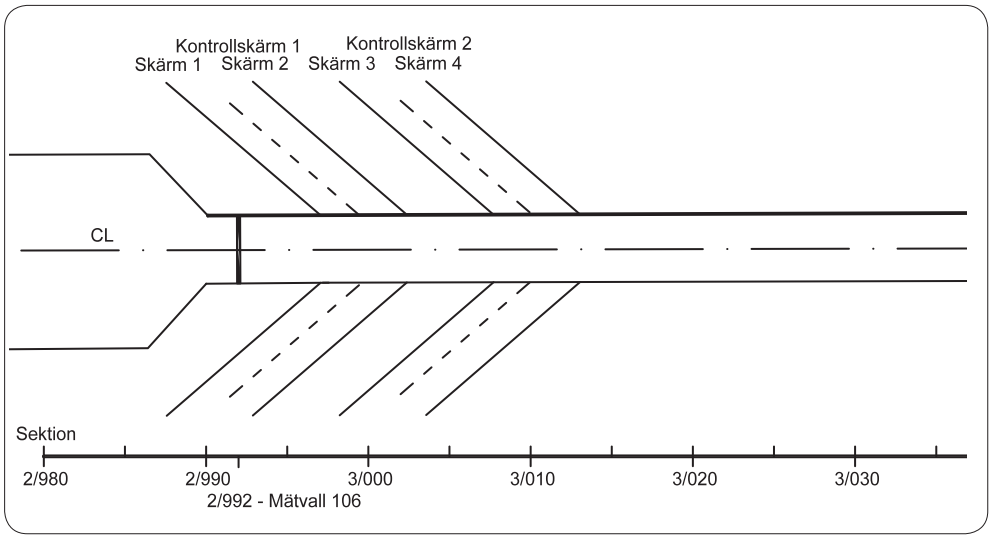


Figur 10 Använd injekteringsblandare (vänster) och vakuumpump (höger)

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Arbetsetapp 1, skärm 1–4

Syftet med etapp 1 var att testa designen och den föreslagna arbetsgången, inkl utrustning, samt att skapa en tätare zon som nästföljande etapp skulle tätas emot. Etapp 1 utgjordes av injekteringsskärm 1 till 4, inkl kontrollhål, se figur 11.



Figur 11 Etapp 1, tunneln i plan med skärm 1-4 och kontrollskärm 1-2.

Den beskrivna arbetsgången, med hydrauliska tester, blandning, injektering och avslut, följdes utan större problem. Det största praktiska utförandeproblemet var den långsamma borrningen. Detta var kopplat till en för svag borrmaskin för en håldiameter på 63 mm, det begränsade arbetsutrymmet samt med avseende på arbetsmiljön att använda vattenspolning.

För att få borrningen att gå snabbare ändrades håldimensionen till 51 mm. Men för att få plats med manschett/packers från vakuumpumpen borrades först de första 2 metrarna med 63 mm. Vidare inskaffades en separat dammsugare med stoftavskiljare som kunde förbättra arbetsmiljön och kunna borra med lufttryck.

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

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

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Samtliga hål injekterades med silica sol eftersom inget hål överskred kriteriet; > 10 l/min och 3 bar. Samtliga batcher kontrollerades genom kopptest och generellt låg geltiden lite under 20 min och därmed även pumptiden. I figur 12 visas förfarandet med injektering och vakuumpumpning.

När en batch började ta slut förbereddes nästa i blandaren. Rengöring/uppblandning av omröraren gjordes med silica istället för vatten då en viss mängd tenderade att bli kvar i botten. En viss kompensering av salt fick göras för att bibehålla rätt geltid.

Vid hålsamband stängdes läckande manschett och rensades senare ur innan injektering av borrhålet. Vid ytläckage och bibehållet injekteringstryck fortsatte injekteringen enligt plan. Vid större ytläckage, där injekteringstrycket sjönk och åtgången uppnådde ca 350–400 liter blandades en ”snabb/stopp” sats med halva gelningstiden.

Figur 12 Injektering i det nedre borrhålet medan vakuumpumpen tömmer det övre borrhålet.

Injekteringsresultatet kontrollerades med kontrollhål. Kontrollhålen var antingen så kallade ”split-spacing” hål, som borrades i injekteringsskärmen och mellan/intill injekteringshål, eller hål i kontrollskärm, som borrades mellan två injekteringsskärmar. I kontrollhålen utfördes först hydrauliska tester och därefter injektering på motsvarande sätt som i injekteringshålen.

Under arbetet med pluggning av hål uppkom läckande hål. Dessa hål åtgärdades enligt designen, dvs ytinjektering inleddes med att justera manschettläget från ca 1,5 m in i hålet till ca 0,7 m. Därefter injekterades hålsektionen med en silica sol blandning med en geltid på 10–12 min med fullt tryck på 15 bar i 7–10 min.

Figur 13 Handskrivna protokoll görs alltid vid sidan av injekteringsloggen.

När etapp 1 var genomfört gjordes en uppföljning och utvärdering. Uppföljningen gav att mätvallsvärdena minskade något, från ca 3,8 till ca 3,3 l/min, 100 m. Få injekteringshål hade mätbara inflöden innan injektering men intilliggande kontrollhål gav en tätningsfaktor på ca 25. Detta innebar att injekteringen av etapp 1 gav effekt och att designen bibehölls..

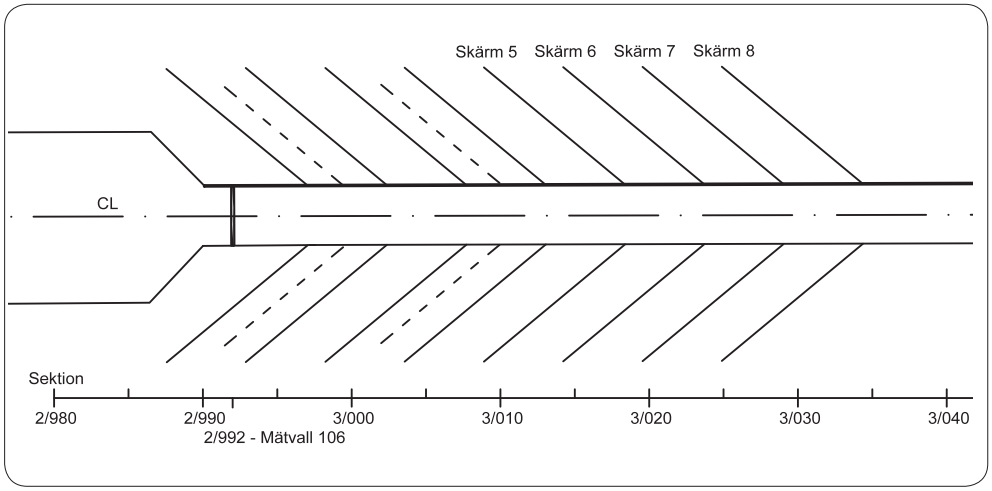
De erfarenheter som togs till vara under etapp 1 och innebar vissa justeringar inför etapp 2 var; ändrad borrdiameter efter 2 meters borrning, noggrannare inflödesmätningar (även

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

dropp noterades), tydligare arbetsinstruktioner för ytinjekteringen/pluggningen, ändrat kriterium vid stor åtgång silica sol (ingen blandning med korta geltider utan avsluta injekteringen vid 400 liter) samt korta pumptiden till hälften i de täta hålen (hål med inga inflöden och ingen åtgång efter hålfyllnad).

Arbetsetapp 2, skärm 5–8

Syftet med etapp 2 var att minska inläckaget i tunneln så att 1 l/min, 100 m skulle kunna uppnås. Etapp 2 utgjordes av injekteringsskärm 5 till 8, se figur 14.



Figur 14 Etapp 2, tunneln i plan med skärm 5-8

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

Vid ytinjekteringen gjordes en förändring, så att läckande hål skulle rensas ur ca 3 m in och manschetteras på 0,5 m djup. Hål som fortfarande läckte manschetterades med en engångsmanschett så ytligt som möjligt. Därefter pluggades hålen med ett sk. pluggbruk, dvs en cementblandning med vct ca 0,5. Utöver detta uppstod det inga förändringar under etapp 2.

När skärm 5 till 8 var genomförd gjordes en uppföljning av delresultaten. Uppföljningen gav att mätvallsvärdena minskade markant, från ca 3,3 till ca 1,3 l/min, 100 m. Totalt 12 injekteringshål hade mätbara inflöden innan injektering. Jämförelsen mellan mätbara injekteringshål och intilliggande kontrollhål gav en tätningsfaktor på ca 60. Detta innebar att efter injekteringen av etapp 2 hade inläckagemålet näst intill uppnåtts.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Arbetsetapp 3, skärm 9–12

Resultaten från etapp 1 och 2 visade att designen och utförandet hade gett ett bra tätningsresultat. Vidare fanns inför etapp 3 ett minskande dropp i tunnelsektionen jämfört med etapp 1 och 2. Därför beslutade projektet att syftet med etapp 3 var att testa en metod för att effektivisera antalet skärmar och injekteringshål.

En metodik användes för beslut om injektering skulle ske eller ej. Metodiken baseras på vattenförlustmätningar i sonderingshål. Metodiken finns allmänt beskriven i Gustafson et al (2010). Med användandet av denna metodik erhölls att fyra sonderingshål per skärm skulle borras och vattenförlustmätas. Om ett hål översteg en vattenförlust på 0,16 l/min skulle hela skärmen borras upp och injekteras.

Samtliga sonderingshål visade på vattenförluster lägre än det satta kriteriet och injekteringen med silica sol i sonderingshålen gav bara hålfyllnad. Efter det att etapp 3 hade slutförts låg inflödet kvar på på ca 1,3 l/min, 100 m, dvs hade varken minskat eller ökat inläckaget.

Resultat

Efter etapp 3 utvärderades och analyserades resultaten från samtliga etapper med avseende på:

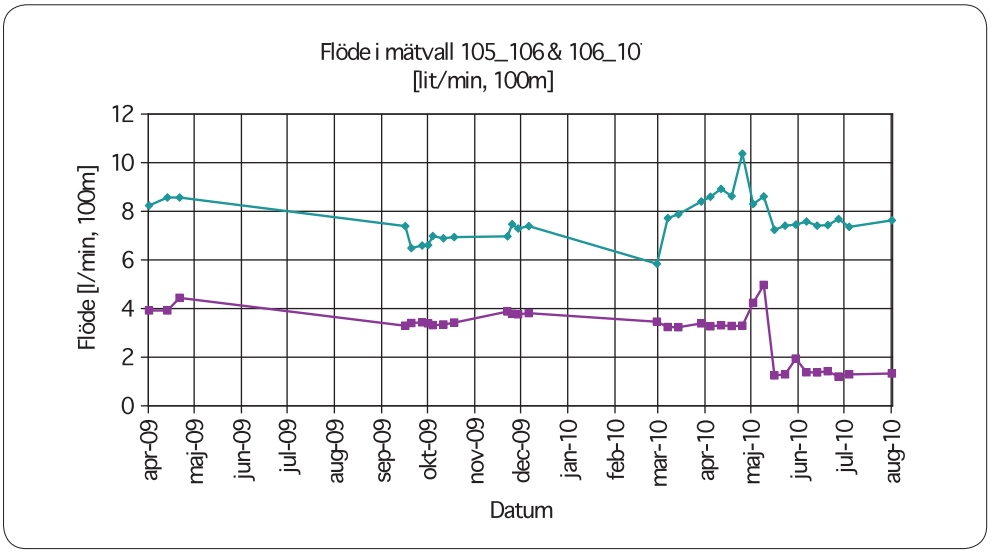
- Mätvallsresultat, före, under och efter injektering
- Droppkartering, före och efter injektering
- Hydrauliska tester, jämförelse mellan de hydrauliska metoderna, resultat mellan hydrauliska tester och injekteringsåtgång och slutligen tätningseffekten genom jämförelse mellan inflöden i kontrollhål och närliggande injekteringshål
- Uppföljning av riskanalysen
- Förändringar i arbetsutförandet

Mätvallsresultat

I figur 15 redovisas resultat från mätvallsmätningarna från jan -09, dvs strax innan arbetena påbörjades, till aug -10, dvs efter etapp 3 och avetablering.

För etapp 1 (feb – mars) kan noteras en mindre sänkning av flödet vid vall 105_106. Medan en ökning av flödet erhölls i det direkt intilliggande avsnittet (vall 106_107). Det ökande flödet för vall 105_106 i början av maj skedde under borrningen av etapp 2, därefter inträffade en markant minskning av flödet som sammanfaller med injekteringen av etapp 2. Under och efter etapp 3 skedde inga förändringar av flödet.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 15 Mätvall 105_106 (lila/kvadrat) motsvara aktuellt tunnelavsnitt och 106_107 (grön/romb) är tunnelavsnitt som närmast angränsar injekteringsområdet.

Droppkartering, efter injektering

Droppkarteringen, efter injektering, visar på ett minskande dropp för det aktuella tunnelsektionen. Vidare noterades att i sektionen närmast etapp 1 hade droppet ökat något.

Hydrauliska tester

Resultaten från de två olika hydrauliska testerna, dvs inflödes- och vattenförlust-mätningar, har jämförts med varandra. Jämförelsen visar på blandade resultat, dvs både överensstämmelse och icke överensstämmelse.

En jämförelse har gjorts mellan de hydrauliska testerna och åtgången silica sol. Inga samband kan visas, vilket tydliggör svårigheten att prognostisera åtgången vid en efterinjektering. I figur 16 redovisas samtliga mätbara inflöden i kontrollhål och närliggande injekteringshål, figuren ger en täthetsfaktor på ca 45.

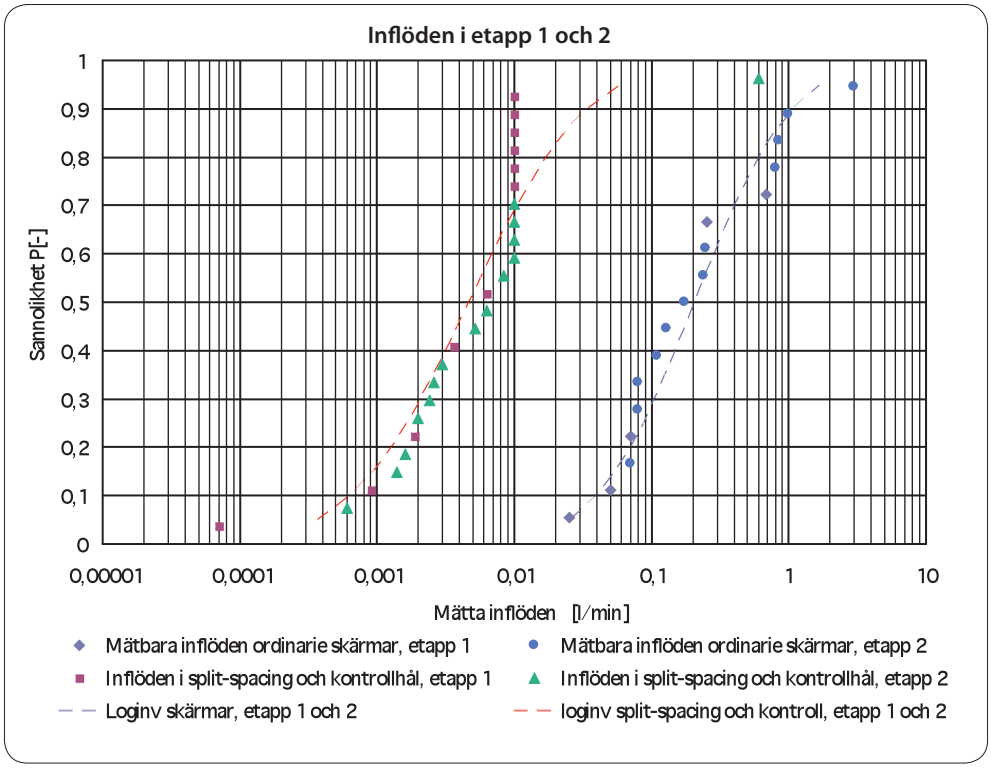
Uppföljning av riskanalysen

Bland de högst identifierade riskerna kunde flertalet undvikas genom åtgärder men en del risker kunde bekräftas, såsom ”långa arbetspass”, ”utrustning klarar inte kravspecifikationerna” samt ”slutdatum och därmed kostnader överskrids”.

Förändringar i arbetsbeskrivningen

Vissa mindre förändringar har gjorts från den ursprungliga arbetsbeskrivningen, såsom borrdimensionen, kortare pumptid för ”täta” hål, inga silica sol blandningar

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors



Figur 16 Samtliga inflödesmätningar, dvs hopslaget från etapp 1 och 2.

med korta geltider (< 15 min) samt bättre beskrivning av ytinjektering och/eller hålpluggning.

Slutsatser

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

- Implementerat och utvecklat en designmetodik för efterinjektering av befintliga tunnlar.
- Genomfört efterinjektering av befintlig tunnel enligt en framtagen design och strategi, där mindre förändringar av utförandet har baserats på observationer och basdesignen.
- Uppnått satta delmål under genomförandet och slutmål för inläckagemängden.
- Genomfört ett samarbetsprojekt där beställare, designer, projektör och entreprenör har deltagit aktivt från initieringen till avslutning av projektet.

© 2011, Svenska Bergteknikföreningen och författarna/Swedish Rock Engineering Association and authors

Förutsättningarna från befintligt material gav stor information men behövde kompletteras med kärnborrningen, med tillhörande kartering och hydrauliska tester. Ett viktigt moment i projektet var de praktiska förberedelserna, såsom val och test av injekteringsmedel och övrig injekteringsutrustning, och med hänsyn till de begränsade tunnelutrymmena och logistiken.

Förväntade scenarier och förlopp stämde bra överens med iakttagelser under injekteringen. Batchblandningen och injekteringen med silica sol genomfördes utan problem tack vare entreprenör med tidigare erfarenhet av silica sol och direkta kommunikationer på plats mellan entreprenör och designer/projektör via injekteringsingenjör.

Både i detta projekt och även dokumenterat i andra projekt är läckande borrhål ett problem. Inläckaget sänktes från ca 3,8 till ca 1,3 l/min och 100 m. Vid dessa måttliga inläckage är de uppnådda inläckaget normalt väldigt svårt att erhålla, inga tidigare dokumenterade efterinjekteringsprojekt har kunnat visa samma resultat.

Rekommendationer inför liknade framtida efterinjekteringsprojekt är:

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

Referenser

Fransson, Å. Gustafson, G. 2006. Efterinjektering: Inläckageprognos och design – förslag till analys. SveBeFo Nr 75.

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.

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

Janson, T. Funehag, J. Granberg, N. Jonsson, H. 2010. Underhållstätning av mediatunnel i Göteborg – design och utförande av efterinjektering. BeFo Nr 105.