



FÄLTVERIFIERING AV RTGC-METODEN

Almir Draganović

FÄLTVERIFIERING AV RTGC-METODEN

Field verification of the RTGC-method

Almir Draganović, KTH

BeFo Rapport 171

Stockholm 2020

ISSN 1104 – 1773

ISRN BEFO-R—171—SE

Förord

Real Time Grouting Control Method (RTGC-metoden) är ett injekteringskoncept utvecklat vid KTH och Chalmers. Konceptet är ett resultat av mer än tjugo års forskning inom injektering. Metoden är ett aktivt verktyg för styrning av injekteringsbrukets spridning i berg samt ett verktyg för kontroll av bergupplyft.

Med hjälp av metoden reducerar man både tiden för injektering och åtgången av bruk jämfört med dagens sätt att injektera. Om man slutar injektera för tidigt blir tätningen dålig, vilket medför stora kostnader för kompletterande injektering. Om man injekterar för lång tid ökar kostnaden, både genom längre arbetstid och genom större materialåtgång. Det är därför nödvändigt att kunna beräkna korrekt inträngningslängd och injekteringstid för en optimal injektering. Beräkning av brukets inträngningslängd och tid är centralt i RTGC-metoden för att uppnå ställda täthetskrav på ett optimalt sätt.

Målet med detta projekt var att verifiera spridningsmodellen byggd på RTGC metoden i fält där spridningen av bruk i sprickor ska både mätas och beräknas. Tio platser med potentiella lämpliga sprickor för test har hittats i Nacka gruvan och Äspölaboratoriet. Mätningar av transmissiviteten av 31 sektion i Äspölaboratoriet och 34 sektioner i Nacka-gruvan har genomförts. Genomförda mätningar av transmissiviteten samt undersökningar av sprickor från kärnborrning och borrhålskamera visar att sprickor inte är så konduktiva som man har förväntat. Även om sprickor syns i tunnelväggen och finns i berget är majoriteten av dem inte konduktiva i en lokal skala. Därför kunde man inte genomföra några praktiska injekteringsförsök.

Projektarbete har genomförts av Almir Draganović (KTH), Ali Nejad Ghafar (KTH) och Stefan Larsson (KTH) med stöd av referensgruppen Håkan Stille (KTH), Daniel Eklund (SKB), Tommy Ellison (Besab), Robert Sturk (Skanska), Thomas Janson (Tyréns), Emmeli Johansson (SKB), Niclas Bockgård (Golder) och Per Tengborg (BeFo).

Projektet finansierades av Trafikverket, SBUF och Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo).

Stockholm 2020

Per Tengborg

Sammanfattning

Syfte med denna undersökning var att verifiera Real Time Grouting Control, RTGC-metod, i fält. Idén var att hitta lämpliga bergssprickor i fält, injektera de och mäta bruksspridning i tid. Samtidigt beräknar man också spridningen enligt RTGC-metoden. Skillnaden mellan den beräknade och uppmätta spridningen ger en indikation om noggrannheten av RTGCM. Osäkerheten finns i beräkningsmodellen men också i bestämningen av parametrarna som används i modellen. Därför är det viktigt att ta hänsyn till noggrannheten i bestämningen av parametrarna också.

Mätnoggrannhet av flöde och injekterad bruksvolymer har diskuterats eftersom de har stor påverkan på bruksspridning. Det förväntades relativt låga flöden och volymer så en plexiglas-cylinder har tagits fram som bruksbehållare för att kontrollera mätningen av flöde uppmäta med injekteringsriggen. Det visade sig att vid låga flöden är flödesmätningen med injekteringsriggen inte tillräckligt noggrann. För transmissivitetmätningar i Äspölaboratoriet användes SKBs High water injection controller (HWIC) utrustning. Det är en specialtillverkad utrustning för noggrannare transmissivitetmätningar som kan mäta flöden ner till 2 ml/min.

Nacka gruvan och Äspölaboratoriet var platser där fältförsök har genomförts. Dessa anläggningar kan vara mera lämpliga för fältförsök jämfört med tunnlar som är i produktion relaterad till produktionsstörningar men en del problem fanns också i dessa anläggningar vid sökandet av sprickor. I Nacka gruvan var antal plaster med sprickor ganska begränsad på grund av gamla borrhål från tester av borrhåll. Problem med Äspölaboratoriet var relaterade till att hitta platser som är inte tidigare injekterade, sprutade med betong och som inte ligger för djupt. Till slut valdes fem platser med sprickor i tunnelväggen i Nacka gruvan och fem plaster i Äspölaboratoriet. Man har borrar ett borrhål per plats med mål att träffa dessa valda sprickor cirka 5 m från tunnelväggen och testa om de är konduktiva d v s prolangerar och leder vatten hela vägen från borrhålet till tunnelväggen. Bilder av försöksplatserna, borrhåll och borrhållena tagna med borrhållskamera samt resultat från transmissivitetmätningar visas i bilagor.

Transmissivitetmätningar av borrhål är gjorda på 1 m långa sektioner. Anledningen för val av en relativt kort testsektion är att antal sprickor per sektion blir mindre. Det innebär att man kan noggrannare bestämma b från parameter $\sum b^3$. Sammanlagt har man testat 34 sektioner i Nacka gruvan och 31 sektion i Äspölaboratoriet.

Transmissivitetmätningar i Nacka visade väldigt små flöden, runt 0.1 till 0.2 l/min vilket motsvarar en b_{hyd} mellan 25 och 31 μm . Medelvärde av den fysiska sprickvidden är principiellt samma. Det betyder att dessa sprickor inte kan injekteras lätt med cementbruk. Dessutom kunde man inte observera vattenutflöde från sprickorna på tunnelväggarna under transmissivitetmätningar. Man vet inte vart dessa små vattenflöden tog vägen och då är det svårt att borra observationsborrhål för att följa spridning av bruk.

Transmissivitetmätningar av 31 sektion i Äspölaboratoriet visade i princip samma resultat. Bara vid tester av tre sektioner uppmättes flöden av någorlunda betydande storlek. I BH9 sektion 5 uppmättes flöde av 0.8 l/min vilket motsvarar b_{hyd} av 50 μm eller medelvärde av den fysiska sprickvidden av 50 till 60 μm . Det är relativt små sprickor för injektering med cementbaserat bruk. Problemet var också att man inte kunde se vart vattnet tog vägen. Vattenflöde kunde inte observeras på tunnelväggen från den förväntade sprickan. P g a det och en liten fysisk sprickvidd var sektion inte lämplig för injekteringstest.

I BH12 sektion 3 och 4 uppmättes flöde av cirka 0.35 l/min vilket motsvarar en b_{hyd} av 37 μm och ger ett medelvärde av den fysiska sprickvidden av cirka 40 till 45 μm . Dessa sprickor är också relativt små för injektering med cementbaserade bruk. Dessutom i BH12 sektion 3 kunde man inte heller observera vart vatten tog väggen. I BH12 sektion 4 observerade man vattenflöde komma från tunnelväggen med det observerade vattenflöde kom inte från den valda sprickan utan den kom från en spricka 1 m ovanför borrhålmynningen. Att bestämma flödesvägar från borrhålsektionen till denna spricka i tunnelväggen är väldigt osäkert. Det bidrar till stora osäkerheter vid eventuell jämförelse mellan den uppmätta spridningen i tiden med den beräknade enligt RTGCM. Det skulle vara svårt också att borra observationsborrhål och följa den eventuella spridningen av bruket. Dessutom var det en väldigt liten spricka. Baserad på allt detta bedömdes sprickan som olämplig för injekteringstest.

Genomförda transmissivitetmätningar samt undersökningar av sprickor med kärnborrning och borrhålkamera visar att sprickor inte är så konduktiva som man har förväntat. Även om sprickor syns i tunnelväggen och finns i berget är majoriteten av de inte konduktiva i en lokal skala.

Summary

Aim of this study was to verify Real Time Grouting Control (RTGC) method in the field. Idea was to find suitable rock fractures in field, grout them and measure spread in time. In the same time, we have also to calculate the spread according to RTGC method. The difference between the calculated and measured spread gives us an indication of the accuracy of RTGCM. The uncertainty exists in the calculation model but also in the determination of the parameters used in the model. Therefore, it is important to take into account the accuracy of the determination of the parameters as well.

Accuracy of measurements of flow and grouted volume has been discussed because they have a large impact on spread. Relatively low flows and volumes were expected, so a grout container in plexiglass has been produced to control the flow measured with grouting rig. It was shown that at low flow, the flow measurement with grouting rig is not sufficiently accurate. For transmissivity measurements in Äspö HRL, SKB's High water injection controller (HWIC) equipment was used. It is special equipment produced for accurate transmissivity measurements. It can measure flow down to 2 ml / min.

Nacka mine and Äspö HRL were places where field tests have been conducted. These facilities are more suitable for field tests compared to the tunnels in production due to disturbances, but in these facilities we had also some problems during the searching of the suitable fractures. In Nacka mine the number of places with cracks was quite limited because of old drill holes from the testing of drill rigs. Problems with the Äspö HRL were related to finding places that are not previously grouted, sprayed with shotcrete and that is not too deep. At the end, five places with fractures in the tunnel walls were chosen in Nacka mine and five in the Äspö HRL. One borehole per site were drilled with the goal to cross these selected fractures about 5 m from tunnel wall and test if they are conductive i.e. lead water from the borehole to the tunnel wall. Images of test sites, drill cores and borehole taken with borehole camera as well as results from the transmissivity measurements are shown in the appendices.

Transmissivity measurements of boreholes are performed on 1 m long sections. The reason for the choice of a relatively short test section is that the number of fractures per section will be smaller. This means that accuracy of determination of fracture aperture b from the parameter $\sum b^3$ will be higher. Altogether 34 sections in Nacka mine and section 31 in the Äspö HRL have been tested.

The transmissivity measurements in Nacka showed very small flows, around 0.1 to 0.2 l / min. This corresponds to a b_{hyd} between 25 and 31 μm . Mean value of the physical aperture for low values of b_{hyd} is principally the same. These fractures cannot be easily injected whiteout filtration with cement-based grout. Moreover, the water outflow from the fractures in the tunnel walls was

not observed during the transmissivity measurements. In case of grouting test it will be very difficult to drill observation boreholes to monitor the spread of grout.

The transmissivity measurements of 31 sections in Äspö HRL showed principally the same results. Only in three sections the measured water flow was of some substantial size. In BH9 section 5 the measured flow was 0.8 l / min corresponding to a bhyd of 50 μm or the mean physical aperture of 50 to 60 μm . It is also a relatively small fracture for grouting with cement-based grout. The water flow was neither observed at the tunnel wall from the expected fracture. Because of it and a small physical fracture it was judged that this section was not suitable for grouting test.

In BH12 section 3 and 4 the measured flows were about 0.35 l / min corresponding to a bhyd of 37 μm and a mean physical aperture of about 40-45 μm . These fractures are also small for grouting with cement-based grout. Furthermore, in BH12 section 3, water outflow at the tunnel wall was neither observed. In BH12 section 4 water outflow was observed but not from the selected fracture. The outflow was observed from a crack 1 m above the borehole. To determine the flow paths from this borehole section to the tunnel wall is very uncertain. This would contribute to a large uncertainty in eventual comparison between measured spread in time with calculated according RTGCM. It would be also difficult to drill observation bore holes and monitor the possible spread of the grout. In addition, the fracture is very small. Based on all this information this fracture was also judged as inappropriate for grouting test.

The performed transmissivity measurements and examination of fractures with core drilling and borehole camera showed that the cracks are not conductive as we had expected. Even if fractures are visible at the tunnel wall and exist in the rock, the majority of them are not conductive in a local scale.

Innehållsförteckning

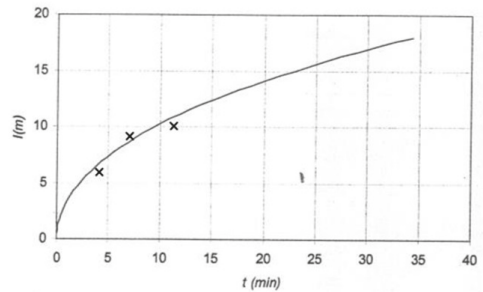
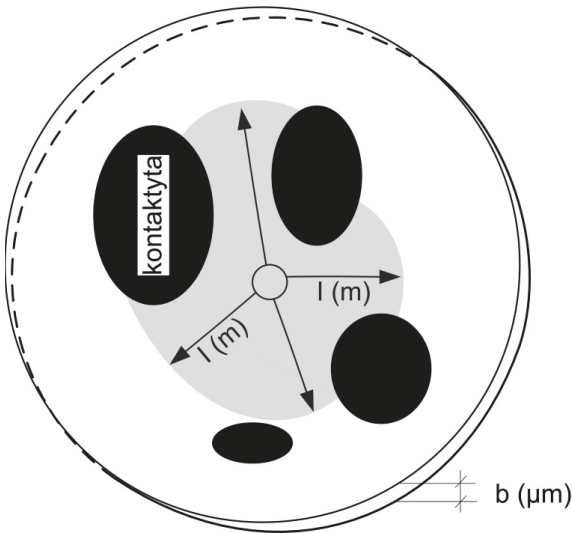
Förord.....	i
Sammanfattning.....	iii
Summary	v
Innehållsförteckning	vii
1. Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Teoretisk exempel av spridning av bruket i tid enligt RTGCM.....	2
2. Beskrivning av försöksmetoden – verifiering av RTGCM i fält.....	5
3. Bestämning av parametrar som behövs för beräkning av brukets spridning enligt RTGCM samt deras påverkan på spridning.....	7
3.1 Utvärdering av flödesdimensionalitet (DIM) och noggrannhet av volymmätning	7
3.2 Sprickfördelningspåverkan på spridningen och bestämning av sprickfördelningen	10
3.3 Bestämning av sprickvidden b och dess påverkan på spridningen.....	10
3.4 Bestämning av reologiska egenskaper av bruk och dess påverkan på spridningen	13
3.5 Bestämning av injekteringstryck och dess påverkan på spridningen	15
4. Förberedelse inför fältmätningar.....	17
4.1 Förväntade bruksvolymer och injekteringstider för bruksspridning av 5 m.....	17
4.2 Längd av injekteringssektion och val av packers	19
4.3 Val av bruk.....	19
4.4 Förväntade vattenflöden och vattenvolymer för olika sprickvidder i 1 m lång testsektion.....	20
4.5 Övriga risker förknippade med försöket.....	20
5. Val av lämpliga sprickor för fältförsök och transmissivitetmätningar.....	21
5.1 Val av sprickor för fältförsök i Nacka-gruva och resultat från transmissivitetmätningar	21
5.2 Val av sprickor för fältförsök i Äspölaboratoriet och resultat från transmissivitetmätningar	26
5.2.1. Val av platser för fältförsök.....	26
5.2.2 Genomföring av transmissivitetmätningar	27
5.2.3 Resultat från transmissivitetmätningar.....	29
Slutsatser.....	33
6. Referenser:.....	35
Bilagor.....	37

1. Introduktion

1.1 Bakgrund

Injektering av sprickor i undermarksbyggande är en vanlig metod för att minska vatteninläckage till undermarksrum och förebygga en eventuell sänkning av grundvattennivå. Real Time Grouting Control (RTGC) metod är det senaste utvecklade konceptet för optimering av injekteringsprocessen och kontroll av jacking^[1-7]. Med denna metod kan man bestämma brukets spridning i bergsprickor i tid. Optimering av injekteringsprocessen betyder att man kan stoppa injekteringen när man har nått den önskade spridningen. På så sätt sparar man både material och tid samtidigt som man uppnår tätningskrav.

Enligt RTGC-metoden är spridning av bruket i tid ($I=f(t)$) en produkt av maximal spridning (I_{\max}) och relativ spridning ($I_d=f(t)$). Se Figur 1 och Figur 2. Maximal spridning är spridning som ett givet bruk kan nå vid ett givet injekteringstryck. Injekteringstrycket är en drivandekraft medan brukets skjuvhållfasthet och grundvattentryck ger motståndskrafter. När dessa krafter är i balans stannar bruket. Relativ spridning är en procentsats av den maximala spridningen. Den är oberoende av sprickvidden (b) vilket betyder att relativ spridning av bruket är lika i sprickor med olika sprickvidder.



1.2 Syfte

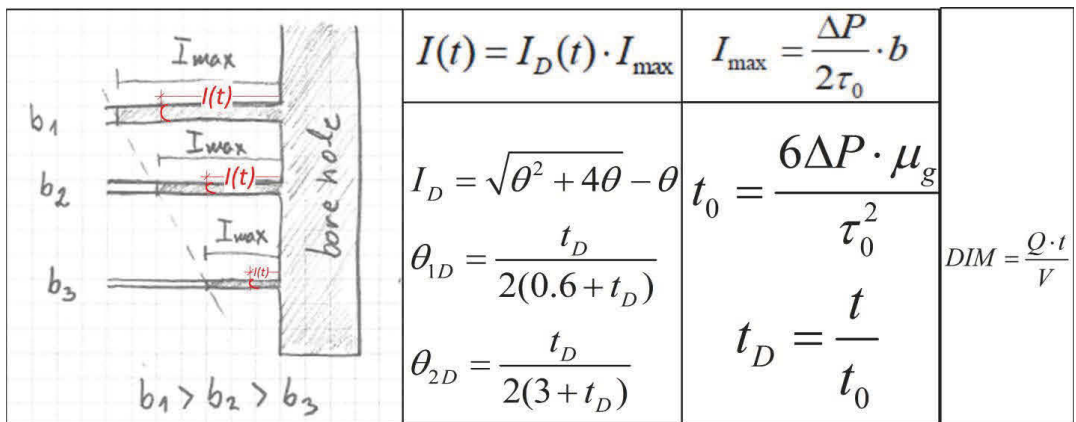
För beräkning av spridning av bruket i tid $I(t)$ enligt RTGC metoden måste man bestämma eller mäta:

- Sprickans/sprickors vidd b och antal
- Dimensionalitet av brukets flöde d v s mäta brukets flöde och volym i tid
- Reologiska egenskaper av bruket (skjuvhållfasthet och viskositet)
- Injekteringstryck

Bestämning av dessa parametrar är relaterad till en del osäkerheter. Syfte med detta projekt är att verifiera denna metod i fält. Idé är att hitta en lämplig spricka i en tunnel. Injektera denna spricka och mäta den verkliga spridningen samt beräkna spridningen enligt RTGC metoden. Jämförelse av den uppmätta och den beräknade spridningen kan ge indikation hur osäker är beräkning av brukets spridning enligt RTGC metoden.

1.3 Teoretisk exempel av spridning av bruket i tid enligt RTGCM

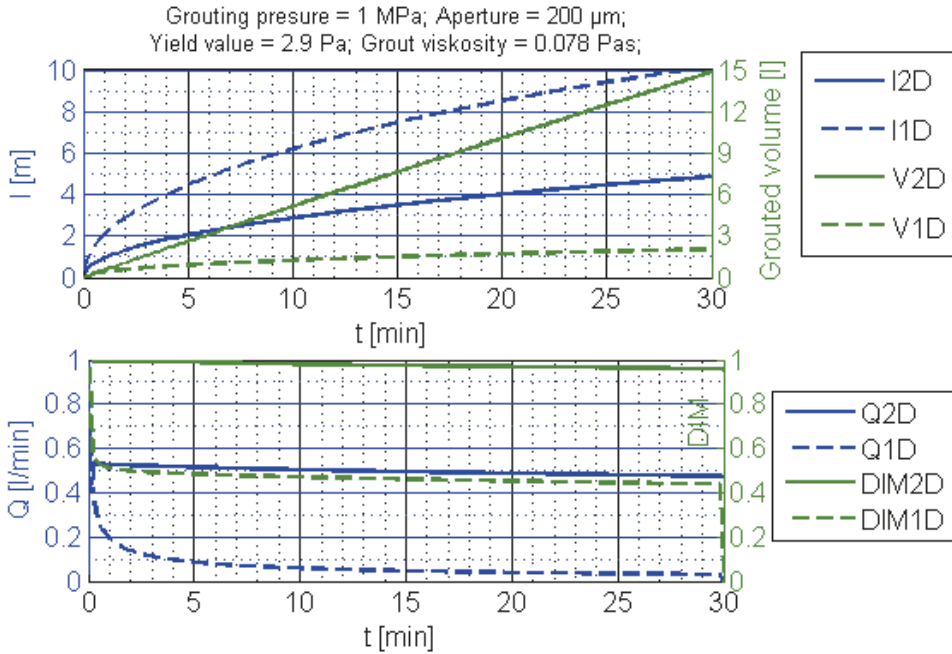
Enligt RTGC metoden är spridning av bruket in tid i en spricka $I(t)$ en produkt av maximal spridning, I_{\max} och relativ spridning, $I_D(t)$. Se ekvationer för beräkning av $I(t)$ i Figur 2. Figur 2 illustrerar också tre sprickor med olika sprickvidder som har injekterats till I_{\max} från ett borrhål. I_{\max} är längre i större sprickor medan den relativa spridningen I_D i tiden är lika i alla sprickor.



Figur 3 visar ett exempel på en teoretisk spridning av bruket, volym av injekterat bruk, flöde av bruket samt flödesdimensionalitet vid injektering av en 200- μm spricka vid 1D och 2D flöde. Injekteringstryck och egenskaper av bruket visas i figurtitel. Vid 1D-beräkningen antogs sprickbredden vara 1 m. Efter 30 min injektering vid 1D flöde, når bruket cirka 10 m spridning. För det behövdes 2 l bruk. Flödet efter 5 min faller till 0.1 l/min och sedan långsamt minskar till ca. 0.03 l/min efter 30 minuter injektering. Dimesinaliteten (DIM) i början är 0.5 och sedan långsamt minskar mot 0.45 vilket visar att det är ett 1D flöde.

Vid 2D flödet efter 30 min injektering når bruket en spridning av 5 m. Injekterad volym är 15 l. Flödet i början är något över 0.5 l/min och sakta minskar till 0.45 l/min under den 30 minuter

långa perioden. Dimensionalitet (DIM) i detta fall sakta minskar från 1 till 0.95 vilket visar att det är ett 2D flöde.

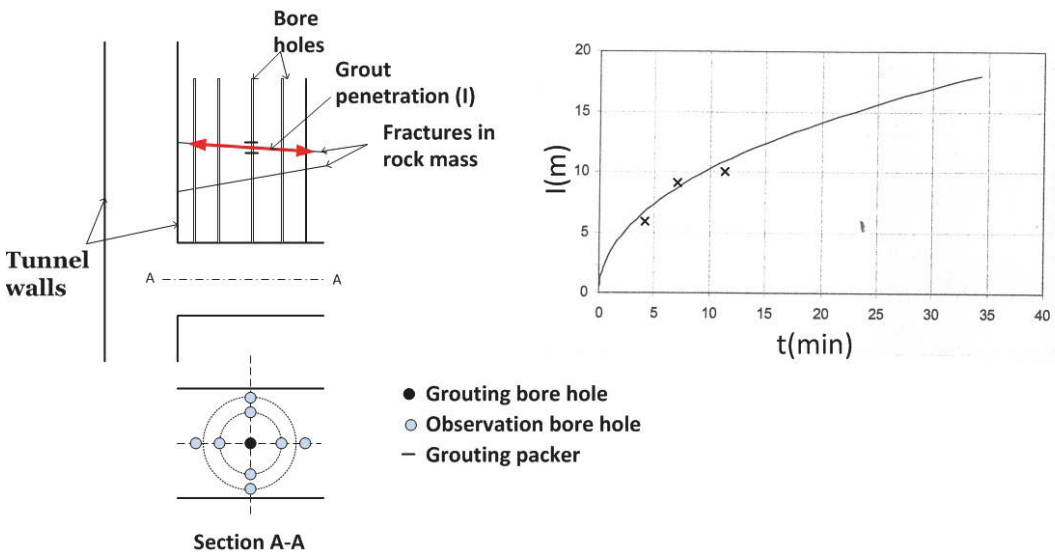


Figur 3: Ett exempel av teoretisk bruckspridning, bruksvolym, flöde och dimensionalitet för 1D och 2D flöde. Sprickbredden för 1D flöde är 1 m.

2. Beskrivning av försöksmetoden – verifiering av RTGCM i fält

Figur 4 illustrerar en försöksidé för verifiering av RTGCM i fält. Den visar en spricka i en tunnelvägg nära en tunnelkorsning. Från den andra tunnelförgreningen borrar man ett "injekteringsborrhål" för att träffa sprickan cirka 5 m från tunnelväggen. Man injekterar sprickan och följer/observerar spridningen av bruket genom sprickan från borrhålet till tunnelväggen. För att kunna observera brukets spridning från borrhålet till tunnelväggen borrar man ett antal "observationsborrhål" runt om "injekteringsborrhålet" på ett vist avstånd. Man placerar borrhålskameror i observationsborrhål vid korsningen med den observerade sprickan och mäter spridningstiden av bruket från injekteringsborrhålet till observationsborrhålet. Dessa uppmätta tider illustreras med "x" i grafen i Figur 4. Den sista "x" i grafen visar den uppmätta tiden när bruket har nått tunnelväggen. Kurvan i grafen i Figur 4 visar den beräknade spridningen. Överensstämmelse mellan kurvan och de uppmätta punkterna indikerar osäkerheten i RTGC metoden.

Noggrannheten av tidmätningen samt noggrannheten vid bestämningen av alla parametrar som behövs i beräkningen är också viktig för verifiering. Därför kommer dessa punkter också att diskuteras.

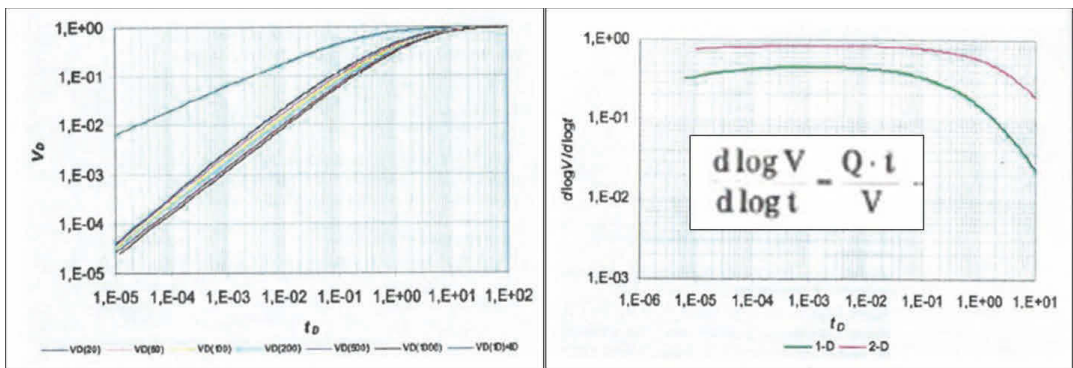


Figur 4: Illustration av försöket. Injektering av en bergspricka och mätning av brukets spridning i sprickan

3. Bestämning av parametrar som behövs för beräkning av brukets spridning enligt RTGCM samt deras påverkan på spridning

3.1 Utvärdering av flödesdimensionalitet (DIM) och noggrannhet av volymmätning

Dimensionalitet av brukets flöde måste bestämmas i början av en injektering för att man ska kunna beräkna spridning av bruket i tid. Det finns en väsentlig skillnad i spridningen när bruket från ett borrhål sprids radiellt (2D flöde) jämfört med en mera kanalliknade spridning (1D flöde). Figur 1 illustrerar ett flöde som är något närmare 2D. Skillnaden mellan de två karaktäristiska flöden kan visas matematiskt om man plottar relativt injekterad volym V_D mot relativ injekteringstid t_D och lutningen av dessa kurvor $d \log V / d \log t$ mot relativ tid, t_D . Se Figur 5. Lutningen av kurvor som representerar 2D flöde är mycket större än för 1D flöde. Lutningen för 2D flöde är nära 0.8 och för 1D flöde nära 0.45 under tiden som är relevanta i injekteringen.



Figur 5: Utvärdering av dimensionalitet. Från Gustafson och Stille (2005)^[4].

Enligt Gustafsson och Stille (2005)^[4] kan dimensionaliteten bestämmas enligt ekvationen

$$\frac{d \log V}{d \log t} = \frac{Q \cdot t}{V} = DIM, \text{ där } Q \text{ är det aktuella flöde, } t \text{ är den aktuella tiden och } V \text{ är den}$$

injekterade volymen av bruk vid denna tidpunkt. Förutsättningen är konstant tryck.

Vanligtvis variera dimensionalitet i fält under injekteringen. Anledningen kan vara att sprickgeometri ändras samt tryckvariation. Om DIM minskar från 0.8 mot 0.45 då ändras flödes karaktär från 2D till 1D vilket kan betyda att kontaktyta i sprickan ökar. DIM närmare 1 visar en relativt låg kontaktyta. Om tryck under injekteringen ändras då måste DIM-beräkningen korrigeras.

Vid konstant flödet blir dimensionalitet också konstant, $d \log V / d \log t$ lika med 1. Det betyder att injekteringen är i jämvikt av någon anledning. Bruket kan ha nått en friyta och allt flöde sker mot

den. Om flödet skulle öka plötsligt det kan betyda att vi öppnar sprickor (jacking) och då ökar dimensionalitet.

Hur noggrannheten av Q, t och V mätningen påverkar dimensionalitet (DIM) kan man studera med nedanstående ekvationer. Förutsättningen är att variablerna är oberoende.

$$DIM = \frac{Q \cdot t}{V};$$

 E = Medelvärde, σ^2 = Standard variation

$$E(DIM) = \frac{E(Q) \cdot E(t)}{E(V)};$$

$$\sigma^2(DIM) = \sum \left(\frac{\partial DIM}{\partial x} \right)^2 \cdot \sigma_x^2; x \rightarrow Q, t, V$$

 $\frac{\partial DIM}{\partial Q} = \frac{t}{V}; \frac{\partial DIM}{\partial t} = \frac{Q}{V}; \frac{\partial DIM}{\partial V} = -\frac{Q \cdot t}{V^2};$

$$\sigma^2(DIM) = \left(\frac{t}{V} \right)^2 \cdot \sigma_Q^2 + \left(\frac{Q}{V} \right)^2 \cdot \sigma_t^2 + \left(\frac{Q \cdot t}{V^2} \right)^2 \cdot \sigma_V^2$$

Standard variation av dimensionaliteten $\sigma^2(DIM)$ visar hur respektive variabel (Q, t och V) påverkar variation av dimensionalitet.

Mätningen av tiden är relativt noggrant då parameter σ_t^2 blir liten och då blir också andra termen $\left(\frac{Q}{V} \right)^2 \cdot \sigma_t^2$ liten.

Alla termer har volymen i nämnaren. För större volymer blir alla termer mindre. Speciellt liten blir tredje termen eftersom volymen i nämnaren är upphöjt i 4. Då vid större volymer blir variationen av DIM mindre. Vid låga volymer (mindre än 1) blir variationen större.

I början av mätningen, d v s injekteringen, är den injekterade volymen mindre och då blir variationen av dimensionaliteten i början också större. Med tiden, d v s med den ökade volymen, minskar variationen av dimensionaliteten vilket betyder att noggrannheten av mätningen av dessa parametrar minskar i betydelse med ökade volymen.

Den teoretiska beräkningen Figur 3 visar att det handlar om små flöden vid injektering av en spricka. Flödet vid 2D-flödet är kring 0.5 l/min och för 1D-flöde mindre än 0.1 l/min.

Figur 6 visar injekteringsrigg Unigrout med Logac flödesmätare som kan användas både till transmissivitetmätningar och injektering. Enligt Atlas Copco är noggrannheten av Logac flödesmätare:

- 1.3% vid flödet 8-30 l/min och
- 0.3% vid flödet 30-100 l/min

Vanligtvis används flödesmätningar för beräkning av injekterad bruksvolym också.

De förväntade flödena i de planerade försöken är mindre än 1 l/min och noggrannheten vid mätningen av dessa flöden blir ännu mindre. Därför i detta projekt har man tagit fram en behållare för en noggrannare mätning av injekterad volym av bruk eller vatten. Behållare är en plexiglas cylinder med inre diameter 242 mm. Se Figur 6. Vid 1 mm noggrann avläsning av vatten eller brukshöjden (Δh) blir noggrannheten av volymmätningen $\Delta V=0.046$ l vilket ger en stor noggrannhet. Baserad på volymmätning kan man kontrollera och kalibrera flödesmätare också.



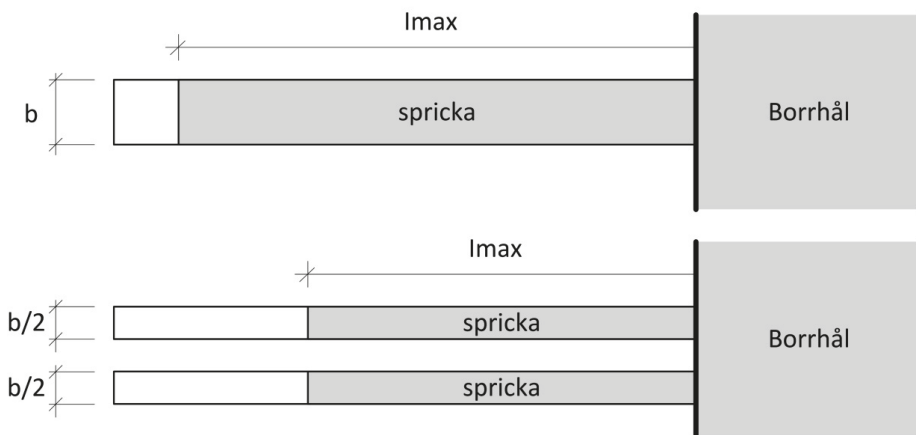
Figur 6: Unigrout, injekteringsrigg från Atlas Copco.

3.2 Sprickfördelningspåverkan på spridningen och bestämning av sprickfördelningen

Vid den ordinära injekteringen kan injekteringsborrhål vara upp till 24 m långa. Undersökningarna ^[9] har visat att borrhålet vanligtvis korsas med få större sprickor och ett större antal mindre sprickor. Den största delen av vattenflödet går genom de större sprickorna trots att de är mindre i antal p g a att flödet är proportionellt med sprickvidden i kubik. Det betyder att injektering av de större sprickorna är mest relevant.

I denna undersökning är det däremot viktigt att veta sprickfördelning mera noggrant. Om den maximala spridningen är I_{max} och den reella bruksspridningen I , blir det inte rätt om vi inte känner till sprickfördelningen. Spridningen blir mindre i två mindre sprickor än i en större spricka även om summa av sprickvidder är lika. Se för illustration Figur 7. Därför har man bestämt att injekteringssektion ska vara kort d v s 1m. Viket minskar antal sprickor som injekteras samtidigt och det ökar noggrannheten vid bestämningen av sprickors storlek och fördelning.

Samtidigt kommer man att undersöka injekteringsborrhål med kamera och undersöka borrkärnor för att med en ännu större säkerhet kunna bestämma antal sprickor i varje sektion.



Figur 7: Illustration av maximalspridning i en större spricka och två mindre sprickor.

3.3 Bestämning av sprickvidden b och dess påverkan på spridningen

Den fysiska sprickvidden varierar i sprickplanen. Den kan bestämmas från hydrauliska eller transmissivitetmätningar. Enligt Zimmerman och Budvarsson, (1996)^[10] relationen mellan den fysiska och hydrauliska vidden kan beskrivas med ekvationen:

$$b_{hyd}^3 = \mu^3 \left(1 - \frac{1.5\sigma^2}{\mu^2} \right) (1 - 2c)$$

där b_{hyd} är hydraulisk vidd, μ och σ är medelvärde och standardavvikelse av den fysiska sprickvidden och c är relativ kontaktyta.

Vidare kan man bestämma sprickvidd b genom mätningen av brukets flöde. Enligt Stille (2015)^[1]:

$$\sum b^3 = \frac{V_{total}}{\pi I_d^2 \left(\frac{\Delta P}{2\tau_0} \right)^2} \text{ för 2D flöde och}$$

$$\sum b^2 = \frac{V_{total}}{w I_d^2 \left(\frac{\Delta P}{2\tau_0} \right)} \text{ för 1D flöde.}$$

Vid denna analys mäter man total volym av injekterat bruk (V_{total}) i tid. Skjuvhållfasthet (τ_0) och viskositet (μ) av bruket samt injektering- och grundvattentryck måste också bli kända. Vidare måste man veta dimensionaliteten för brukets spridning.

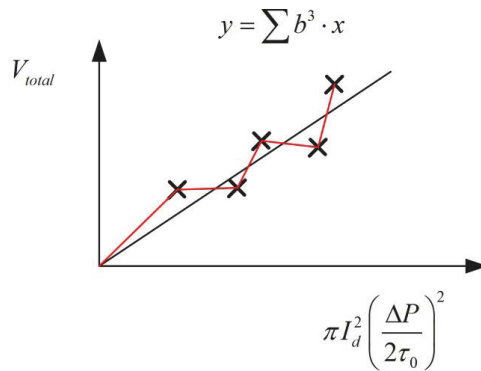
Ovanstående ekvation för 2D flöde kan skrivas i denna format. $V_{total} = \sum b^3 \pi I_d^2 \left(\frac{\Delta P}{2\tau_0} \right)^2$. Man

kan bestämma faktor $\pi I_d^2 \left(\frac{\Delta P}{2\tau_0} \right)^2$ för olika reella tider eftersom I_D är funktion av tid. Se I_D -

ekvation i Figur 2. För motsvarande injekteringstider brukar vi uppmäta V_{total} . Linjär regressionsanalys av dessa punkter genom origo ger en rätt linje och dess lutning ger $\sum b^3$.

Avvikelse från en rät linje är p g a noggrannheten av volymmätningen, antagandet av sprickgeometri som ideala plattor samt andra faktorer som används i ekvationen som tryck och reologi av bruket. Eftersom vi har dessa fel varierar $\sum b^3$ med spridningen.

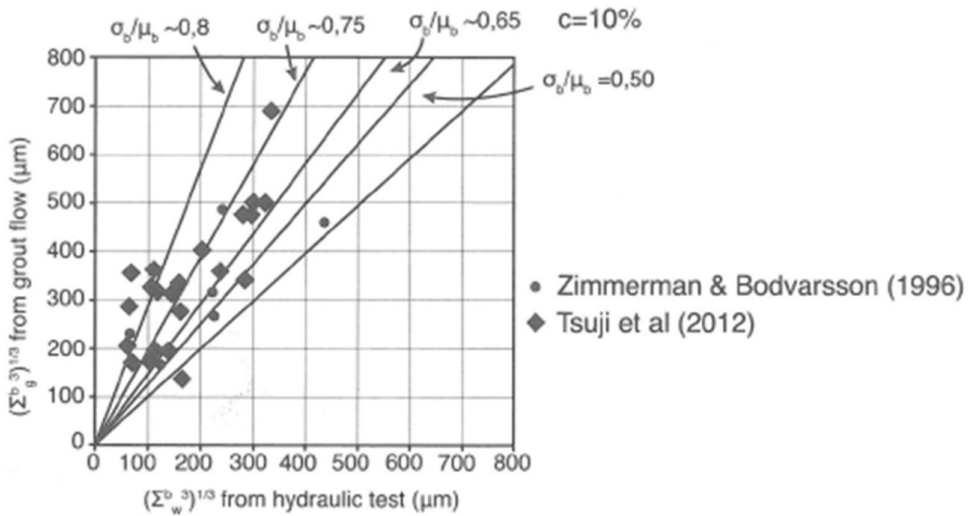
Vi kan inte påverka sprickans geometri men vi kan påverka noggrannheten av mätningar. Vid noga mätningar vet vi att variationen blir då till stor del ett resultat av variationen av sprickans geometri, d v s ändringen av flödes karaktär. Till slut ger regressionsanalysen $\sum b^3$ för just denna injektering. Motsvarande analys kan man göra för 1D flöde.



Figur 8: Utvärdering av b med regressionsanalys av det uppmätta injekterade volymen av bruk i tid

Flera undersökningar^[11-13] kring denna problematik har gjorts. Resultatet från en del av undersökningar har sammanställts och visas i Figur 9. Figuren visar att den fysiska sprickvidden är något större än den hydrauliska. I de flesta fall kan man anta att den fysiska sprickvidden är cirka 1.5 till 2 gånger större än b_{hyd} . För mindre sprickor är skillnaden mindre^[14,15]. Till exempel för en spricka med b_{hyd} av 50 μm blir medelvärde av den fysiska sprickvidden mellan 50 och 70 μm . På grund av att det finns ännu mindre förträngningar än medelvärde blir det väldigt svårt att injektera dessa sprickor. Ibland kan bruket passera en förträngning genom att flöda till vänster eller höger av förträngningen. Större sannolikhet för att det kan ske är i fall av 2D flöde. Förträngningar i en sprickplan i flödesriktningen kan vara en kombination av seriella och parallella system.

Man får inte glömma att parameter b_{hyd} är resultat av vattenflöde genom alla sprickor i den testade sektionen. Därför är det viktigt att undersöka antal sprickor per sektion. Om det finns flera sprickor, blir den fysiska viden av de individuella sprickorna ännu mindre.

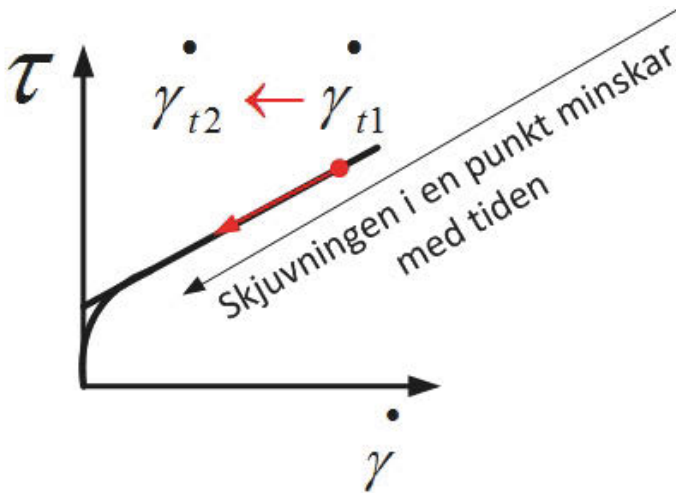


Figur 9: Jämförelse av sprickvidden bestämda med hydrauliska tester och fysiska mätningar. Från Stille (2015)^[1].

3.4 Bestämning av reologiska egenskaper av bruk och dess påverkan på spridningen

För beräkning av I_{\max} och I_d måste reologiska egenskaper av bruk bestämmas. Under injekteringen tränger bruket genom sprickor i början med en högre hastighet och sedan minskar hastigheten med spridningen p g a den ackumulerade friktionen. Bruket skjivas mot tunnelväggen och inom bruket mellan olika skikt. Bruket skjivas inte inom kärnan för att skjuvhållfastheten av bruket (τ_0) är större än rådande skjuvkrafter i kärnan. Skjuvningshastighet i bruket är olika. Den är högst i kontakten med sprickan och minskar mot kärnan. Också med spridningen minskar skjuvningshastighet och den minskar i varje punkt. Till slut blir skjuvningshastighet överallt 0 när bruket når I_{\max} d v s när drivkrafter är lika med motkrafter. I normala fall vid injekteringen finns inte lägen när bruket står stilla och den ska fås i rörelse igen.

Man har märkt att den uppmätta viskositeten och skjuvhållfastheten med reometer blir olika om man mäter med stigande eller fallande skjuvhastigheter. Viktigt att notera att skjuvningshastigheten i varje punkt i bruket startar från högre värde och minskar med tiden. Det pekar på att reologimätningar med reometer borde utföras på samma sätt d v s starta med högre skjuvhastigheter. Se illustration i Figur 10.

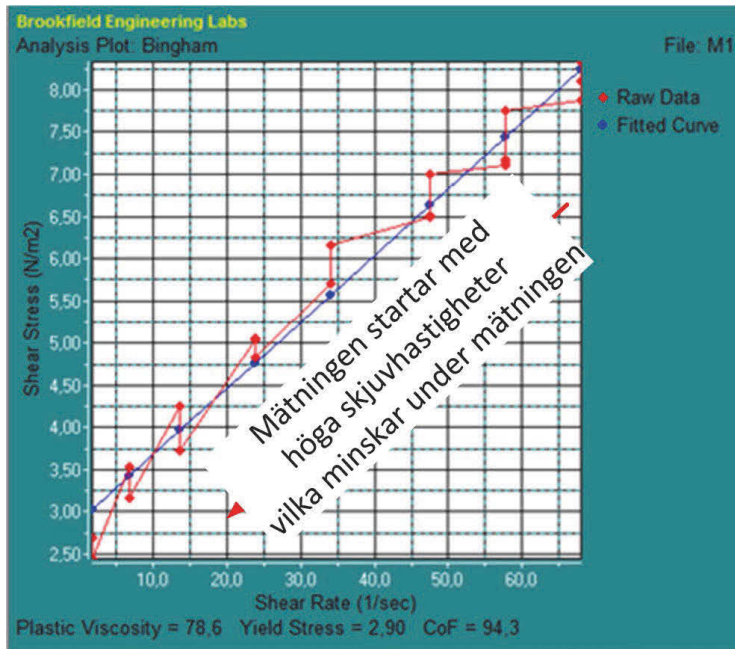


Figur 10: Skjuvning av bruk under spridning genom en spricka. Bruket skjuvas i alla punkter i bruket utom i kärnan. Bruket skjuvas olika i z-riktningen och i tiden. I z-riktningen minskar skjuvningen från sprickvägen mot kärnan. I tiden minskar skjuvningen i alla punkter i bruket. Bruket antas ha egenskaper som en Binghamvätska.

Figur 11 visar ett resultat från en reologimätning av bruk med reometer. Man startar vid högre hastigheter och sedan minskar den för att likna situationen i fält som har diskuterats ovan. Det utvärderade skjuvhållfasthet (τ_0) med regressionsanalys i denna mätning är 2.9 Pa vilket är 0.4 Pa högre än den uppmätta skjuvhållfastheten vid skjuvningshastighet 1.7 1/s. Det betyder att skillnaden kan vara ca. 1 Pa mellan det utvärderade och ”uppmätta” värdet. En jämförelse av spridningen mellan dessa två bruk enligt RTGCM ger en skillnad i spridningen av 0.07 m eller 1.4 % efter 30 min spridning för 2D exempel presenterad Figur 3. Se Tabell 1. Det visar att skjuvhållfastheten inte har så stor påverkan på spridningen inom 5 till 10 m önskad spridning.

Tabell 1: Spridningsskillnad efter 30 min mellan två bruk med olika skjuvhållfasthet.

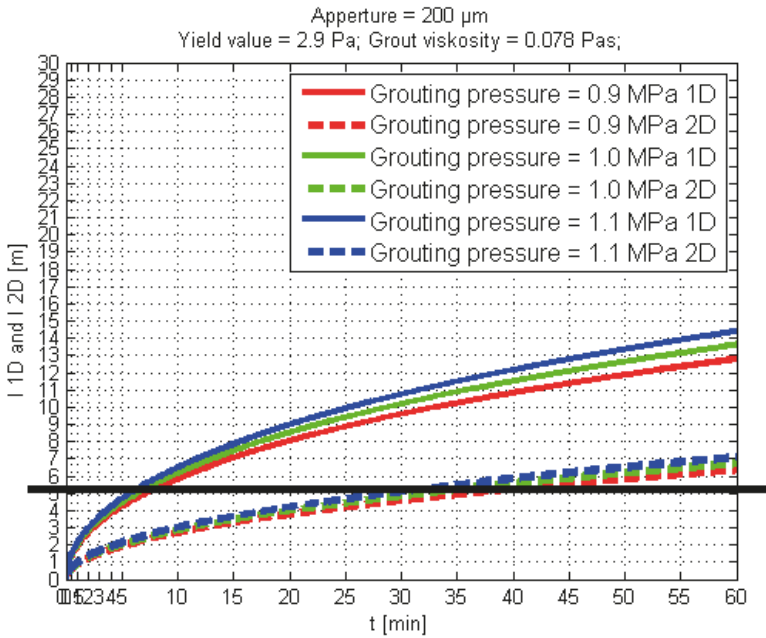
	$\tau_0 = 2.9 \text{ Pa}$	$\tau_0 = 1.9 \text{ Pa}$	skillnad.
I max [m]	34.5	52.6	-
I 30min [m]	4.86	4.93	0.07 m eller 1.4 %



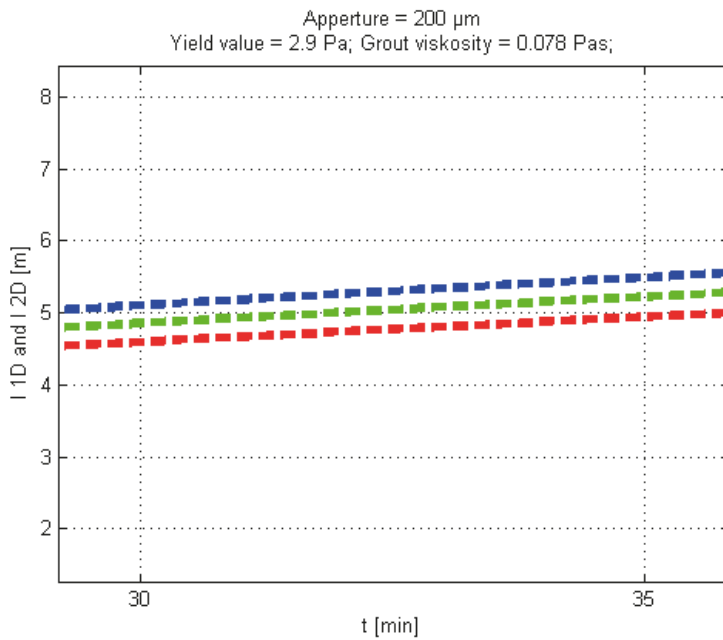
Figur 11: Mätning av reologiska egenskaper med reometer av bruk 1 i Tabell 3.

3.5 Bestämning av injekteringstryck och dess påverkan på spridningen

Det är viktigt att bestämma trycket för försök baserad på sprickans vidd och reologiska egenskaper av bruket så att önskad spridningen av ca 5 meter sker inom en rimlig tid. Figur 12 visar bruksspridning i tid i en 200 μm spricka vid en 10%-ändring av injekteringstryck för 1D och 2D flöde. Figur 13 visar en förstoring av Figur 12 vid tid 35 minuter. Man kan se att en 10% noggrann mätning av tryck påverkar spridningen med cirka 0.25 m eller 5% i detta fall för 2D flöde. Det tyder att spridningen är något mera känslig för tryckmätning än mätning av skjuvhållfastheten. Figur 12 visar också att det är en stor skillnad mellan 1D och 2D spridningen. Dimensionaliteten av spridningen under försöket kan vara någonting emellan vilket måste tas i analys.



Figur 12: Bruksspridning i tid för 10% ändring av injekteringstryck i en 200 μm spricka



Figur 13: Förstoring av Figur 12 för tid mellan 30 och 35 min.

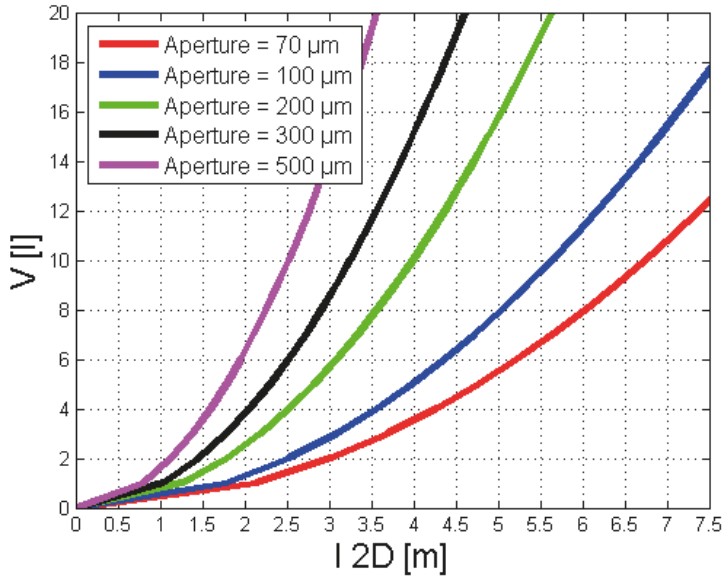
4. Förberedelse inför fältmätningar

4.1 Förväntade bruksvolym och injekteringstider för bruksspridning av 5 m

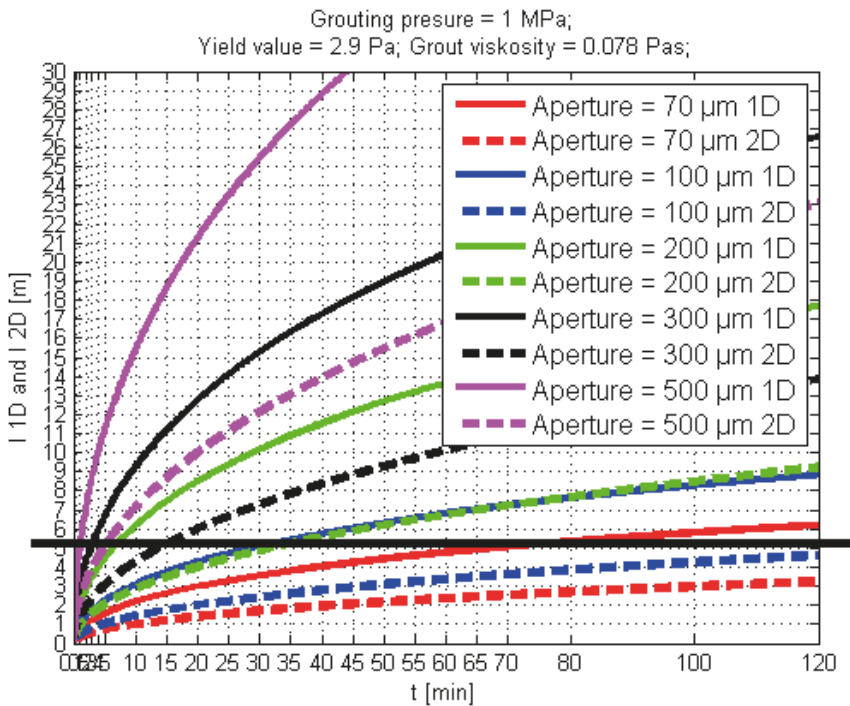
Det är viktigt att känna till de förväntade bruksvolymerna och injekteringstiderna relaterad till en given inträngningslängd vid injektering av olika sprickor. Tabell 2 visar vilka volymer av bruk som behövs för att injektera dessa sprickor samt injekteringstiden vi kan förvänta oss. Data i tabellen är hämtade från beräkningar som visas i Figur 14 och Figur 15. Det handlar om små bruksvolymerna, så noggrannheten för mätning av dessa små volymer är viktig. Det kan också bli problematiskt med injekteringstiden om vi ska injektera en 70- μm spricka. Det kan ta upp till 6 timmar att nå en spridning av 5 m i denna spricka för givet bruk och tryck vid 2D flöde. I sådana fall ska man använda ett högre tryck eller/och ett mindre visköst bruk. Problemet kan också uppstå för att bruket skulle ändra reologiska egenskaper under så lång tid. Det handlar inte bara om bruket i omröraren utan också om det som har injekterats. Bruket som redan har injekterats kan bli svårare att trycka fram efter 2 eller 3 timmar. Detta skulle minska spridningen och därför är det att föredra försök med max 1 timme injektering.

Tabell 2: Förväntade bruksvolym och injekteringstid för bruksspridning av 5 m i 70, 100 och 200 μm spricka för radial spridning (2D). Data från beräkningar som visas i Figur 14 och Figur 15.

	70 μm spricka	100 μm spricka	200 μm spricka
Volym av bruk (l)	4.5	8	16
Tid (min)	Ca. 6 timmar	Ca.150	35



Figur 14: Bruksvolym som funktion av brukets spridning för radial (2D) flöde och olika sprickvidder.
 $V = l^2 \pi b$



Figur 15: Spridning av bruk i tid enligt RTGCM för 1D och 2D flöde.

Tabell 3: Reologiska och inträngningsegenskaper av tre olika bruk.

Bråk	cement	Vct-tal	Tillsatsmedel		τ_0 [Pa]	μ [Pas]	Bcrit [μm]	bmin
1	INJ30	0.8	i-Flow1 (0.2%)	iAcc-1 (4.0%)	2.90	0.78	50-70	
2	INJ30	0.8	i-Flow1 (0.3%)	iAcc-1 (4.0%)	1.11	0.22	50-70	
3	INJ30	1.0	SetControll II (2.2%)	-	2.07	0.28	50-70	

4.4 Förväntade vattenflöden och vattenvolymer för olika sprickvidder i 1 m lång testsektion

Tabell 4 visar beräknad konduktivitet, transmissivitet, hydraulisk sprickvidd för olika antagna flöden vid 1MPa tryck i 1 m lång sektion. Man kan se att flöden mindre än 1 l/min ger hydrauliska sprickor mindre än 54 μm vilka är svåra att injektera. Flödet av 2 l/min ger en hydrauliskvidd av 68 μm vilket ger ett medelvärde av den fysiska sprickan av 100 μm . Det är också på gränsen att kunna injektera med cement-baserat bruk utan filtrering. Vi bör ha flöden större än 2 l/min och ett vattenmagasin minst 60 l för att klara en halvtimme mätning utan störningar.

Tabell 4: Beräknad konduktivitet, transmissivitet, hydrauliskvidd av sprickor för olika antagna flöden vid 1MPa tryck och 1 m lång sektion. Borrhål diameter = 64 mm. Vattnets viskositet $\mu = 1.3$ mPas. Densitet av vatten = 1000 kg/m^3 .

Flow [l/min]	0,1	0,5	1	2	5	10	20	100	200
Lugeon [Lu]	0,1	0,5	1	2	5	10	20	100	200
Conductivity k [m/s]	1,E-08	5,E-08	1,E-07	2,E-07	5,E-07	1,E-06	2,E-06	1,E-05	2,E-05
Transmissivity T [m ² /s]	1,E-08	5,E-08	1,E-07	2,E-07	5,E-07	1,E-06	2,E-06	1,E-05	2,E-05
h. apertur b [μm]	25	43	54	68	92	116	146	249	314
Flow [l/30 min]	3	15	30	60	150	300	600	3000	6000

4.5 Övriga risker förknippade med försöket

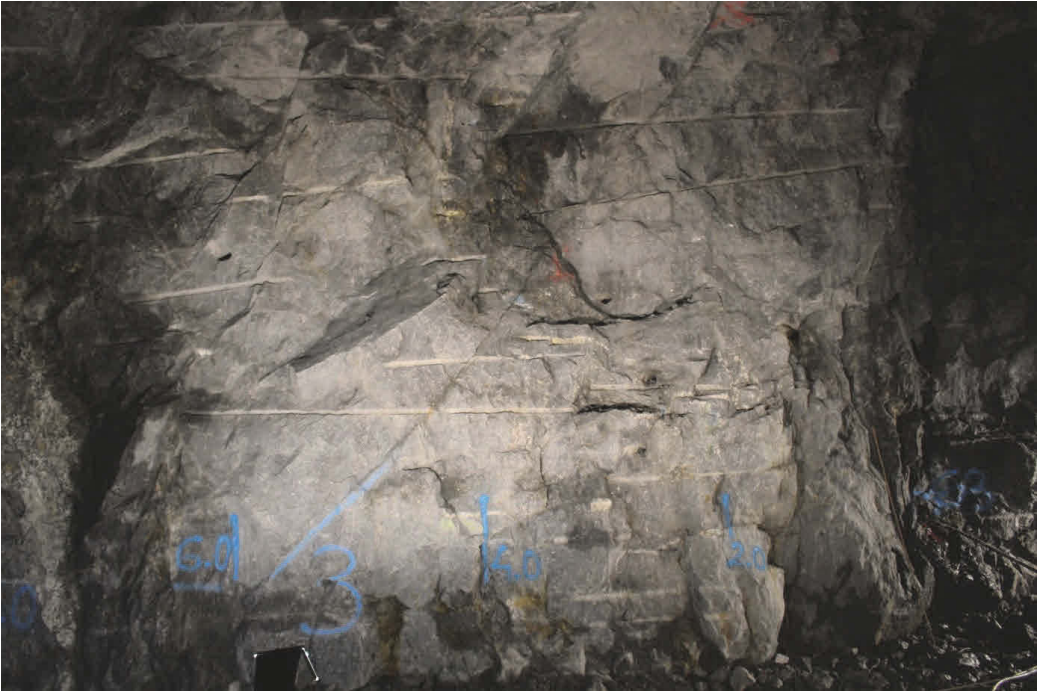
Vid borringen av observationsborrhåll finns det risk att träffa kontaktyta istället för sprickan. Risken också finns att det blir svårt att observera bruksinflödet till observationsborrhål. Bruket kan vara urvattnat. En möjlig lösning kan vara färgning av bruket.

5. Val av lämpliga sprickor för fältförsök och transmissivitetmätningar

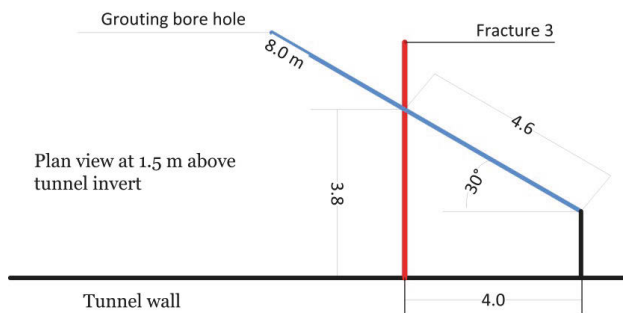
5.1 Val av sprickor för fältförsök i Nacka-gruva och resultat från transmissivitetmätningar

Man har gjort en rekognosering i Nacka-gruvan för att hitta sprickor lämpliga för försök. Sprickor nära tunnelkorsningar är att föredra på en lättare borrhåll av injekterings- och observationsborrhål. Ett klart problem vid sökandet och urvalet av sprickor i Nacka-gruvan var förknippad med ett väldigt stort antal gamla borrhål i gruvan från tester av Atlas Copcos borrhåll. Närvaro av dessa borrhål i försökzonen skulle påverka både transmissivitetstester och injekteringsförsök och därför minskade urvalet av möjliga sprickor betydligt. Till slut hittades fem plaster med sprickor som tycktes vara lämpliga för fältförsök. De heter G0, G1, G2, G3 och G4. Bilden i Figur 17 visar spricka 3 på plats G3 och Figur 18 visar borrhållsskiss som illustrerar hur borrhålet borde korsa sprickan. Borrhålet borde träffa sprickan på avståndet 4.6 m från borrhållmynningen och cirka 3.8 m från tunnelväggen.

Bilder och borrhållsskisser av andra sprickor visas i bilaga 1. Dessa fem platser med en eller flera sprickor per plats ligger på ungefär 40 m djup. Det ger en vertikal spänning på ca 1.08 MPa. Horisontella spänningar i Stockholmsområdet kan uppgå till 3 gånger vertikala spänningar. Därför är det ingen risk för jacking vid transmissivitetmätningar med 1MPa tryck. Berg kring tunnelkontur dräneras genom sprickor och grundvattentryck i sprickor anses noll eller lågt närmast tunnelkonturen.



Figur 17: Spricka 3 på plats G3 i Nacka-gruvan. Till höger syns injekteringsrör som sticker ut från borrhålet under transmissivitetmätningar.



Figur 18: Skiss av borrning plan för transmissivitetmätningar av borrhål G3 som skulle korsa spricka 3.

Innan man skulle borra observationsborrhål genomförs först transmissivitetmätningar på sprickor för att se om de är konduktiva d v s leder vatten från borrhålet till tunnelväggen samt för att mäta deras hydrauliska vidd (b_{hyd}). Borrhålen undersöktes också med borrhålkamera för att bestämma exakt position av sprickor samt deras antal.

Tabell 5 visar resultat från transmissivitetmätningar från de fem valda borrhålen. Transmissivitetmätningarna har genomförts med Unigrout som visas i Figur 6. Vattenflödet har mätts med Logac flödesmätare och volymen av injekterat vatten har mätts också med plexiglas-cylindrar. Injekterat vattenvolym uppmät med Logac var cirka 3 l under en period av

cirka 25 min i nästan alla borrhålektioner. Det ger ett flöde på 0.12 l/min. Det är ett väldigt lågt flödesområde för mätningar med Logac. Uppmätta vattenvolymer med plexiglas cylinder var mycket lägre. De ger ett mycket mindre medelflöde och detta flöde visas i sista kolumnen i tabellen. Kontrollmätningen med cylindern visade att Logac inte kan mäta flödet i de låga områdena.

Flödet av 0.1 l/min ger en hydraulisk vidd av 25 μm . Se Tabell 4. Det ger ett medelvärde av fysiska sprickvidden runt 25 till 30 μm , se Figur 9. Sprickförträngningar i dessa sprickor blir ännu mindre och det blir väldigt svårt att injektera sådana små sprickor.

Vid transmissivitetmätningarna av borrhål G3 sektion 3 fick vi ett medelflöde runt 0.337 l/min. Vid mätningen av detta flöde observerades ett vattenläckage från borrhålet, dvs läckage mellan packers och borrhålväggen. Närmare undersökning av denna sektion med borrhålkamera visade inga synliga sprickor så i princip kan hela flödet bli läckage. Inflödet från borrhålet observerades också vid mätningar av sektioner 4, 5 och 6 av borrhål G2. Det kan vara p g a läckaget bredvid packers men också p g a spricksystemet nära borrhålet som går parallellt med borrhålet.

Bild i Figur 19 visar borrhålet G3 2.5 m från borrhålmynningen (sektion 4). Man kan observera minst två klara sprickor som korsar borrhålet. Borrhål är borrade med hammar-borrning och väggarna är grova men ändå kan sprickor observeras med borrhålkamera. Trots dessa sprickor var det uppmätta vattenflödet i denna sektion bara 0.084 l/min vilket ger väldigt små hydrauliska viddar.

Man kan också observera vatten på botten av borrhålet från borrhålspolningen eller grundvatten. Även om man börjar borrhållningen med en liten lutning uppåt avviker borrhålet med längden nedåt p g a vikten av borrhållningen. Efter 5 m är borrhålet helt under vatten men vattnet är klart och man kan ändå observera sprickor med borrhålkamera.

Sammanfattningsvis visade transmissivitetmätningar av 36 sektioner i Nacka-gruvan att sprickor inte är så konduktiva som man trodde trots att sprickorna kunde observeras både på tunnelväggen och i borrhål.

Tabell 5: Transmissivitetstester av fem borrhål i Nacka-gruvan. Q är beräknad baserad på uppmätt volym i cylinder.

Transmissivity tests of bore hole Go in Nacka main										
Borehole secti	Time	Time	H water	H water	Δh	Vol	Vol	Δt	Q	
[m]	strat logg	stopp log	start [cm]	stopp [cm]	[cm]	cylind. [l]	logac [l]	[min]	[l/min]	[l/min]
1	13.2-12.2	10:01:49	10:31:00	104	100,7	3,3	1,518	9,8	29,18	0,052
2	12.2-11.2	10:44:36	11:17:15	98,6	97	1,6	0,736	5,7	32,65	0,023
3	11.2-10.2	12:43:04	13:10:15	123	122,3	0,7	0,322	4	27,11	0,012
4	10.2-9.2	13:27:00	13:49:43	120,8	119,7	1,1	0,506	3,7	22,70	0,022
5	9.2-8.2	14:02:30	14:29:00	115,8	114,8	1	0,46	3,6	26,50	0,017
6	8.2-7.2	14:48:00	15:16:00	135,1	134,6	0,5	0,23	4,6	28,00	0,008
7	7.2-6.2	09:29:00	09:58:00	105,1	104,8	0,3	0,138	3,8	29,00	0,005
8	6.2-5.2	10:09:00	10:29:00	100,7	99,5	1,2	0,552	2,9	20,00	0,028
9	5.2-4.2	10:45:00	11:04:00	90,2	89,3	0,9	0,414	2,8	19,00	0,022
10	4.2-3.2	11:13:00	11:29:30	86,3	85,1	1,2	0,552	2,3	16,50	0,033

11	3.2-2.2	11:37:00	11:52:00	81,1	80,5	0,6	0,276	1,9	15,00	0,018
----	---------	----------	----------	------	------	-----	-------	-----	-------	-------

Transmissivity tests of bore hole G1 in Nacka main

Borehole secti	Time	Time	H water	H water	Δh	Vol	Vol	Δt	Q	
[m]	strat logg	stopp log	start [cm]	stopp [cm]	[cm]	cylin. [l]	logac [l]	[min]	[l/min]	
1	14.36-13.36	14:39:00	15:05:00	144,3	143,0	1,3	0,598	3,6	26,0	0,023
2	13.56-12.36	15:21:00	15:45:00	131,7	130,9	0,8	0,368	3,1	24,0	0,015
3	12.36-11.36	08:58:00	09:21:00	96,8	95,5	1,3	0,598	3,4	23,0	0,026
4	11.36-10.36	09:39:00	10:03:00	93,4	92,4	1,0	0,46	3,6	24,0	0,019
5	10.36-9.36	10:16:00	10:39:00	130,5	127,2	3,3	1,518	5,0	23,0	0,066
6	9.36-8.36	11:01:00	11:24:00	131,7	130,9	0,8	0,368	3,4	23,0	0,016
7	8.36-7.36	12:43:00	13:05:00	113,7	113,5	0,2	0,092	2,9	22,0	0,004
8	7.36-6.36	13:16:00	13:38:00	106,8	106,1	0,7	0,322	3,2	22,0	0,015
9	6.36-5.36	13:47:00	14:14:00	100,5	99,2	1,3	0,598	3,6	27,0	0,022

Transmissivity tests of bore hole G2 in Nacka main

Borehole secti	Time	Time	H water	H water	Δh	Vol	Vol	Δt	Q	
[m]	strat logg	stopp log	start [cm]	stopp [cm]	[cm]	cylin. [l]	logac [l]	[min]	[l/min]	
1	10.56-9.56	10:36:00	11:05:00	97,6	97	0,6	0,276	3,6	29,00	0,010
2	9.56-8.56	12:31:00	12:47:00	127	126,3	0,7	0,322	3,4	16,00	0,020
3	8.56-7.56	13:10:00	13:35:00	127,5	126,4	1,1	0,506	3,2	25,00	0,020
4*	7.56-6.56	13:48:00	14:18:00	110	98	12	5,52	8,8	30,00	0,184
5*	6.56-5.56	14:41:00	15:09:00	120,2	109,8	10,4	4,784	7,9	28,00	0,171
6*	5.56-4.56	15:32:00	16:04:00	127,3	120	7,3	3,358	7,2	32,00	0,105
7	4.56-3.56	09:06:00	09:33:00	101,8	100,7	1,1	0,506	3,9	27,00	0,019

*= water leakage from bh. Observed water dropps at one place under the inlet of the bore hole

Transmissivity tests of bore hole G3 in Nacka main

Borehole secti	Time	Time	H water	H water	Δh	Vol	Vol	Δt	Q	
[m]	strat logg	stopp log	start [cm]	stopp [cm]	[cm]	cylin. [l]	logac [l]	[min]	[l/min]	
1	6.36-5.36	14:45:00	15:06:00	127,8	127,0	0,8	0,368	2,6	21,00	0,142
2	5.36-4.36	15:32:00	15:50:00	116,1	115,3	0,8	0,368	2,3	18,00	0,160
3*	4.36-3.36	09:05:44	09:38:55	133,4	129,3	4,1	1,886	5,6	33,18	0,337
4	3.36-2.36	09:40:00	09:50:00	129,3	129,1	0,2	0,092	1,1	10,00	0,084

* 9.26 observed leakage from bore hole G3 (h=129.3)

Transmissivity tests of bore hole G4 in Nacka main

Borehole secti	Time	Time	H water	H water	Δh	Vol	Vol	Δt	Q	
[m]	strat logg	stopp log	start [cm]	stopp [cm]	[cm]	cylin. [l]	logac [l]	[min]	[l/min]	
1	7.61-6.61	09:52:30	10:09:00	119	117,3	1,7	0,782	2,4	16,50	0,047
2	6.61-5.61	10:24:00	10:45:00	113,7	112,5	1,2	0,552	2,6	21,00	0,026
3	5.61-4.61	12:15:00	12:42:00	110,3	108,6	1,7	0,782	3,3	27,00	0,029
4	4.61-3.61	12:55:00	13:22:00	107,8	106,5	1,3	0,598	3,2	27,00	0,022
5	3.61-2.61	13:35:00	14:01:00	105,6	104,2	1,4	0,644	3,2	26,00	0,025



Figur 19. Observerade sprickor i BH G3 2.5 m från borrhålmyningen. Vatten på botten i borrhålet.

5.2 Val av sprickor för fältförsök i Äspölaboratoriet och resultat från transmissivitetmätningar

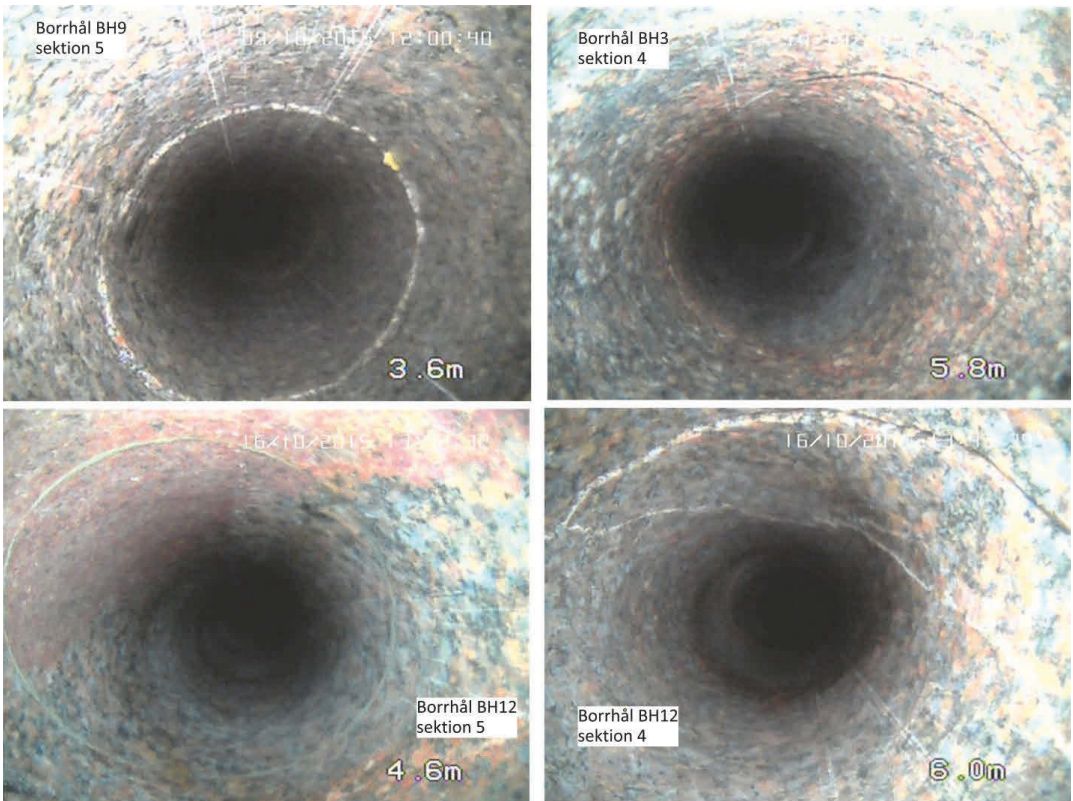
5.2.1. Val av platser för fältförsök

Fem platser med möjligt lämpliga sprickor har valts i tunnel på Äspölaboratoriet för fältförsök. Sprickorna är valda på platser som var inte injekterade förut. Alla valda sprickor prolongerar också genom hela tunneltaket vilket betyder att de är långa och därför finns det en stor möjlighet att de också prolongerar åtminstone 5 m in berget från tunnelväggen.

Fem borrhål, en per plats, är borrade med målet att träffa dessa sprickor och undersöka om de är konduktiva och lämpliga för injekteringsförsök. Borrhålen är placerade på så sätt för att träffa sprickor cirka 5 m in i berget från tunnelväggen. 3D modeller är skapade för att öka noggrannheten i positionsbestämningen av sprickor och borrhål samt deras korsning. Bilagor 2.1-2.5 visar bilder på dessa fem platser, borrhålor, bilder från borrhålkamera på sprickor, resultat från transmissivitetmätningar av varje sektion samt 3D borrhålsmodeller av varje plats.

I Äspölaboratoriet är borrhålen borrade med kärnbörning. Kärnbörningen ger en finare borrhålvägg som är lättare att undersöka med borrhålkamera. Till exempel bilder från BH9, BH3 och BH12 i Figur 20 där sprickorna syns väldigt tydligt. Man kan också se om sprickor är fyllda med material. Det syns tydligt att sprickan i BH12 sektion 5 är fylld med material.

I borrhålor förekommer ett antal sprickor som inte är riktiga sprickor utan borrhålor har spruckit under borrhålsprocessen. Men i kombination med bilder från borrhålkamera kan alla dessa sprickor identifieras ganska noga. Kombination av borrhålsbilder och borrhålor förbättrar sprickundersökningen markant jämfört med tester i Nacka-gruvan. Både antal och position av sprickor blir mycket noggrannare bestämt. Borrhålskameran överskattar något distansen. Ungefär 1 m på 10 m. Därför positioner som visas i bilder från borrhålkamera är något kortare.

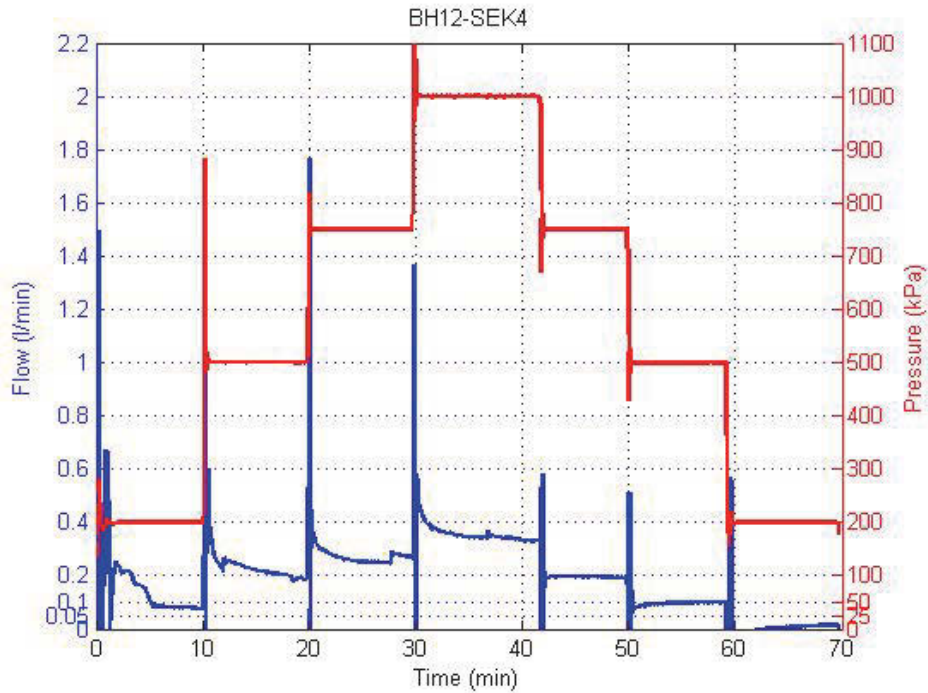


Figur 20: Bilder från borrhålkamera från Borrhål BH9 sektion 5 och BH3 sektion 4 och BH12 sektion 4 och 5.

5.2.2 Genomföring av transmissivitetmätningar

Transmissivitetmätningar av borrhål är gjorda i 1 m långa sektioner. Mätningen börjar med att packers placeras längst in i borrhålet vilket motsvarar sektion 1. Trycket i packers sätts till 2 MPa. Transmissivitetmätningarna av andra sektioner fortsätter successivt genom att packers dras 1 meter för mätning av nästa sektion. Transmissivitetmätningarna är gjorda stegvis med olika tryck (200, 500, 750, 1000, 750, 500 och 200 kPa). Varje steg är ca 10 min lång. Transmissivitetmätningen av en sektion är cirka 70 min lång. Se till exempel resultatet från transmissivitetmätningen av BH12 sektion 4 presenterad i Figur 21.

Transmissivitetmätningarna har genomförts med SKBs High water injection controller (HWIC) som syns i Figur 22. Man kontrollerar tryck och mäter vattenflödet. Utrustningen har två separata flödesmätare. En för lågt flöde och en för högt flöde. Enligt tillverkaren är mätningens område mellan 2 ml/min och 90 l/min.



Figur 21: Resultat från transmissivitetmätningar av BH12 sektion 4.



Figur 22: Transmissivitetmätningar av borrhål BH58 med SKBs High water injection controller (HWIC). Sprickor 5 och 8 som visas i den vänstra bilden finns i tunnelväggen nära de orange konerna.

5.2.3 Resultat från transmissivitetmätningar

Resultat från transmissivitetmätningar genomförda i Äspölaboratoriet visas i Tabell 6. Tabellen visar uppmätta flöden vid 1 MPa tryck. Tabellen visar också positioner och djup av borrhålen i tunneln, längd, total antal sprickor in borrhålen samt antal sprickor per sektion.

Som man kan se från tabellen gav de flesta mätningar inget flöde alls även när man kunde observera sprickor i borrhålkärnan eller i borrhålet med kameran. I två sektioner uppmättes något flöde av betydelse. Det var BH12 sektion 4 och BH9 sektion 5.

Figur 23 visar en bild från transmissivitetmätningarna av BH12. Spricka 12 syns till höger i bilden och injekterings slang och rör placerade i borrhålet syns till vänster. Det förväntades ett vattenflöde från borrhålet till tunnelväggen genom spricka 12. Men man kunde inte observera något flöde från spricka 12 utan observerades ett flöde cirka en meter ovanför borrhålmyningen. Det förekom vattendroppning där innan mätningen, men vattendroppningen intensifierades under mätningen av denna sektion. Bilder av borrhålkärnan med sprickor av denna sektion samt bild från borrhålkamera på dessa sprickor visas också i Figur 23. Det uppmätta flödet motsvarar b_{hyd} kring $37 \mu m$ vilket ger ett medelvärde av den fysiska spricköppningen mellan 40 och $50 \mu m$. Förträngningarna i spricka blir ännu mindre. Det bedömdes att denna sektion inte är lämplig för injekteringsförsök på svårdefinierade flödesvägar, borring av observationsborrhål samt transmissivitetsförsöket tyder på en mycket liten spricka.

Figur 24 visar transmissivitetmätningar av BH9, borrhålkärna av sektion 5 och en bild från borrhålkamera från sektion 5. Man har observerat vatteninflöde till borrhålet i denna sektion på 3.6 m avstånd. Transmissivitetmätningarna av denna sektion gav ett flöde på 0.8 l/min vid tryck av 1 MPa. Detta flöde ger en b_{hyd} på ca $50 \mu m$ vilket ger ett medelvärde av den fysiska sprickvidden på cirka 50 till $60 \mu m$. Det ligger precis på gränsen som man kan injektera med cementbruk. Sprickor kunde observeras i borrhålkärna och i borrhålet med borrhålkameran (Figur 24) men man kunde inte observera var någonstans vattnet tar vägen. Inget vattenflöde kunde observeras från spricka på tunnelväggen eller någonstans. Man vet inte hur man skulle kunna följa bruksspridning. Så detta borrhål var inte heller lämpligt för försök.

De resterande 29 sektioner visade väldigt liten eller ingen alls flöde trots att man kunde observera sprickor i borrhålkärnan, i borrhål med borrhålkamera och i tunnelväggen. Bilder från alla borrhålkärnor och borrhålkamera samt resultat av transmissivitetmätningarna av varje sektion visas i de bifogade bilagorna.

Tabell 6: Transmissivitetstester av fem borrhål i Äspölaboratoriet

Bore hole	Position/ deep [m/m]	Length[m] Total nr. fractures ()	Flow [l/min], Nr. fracture per section ()						
			Section 1 [m-m]	Section 2 [m-m]	Section 3 [m-m]	Section 4 [m-m]	Section 5 [m-m]	Section 6 [m-m]	Section 7 [m-m]
BH12	249/65	9.68 (24)	8.50-7.50	7.50-6.50	6.50-5.50	5.50-4.50	4.50-3.50	3.50-2.50	2.50-1.50
			≈0 (4)	≈0 (3)	0.38 (5)	0.35 ** (4)	0.04 (2)	0.04 (3)	0.05 (3)
BH9	471/80	9.86 (16)	8.68-7.68	7.68-6.68	6.68-5.68	5.68-4.68	4.68-3.68	4.18-3.18	3.18-2.18
			≈0 (3)	≈0 (1)	0.1 unst.* (1)	≈0 (0)	0.8*** (8)	≈0 (1)	≈0 (2)
BH3	610/93	9.81 (9)	8.63-7.63	7.63-6.63	6.63-5.63	5.63-4.63	4.63-3.63	3.63-2.63	2.63-1.63
			≈0 unst*. (0)	≈0 unst. (1)	0 (2)	≈0 unst. (2)	≈0 unst. (1)	0 (0)	≈0 unst. (2)
BH58	1037/145	9.63 (23)	8.45-7.45	7.45-6.45	6.45-5.45	5.45-4.45	4.45-3.45	3.45-2.45	2.45-1.45
			≈0 (3)	0.1 (4)	0.05 (1)	≈0 (4)	≈0 (2)	≈0 (5)	≈0 (4)
BH6	1194/160	4.93 (18)	3.75-2.75	2.75-1.75	2.12-1.12	-	-	-	-
			≈0 (2)	0.08 (7)	0.07 (9)	-	-	-	-

*Unstable **Dripping 1m above BH *** (0.9 for 1.4 MPa)



Figur 23: Transmissivitetmätningar av borrhål BH12. Bilden från borrhålkameran är från sektion 4. Bilden av borrhålkärna av sektioner 3,4 och 5. Våt tunnelvägg från vattendroppar från 1 m ovanför borrhålmyningen under transmissivitetstester av sektion 4 visas på bilden i den vänstra högerhörnan.



Figur 24: Transmissivitetmätningar av borrhål BH9.

Slutsatser

Transmissivitetmätningarna av 31 sektion i Äspölaboratoriet och 34 sektioner i Nacka-gruvan visade att sprickor inte är så konduktiva som det var förväntat. Alla sprickor valda i Äspölaboratoriet prolongerar också genom hela tunneltaket. De är långa och därför förväntades att de prolongerar också in i tunnelväggar åtminstone 5 m. Sprickorna har observerats i borrhärnor och i borrhål med borrhålkamera också. Trots det visades att majoriteten av sprickorna som fanns i bergmassan inte var konduktiva. Efter 75 testade sektioner hittades ingen sektion lämplig för injekteringsförsök.

Kvaliteten på sprickbilder från borrhålkamera visar att det troligen är möjligt att observera bruksinflöde från berget in till borrhålet och på detta sätt mäta verklig spridningstiden av bruk genom sprickor i berget.

6. Referenser:

- (1) Stille H. (2015). Rock Grouting-Theories and Applications. BeFo. ISBN 978-91-637-7638-0.
- (2) Stille H, Gustafson G and Hässler L (2012) Application of new theories and technology for grouting of dams and foundations on rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(3); 603-624.
- (3) Gustafson, G.; Claesson, J.; Fransson, Å. (2013) "Steering Parameters for Rock Grouting". *Journal of Applied Mathematics*, Article ID 269594.
- (4) Gustafson G, Stille H (2005) Stop criteria for cement grouting. *Felsbau*, 23, 62-68.
- (5) Hässler L (1991) Grouting of rock—simulation and classification. Doctoral thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden
- (6) Kobayashi, S., Stille, H., Gustafson, G. and Stille, B. (2008) Real Time Grouting Control Method: Development and application using Äspö HRL data. SKB report R-08-133.
- (7) Stille B, Stille H, Gustafson G, Kobayashi S (2009) Experience with the real time grouting control method. *Geomechanics and Tunneling*, 2, 447-459.
- (8) Snow D T. (1970) The frequency and apertures of fractures in rock. *J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 7, pp. 23-40.
- (9) Fransson, Å. 2002 Nonparametric method for transmissivity distributions along boreholes, *Ground Water*. 40(2), 201-204.
- (10) Zimmermann R W, Bodvarsson G S (1996) Hydraulic conductivity of rock fractures. *Transport in Porous Media* 23, 1–30.
- (11) Janson, T. 1998 Calculation models for estimation of grout take in hard jointed rock. Doctoral thesis, Division of Soil and Rock Mechanics, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- (12) Tsuji M., Holmberg M., Stille B., Rafi J. Y., Stille H., (2012) Optimization of the grouting process with RTGC method. Data from a trial grouting at city line project in Stockholm, SKB R-12-16. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.
- (13) Zou L., Cvetkovic V., Jing L., 2014. Roughness decomposition and effects on fluid flow in single rock fractures. *Proc. 8th Asian Rock Mech. Symp.* In Sapporo, Japan.
- (14) Carter, T., Dershowitz, W., Shuttle, D., and Jefferies, M. (2012) Improved Methods of Design for Grouting Fractured Rock. (ASCE) *Grouting and Deep Mixing 2012*: pp. pp. 1472-1483.

- (15) Dershowitz, W.S, Doe, T.W., Uchida, M. & Hermanson, J. 2003. Correlations between fracture size, transmissivity, and aperture. Soil Rock America: Proceedings of the 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, pp 887-891.

Bilaga 1:

1. Plats G0 i Nackagruvan



Figur 1: Unigrout med cylinder på plats G0. Injekteringsrör och slang syns i borrhålet under transmissivitetmätningen.



Figur 2: Tidliga sprickor på plats G0.



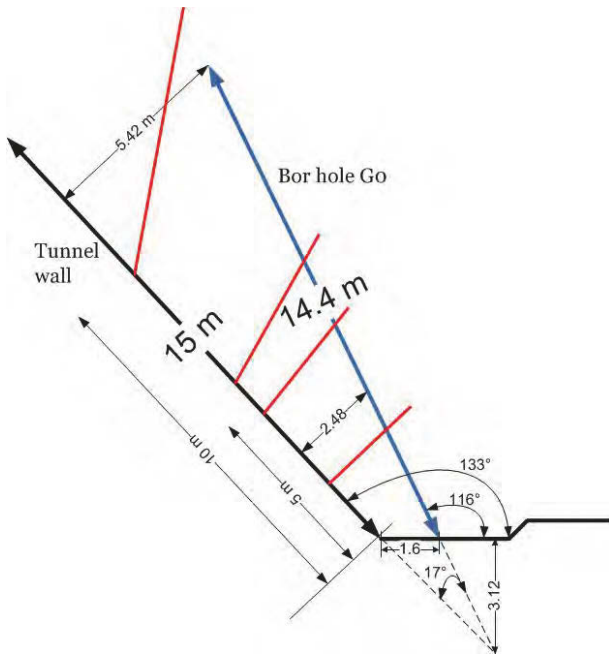
Figur 3: Borrhål G0



Figur 4: En tydlig spricka på plats G0 ca 10 m från korsningen.



Figur 5: Sprickor i tunnelvägg cirka 5.5 m från korsningen.

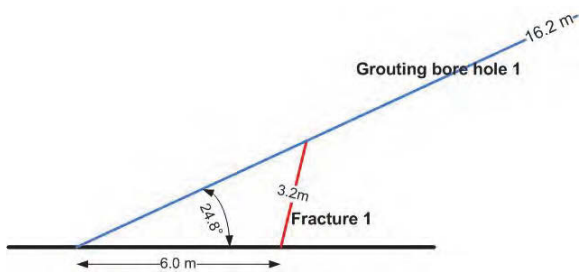


Figur 6: Skiss av sprickor och borrhål G0

2. Plats G1 i Nackagruvan



Figur 7: Spricka 1 på plats G1.



Figur 8: Skiss av spricka 1 och borrhål G1.



Figur 9: Borrhål G1. I bilden syns en del gamla borrhåll från testning av Atlas Copco bormaskiner.

3. Plats G2 i Nackagruvan

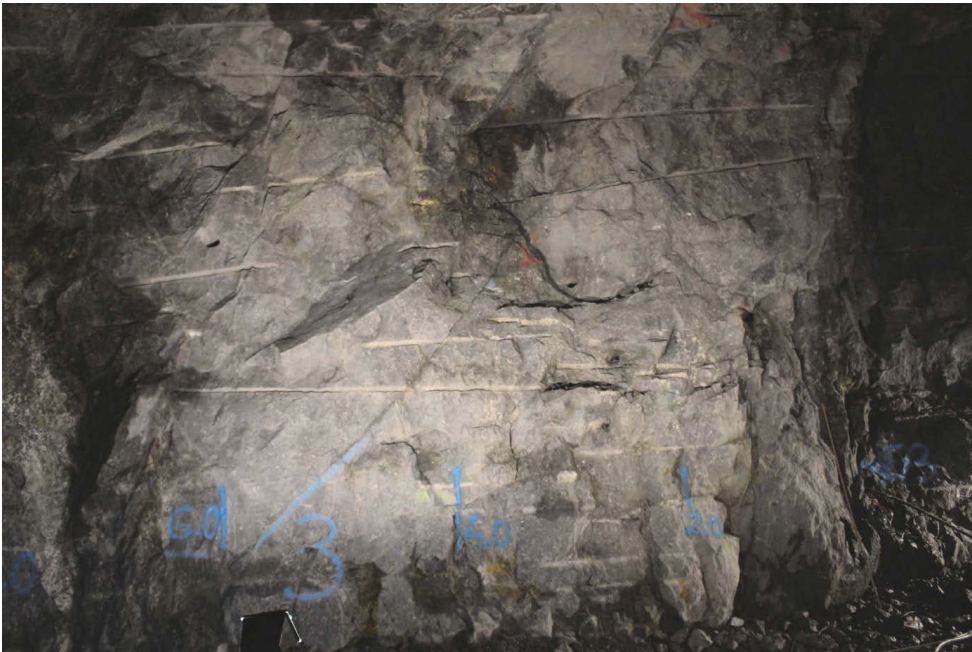


Figur 10: Borrhål G2 under transmissivitetsmätningar.

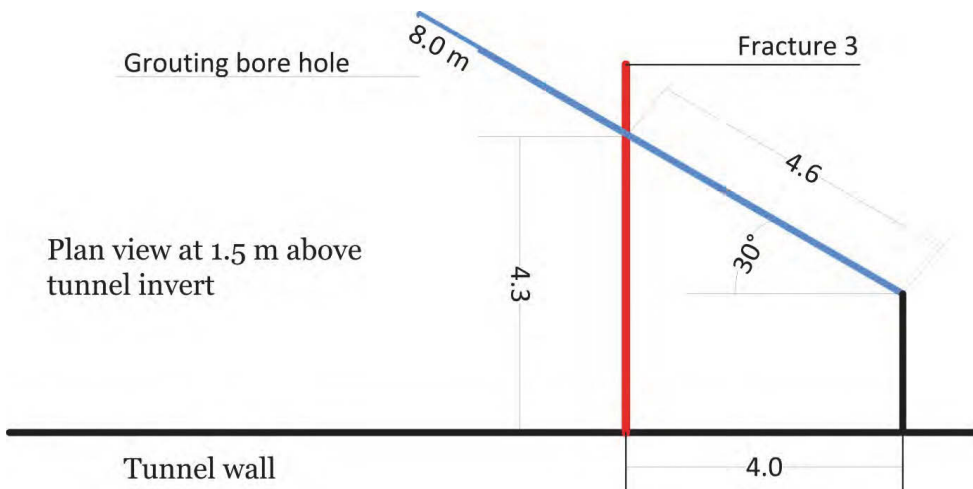


Figur 11: Borrhål G2 (bild till vänster). Spricka 2 och några sprickor till i tunnelväggen ca. 5 m från borrhålmyningen (bild till höger).

4. Plats G3 i Nackagruvan



Figur 12: Plats G3. Högtryckslang som kommer ut från borrhålet syns till höger i bilden.



Figur 13: Skiss av spricka 3 och borrhål G3.

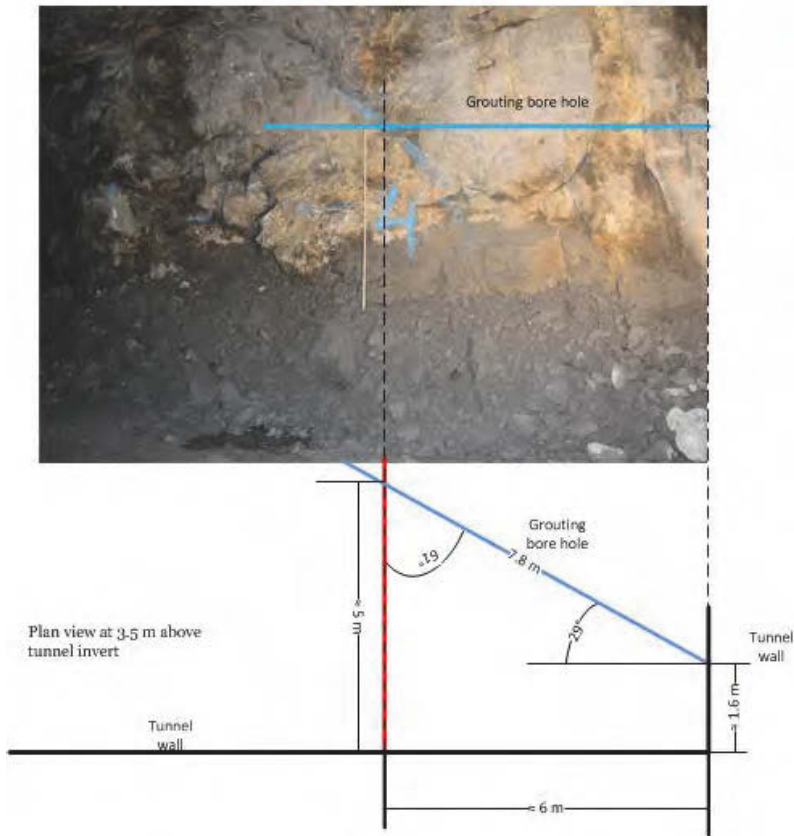
5. Plats G4 i Nackagravan



Figur 14:Plats G4. Sprickor markerade med blå färg syns i tunnelväggen till vänster och borrhål G4 under transmissivitetmätningar syns i tunnelväggen till höger.



Figur 15: En spricka i tunnelväggen markerad som nr. 4. Flera sprickor syns i tunnelväggen.



Figur 16: Skiss av spricka 4 och borrhål G4.

Bilaga 2.1: Plats med spricka 12 och BH12 i Äspö-tunnel samt resultat från transmissivitetmätningar



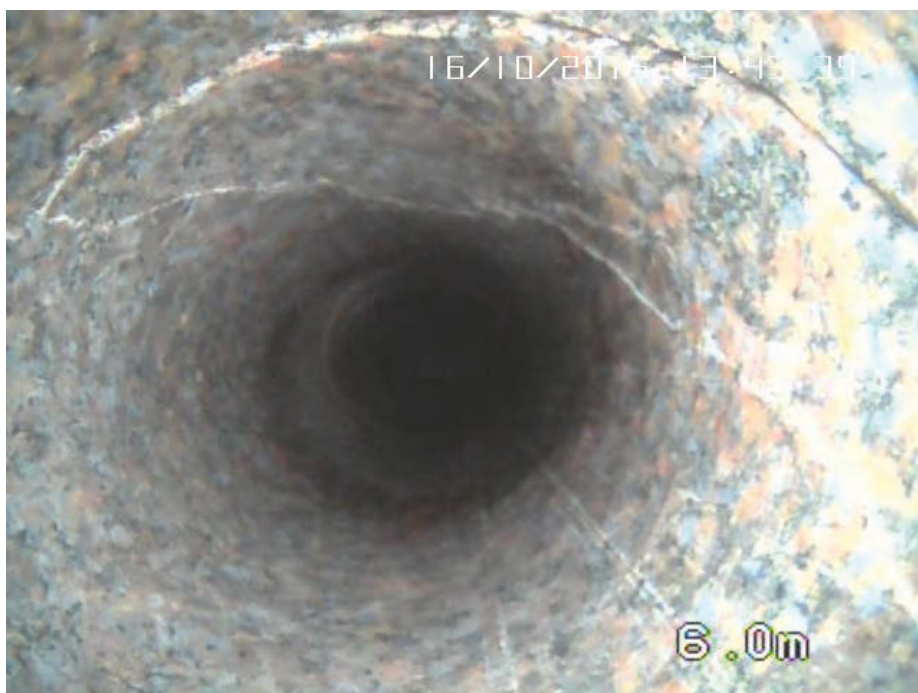
Figur 1: Plats under transmissivitetmätningar av BH12. Spricka 12 syns till höger i bilden.



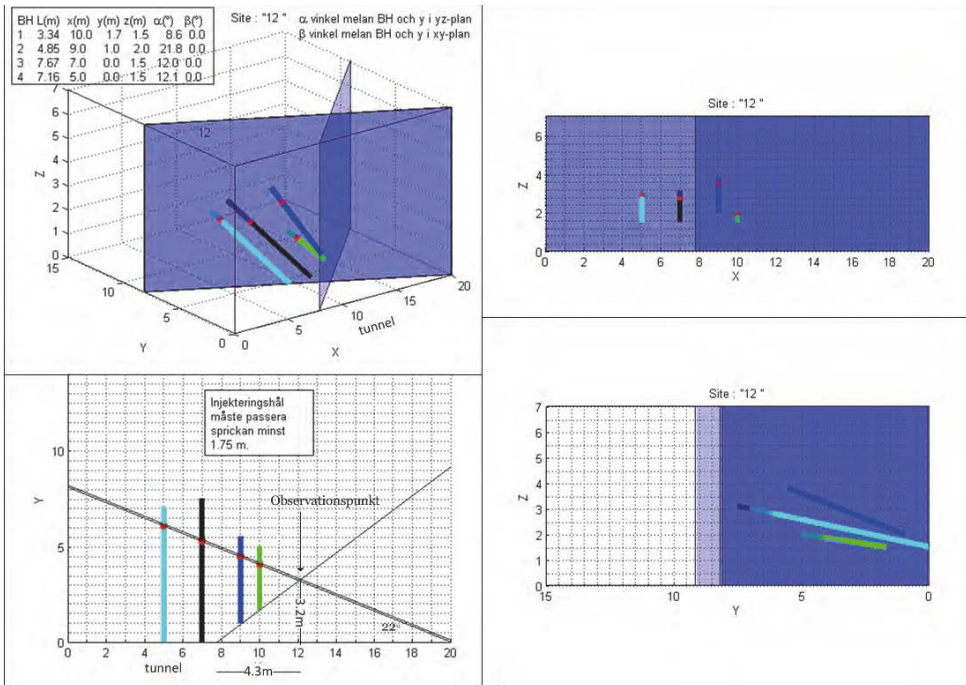
Figur 2: Flera sprickor som möjligt korsar BH12 och inte enbart spricka 12.



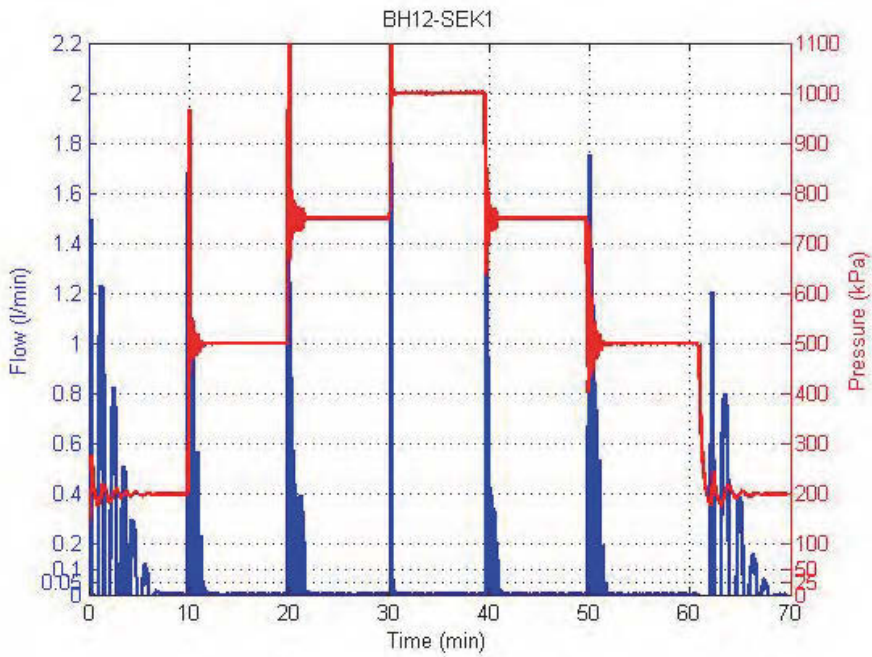
Figur 3: Borrkärna från BH12 med markerade 1m-sektioner. Sektion 1 är längst in i borrhålet.



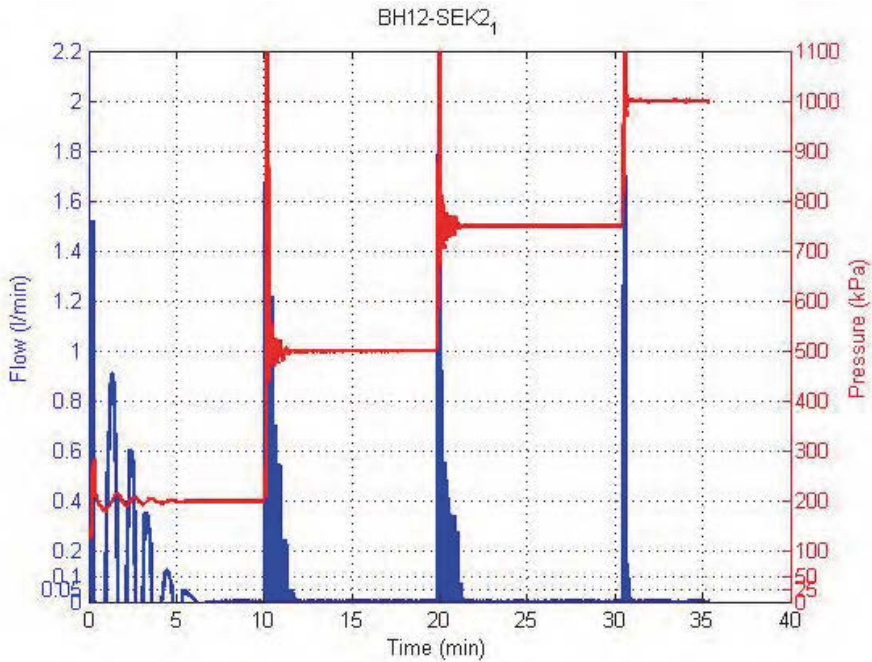
Figur 4: Två tydliga sprickor i BH12 sektion 3.



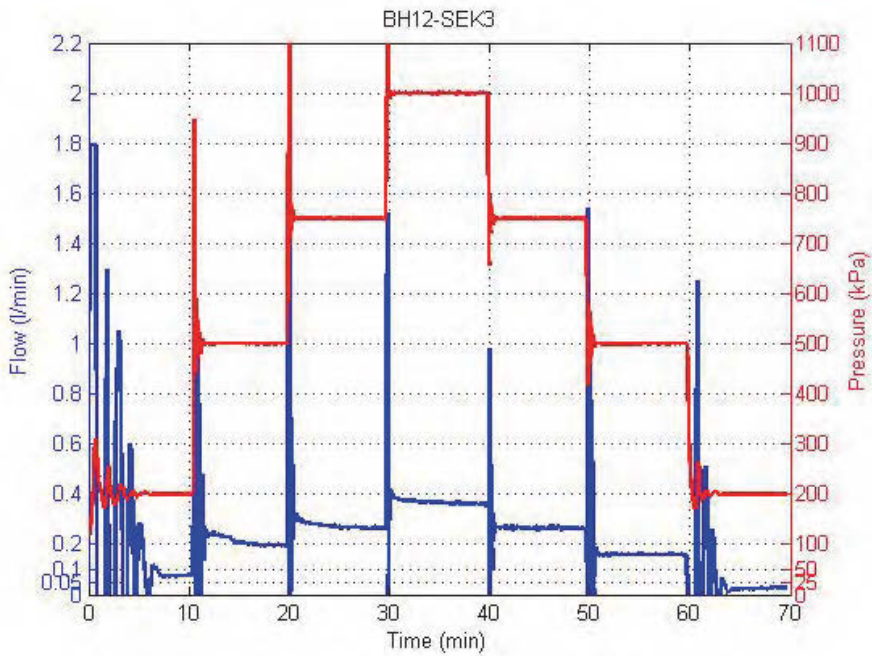
Figur 5: Planerad borrhingsmodell. Svarta borrhålet är injekteringsborrhål. Andra är observationsborrhål.



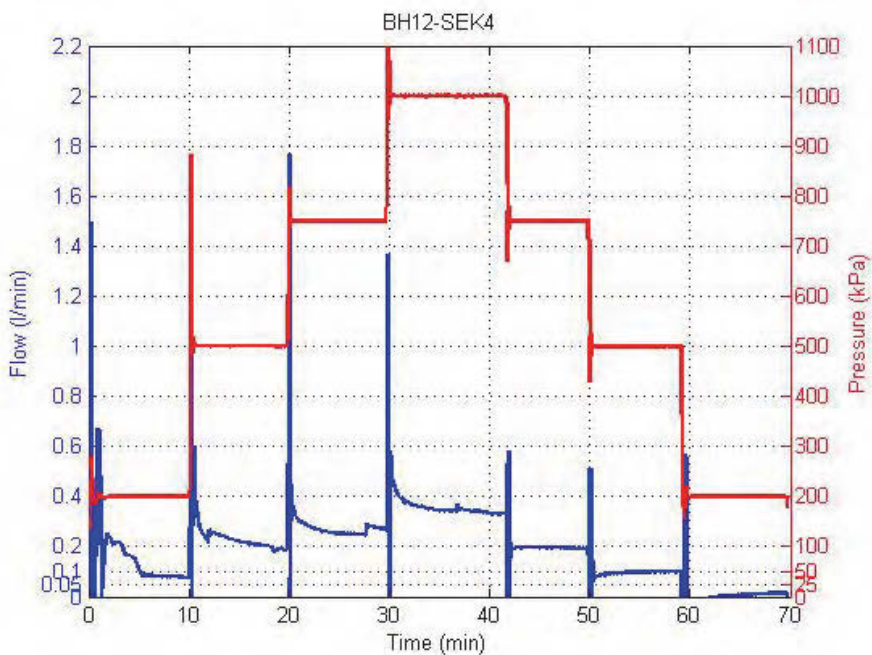
Figur 6: Transmissivitetsmätning av BH12 sektion 1.



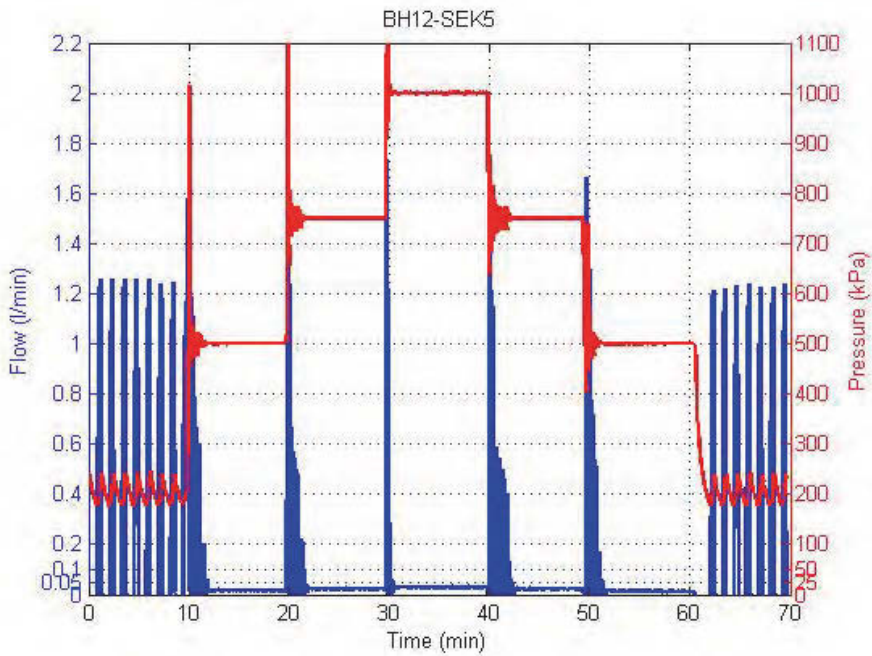
Figur 7: Transmissivitetsmätning av BH12 sektion 2.



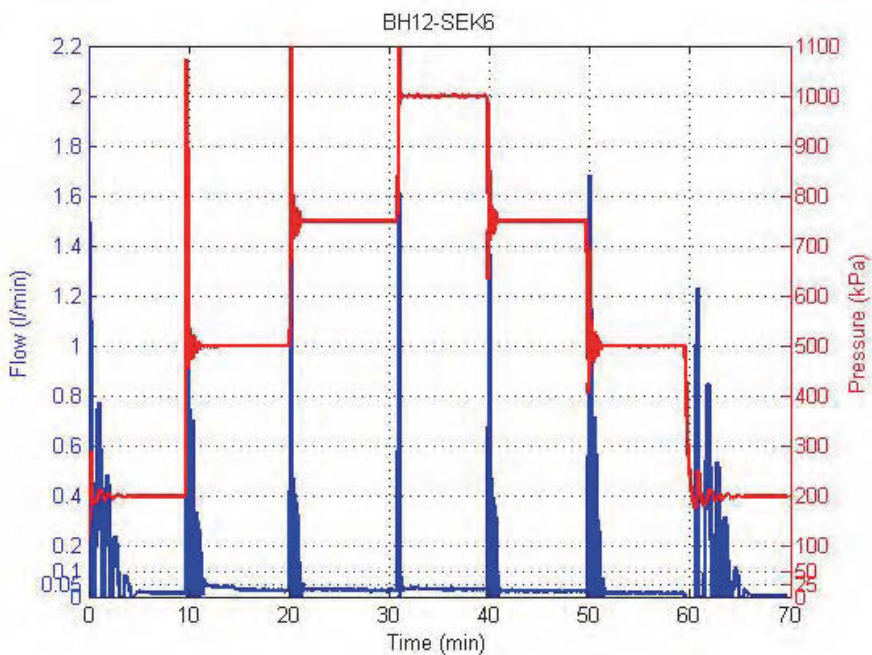
Figur 8: Transmissivitetsmätning av BH12 sektion 3.



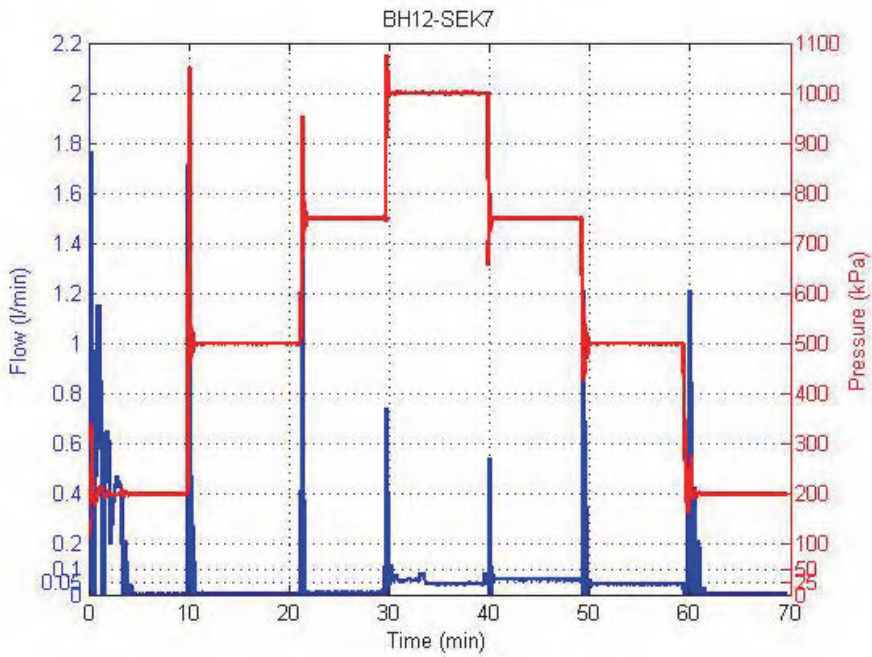
Figur 9: Transmissivitetsmätning av BH12 sektion 4.



Figur 10: Transmissivitetmätning av BH12 sektion 5.



Figur 11: Transmissivitetmätning av BH12 sektion 6.



Figur 12: Transmissivitetsmätning av BH12 sektion 7.

Bilaga 2.2: Plats med spricka 9 och BH9 i Äspö-tunnel samt resultat från transmissivitetmätningar



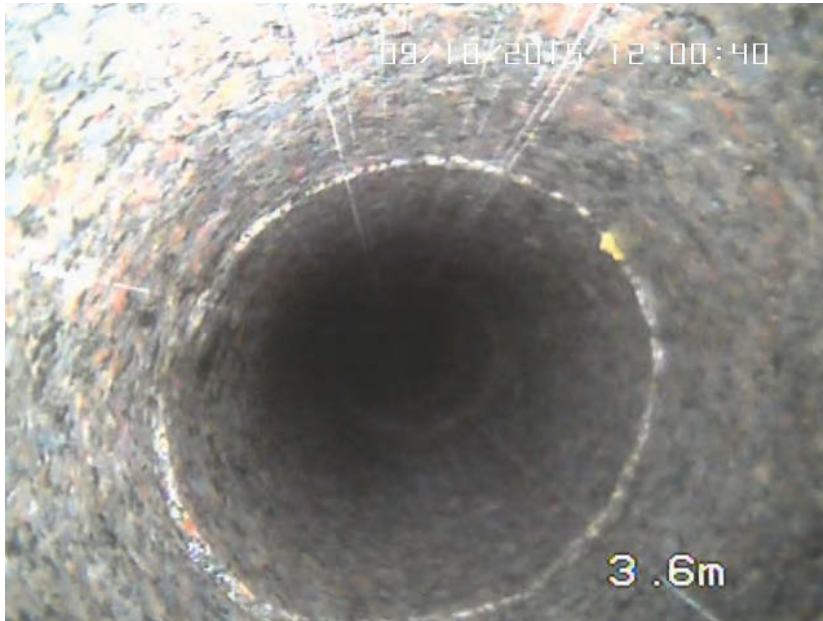
Figur 1:Plats BH9 och spricka 9.



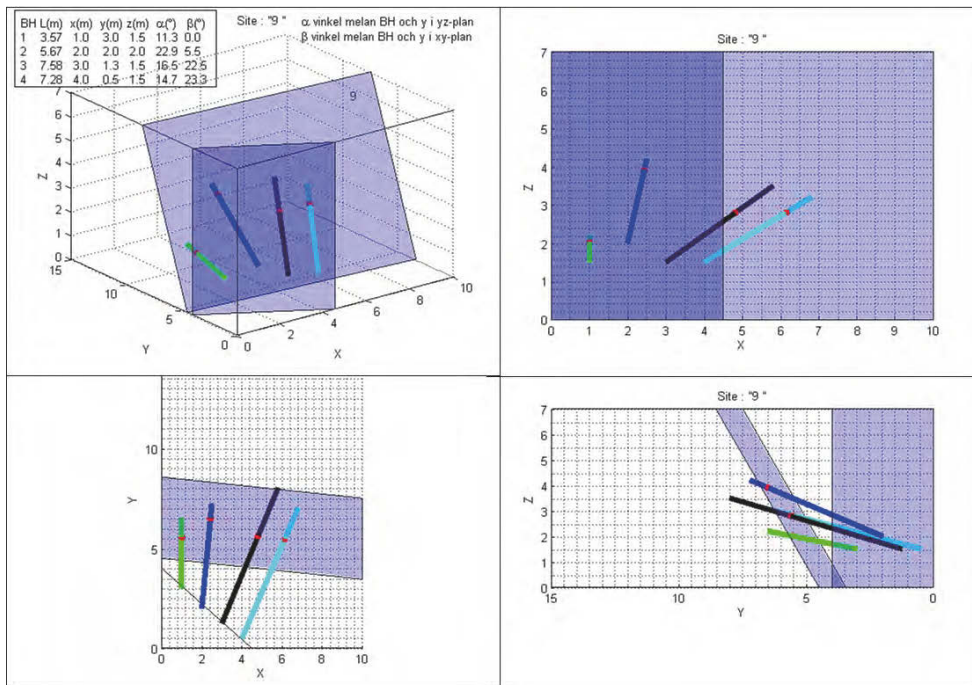
Figur 2: Spricka 9.



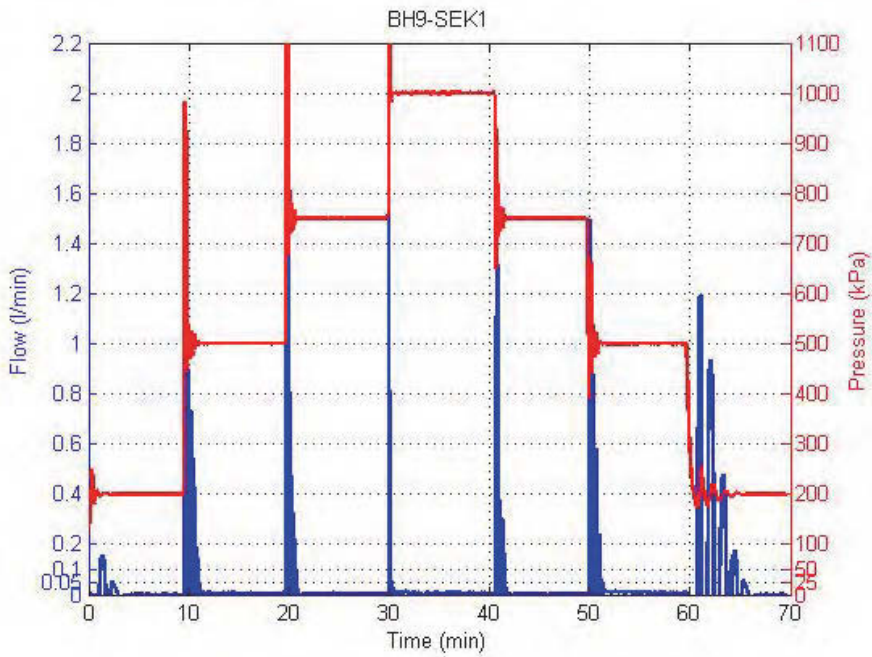
Figur 3: Borrkärna från BH9 med markerade sprickor och 1m-sektioner. Sektion 1 är längst in i borrhålet.



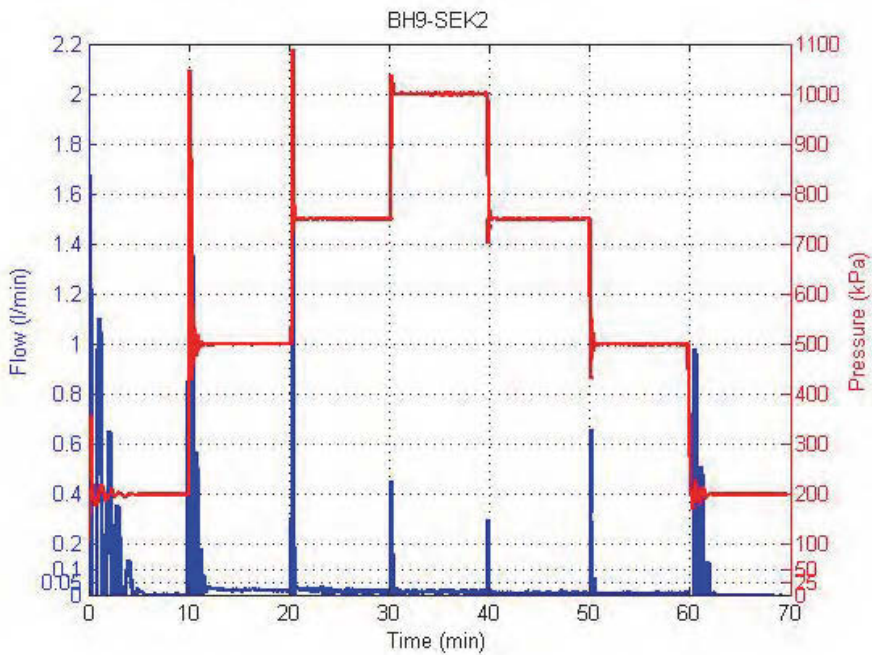
Figur 4: BH9 sektion 5. En bild på en spricka med borrhålkamera.



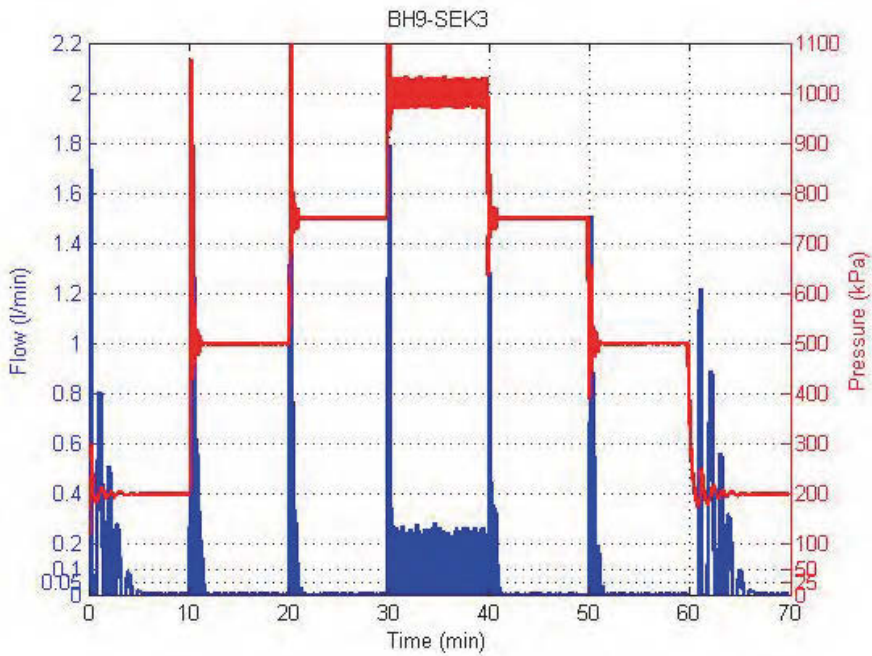
Figur 5: Borrningsmodell BH9



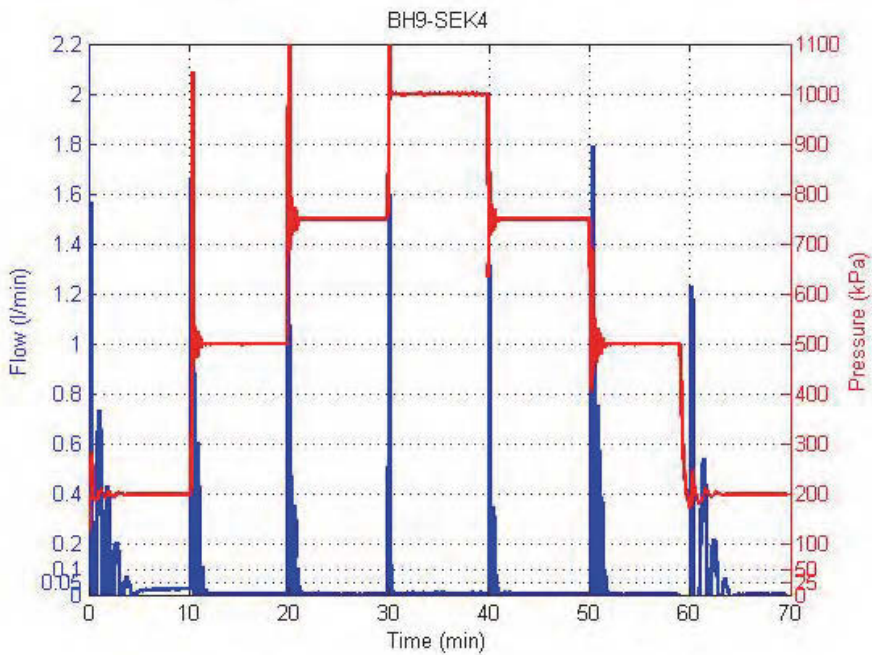
Figur 6: Transmissivitetsmätning av BH9 sektion 1.



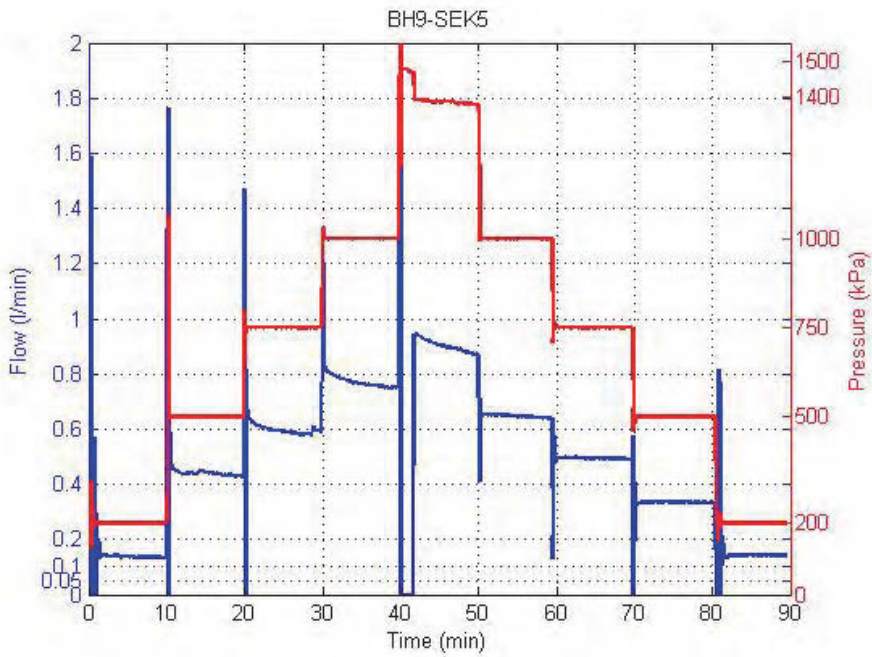
Figur 7: Transmissivitetsmätning av BH9 sektion 2.



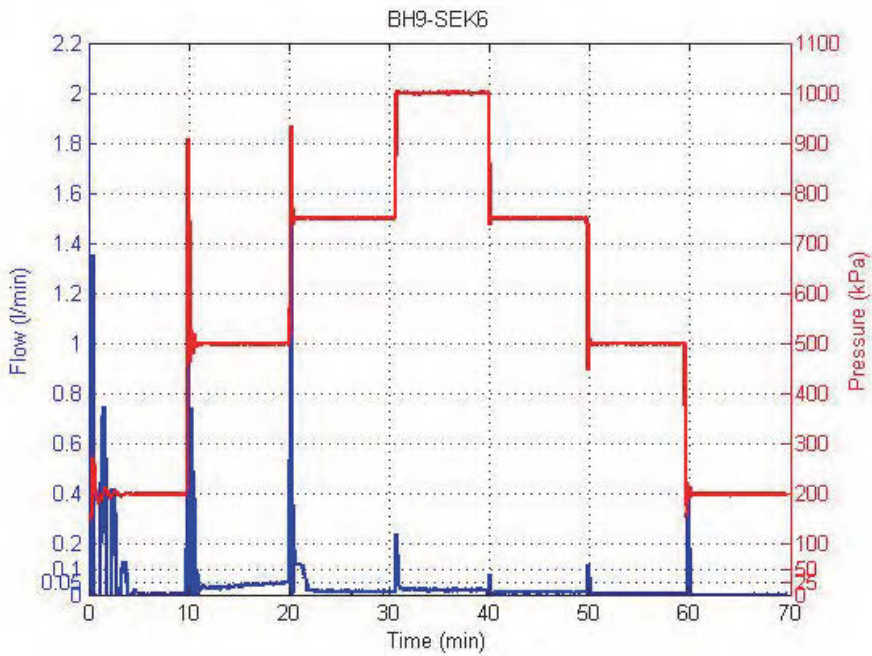
Figur 8: Transmissivitetsmätning av BH9 sektion 3.



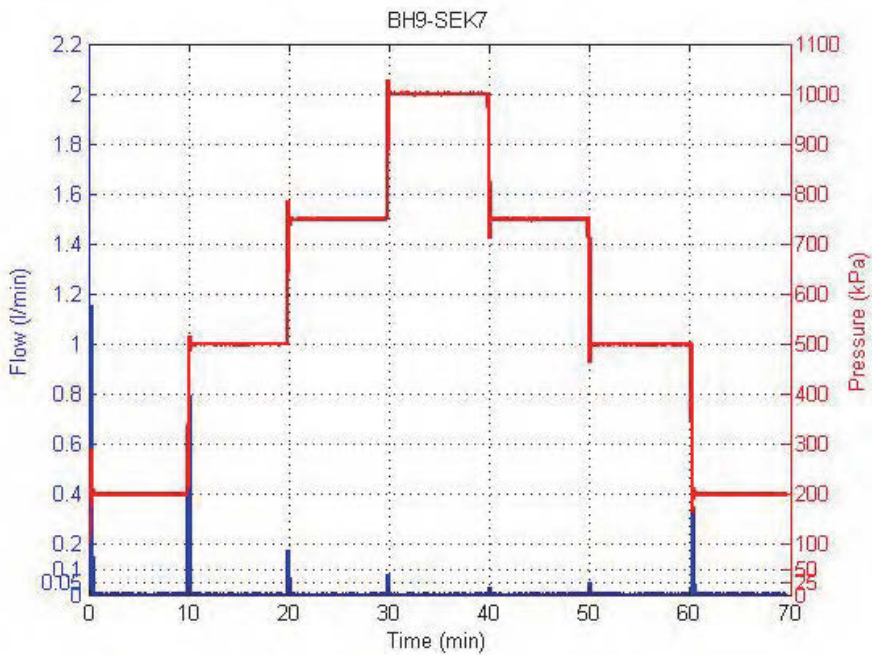
Figur 9: Transmissivitetsmätning av BH9 sektion 4.



Figur 10: Transmissivitetsmätning av BH9 sektion 5. Den ända konduktiva sektionen i BH9 men vattenflöde kunde inte observeras i tunnelväggen.



Figur 11: Transmissivitetmätning av BH9 sektion 6.



Figur 12: Transmissivitetmätning av BH9 sektion 7.

Bilaga 2.3: Plats med spricka 3 och BH3 i Äspö-tunnel samt resultat från transmissivitetmätningar



Figur 1: Plats med BH3 och spricka 3.



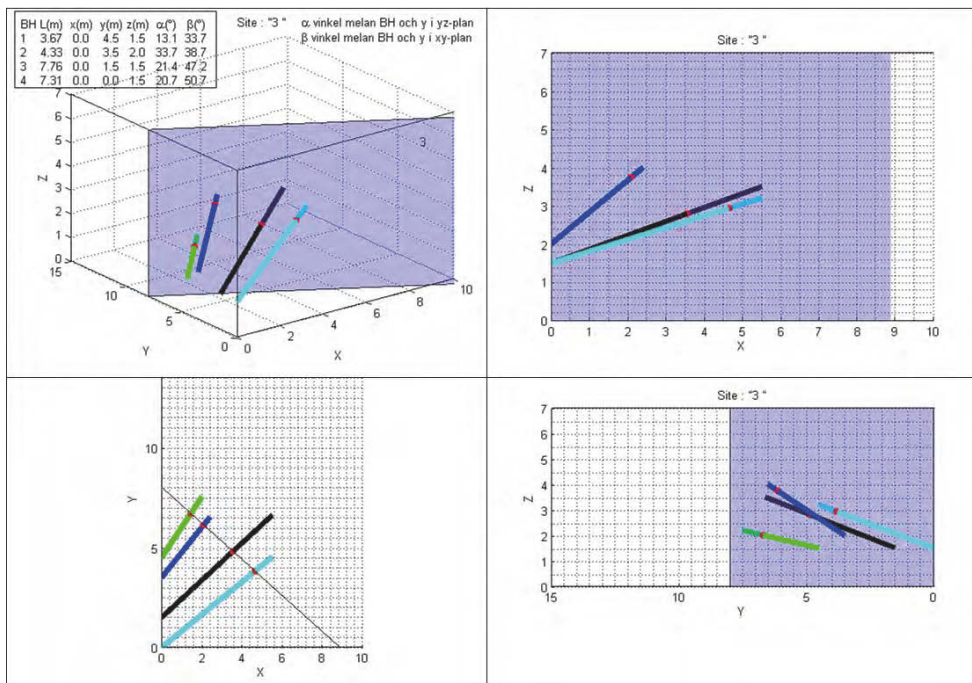
Figur 2: Spricka 3. Sprickan går över hela tunneln.



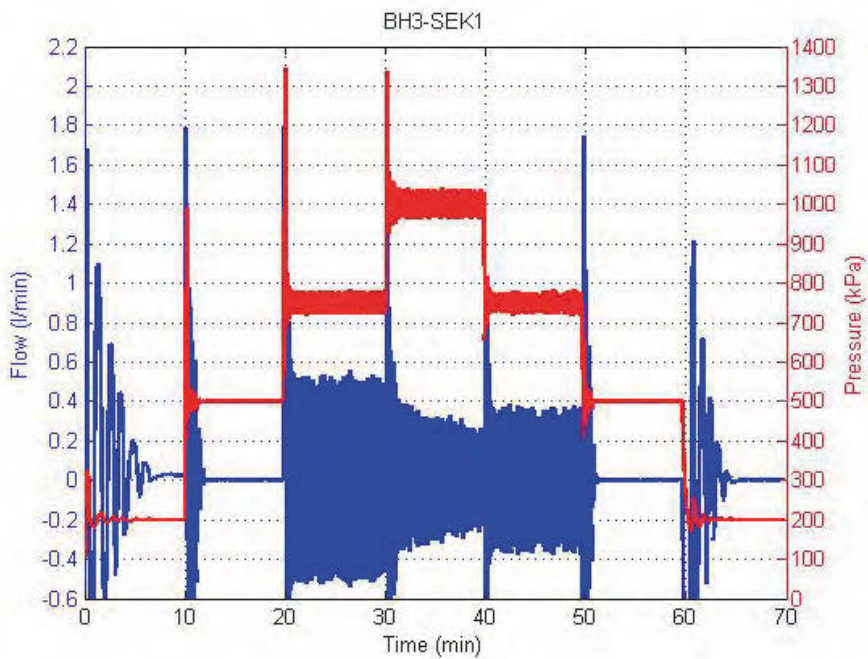
Figur 3: Borrkärna från BH3 med markerade 1m-sektioner och sprickor. Sektion 1 är längst in i borrhålet.



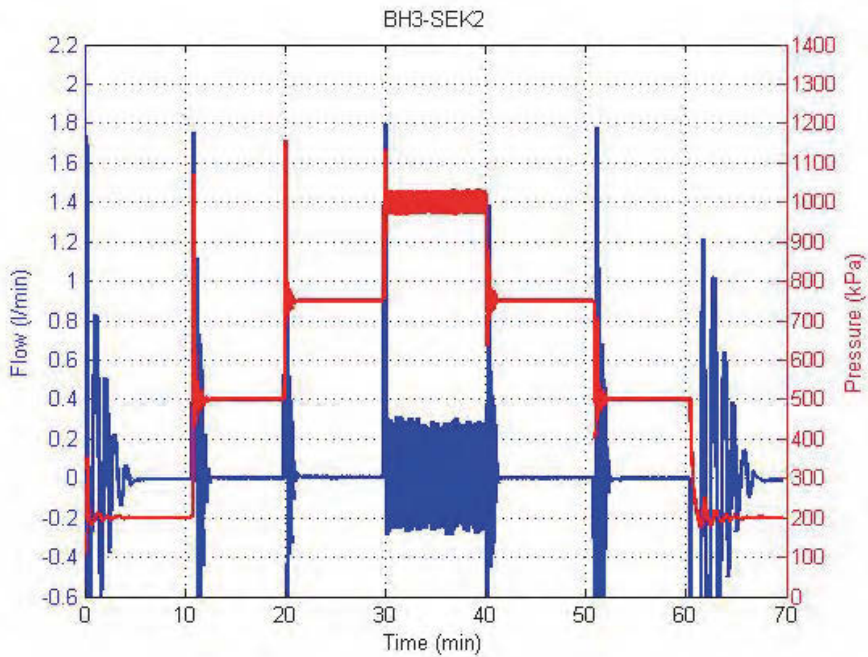
Figur 4: En bild av sprickan i BH3 sektion 4. Bild från borrhålkamera.



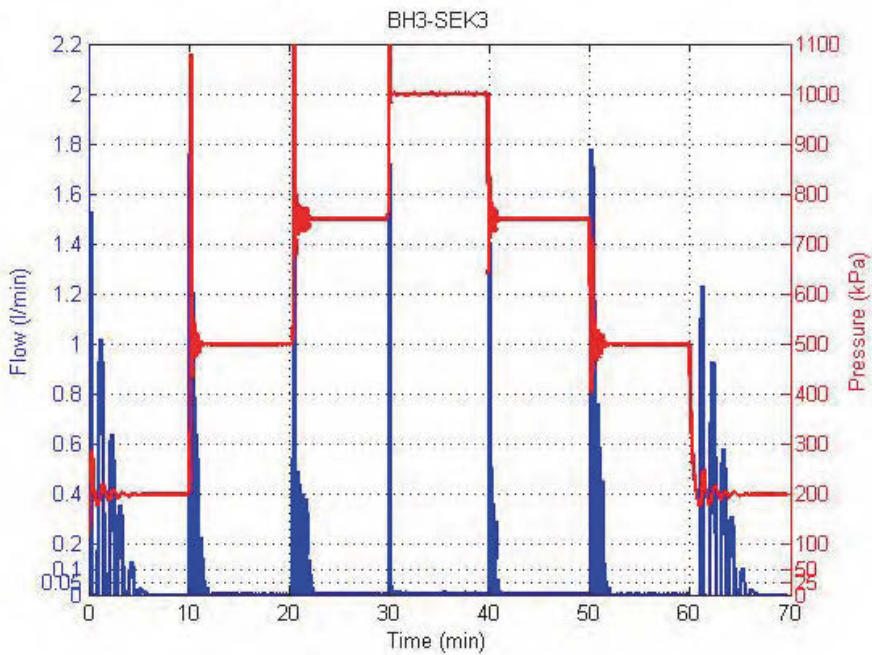
Figur 5: Planerad borrhingsmodell. Svarta borrhålet är injekteringsborrhål. Andra är observationsborrhål.



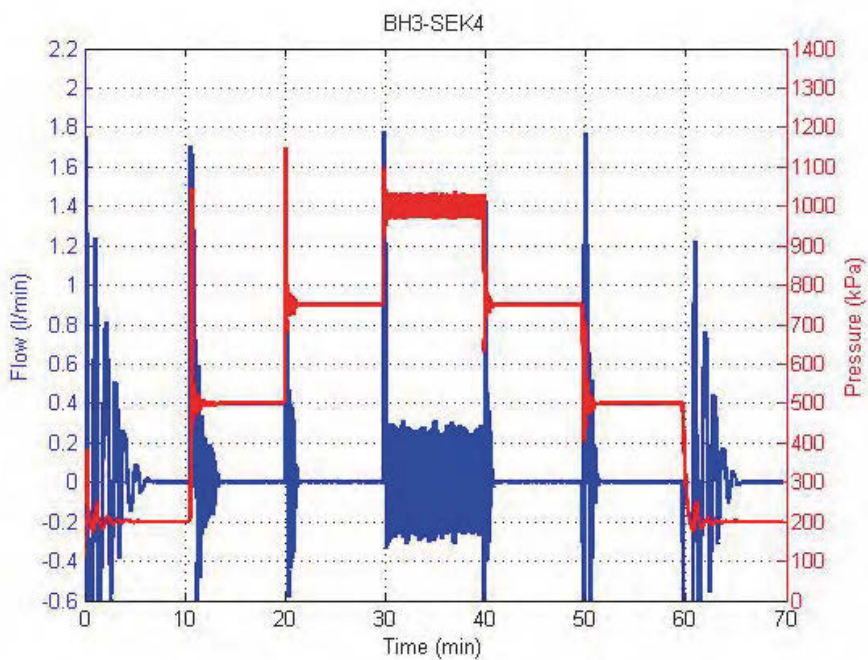
Figur 6: Transmissivitetsmätning av BH3 sektion 1. Ostabil flödesmätning mellan tiden 20 till 50 min.



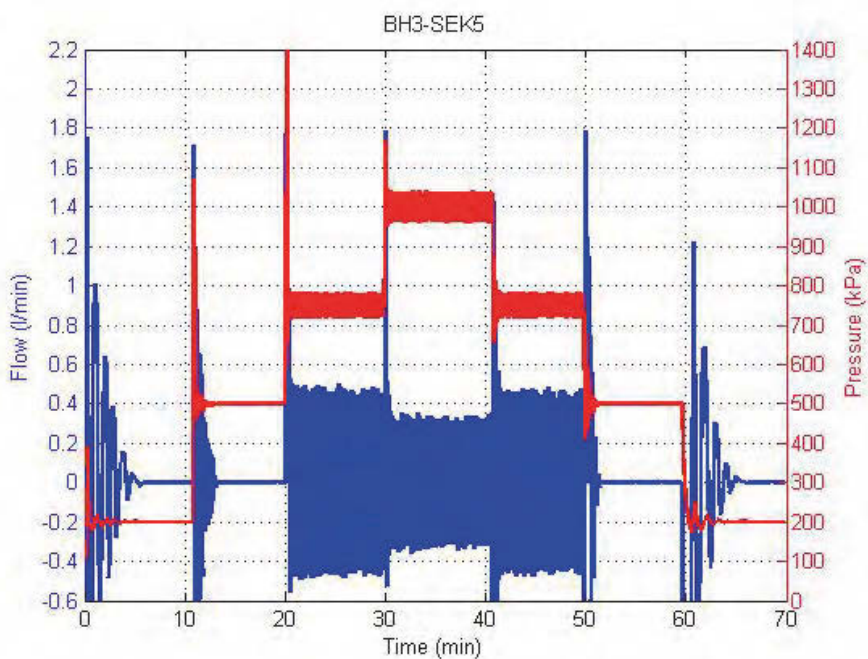
Figur 7: Transmissivitetsmätning av BH3 sektion 2.



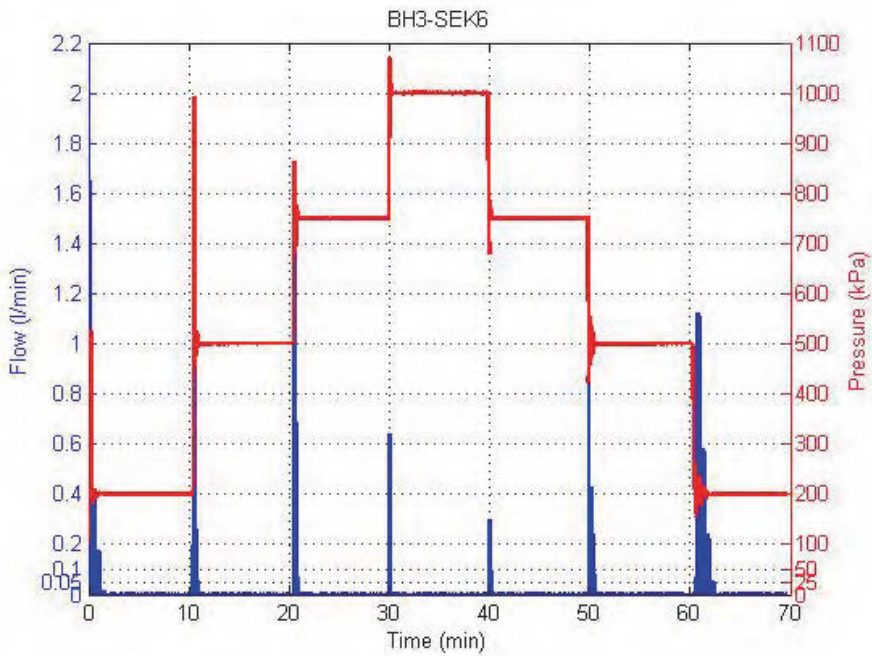
Figur 8: Transmissivitetsmätning av BH3 sektion 2.



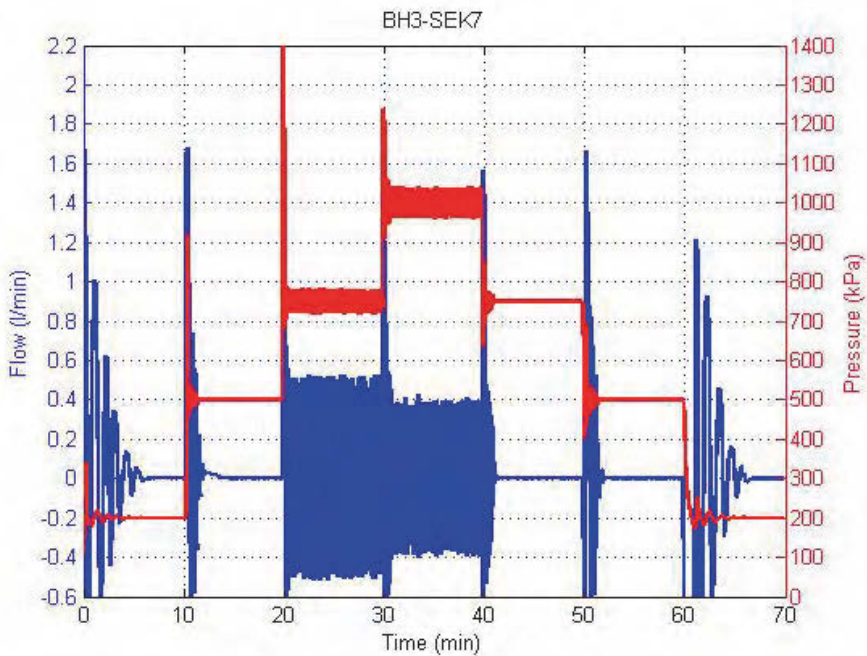
Figur 9: Transmissivitetsmätning av BH3 sektion 4.



Figur 10: Transmissivitetsmätning av BH3 sektion 5.



Figur 11: Transmissivitetmätning av BH3 sektion 6.



Figur 12: Transmissivitetmätning av BH3 sektion 7.

Bilaga 2.4: Plats med sprickor 5 och 8 samt BH58 i Äspö-tunnel och resultat från transmissivitetmätningar



Figur 1: Plats under transmissivitetmätningar av borrhål BH58. Sprickor 5 och 8 är placerade på vänsterväggen nära de orange konerna. Position av sprickorna visas också i Figur 2.



Figur 2 Sprickor 5 och 8.



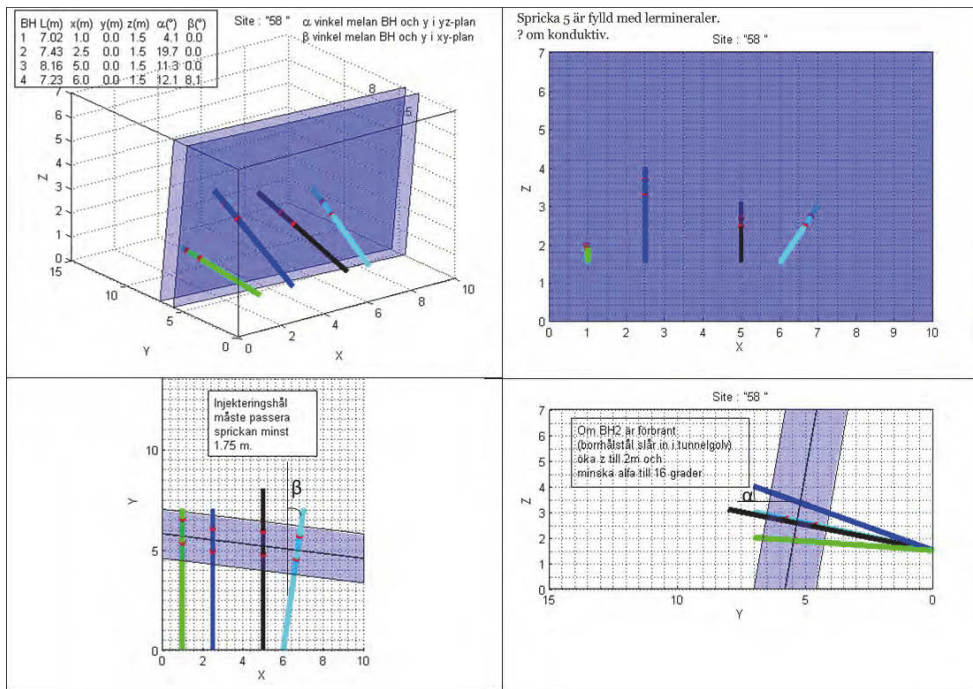
Figur 3: En närmare bild på sprickor 5 och 8.



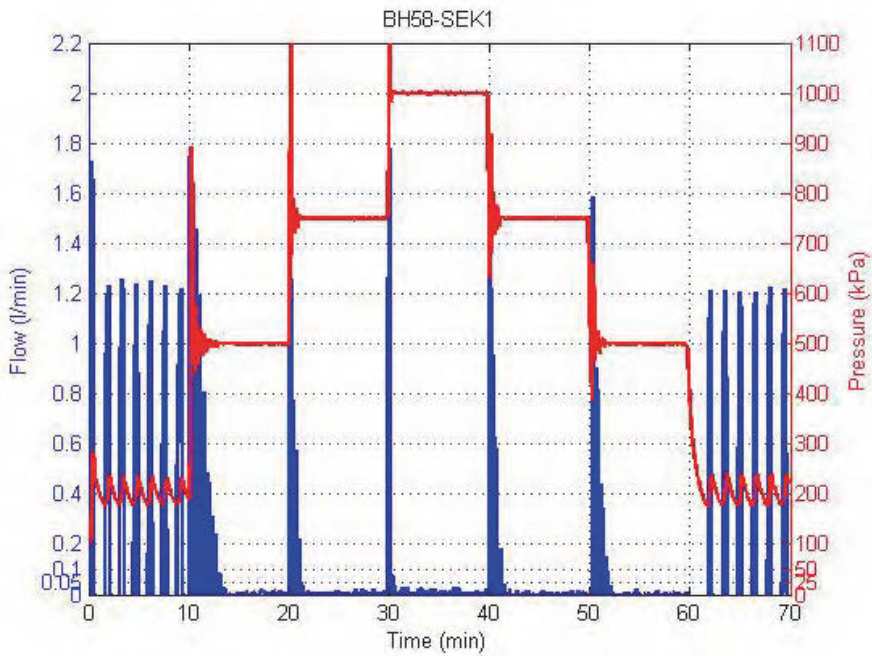
Figur 4: Borrkärna från BH58



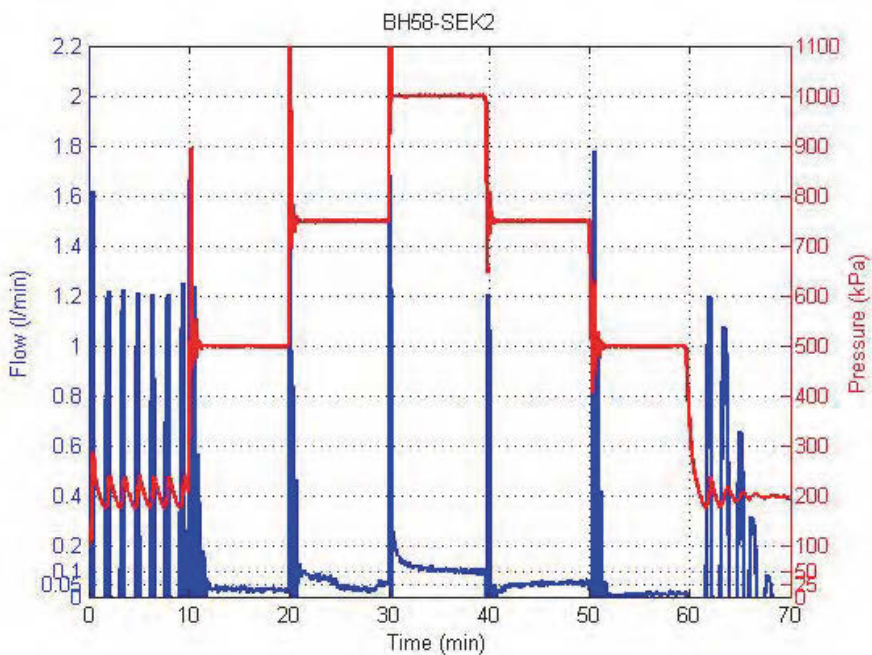
Figur 5: Bild från BH58 sektion 2.



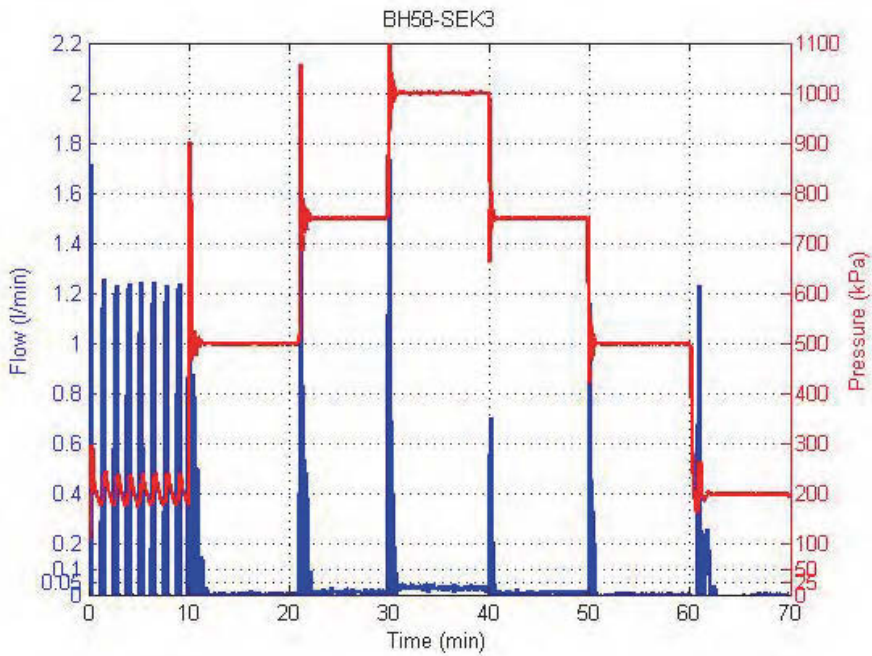
Figur 6: Planerad borrhningmodell på plats BH58. Svarta borrhålet är injekteringsborrhål. Andra observationsborrhål.



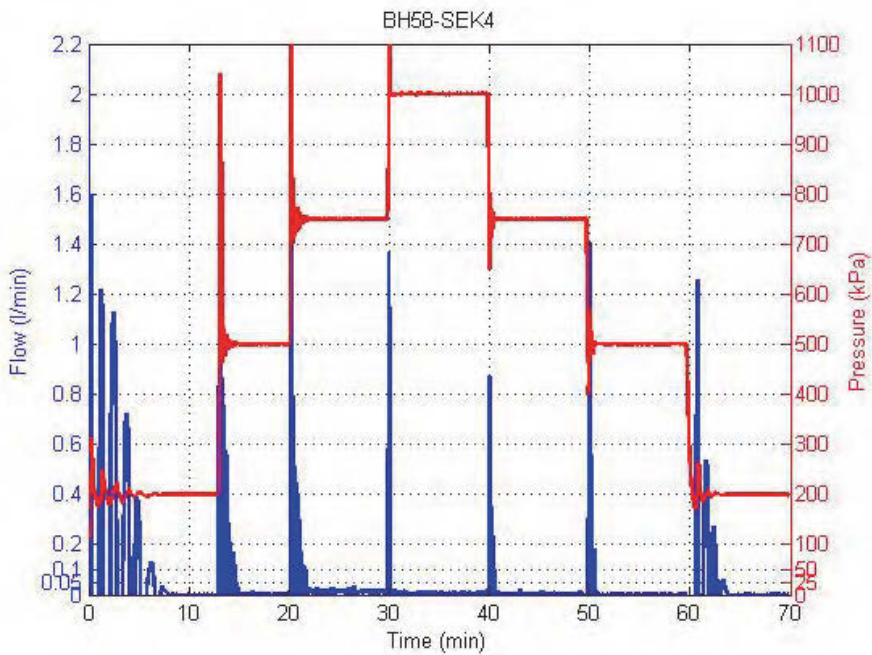
Figur 7: Transmissivitetsmätning av BH58 sektion 1.



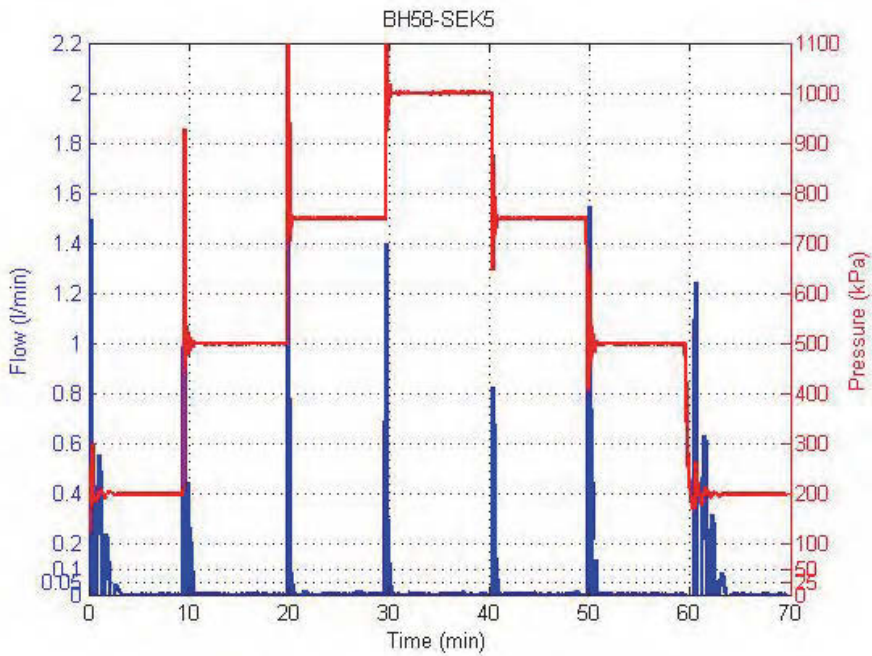
Figur 8: Transmissivitetsmätning av BH58 sektion 2.



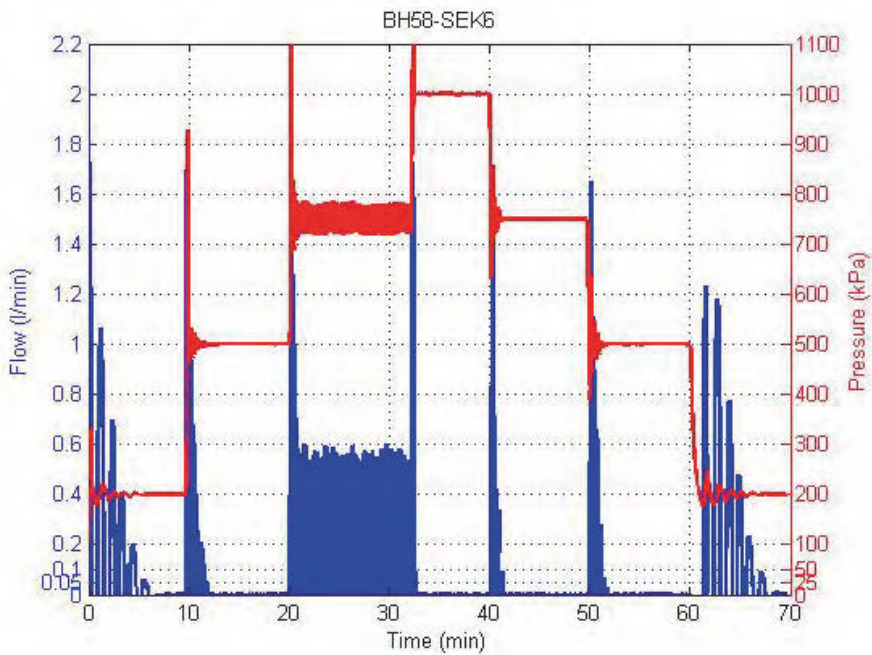
Figur 9: Transmissivitetsmätning av BH58 sektion 3.



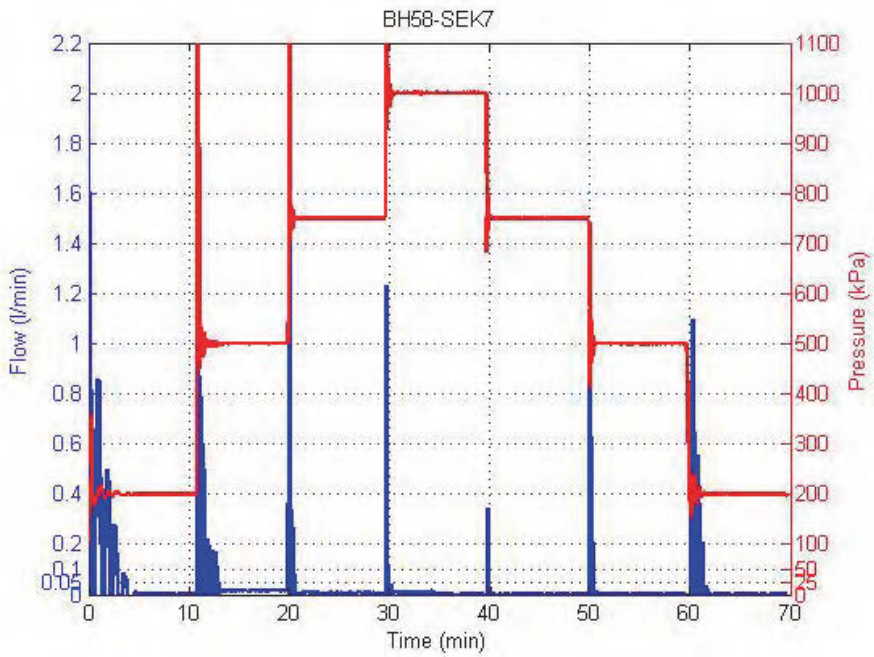
Figur 10: Transmissivitetsmätning av BH58 sektion 4.



Figur 11: Transmissivetsmätning av BH58 sektion 5



Figur 12: Transmissivetsmätning av BH58 sektion 6



Figur 13: Transmissivitetsmätning av BH58 sektion 7.

Bilaga 2.5: Plats med spricka 6 och BH6 i Äspö-tunnel samt resultat från transmissivitetmätningar



Figur 1: Plats med spricka 6 bredvid måttstocken och BH6 till häger nära markeringen G3.



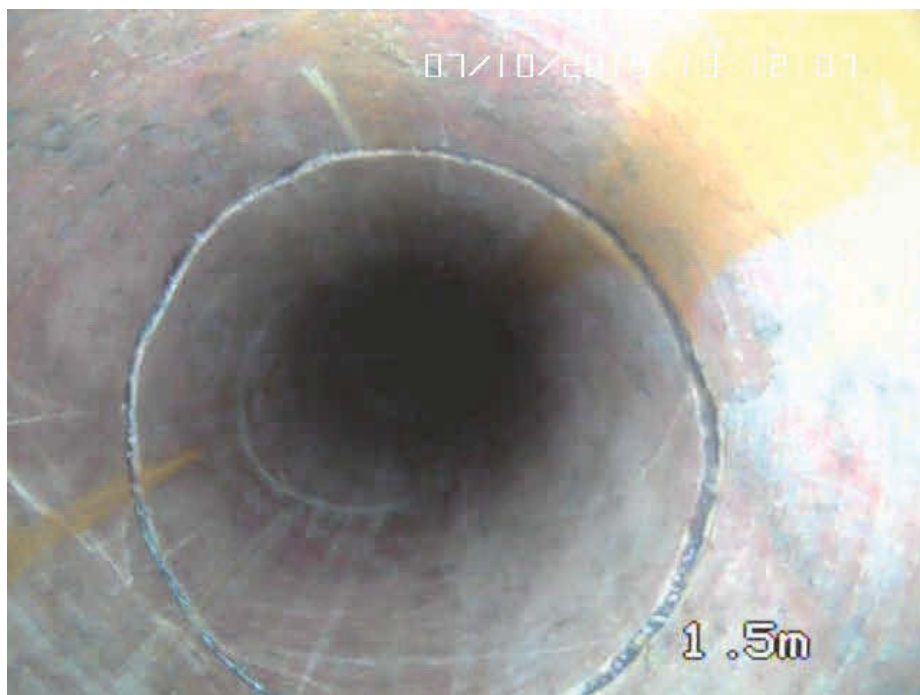
Figur 2: Mätning av platsen med spricka 6 och borrhäll BH6.



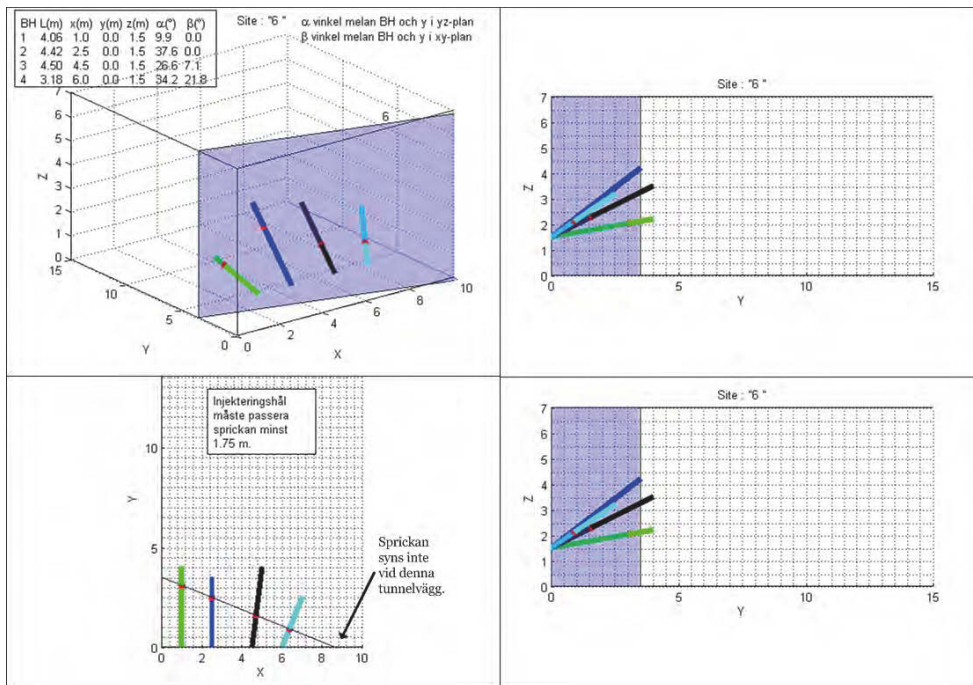
Figur 3: Spricka 6 vid måttstocken och ännu en spricka ca. 2 m till höger av spricka 6.



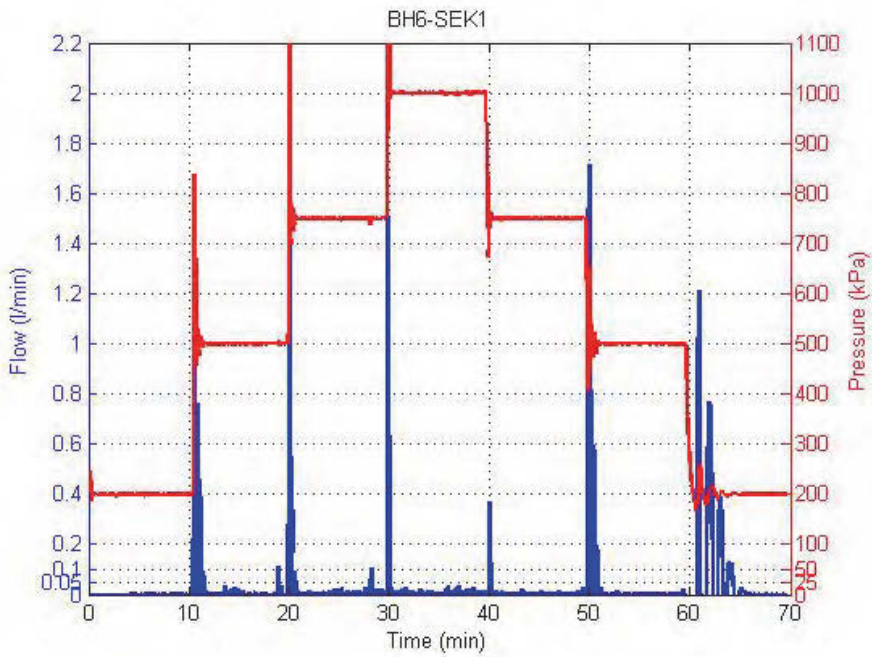
Figur 4: Borrkärna från BH6



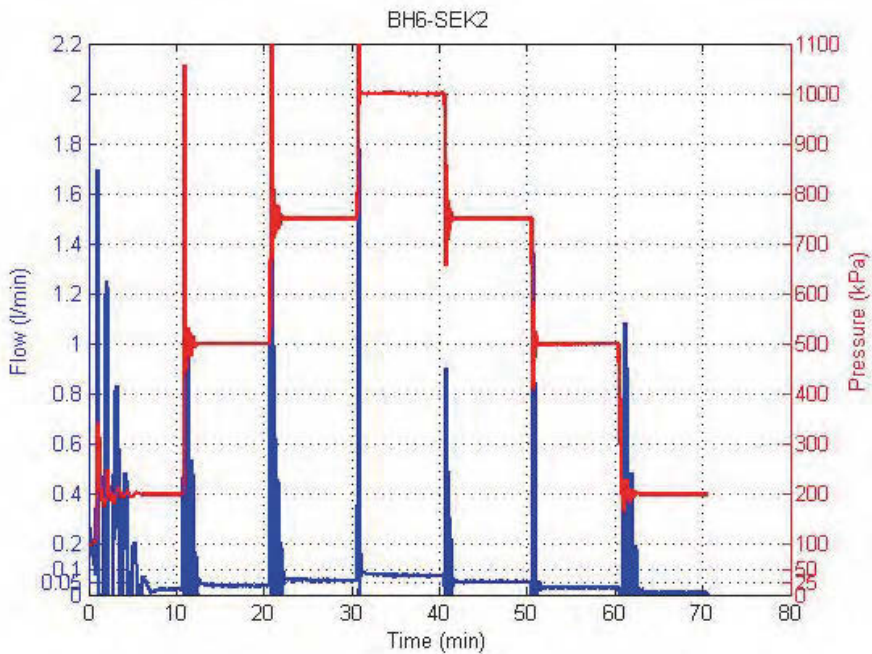
Figur 5: Bild från BH6 sektion 3.



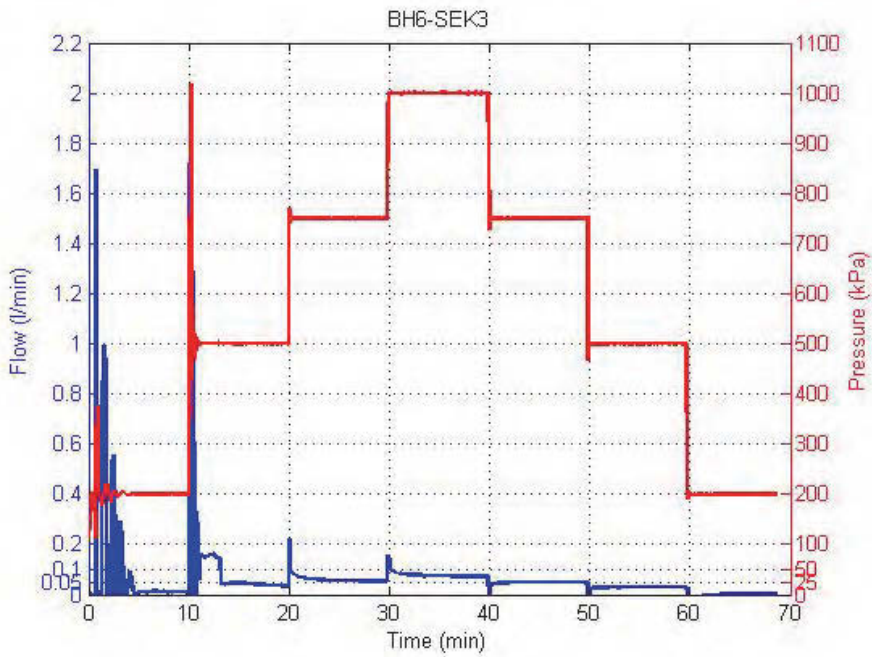
Figur 6: Planerad borrhingsmodell. Svarta borrhålet är injektionsborrhål. Andra borrhål är observationsborrhål.



Figur 7: Transmissivitetsmätning av BH6 sektion 1.



Figur 8: Transmissivitetsmätning av BH6 sektion 2.



Figur 9: Transmissivitetsmätning av BH6 sektion 3.



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org
Besöksadress: Storgatan 19

ISSN 1104-1773