

# **UTVECKLING AV DYNAMISK INJEKTERING ETAPP 2**

**Ojas Arun Chaudhari, Giedrius Zirgulis**

**2022-11-10**



## FÖRORD

Vatteninträning in i underjordisk infrastruktur från omgivande formationer leder till flera miljö-, ekonomi- och hållbarhetsproblem. Tillräcklig spridning av injekteringsbruk i bergssprickor är nödvändig för att erhålla erforderlig tätning. De tidigare projekten i laboriemiljö visar att dynamisk injektering förbättrar spridningen av injekteringsbruk i mikrofrakturer avsevärt. Denna forskning undersöker vidareutvecklingen av dynamisk injektering på fältet, dvs i själva tunneln. Projektet verifierar effektiviteten av den nya injektionstekniken genom att anpassa våra experiment i laboratorieskala till fältmiljö.

Projektet har genomförts vid avdelning: Infrastruktur och Betongbyggande vid Sveriges Forskningsinstitut (RISE). Den primära arbetsgruppen bestod av Ojas Chaudhari (Material Design, RISE) som projektledare och Giedrius Zirgulis (Material lab., RISE). Arbetsgruppen bestod dessutom av Almir Draganovic (SKB), Ulf Håkansson (Skanska), Tommy Ellison (Besab) och Anders Selander (Cementa). Vi har fått stort stöd från referensgruppen som bestod av Patrik Vidstrand (BeFo), Thomas Dalmalm (TRV), Peter Ulriksen (LTH), Charlotte Svensson Tengberg (Skanska), Joakim Jeppsson (Skanska) och Johan Funehag (Tyrens). De har bistått projektet med råd och granskning.

Huvudarbetet både i labb och i fält (etapp 1 och 2) bedrivs i nära samarbete mellan deltagarna från SKB, Skanska och RISE. Deras expertis och erfarenheter inom områdena dynamisk injektering, injekteringens genomträngningsförmåga och reologiska egenskaper samt slutligen injekteringsarbete i fält bidrog till projektets framgång. Deltagare från Besab och Cementa bidrog i de tekniska mötena och fälttesterna då de har lång erfarenhet av både fältverksamheten och materialet i fråga.

Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo), och RISE (internt SK-medel) har finansierat projektet.

## SAMMANFATTNING

Vatteninträning in i underjordisk infrastruktur från omgivande formationer leder till flera miljö-, ekonomi- och hållbarhetsproblem. Tillräcklig spridning av injekteringsbruk i bergssprickor är nödvändig för att erhålla erforderlig tätning av bergssprickorna. Tidigare studier i labb-miljö visade att den dynamiska injekteringen avsevärt förbättrade spridningen av injekteringsbruk i mikrosprickor. Målet med detta projekt är att vidareutveckla den dynamiska injekteringen i fält. Projektet verifierar effektiviteten av den innovativa dynamiska injekteringstekniken genom att anpassa tidigare erfarenheter från laboratoriemiljö till användning i fält. I projektet utvecklades och testades en innovativ distributionsenhet för injekteringsbruk i laboratoriet. Distributionsenheten användes för att tillhandahålla det dynamiska trycket över många borrhål i följd för att förbättra spridningen av injekteringsbruk i bergssprickor och för att minska injekteringstiden. Tekniken har undersökts vidare vid Äspö HRL, användandes distributionsenheten och testanläggningen, för att studera potentiella problem vid injektering och för att visa metodens effektivitet i fälttillämpningar. Den unika erfarenheten erhöles genom att kombinera distributionsenhet och labororiesensorer med ett industriellt injektionssystem, och därefter utföra statisk och dynamisk injektering i fältmiljö. Den innovativa dynamiska injektionsmetoden visade lovande resultat i form av ökat injekteringstryck vid små flödes hastigheter. Den dynamiska injektionsmetoden ökade injektionstrycket, även när injektionsperioden förlängdes från 4 sekunder till 10 sekunder, och perioden utan tryck ökades från 0,25 sekunder till 0,5 sekunder. Dessutom gav fältprovningen förståelse för de olika attributen; såsom tillämpning av de speciella flödes- och tryckregulatorerna för mätning av injekteringsbrukets egenskaper och tillämpning av kontrollventiler för att styra dynamiskt och statiskt tryck under injekteringsanvändningen. Dessutom gav interferensen av tryckfördelningen mellan intilliggande borrhål värdefull förståelse för injektionstekniken. Uppstarten av fältprovningen gav flera insikter som kan användas för att konstruera effektiva distributionssystem av injekteringsbruk för industrin, såsom användning av två flödesmätare för hantering av höga flödes hastigheter från injektionspumpen, användning av flera trycksensorer för att undvika igensättning under injekteringen and att använda injekterings slangar i varierad storlek för att få god kontroll på flödet. Dessutom kan industrin effektivt identifiera ett optimalt injektionssystem under dynamisk injektion genom att använda en vanlig industriell injekteringspump och registrera data under olika intervall, såsom injektionens varaktighet, backventilens öppningstid, injektionens högsta tryck såväl som injektionens lägsta tryck. Till sist, efter framgångsrika tester vid SKB:s Äspö HRL, kan denna teknik tillämpas vid konstruktion av andra kärnbränsleförvar i Sverige. Sammantaget, genom att förbättra effektiviteten för injektering, förväntas kostnaderna för byggandet av underjordiska infrastrukturer minska, vilket resulterar i en ekonomisk fördel för samhället. Tidsbesparingen leder dessutom till minskad resursförbrukning och därmed minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp.

Nyckelord: dynamisk injektering, injektering, injekteringsteknik, fältprovning



## Innehåll

1. INTRODUKTION .....	1
1.1 Huvudmål.....	1
2. ETAPP 1: DESIGN, PRODUKTION, OCH PILOTTEST AV DISTRIBUTIONSENHET I LABORATORIUM .....	3
2.1 Introduktion .....	3
2.2 Råmaterial och förberedelse av injekteringsbruk .....	4
2.3 Uppstart av test .....	5
2.4 Experiment på VALS.....	7
2.5 Resultat .....	8
3. ETAPP 2: EXPERIMENT I FÄLTMILJÖ .....	10
3.1 Introduktion .....	10
3.2 Platsval för fälttestet .....	11
3.3 Borring av borrhål.....	17
3.4 Design och utveckling av distributionsenhet .....	18
3.5 Experiment vid plats NASA 0249A .....	21
3.6 Resultat .....	26
4. SLUTSATSER.....	36
5. FRAMTIDA ARBETE .....	37
6. FÖRFATTARNAS TACK.....	38
7. REFERENSER.....	39
8. BILAGA.....	40
8.1 Testpar 5A-4A .....	41
8.2 Testpar 3A-2B .....	45
8.3 Testpar 1A-4B.....	49

## 1. INTRODUKTION

En viktig parameter för att uppnå den tätning som krävs i underjordisk infrastruktur är tillräcklig spridning av injekteringsbruk i bergsprickor under injekteringsarbetet. Cementbaserade injekteringsbruk används av injekteringsindustrin över hela världen. Vid användning av cementbaserat injekteringsbruk är emellertid filtrering av cementpartiklar som begränsar spridningen av injekteringsbruket ett hinder [1]. Flera år av labbundersökningar och erfarenheter från fältarbete har visat att en av faktorerna som styr injekteringsbrukets filtreringstendens är det applicerade trycket. En tillräcklig ökning av det applicerade trycket minskar filtreringen och förbättrar spridningen av injekteringsbruket. En stegvis tryckökning har visat sig vara fördelaktig [2]. Förbättringen av spridningen av injekteringsbruk genom att använda ett högfrekvent oscillerande tryck demonstrerades i [3]. Ytterligare förbättring erhöles genom att använda ett högfrekvent oscillerande tryck med stor amplitud överlagrat på ett underliggande tryck, vilket gjorde att även ett cementbruk med låg vattenhalt penetrerade väl genom artificiella 100 µm-sprickor [4]. Även om de erhållna resultaten var lovande har den dynamiska injekteringen med högfrekvent oscillerande tryck ännu inte industrialiserats på grund av den begränsade effektiviteten och snabba förlusten av de högfrekventa oscillationerna längs en spricka.

I motsats till de tidigare försöken med högfrekvent oscillerande tryck, introducerades i en ny studie [5] en lågfrekvent rektangulär tryckimpuls som ett nytt alternativ för att öka effektiviteten i metoden och minska spridningen av tryckimpulserna längs en spricka. Resultaten visade signifikant förbättring på upp till 11 gånger i den totala volymen av upptag av injekteringsbruk i 30–43 µm-spalter [5]. Förlusten av tryckstötarna undersöktes sedan i en betydligt längre konstgjord fraktur, 4 m i längd och med öppningar på 10–230 µm [6]. Experiment visade förbättringar på upp till 11 gånger i den totala volymen av injekteringsbruk som passerade genom öppningar <70 µm jämfört med experiment med statiskt trycktillstånd.

Syftet med detta arbete är att vidareutveckla dynamisk injektering i fältmiljö, maximera effektiviteten av den nya tekniken och anpassa vår senaste kunskap och erfarenheter från laboriemiljö till tillämpningar i fält för att implementera den nya tekniken i tunnelbyggen.

### 1.1 Huvudmål

Projektet har två huvudmål:

1. Verifiering av metodens effektivitet i kontrollerat tillstånd i laboratorium (Ettapp 1: Design, produktion och pilottest av distributionsenheten)
2. Demonstration av metodens effektivitet i fält för parterna (Ettapp 2: Fältexperiment i Äspö HRL).

Utifrån målen är projektet uppdelat i två etapper: Etapp 1: Design, produktion och pilottest av distributionsenheten och Etapp 2: Fältprovning av distributionsenheten vid Äspö HRL. Resultatet är att öka spridningen av injekteringsbruk i mikrosprickor  $\leq 70 \mu\text{m}$  och minska tiden för injekteringsarbetet genom en kombination av två injektionstekniker: dynamisk injektering och injektering av flera borrhål.

Detta projekt består därför av två olika etapper. I etapp 1 utvecklades en distributionsenhet för att ändra det statiska trycket hos en vanlig injekteringspump till dynamiskt tryck och för att kunna förse flera borrhål i sekvens samtidigt, för att öka spridningen av injekteringsbruket och minska injekteringstiden.

Enheten testades först i laboratorium för att säkerställa dess prestanda och för att undersöka de övergripande aspekterna av systemet (som förväntat) innan den testades i fältmiljö. I etapp 2 undersöktes metodens effektivitet i full skala vid Äspö HRL med olika tryckuppsättningar och med olika borrhålsarrangemang. Hydrologitester utfördes för att studera sprickbenägenhet och kopplingar mellan borrhålen. Därefter injekterades utvalda borrhål med den dynamiska och statiska metoden medan flödes hastighet och tryck av injekterat injekteringsbruk mättes. I följande avsnitt är forskningsarbetet uppdelat i två etapper.

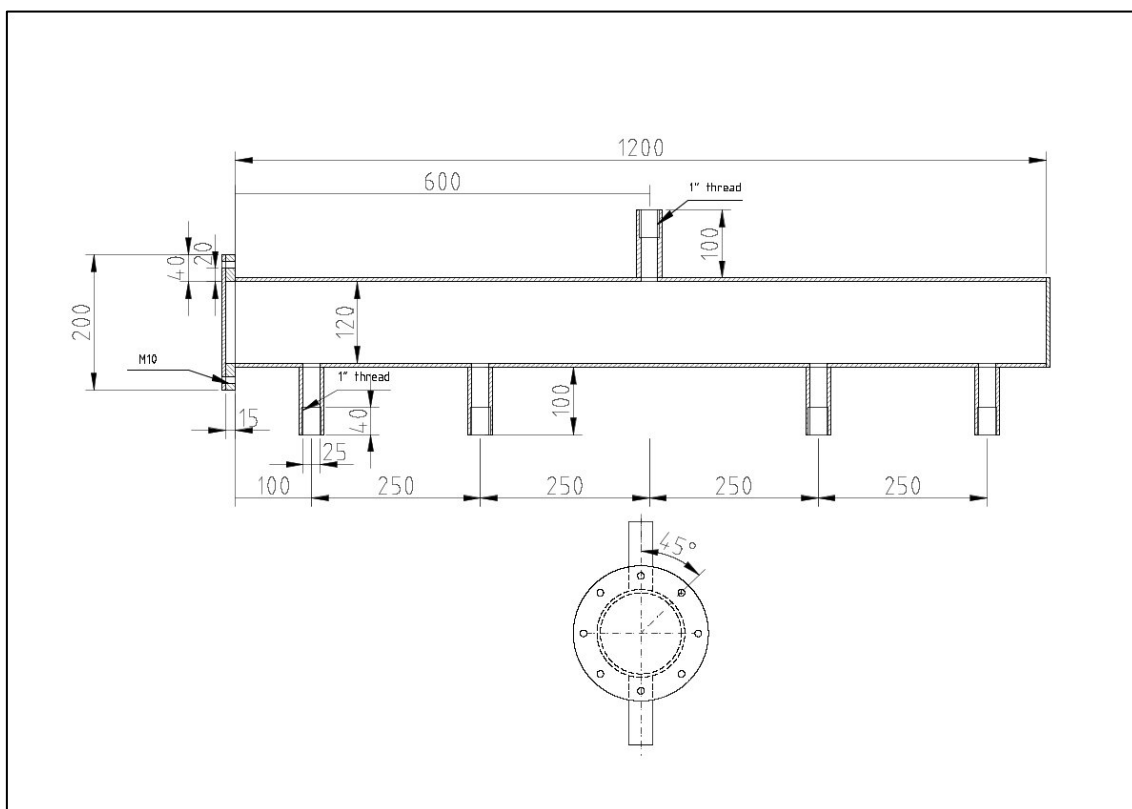
Detaljerna för varje steg beskrivs i följande avsnitt.



## 2. ETAPP 1: DESIGN, PRODUKTION, OCH PILOTTEST AV DISTRIBUTIONSENHET I LABORATORIUM

### 2.1 Introduktion

Syftet var att bygga en tryckdistributionsenhet för att omvandla det statiska trycket från en vanlig injekteringspump till ett programmerbart dynamiskt tryck. Det var också för att kunna fördela det applicerade trycket mellan flera borrhål i sekvens. Avsikten var att kombinera två tekniker, dynamisk injektering och injektering med många borrhål, för att samtidigt öka spridningen av injekteringsbruket och minska injekteringstiden. Pilottester utfördes i laboratorium för att säkerställa att systemet fungerade korrekt innan testning i fält. En preliminär utformning av distributionsenheten presenteras i Figur 1. Den visar det enda inloppet från pumpen och de fyra utlopp för injekteringen av borrhålen. Antalet aktiva utlopp beror på flera faktorer såsom tunneldiameter, geologiska och hydrogeologiska förhållanden i marken, och dessa i sin tur styr avståndet mellan injekteringsborrhålen.



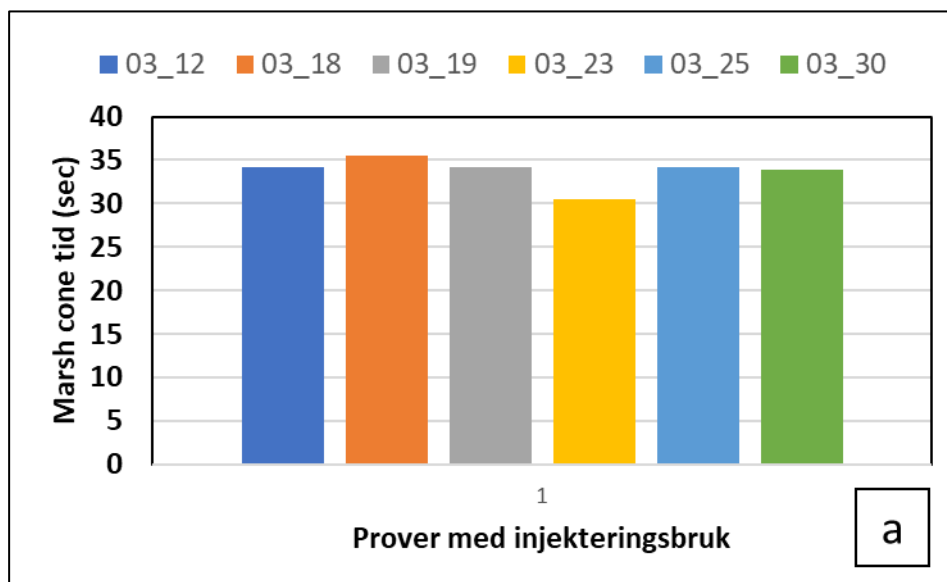
**Figur 1.** Design av distributionsenhet för injektionsbruk.

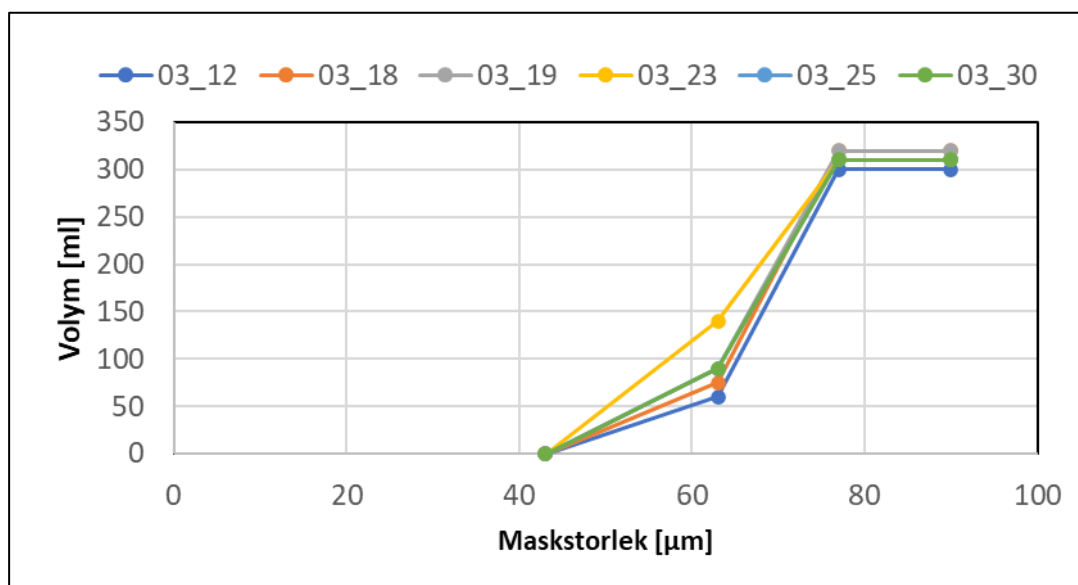
När systemet används för dynamisk injektering, under topperioden i varje utlopp, låter tryckventilen injekteringsbruket strömma genom borrhålet. Sedan, under tryckfallet, leder respektive borrhålskoppling till tanken med injekteringsbruk genom en bypassventil som omedelbart sänker trycket (ungefär till noll) och orsakar ett lätt återflöde.

I denna metod förväntas de delvis igensatta förträngningarna öppnas igen för ytterligare penetration på grund av erosionen av filterkakorna. Detaljerna för laborietesterna för dynamisk och statisk injektering beskrivs i följande avsnitt.

## 2.2 Råmaterial och förberedelse av injekteringsbruk

Injekteringsbruket blandades efter ett recept bestående av cement, vatten och supermjukgörare. Cementtypen var CEM I 525N–SR 3 LA, där 95% av materialet har en partikelstorlek  $\leq 30 \mu\text{m}$ , vilket vanligtvis är den typ av cement som används för injekteringsbruk i Sverige. Förhållandet vatten till cement var 0,8 och dosen av supermjukmedel var 0,5 viktprocent cement. Injekteringsbruket blandades med en högsjjuvnings-VMA-blandare med dispersionsskiva. Denna blandare säkerställer lämplig spridning av injekteringsbrukskomponenterna, och den applicerar också liknande skjuvbelastningar som kolloidala blandningsanordningar som används i fält. Under sammanblandningen av råmaterial sattes hastigheten till 2000 rpm under 1 minut och ökades sedan till 10 000 rpm under ytterligare 6 minuter. För laborietester sattes maximal satsstorlek till 12 liter. Blandningsproceduren utformades utifrån de tidigare projekten för att uppnå god spridning av materialet i injekteringsbruket. Efter varje blandning kontrollerades kvaliteten av injekteringsbruket med hjälp av marsh cone testing (Figur 2a) och test av filterpump enligt standard SS-EN 445 [7] (Figur 2b). Som framgår av figur 2 uppnåddes en marsh cone-tid ( $\leq 35$  sek) under de erforderliga specifikationerna. På samma sätt visade filterpumpstestning (se figur 2b.) att injekteringsbruket lyckades passera genom  $63 \mu\text{m}$ .

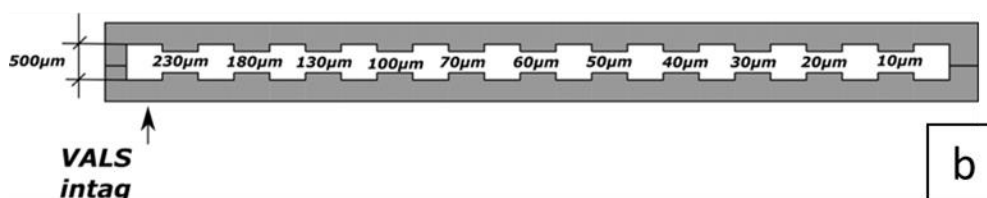




**Figur 2.** Testresultat för 6 experiment med injekteringsbruk utförda i laboratorium: a) Marsh cone-tid (b) Test med filterpump.

### 2.3 Uppstart av test

För att simulera sprickbildningen i berget användes den unika, så kallade Variable Aperture Long Slot (VALS) [6] testrigen (Figur 3a). Den består av två 4-meters stålplåtar med riktade öppningar i sjunkande storlek från 230 µm till 10 µm (Figur 3b). VALS:en har också kammare med storleken 500 µm före och efter varje öppning för att simulera inkonsekvensen i sprickbredden hos det verkliga berget. Längden på öppningarna och 500 µm-kamrarna är 180 mm, förutom för 10 µm-öppningen, som har en längd på 90 mm följt av en 500 µm-kammare med en längd på 40 mm. Inloppet till VALS är placerat före 230 µm-öppningen (Figur 3b).



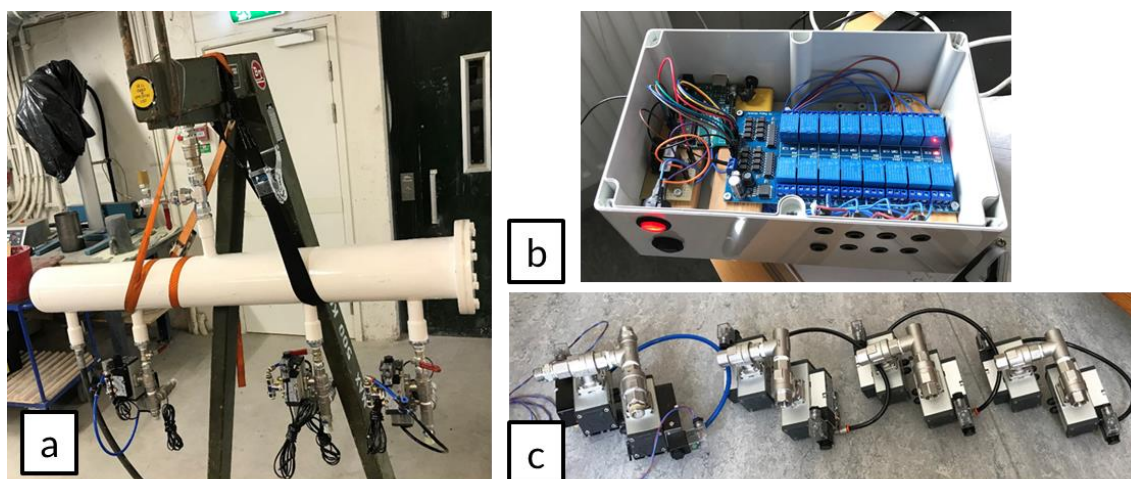
**Figur 3.** Etablering av test i laboratorium: a) Variable Aperture Long Slot (VALS) b) Skiss över öppningarnas storlek och fördelning.

Distributionsenheten för injekteringsbruk (Figur 4a) konstruerades med fyra utflöden för injekteringsbruk så att det skulle vara möjligt att injektera fyra borrhål åt gången under fälttestet. Under laborietestet användes dock ett utflöde. I laborietester användes även distributionsenheten för injekteringsbruk (Figur 4a) som en 12-liters behållare för injekteringsbruket, vilken fylldes på direkt efter blandning. Det bör noteras att laborietestets varaktighet definierades av kapaciteten hos distributionsenheten.

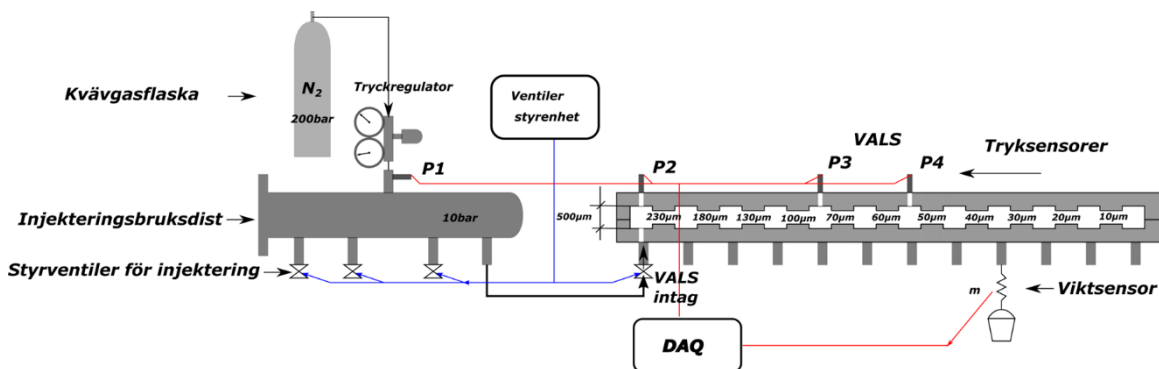
Trycket i injekteringsbruket skapades med hjälp av komprimerad kvävgas ansluten till distributionsenheten genom tryckregulatorn. Samtidigt reglerades tryckprofilen för injekteringsbruket (antingen dynamiskt eller statiskt) som flödade till VALS-inloppet av kontrollventiler (Figur 4c). Ventilerna för injekteringsbruket mottog signaler från valvens styrenhet (Figur 4b), som bestod av ett Arduino-kretskort med öppen källkod kopplat till ett reläblock som med hjälp av ett datorprogram kan ställa in öppnings- och stängningstider för de pneumatiska ventilerna. Figur 5 visar en schematisk skiss över den kompletta uppställningen inför testning i laboratorium, som bestod av VALS ansluten till distributionsenheten för injekteringsbruk.

Testet övervakades med hjälp av trycksensorer och en sensor för massa (Figur 4c). När testet pågick mättes injekteringsbrukets massa som flödade in i hinken med hjälp av en viktsensor, som var placerad under öppningsventilerna i VALS:s nedre del (Figur 3).

Öppningsventilerna öppnades och stängdes manuellt (för hand) under testet. Trycksensorn användes för att registrera tryck av gas och injekteringsbruk. Signalerna från vikt- och trycksensorerna registrerades av datainsamlingssystemet (DAQ) (Figur 5).



**Figur 4.** Annan typ av experimentsuppställning: a) Distributionsenhet för injekteringsbruk b) Kontrollenhet för tryckluftsventiler bestående av ett Arduino-kretskort och reläblock c) System av tryckluftsventiler.

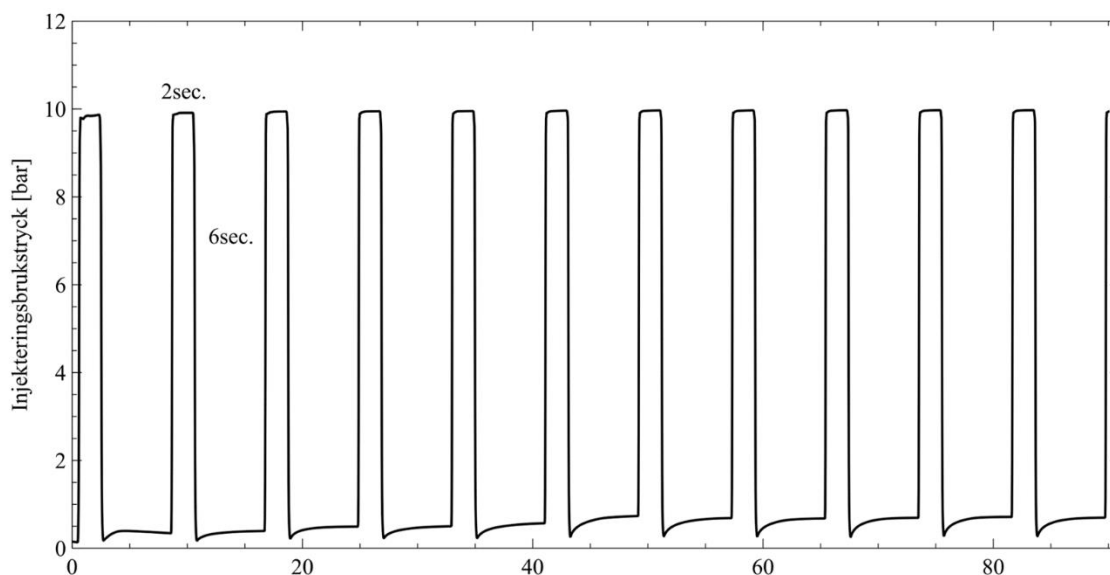


**Figur 5.** Schematisk testuppställning: kvävgastank ansluten till distributionsenheten genom tryckregleringsventil. VALS, mass- och trycksensorer är anslutna till DAQ-systemet och kontrollventiler för injekteringsbruk är anslutna till styrenheten.

## 2.4 Experiment på VALS

Under testning var öppningstiden för ventilerna placerade under VALS, som varierade från 60 till 180 sek, starkt beroende av den observerade flödes hastigheten. I alla tester påbörjades mätningarna från en liten öppning (40  $\mu\text{m}$ ) och fortsatte mot den största öppningen (180  $\mu\text{m}$ ). Under dessa tester fick även endast en ventil stanna i öppet tillstånd åt gången. Längre mätningar (~180 sek) utfördes på de mindre öppningarna, 40-70  $\mu\text{m}$ ,

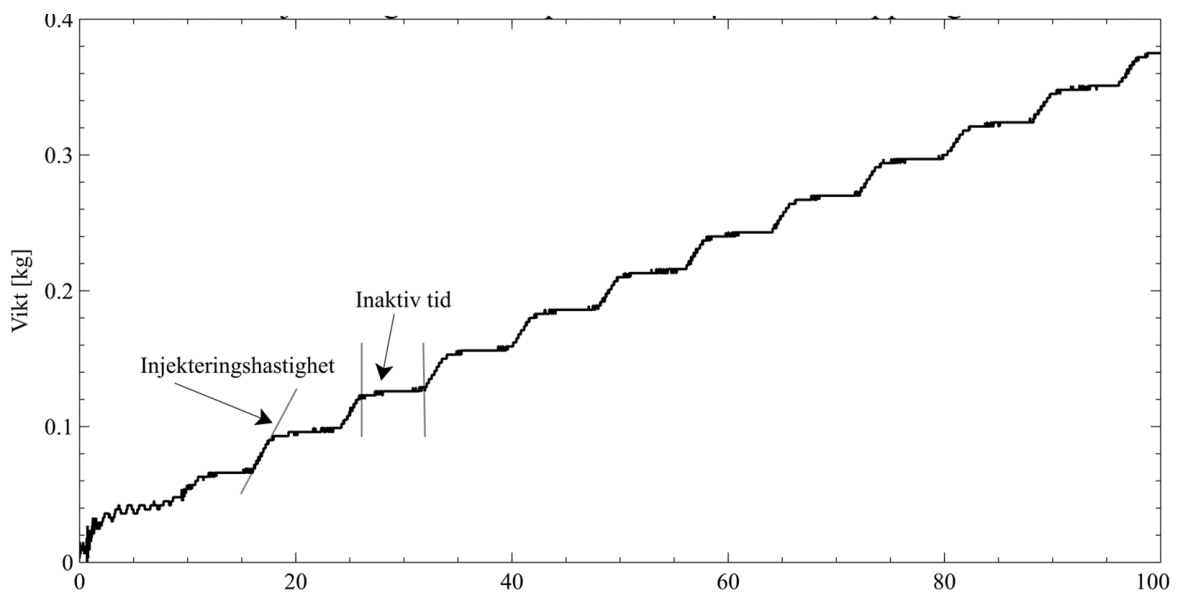
medan kortare mätningar (~60 sek) utfördes på de större öppningarna, 100-180  $\mu\text{m}$ . Totalt sex tester utfördes: tre för dynamisk injektion och tre för statisk injektion. Det visade sig att för de större öppningarna flödade injekteringsbruket bra i både den dynamiska och den statiska injektionsregimen, därför användes en kortare mättid. Tryckpulserna för det dynamiska injektionsprogrammet varade två sekunder efter att ventilen för injekteringsbruket (Figur 4c) öppnades, detta för att minska trycket i injekteringsbruket i VALS ner till ~1 bar (Figur 6). Sedan förblev den inaktiv i 4–6 sekunder och därefter upprepades cykeln (Figur 6).



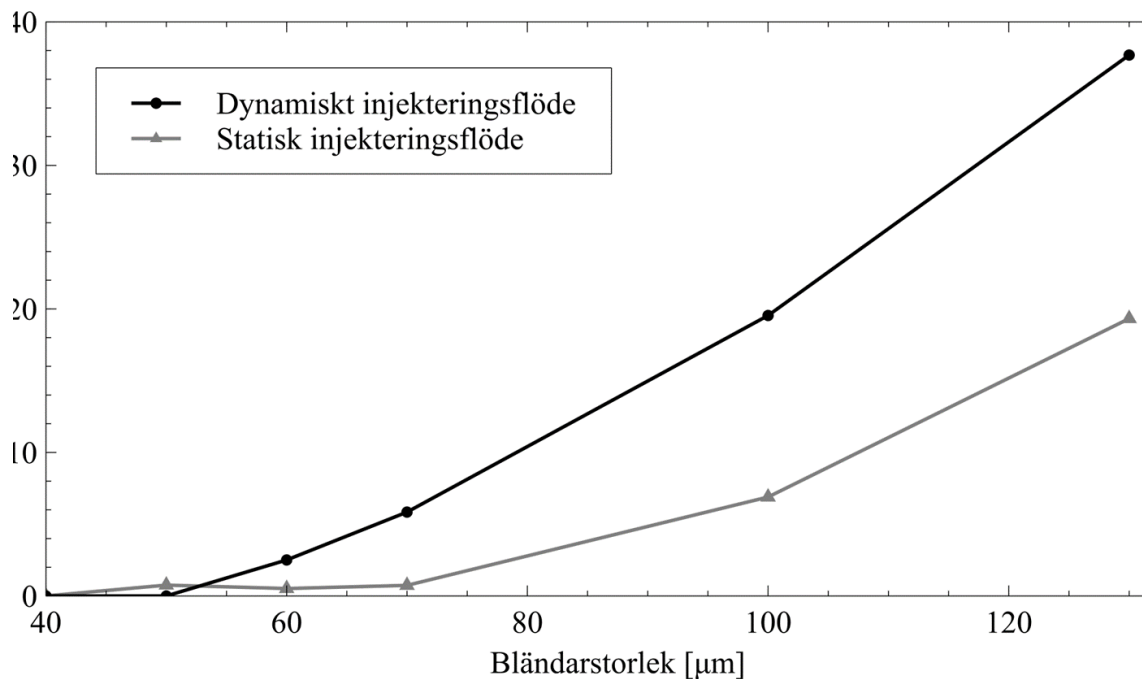
**Figur 6.** Injekteringsbrukets tryckprofil vid inloppet till VALS under ett dynamiskt trycktest.

## 2.5 Resultat

Figur 7 visar en typisk flödesprofil för injekteringsbruk under ett dynamiskt injektionsprogram. Grafen består av en lutande del som visar injekteringshastigheten och en horisontell del som visar perioden utan tryck. Vid analys av datan togs viloperioden bort och den genomsnittliga flödeshastigheten beräknades. Totalt utfördes 6 laborietester: tre för dynamisk injektion och tre för statisk injektion. Medelvärden för uppmätt flödeshastighet för injekteringsbruket beräknades för varje öppningsstorlek (Figur 8). Resultaten visar en ökad flödeshastighet för det dynamiska injektionsprogrammet av injekteringsbruk jämfört med det statiska. De viktigaste resultaten är för öppningarna på 60  $\mu\text{m}$  och 70  $\mu\text{m}$ , där injekteringsbruket för det statiska injektionsprogrammet visade nästan inget flöde eller att flödet stoppades snabbt på grund av bildning av filterkaka (Figur 8), medan injekteringsbruket under det dynamiska injektionsprogrammet fortfarande flödade.



**Figur 7.** Typexempel på ett diagram som visar injektionsbruk som passerar genom en 100 µm-öppning under dynamiskt tryck. Den illustrerar hur aktiv injektion övergår till inaktiv tid när injektionstrycket går från 0 till 1 bar.



**Figur 8.** Graf som visar genomsnittlig injektionshastighet för både dynamisk och statisk injektion.



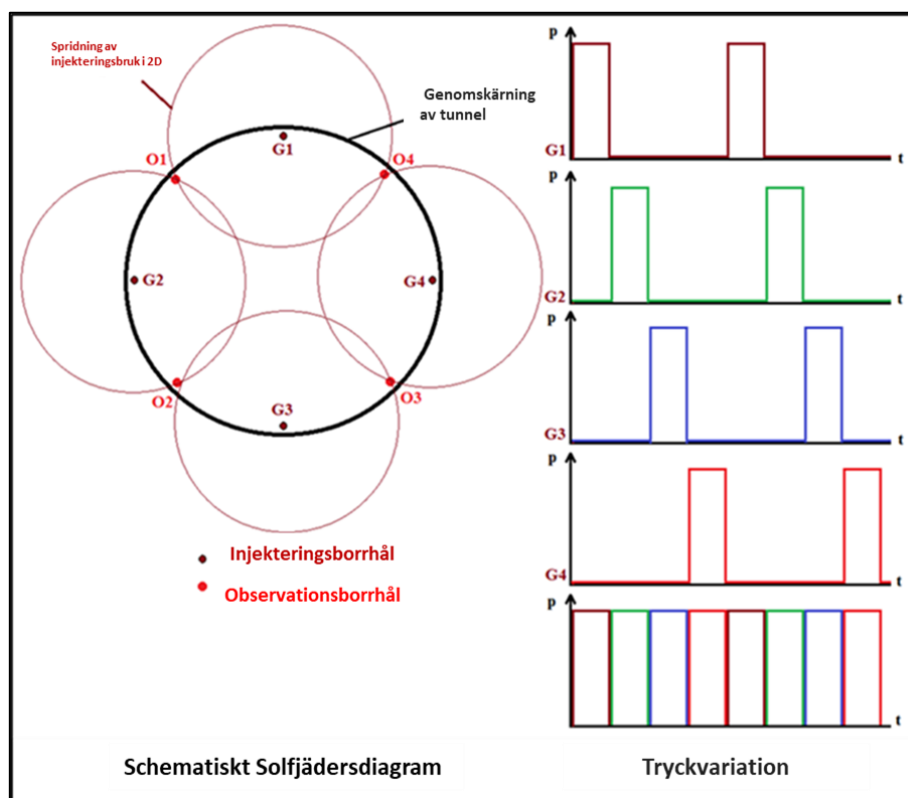
### **3. ETAPP 2: EXPERIMENT I FÄLTMILJÖ**

#### **3.1 Introduktion**

Effektiviteten av den nya tekniken undersöktes i full skala vid Äspö HRL, där tunnelplatsen valdes utifrån kunskap om de geologiska och hydrogeologiska förhållandena. Sökandet efter en plats i detalj utfördes i nära samarbete med projektpartners och ett par potentiella platser med god permeabilitet och ordentliga spricknät valdes ut. Figur 9 visar ett schematiskt solfjädersdiagram över fyra injekteringsborrhål, G1-G4, och fyra observationsborrhål, O1-O4. I förslaget nämndes observationsborrhålen men i själva provningen borrades inte observationsborrhålen på grund av begränsat utrymme. I Figur 9 representerar de bruna cirklarna spridningen av injekteringsbruket i 2D runt varje injekteringsborrhål. Graferna över den förväntade tryckvariationen i varje borrhål presenteras också i Figur 9 (till höger). Detta tryckvariationsdiagram antyder att injekteringspumpen kan arbeta utan tryckförändring där det tillhandahållna trycket fördelar sig mellan injekteringsborrhålen. Detta schematiska solfjädersdiagram med fyra injekteringsborrhål är ett exempel, men fler borrhål kan läggas till och injekteras samtidigt. För att undersöka metodens effektivitet när det kommer till att kontrollera filtreringen användes tryck- och flödesmätningar.

Detaljerna i fälttestningen för dynamisk och statisk injektering beskrivs i följande avsnitt.





**Figur 9.** Schematiskt solfjädersdiagram över fyra injekteringsborrhål, G1-G4, och fyra observationsborrhål, O1-O4, tillsammans med grafer över tryckvariationerna i varje borrhål.

### 3.2 Platsval för fälttestet

De tidigare projekten med fälttester tydde på att val av tunnelplats är en avgörande och utmanande uppgift i projektet. Om tunnelplats väljs vid pågående byggplats, kan fältexperimentet störa den vanliga produktionsrutinen och experimentet kan störas av byggtrafik (t.ex. borring av närliggande berg). Testets varaktighet kan också vara mycket beroende av produktionsschemat på byggplatsen.

Efter diskussion med arbetsgruppen för projektet beslutades därför att kontakta SKB:s Äspö Hard Rock Laboratory (Figeholm, Sverige) och efter deras positiva svar fortsatte planeringen av fältprovningen med ytterligare steg: 1. undersökning av potentiella provplatser, 2. slutval av provplats, 3. borring av borrhål och 4. den slutgiltiga provningen.

#### 3.2.1 Platssökning vid Äspö HRL

Äspö HRL har många tunnlar som ligger på olika djup. För inledande undersökning av lämplig plats övervägdes olika aspekter såsom berg med ledande sprickor, tillgänglighet för borring och injektering. Ett besök genomfördes vid Äspö HRL för att inspektera 8 möjliga platser (Tabell 1). En kort beskrivning för varje plats ges i följande avsnitt.

**Tabell 1.** Lista över provplatser vid Äspö HRL.

Nummer	Platsens namn vid Äspö HRL	Platsens altitud från ytan (m)
1	TAS05	400
2	TAS 04	400
3	Elevator	220
4	NASA 0748	n/a
5	REDOX (TASR)	n/a
6	NASA 0408A	n/a
7	TASM	n/a
8	NASA 0249A	~30

#### 3.2.1.1 TAS05 (djup: -400m)

Den första troliga kandidaten var plats TAS05 (Figur 10a). Den här platsen har några ställen med sprucket berg, som synliggjordes genom vattenläckage från sprickor. Dock, skulle denna plats vara svår att använda för borrning och senare injektering eftersom det tidigare har använts sprutbetong på denna plats.



**Figur 10.** De besiktigade platserna runt ~400 m: a) plats TAS05 b) plats TAS 04 generell överblick c) plats TAS 04 som visar vatteninträngning på tunnelgolvet.

### 3.2.1.2 TAS 04 (djup: -400m)

Den andra platsen, TAS04 (Figur 10b), var också belägen på ~400 m djup. Det var synlig vatteninträngning på tunnelgolvet (Figur 10c). Vattentrycket mättes vid ett förborrat borrhål och det visade sig vara ~4 bar. Detta tryck kan dock vara missvisande eftersom borrhålet bara var ett par meter långt.

### 3.2.1.3 Hiss (djup: -220m)

Denna plats var belägen nära ventilationsschakten och hissen (Figur 11a). Efter okulär besiktning hittades inga större områden med vattenläckage. Den här platsen var också opraktisk för injekteringsarbete på grund av hissens placering.

### 3.2.1.4 NASA 0748 – Pumpstation (okänd altitud)

Denna potentiella plats låg framför Äspötunnelns pumpstation. Sprickorna sågs genom visuell inspektion och vattenläckage var tydligt synbar (Figur 11b-c). Vattentrycket uppmättes vid pumpstationens vägg och det visade sig vara ~9 bar.

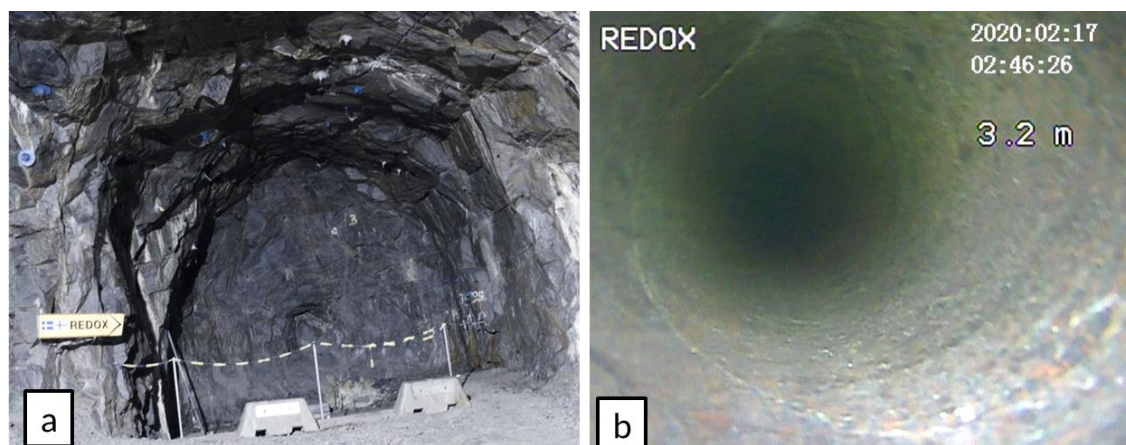


**Figur 11.** Två av de inspekterade platserna a) hissområde med ventilationsschakt b) plats NASA 0748 med vatteninträngning vid bergväggen c) plats NASA 0748 med vatteninträngning vid ett annat ställe.

### 3.2.1.5 REDOX (TASR)

En annan lovande plats var REDOX (Figur 12a), eftersom den tidigare har använts för grundvattenanalysexperiment. Vattentrycket mättes vid ett förborrat borrhål, och det visade sig vara ~5,5 bar. Dessutom inspekterades borrhålen med en fiberoptisk kamera och sprickor observerades i längsgående och tvärgående riktning (Figur 12b).





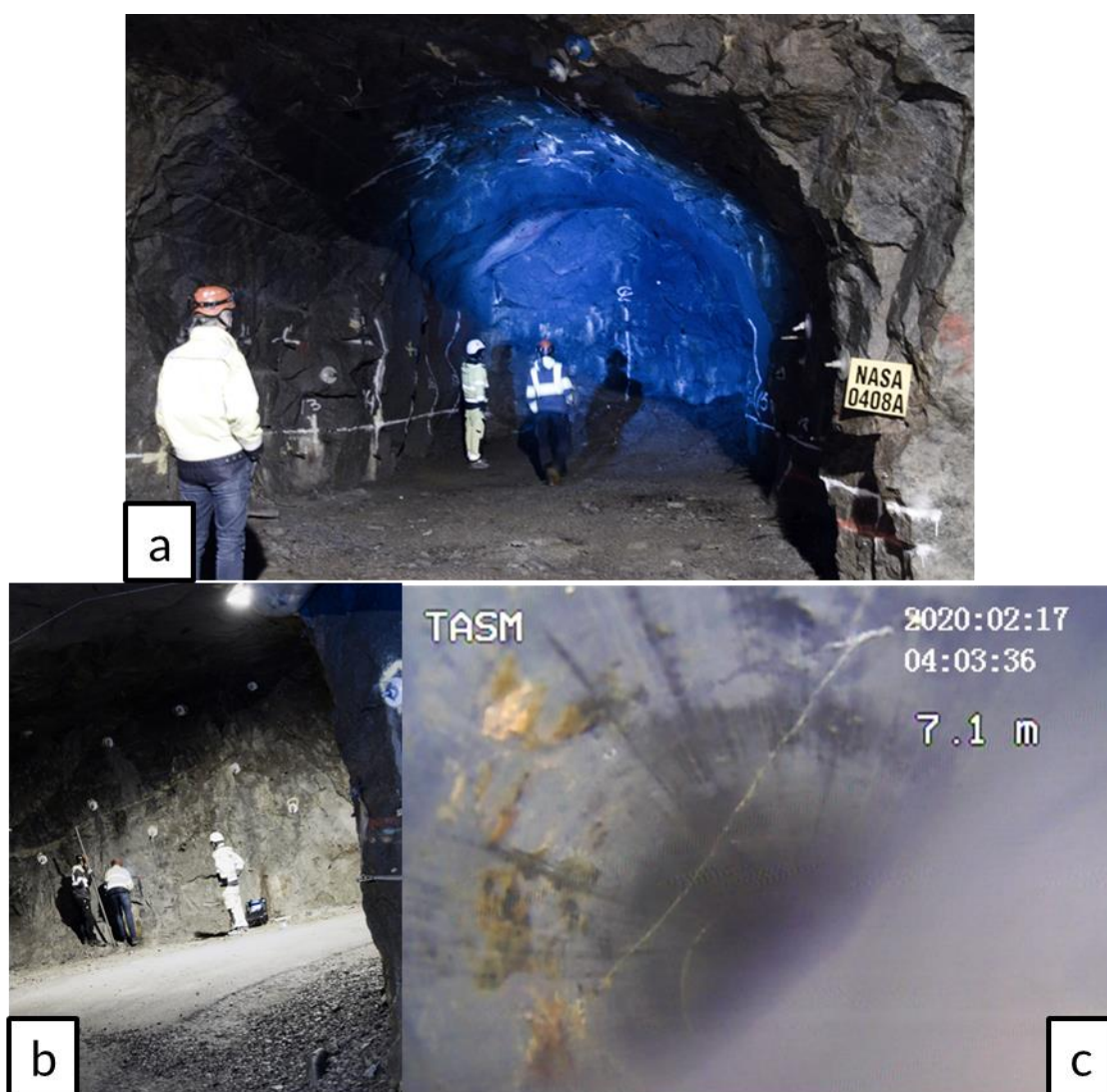
**Figur 12.** REDOX (TASR): a) översikt över platsen b) sprickor i ett borrhål.

#### 3.2.1.6 NASA 0408A

För denna plats (Figur 13a), observerades inga större sprickor eller vattenläckage. Det kan bero på tidigare utförda injekteringsexperiment på denna plats då sprickor fylldes med injekteringsbruk.

#### 3.2.1.7 TASM

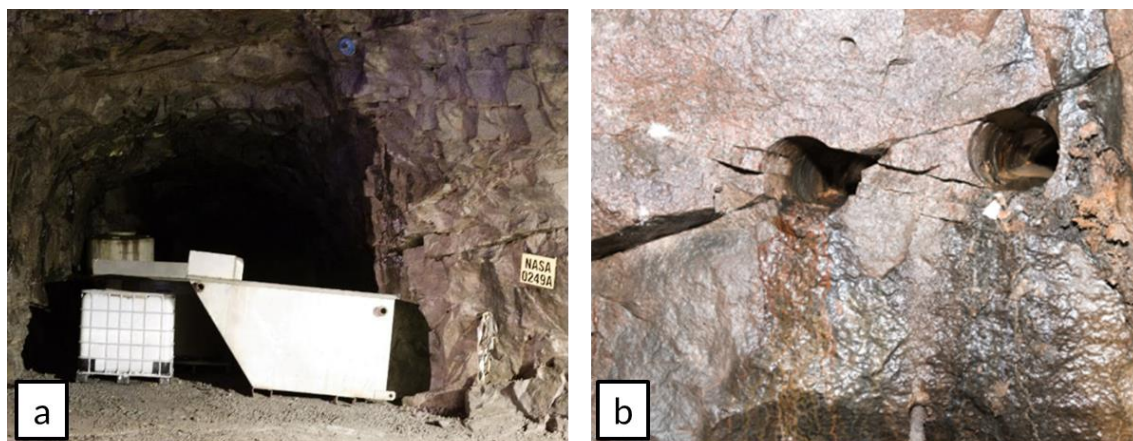
På denna plats (Figur 13b) observerades vattenläckage vid väggen. Vattentrycket mättes vid ett förborrat borrhål, och det visade sig vara ~5,5 bar. Dessutom inspekterades det mycket djupa borrhålet (~45 m) med en fiberoptisk kamera och sprickor observerades i längsgående och tvärgående riktning (Figur 13c).



**Figur 13.** Inspekterade platser: a) NASA 0408A b) TASM c) sprickor i borrhål vid TASM.

### 3.2.1.8 NASA 0249A (djup: -30m)

Plats NASA 0249A (Figur 14a) var belägen på ~30 m och det var den plats som var närmast tunnelinfarten. Bergväggen på denna plats visade många sprickor med ytor som fuktats av vatteninträngning (Figur 14b), emellertid observerades inga större läckage, men detta kan bero på lågt vattentryck vid 30 meters djup.



**Figur 14.** a) översikt över plats NASA 0249A b) observerat sprucket berg med tecken på vatteninträning.

### 3.2.2 Val av slutlig plats

Två potentiella platser valdes ut efter analys av tidigare inspektionsresultat tillsammans med geologisk data för platserna som tillhandahållits av Äspö HRL. De många faktorerna beaktades vid valet av platsen.

- REDOX (Figur 12):
  - Den visade god vatteninträning vid tidigare borrade borrhål.
  - Det uppmätta trycket var vid tidigare borrar borrhål ~5 bar vattentryck.
  - Sprickor observerades i borrhålet.
  - Det fanns tillräckligt med utrymme för borrning och injektering.
  - Negativ aspekt – experiment med grundvattenanalys pågick på platsen.
- NASA 0249A (Figur 14):
  - Den ligger nära ytan, så det krävs lågt injekteringstryck för injekteringsbruk.
  - Många sprickor observerades på bergväggens yta.
  - Tecken på vatteninträning indikerade att sprickor kan vara ledande.

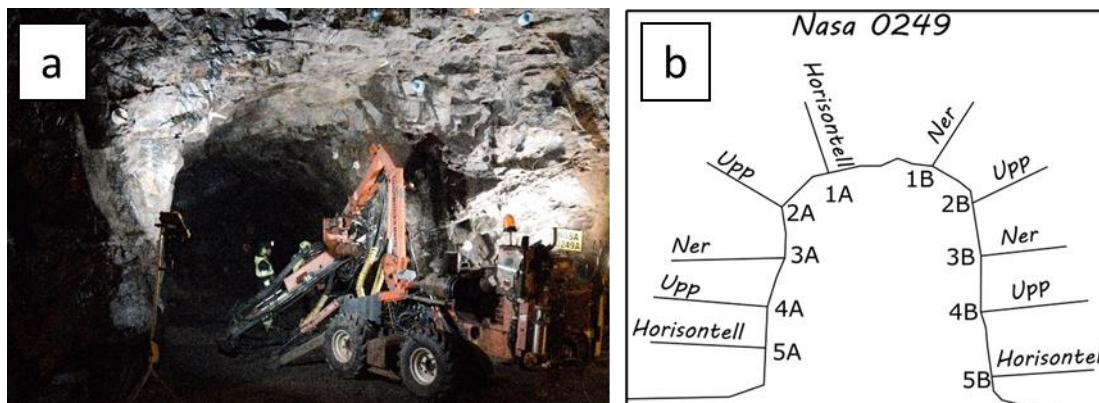
Efter diskussion med Äspö HRL slopades REDOX-platsen för att undvika störningar i det pågående grundvattenkemiska analysexperimentet. Sålunda, baserat på alla ovanstående överväganden, valdes NASA 0249A för fältprovingen.

### 3.3 Borrning av borrhål

Efter val av plats – NASA 0249A – anlätades en borrentreprenör från Äspö HRL. Baserat på tillgängligt utrymme borrades 10 borrhål (Figur 15a). Dessa 10 borrhål var jämnt fördelade längs nischens (NASA 0249) väggar: 5 borrhål på höger sida och ytterligare 5 borrhål på vänster sida. Borrhålen placerades ~1,5 m upp från tunnelns marknivå för att underlätta installationen av packers. Diametern på borrhålen var 56 mm och längden på varje borrhål var 10 meter.



Borriktningen begränsades delvis av borrhutrustningen, men det var fortfarande möjligt att någorlunda justera borrhålens lutning (uppåt, horisontellt eller nedåt) för att öka möjligheten för borrhålen att skära igenom bergsprickor (Figur 15b).



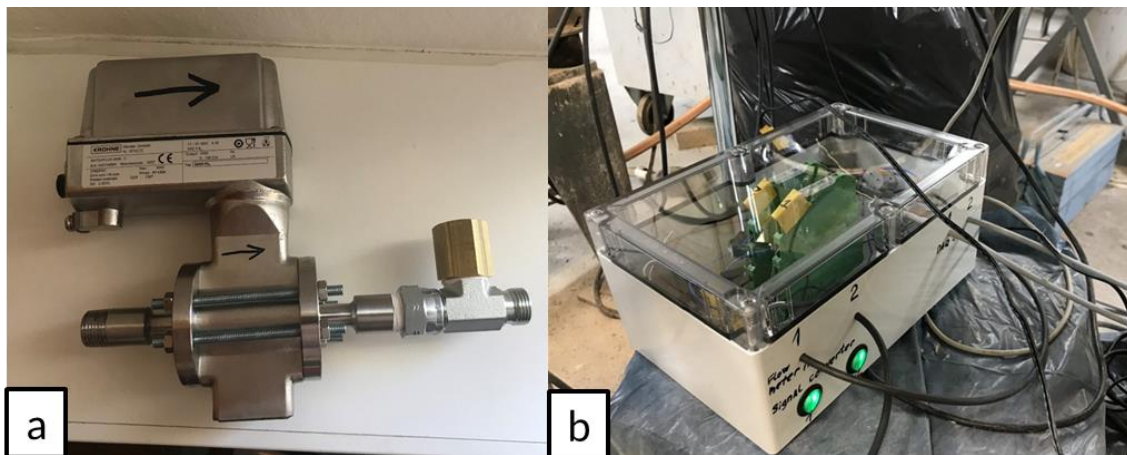
**Figur 15.** Borring av borrhål vid vald plats i Äspötunneln: a) borrhutrustningen vid platsen b) plan över borrade borrhål där lutningen på borrhålen är markerad.

### 3.4 Design och utveckling av distributionsenhet

#### 3.4.1 Utveckling av testuppsättning

För att mäta flödet av injekteringsbruk från distributionsenheten krävdes lämpliga flödesmätare. Sålunda förvärvades två flödesmätare (Batchflux 5500C, KROHNE Messtechnik GmbH, Tyskland) för testningen (Figur 16a). Dessa flödesmätare är elektromagnetiska flödesmätare (EMF) för roterande eller linjära fyllningsmaskiner. Tack vare det unika keramiska mätröret har de magnetiska mätarna den bästa repeterbarheten och stabiliteten över lång tid. En flödesmätare tilldelades för att mäta flöde för den dynamiska injektionen, och en annan användes för den statiska injektionen. Det visade sig att flödesmätarna inte var kompatibla med insamlingssystemet för testdata (DAQ) som fanns tillgängligt på laboratoriet. Signalen från flödesmätarna var frekvens-output, medan volt-output behövdes för DAQ-systemet. För att lösa problemet konstruerades en speciell signalomvandlingsmaskin (Figur 16b), och den bestod av två signalomvandlare tillsammans med strömförsörjning.



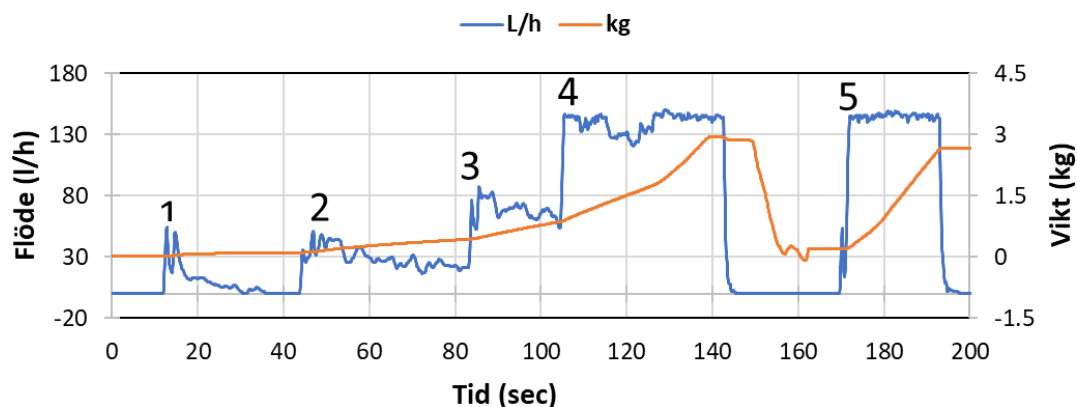


**Figur 16.** Uppställning av flödesmätare: a) flödesmätare Batchflux 5500C b) signalomvandlingsmaskin för att omvandla flödesmätarens frekvens-output till volt-output som DAQ-systemet kan läsa.

För att kontrollera flödesmätningens tillförlitlighet testades flödesmätning- och registreringsystemet i laboratoriet. Det enkla testet utformades så att kranvattenslangar kopplades till flödesmätarna (Figur 17) och vattnet från flödesmätaren leddes till hinken som hängde på viktsensorn. Massförändringen registrerades tillsammans med uppmätt flödes hastighet (Figur 18). Under testningen öppnades kranventilen i 5 steg, vilket gradvis ökade vattnets flödes hastighet (Figur 18).

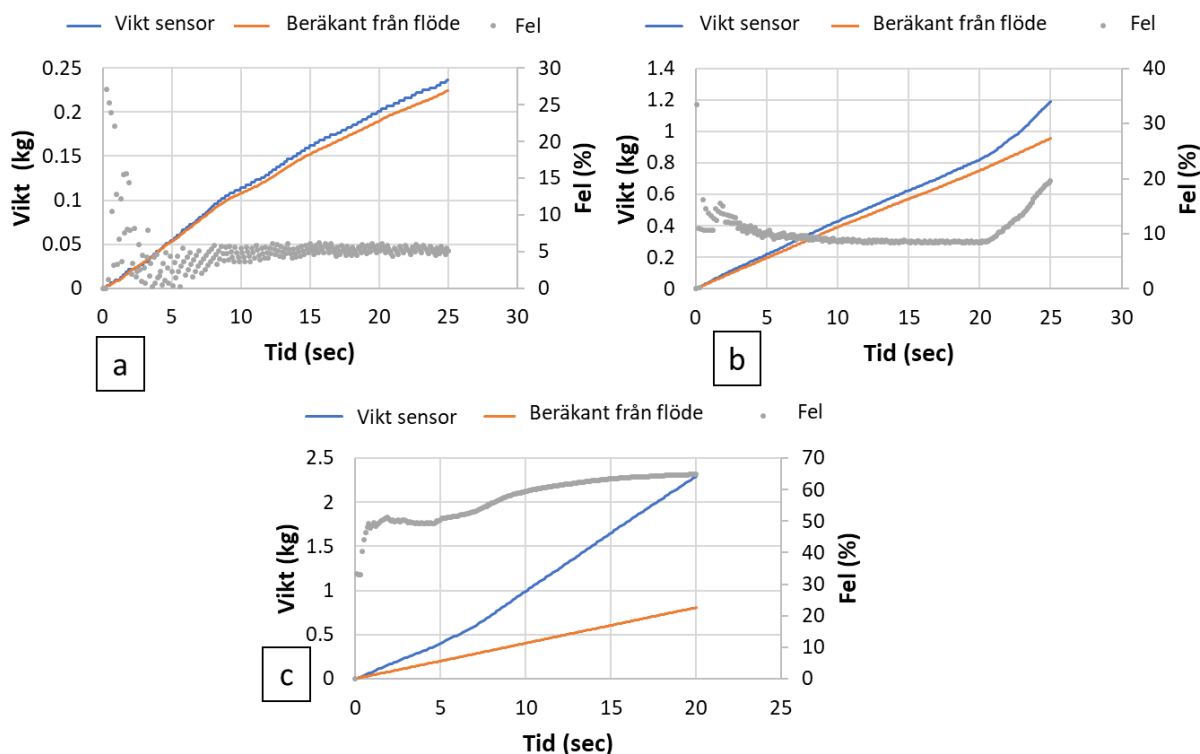


**Figur 17.** Kranvatten användes för att testa om signalomvandlingsmaskinen gav korrekta avläsningar till DAQ-systemet.



**Figur 18.** Flödes hastigheten mättes med flödesmätaren och vattnets massförändringar mättes med en viktsensor.

Från den uppmätta flödes hastigheten (mätt med flödesmätare) beräknades vattenmassan och jämfördes med vattenmassan som uppmättes med viktsensor inom samma tidsram (Figur 19a-b-c). Skillnaden mellan de uppmätta och de beräknade massvärdena i flödesmätningen ansågs vara felaktiga värden och visas i Figur 19. Som framgår av Figur 189 a-b, vid flöden lägre än 150 l/h, var de felaktiga värdena betydligt lägre, men vid hög flödes hastighet ( $\geq 150$  l/h), ökade skillnaden signifikant vilket resulterade i ett högt fel (Figur 19c). Efter analysen av flödesresultaten ansågs det att signalkonverteringsenheten fungerade som avsett. Dessutom visade den flödesmätarnas begränsning, och den föreslog att flödes hastigheten för injekterings bruket under fälttestet skulle begränsas till mindre än 150 l/h.



**Figur 19.** Den uppmätta vattenmassan och den beräknade vattenmassan från uppmätt flöde. Prickarna visar felaktiga värden (skillnad mellan uppmätt och beräknad flödes hastighet): a) medelflöde på 34 l/h b) medelflöde på 171 l/h c) medelflöde på 412 l/h.

### 3.5 Experiment vid plats NASA 0249A

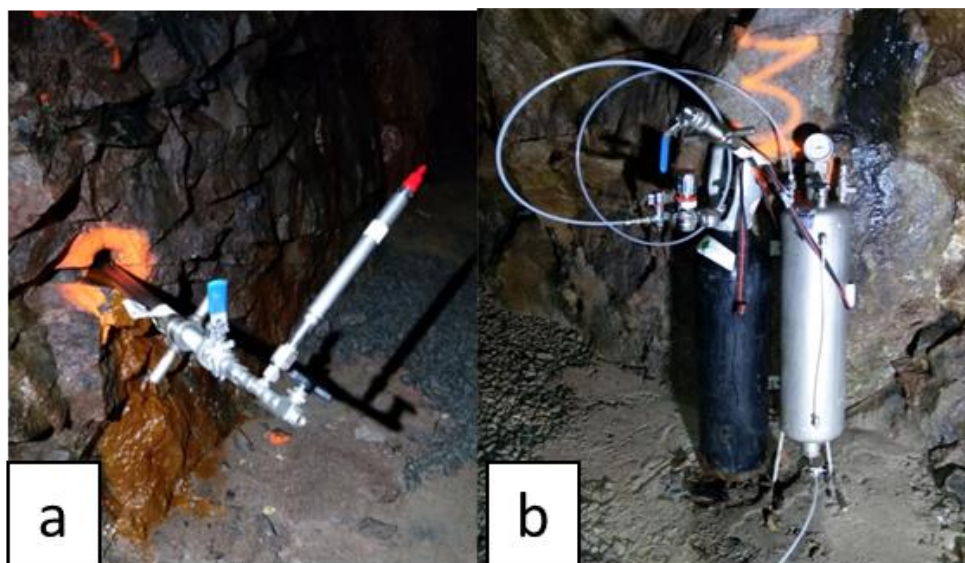
#### 3.5.1 Inträngningstest för grundvatten (Hydrotest I)

Det första Hydrotestet utfördes i alla 10 borrhålen för att mäta flödes hastigheten för inträngande vatten i borrhålen. Testet utfördes enligt följande:

- Packarna (Figur 20a) installerades i varje borrhål minst 2–3 dagar före provstart för att uppnå god återhämtning av trycket (tryckuppbyggnad) i borrhålet.
- Loggaren för tryck installerades på packaren vid borrhålet. Loggaren startades några minuter innan borrhålet öppnades för att lagra data var 5:e sekund.
- Efter denna initiala installation öppnades varje borrhål och flödet registrerades under 30 minuter.
- Under flödesperioden mättes flödet manuellt med klocka och mätkärl. Borrhålet stängdes och trycket som byggdes upp registrerades.
- Återhämtningstiden var minst 30 minuter (en del av borrhålen krävde många timmars återhämtning).

### 3.5.2 Injektionstest med vatten (Hydrotest II)

Hydrotest II utfördes efter rekommendationer från arbetsgruppen för projektet. Testet utfördes för att undersöka eventuella sprickförbindelser mellan borrhålen. En kväveflaska användes för att skapa tryck i kärlet, som innehöll vatten, genom en tryckregulator (Figur 20b). Under testet injekterades vattnet i borrhålet med 10 bar. På grund av friktion i anslutningsrör och sprickor i borrhålen minskade dock det faktiska trycket och stabiliserades runt 4–5 bar under vatteninjektionen. När vatten injekterades i ett borrhål registrerades tryckförändringen i de andra 5 borrhålen. På så sätt testades 6 borrhål.



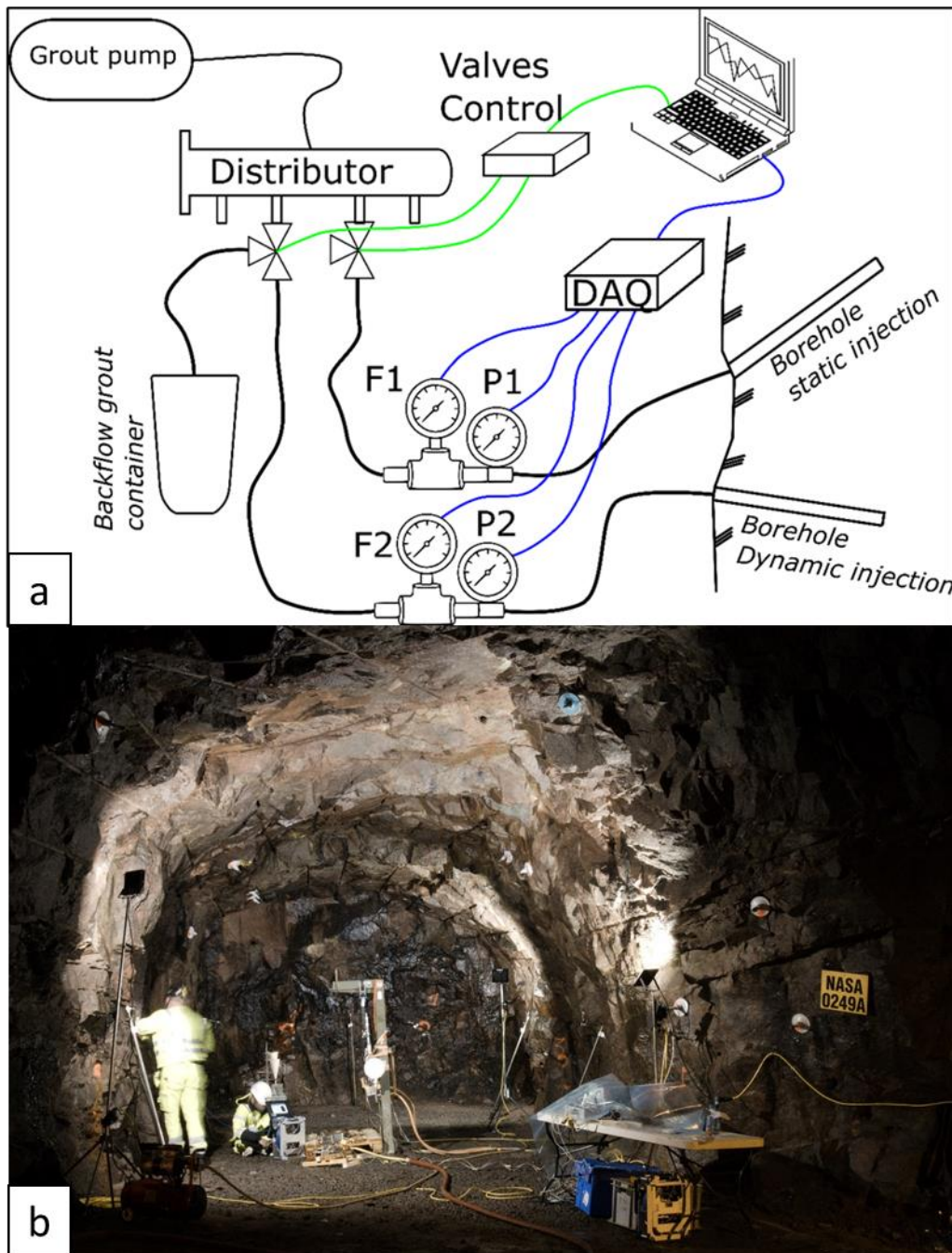
**Figur 20.** Hydrotest II uppställning a) packer med tryckmätare b) kväveflaska för att skapa tryck, en tryckregulator, och kärl med 10 l vatten.

### 3.5.3 Testuppställning för fältprovning vid plats NASA0249A

Testuppställningen bestod av ett injektionssystem och ett datainsamlingsystem (Figur 21). Injektionssystemet bestod av tre nyckelkomponenter: injektionspump (injektionspump från BESAB), distributionsenhet (utvecklad i laboratorium), och en kontrollbox med tryckluftsventiler. På samma sätt bestod datainsamlingsystemet av olika huvudkomponenter: DAQ-modulen (datainsamlingsystem), flödesmätare, tryckmätare samt bärbar dator (för dataregistrering och visualisering). Anslutningsschemat visas i Figur 21a.

Hela uppställningen fungerade på följande sätt: injekteringstrycket skapades med ventilsystem V1 och V2. Värdena V1 och V2 styrdes av ett ventilstyrsystem. Flödes hastigheten för injekteringsbruk mättes med flödesmätare F1 och F2, medan trycket för injekteringsbruket mättes med trycksensorer P1 och P2. Slutligen insamlades signaler från sensorerna av datainsamlingsmodulen (DAQ) och registrerades i realtid med en PC.



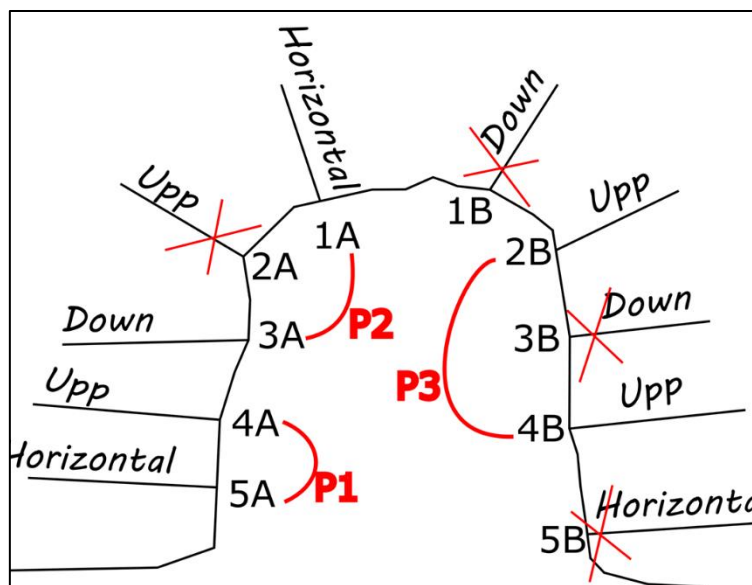


**Figur 21.** Uppställning av experiment i fältmiljö a) schematisk testuppställning: injekteringsbrukspump ansluten till distributionsenheten b) färdigmonterad testuppställning vid NASA 0249A.

Som framgår av Figur 21, var den slutliga provuppställningen i fält annorlunda än den som beskrevs i den initiala projektbeskrivningen. Det var planerat att injicera 4 borrhål med dynamisk injektion samtidigt, men planen ändrades till två borrhål på grund av flera faktorer såsom borbudget, utrymmesbegränsning och dyra flödesmätare. Således

beslutades att i stället injicera två borrhål samtidigt: en dynamisk och en statisk injektion. På samma sätt, efter diskussion med arbetsgruppen för projektet, beslutades det att hoppa över installationen av inspektionsschakten på grund av begränsad budget och svårigheter med att utvärdera i det begränsade utrymmet. Efter den första installationen anslöts injekteringspumpen till distributionsenheten med anslutningsslangar med 1" i diameter (Figur 21a).

För att utföra injektionen krävdes val av lämpliga borrhål. Sålunda användes *grundvattnets inträngningshastighet* från Hydrotesterna som riktmärke för val av injektionsborrhål och borrhålen grupperades i tre par (Figur 22 and Tabell 2).



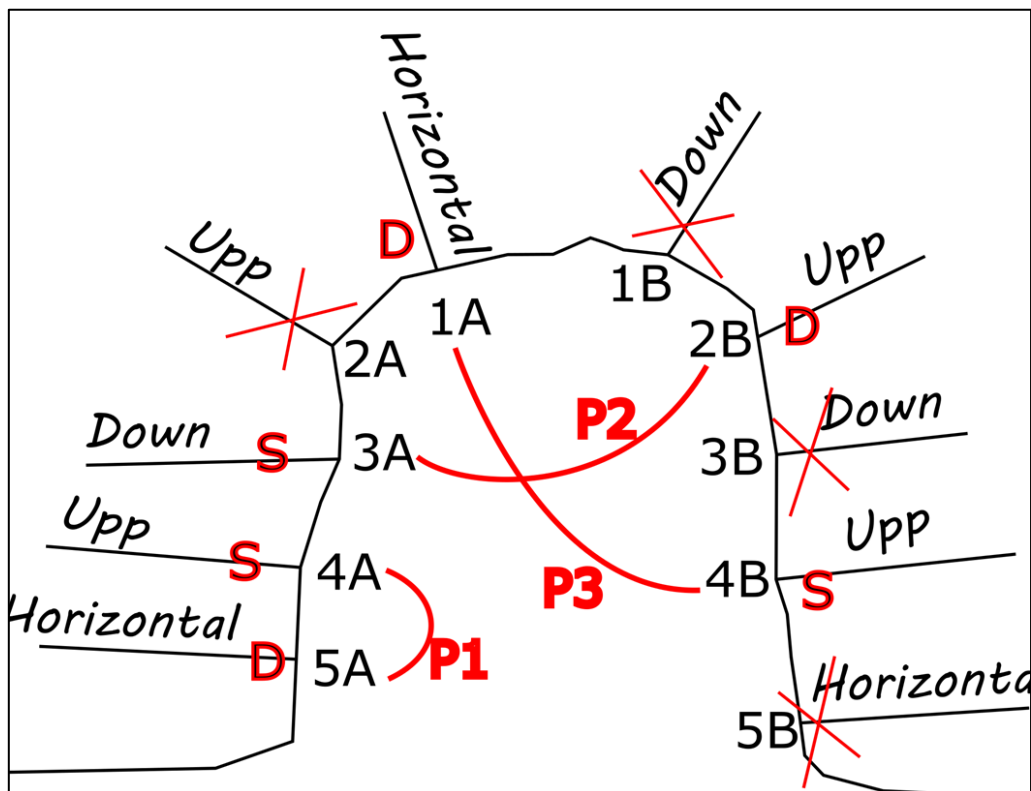
**Figur 22.** De ihopkopplade borrhålen och planerad sekvens av borrhålsinjektion.

**Tabell 2.** The ihopkopplade borrhålen enligt inträngningsflödet av grundvattnet i borrhålen.

Par	Borrhål	Flödes hastighet (l/min)	Typ av injektion
P1	5A	1.32	<i>Dynamic</i>
	4A	0.72	Static
P2	1A	0.54	Static
	3A	0.34	<i>Dynamic</i>
P3	2B	0.14	<i>Dynamic</i>
	4B	0.12	Static

Under fältprovningen påbörjades injektionen av injekteringsbruk med hjälp av planen beskriven i Figur 22. Men under injektionen av par P1 (Figur 23), visades möjlig interferens av tryckpulser från den dynamiska injektionen till den statiska injektionen

mellan angränsande borrhål. Under experimentets gång beslutades det sålunda att planera om injektionssekvensen för borrhålen för de återstående paren P2 och P3 (Figur 23 and Tabell 3). Paren omfördelades på ett sådant sätt så att varje par bestod av borrhål på motsatta sidor för att minska eventuell interferens under injektion. Dessutom beslutades att injicera ett borrhål i taget: börja med dynamisk injektion och därefter statisk injektion.



**Figur 23.** Den uppdaterade provplanen efter utfört test på par P1. Borrhål från motsatta tunnelsidor kopplades ihop för att reducera risken för interferens. Bokstaven S står för statisk injektion och bokstaven D står för dynamisk injektion.

**Tabell 3.** Den uppdaterade ihopkopplingen av borrhål efter injektering i P1.

	Statisk injektion	Dynamisk injektion	Flödes hastighet för vattentest [l/min]
Par 1	4A		0.72
		5A	1.32
Par 2	3A		0.345
		2B	0.14
Par 3	4B		0.12
		1A	0.54

### 3.6 Resultat

#### 3.6.1 Inträngningstest för vatten (Hydrotest I)

Flödes hastigheten från borrhålet sattes som riktmärke vid val av borrhål.

Baserat på resultat från vatteninträngningen visade endast 6 borrhål mätbart vattenflöde (Tabell 4) och valdes ut för ytterligare testning (markerade i grönt). Fyra borrhål kasserades på grund av låg flödes hastighet ( $\leq 0,1$  l/min), vilket tyder på mindre sprickor i borrhålet.

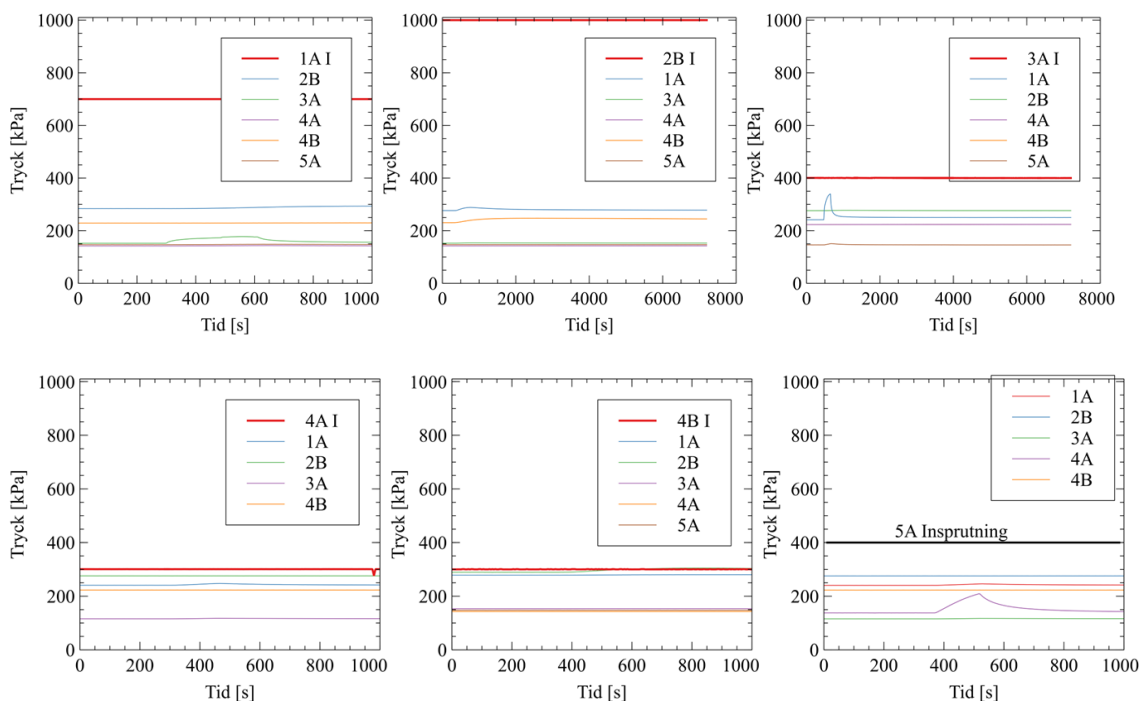
**Tabell 4.** Resultat för alla borrhål i Hydrotest I.

Namn på borrhål	Sida i tunneln	Riktning	Tryck (kPa) i borrhål	Flödes hastighet (l/min) från borrhål	Selektion	Hydraulisk konduktivitet (l/min)/(m <sup>2</sup> )
5A	Vänster	Horisontell	141	1.32	Ja	0.87
4A	Vänster	Uppåt	135	0.72	Ja	0.48
1A	Vänster	Horisontell	232	0.54	Ja	0.36
3A	Vänster	Neråt	120	0.345	Ja	0.23
2B	Höger	Uppåt	285	0.14	Ja	0.09
4B	Höger	Uppåt	227	0.12	Ja	0.08
1B	Höger	Neråt	270	0.012	Nej	0.01
3B	Höger	Neråt	270	0.0076	Nej	0.01
2A	Vänster	Uppåt	110	0.005	Nej	0.00
5B	Höger	Horisontell	102	0.0017	Nej	0.00

#### 3.6.2 Vatteninjektion för att testa sprickans sammankoppling mellan borrhål (Hydrotest II)

Figur 24 visar att det finns en möjlig interaktion mellan borrhål 5A och 4A (vilket också observerades under injekteringsarbetet). Det finns även en möjlig stark interferens mellan borrhål 3A och 1A. Det visade sig att vissa mindre störningar observerades mellan 2B och 1A samt 2B och 4B. För att undvika störningsproblem mellan borrhålen (1A, 3A, 2B och 4B) utformades testprotokollet för att gruppera borrhålen i injektionsparen (Figur 23).

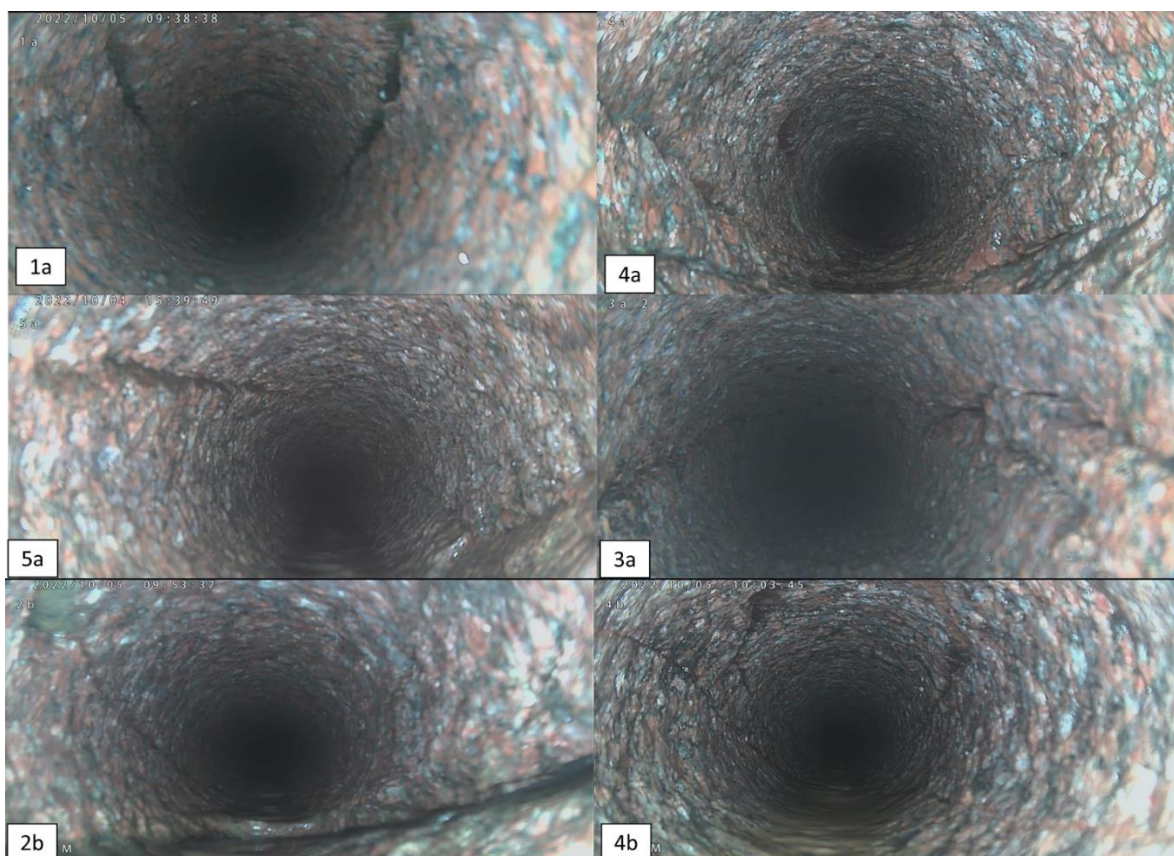




**Figur 24.** Tryck i borrhålen i Hydrotest II: namnet på det injekterade borrhålet är markerat med "In" och den tjocka linjen representerar vattentrycket och ingången till det injekterade borrhålet.

### 3.6.3 Borrhålsinspektion med kamera

Före injektionen inspekterades de 6 utvalda borrhålen med en fiberoptisk kamera (figur 25). Kamerainspektionen visade att de flesta spruckna områden i borrhålen var belägna i början av borrhålen. Dessutom hade alla borrhål sprickor nästan parallellt med borrhålets borriktning. Baserat på resultat från kamerainspektionen beslutades det att packare skulle placeras på minsta möjliga djup för att undvika blockering av de spruckna områdena i början av borrhålen så mycket som möjligt.



**Figur 25.** Borrhålsinspektionen och sprickor i de 6 valda borrhålen.

### 3.6.4 Resultat för injekteringsbruk

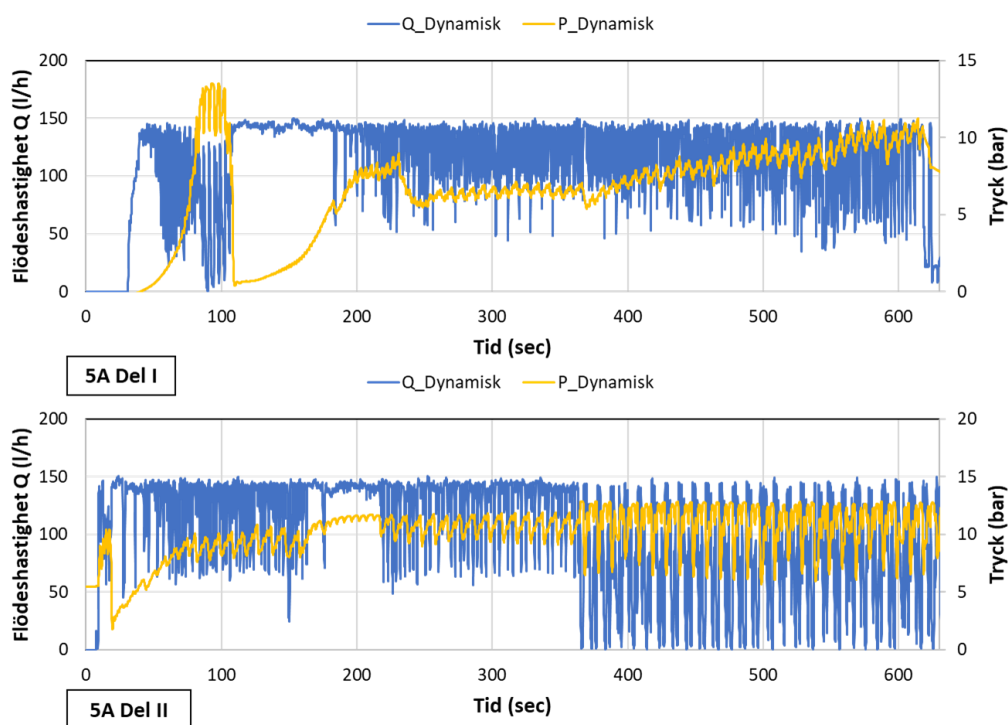
Följande avsnitt visar resultaten. Dessutom har grafer i full storlek lagts till som bilagor.

#### 3.6.4.1 Par P1 (5A-4A) Injekteringsresultat

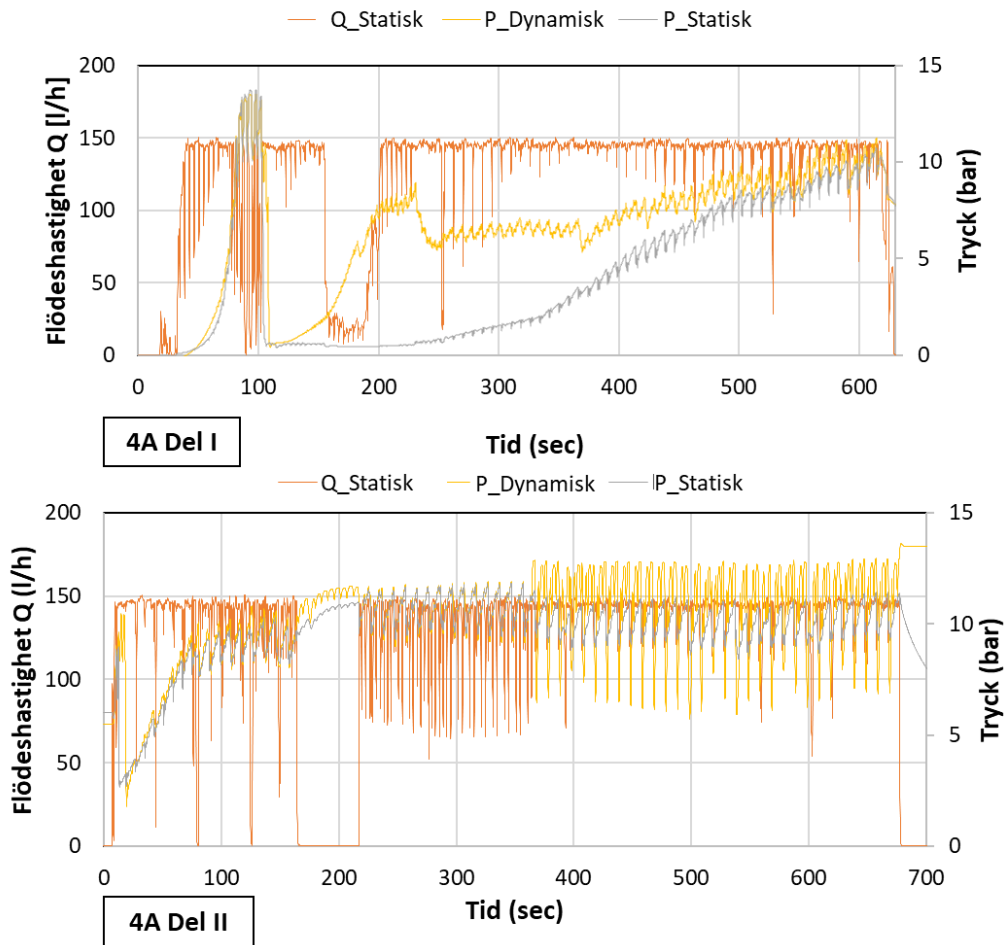
Borrhålen 5A och 4A var det första paret att testas och de injekterades samtidigt: 5A med dynamisk injektion och 4A med statisk injektion. Injektionen varade ungefär 20 minuter, därför presenteras graferna i två delar (Figur 26 för 5A, och Figur 27 för 4A). Under injektionen förekom tekniska stopp (för blandning av ny injekteringsbruk och tömning av injekteringsbruk från återflödesbehållare). Stoppen kan ses i injekteringsbrukets tryck som då sjunker till 0–2 bar.

Som man kan se från 4A-diagrammet (Figur 27), avbröts det statiska trycket och flödet av tryckförändringar i angränsande borrhål, 5A, vilket också bekräftade Hydrotest II resultat (Figur 26). Tryckinterferensen genom injektionssystemet med slangar bör ha varit minimal, eftersom injektionsventilen vid tryckfall i 5A var stängd, vilket hindrade trycket från att falla i distributionsenheten och i borrhålet 4A för statisk injektering. Ändå förändrades inte flödes hastigheten över tid i borrhålen, vilket visar att borrhålsöppningarna var ganska stora och att flödet av injekteringsbruk nådde mätningens gränser för flödesmätaren (se avsnitt 3.4.1).

Under injektionen vid 5A, del II (Figur 26, från tid 650s) visade emellertid den dynamiska injektionen sin effektivitet. Vid denna tidpunkt modifierades injektionsprofilen genom att förlänga injektionstiden till 10 sekunder (från 4 och 6 sekunder) och genom att förlänga backventilens öppningstid för att få större tryckfall (se större tryck- och flödesfall av injekteringsbruk i Figur 26). Detta förbättrade injektionstrycket vid borrhålsinloppet från maximalt 11 bar till maximalt 13 bar. Det bör noteras att trots störningar i trycket vid statistiskt borrhål 4A var injektionstrycket i allmänhet lägre med 1–2 bar jämfört med dynamiskt injektionstryck vid 5A.



**Figur 26.** Dynamisk injektering i borrhål 5A Del I och Del II.

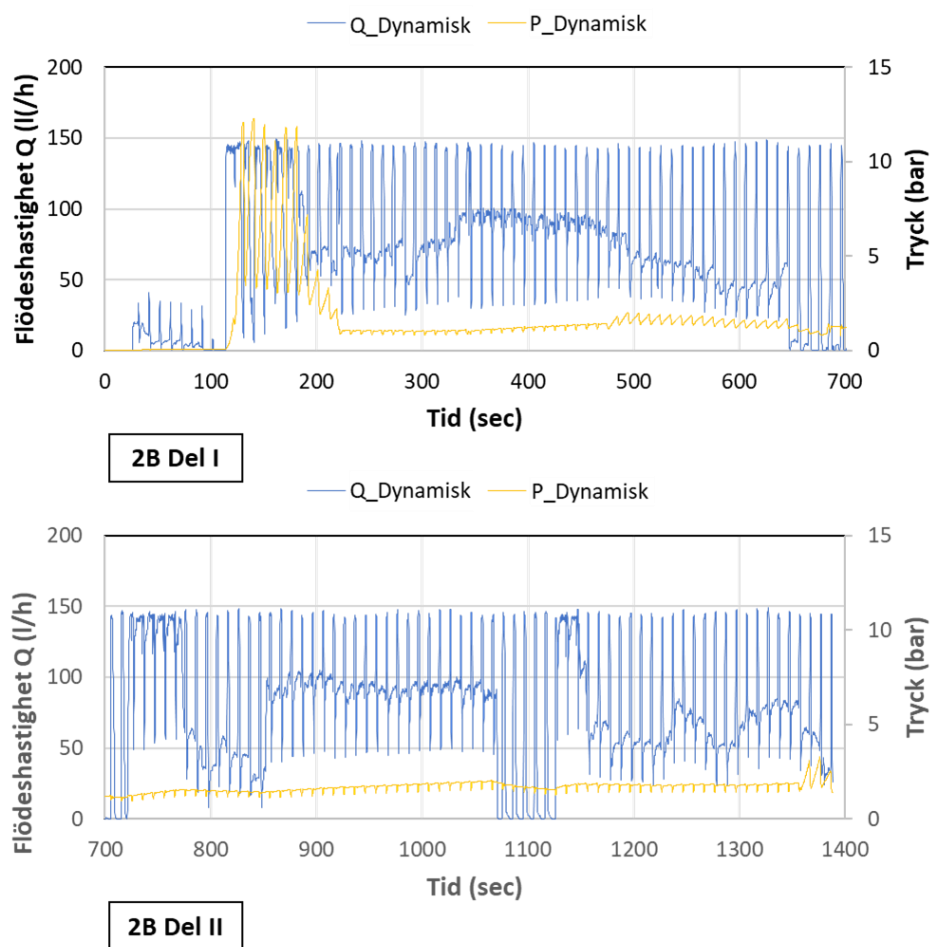


**Figur 27.** Statisk injektion i borrhål 4A Del I och Del II.

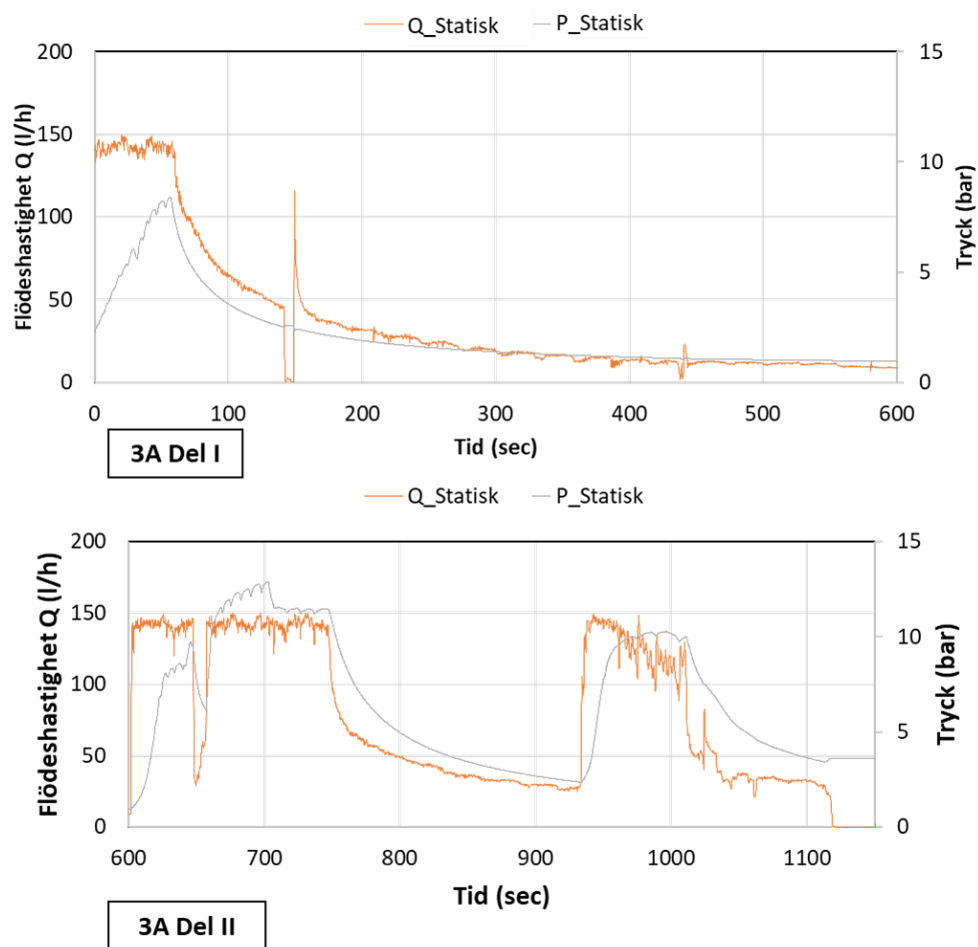
#### 3.6.4.2 Par P2 (3A-2B) injekteringsresultat

Även om alla sensorer rengjordes innan testet startade, är det möjligt att trycksensorn för dynamisk injektion för 2B sattes igen av partiklar av injekteringsbruk eftersom tryckavläsningarna sjönk nästan konstant till 1 bar (Figur 28), vilket försvårade slutsatsen för dynamisk injektion för par P2. Flödes hastigheten för varje test reglerades manuellt med hjälp av ventiler på distributionsenheten. På så sätt hölls det maximala flödet under flödesmätarens mätgränser.

Flödes hastigheten vid båda borrhålen visade inga reduktionstecken (förutom vid manuell reglering) och testet avbröts efter att ha pågått ~20 minuter eller efter att injekteringsbruk uppträdde på den spruckna bergytan. Detta antydde återigen att sprickor i borrhålet hade tillräckligt stora öppningar för konstant flöde.



**Figur 28.** Dynamisk injektion i Borrhål 2B Del I och Del 2.



**Figur 29.** Statisk injektion i 3A Del I och Del II.

#### 3.6.4.3 Par P3 (1A-4B) injekteringsresultat

I detta test sattes inte båda trycksensorerna igen och fungerade normalt. Den manuella regleringen av injekteringsbrukets flöde med ventiler bidrog också till att hålla injekteringsbrukets flödes hastighet under mätgränserna för flödesmätaren.

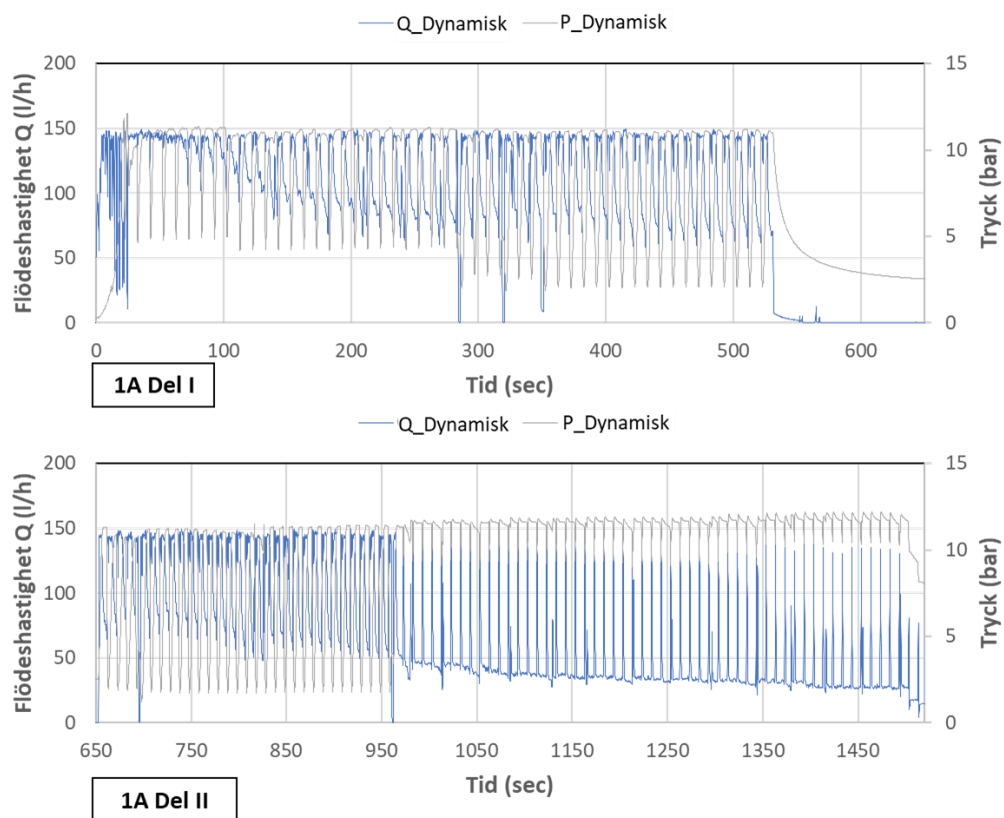
Grafen visar att trycket inte sjönk när flödes hastigheten sänktes i den dynamiskt injekterade 1A (se den lägsta punkten för flödes hastighet i Figur 30), vilket var motsatt effekt som den statiska injektionen hade vid borrhål 3A, där trycket sjönk när injekteringsbrukets flödes hastighet sänktes (borrhål 3A och 1A hade liknande vattenflöde i Hydrotest I). Injekteringspumpen genererade också små tryckpulser som kan ses i det statiska injektionsdiagrammet (Figur 31), men tryckpulserna visade signifikant lägre frekvens och amplitud vid ~1 bar jämfört med dem som genererades av den dynamiska injektionen.

Trycket i det statiskt injekterade borrhålet 4B sjönk inte när flödes hastigheten sänktes, eftersom det sjönk i borrhål 3A. Det noterades att borrhål 4B hade det lägsta vattenflödet i Hydrotest I, vilket antydde att sprickbredderna vid 4B möjligen var mindre, så att trycket i borrhålet inte sänktes lika snabbt. Tyvärr, på grund av igensättning av sensorn vid den dynamiskt injekterade 2B (med nästan samma flödes hastighet i Hydrotestet som 4B), var det inte möjligt att dra någon slutsats om dynamisk injektion hjälpte till att bibehålla (eller öka) injektionstrycket i 2B (Figur 28) på samma sätt som det observerades för borrhål 5A och 1A. Även i detta fall visade borrhålen i par P3 ingen flödesreduktion (annat än vid manuell reglering av ventiler) och injektionen stoppades efter att läckage av injekteringsbruk observerades från sprickor i bergytan.

Det dynamiska injektionstrycket skapades med en backventil för injektionsbruket vilket resulterade i en stor mängd återflöde av injektionsbruk som slussades till en container (Figur 30, vid 650-950 sek visas tydligt längre flödestoppar tillsammans med lägsta tryckfall till 2 bar). Tiden backventilen var öppen varierade mellan 0,25 s och 0,5 s, vilket gjorde det möjligt att reglera trycket så att det inte föll under det minimala tryckvärdet vid dynamisk injektering.

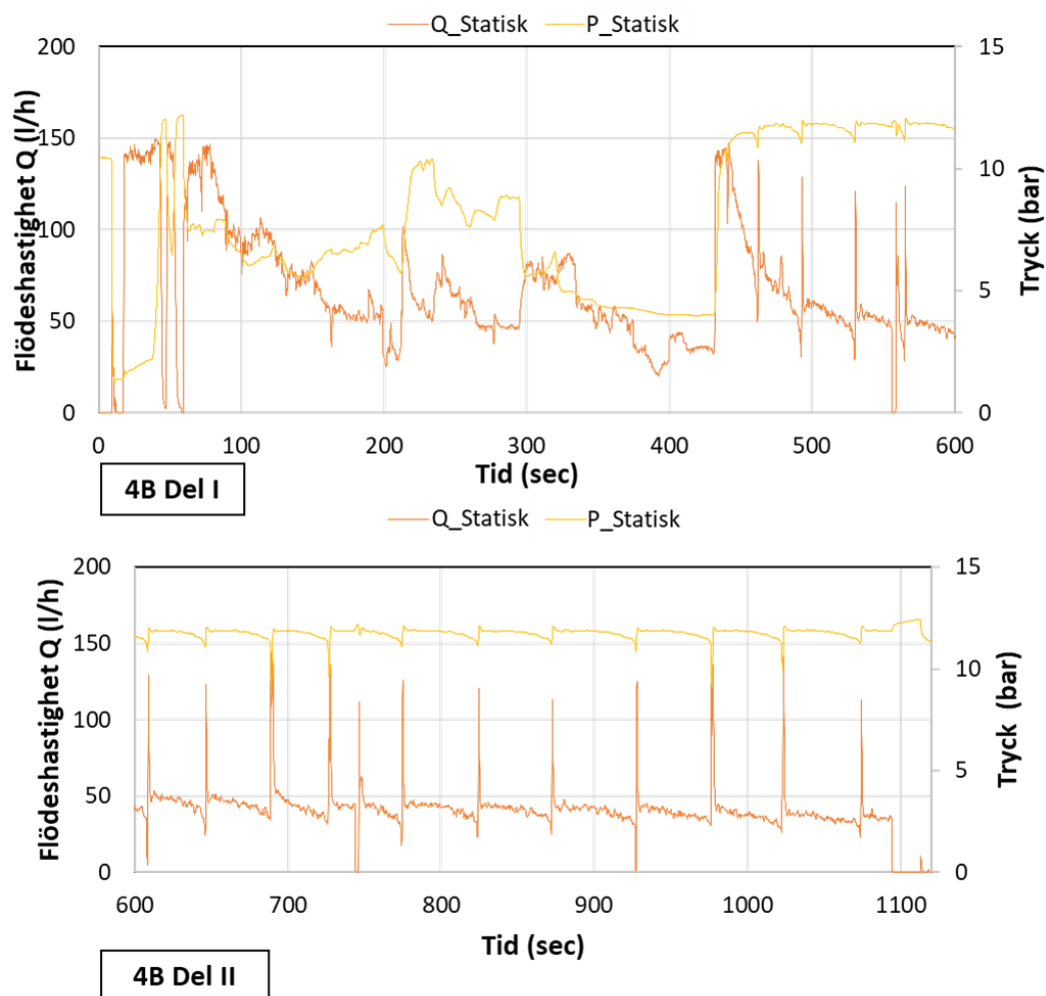
Vid de initiala injektionerna (par 1) slängdes återflödet av injekteringsbruk i avfallsbehållaren, men senare hölls det tillbaka till pumpen för injekteringsbruk. Under denna tid pausades testet. Detta problem skulle lätt kunna lösas genom att använda en extra slang som kan leda tillbaka injekteringsbruket tillbaka till omröraren på injektionspumpen.





**Figur 30.** Dynamisk injektion i borrhål 1A Del I och Del II.





**Figur 31.** Statisk injektion i borrhål 4B Del I och Del II.

#### 4. SLUTSATSER

Detta är ett unikt projekt relaterat till dynamisk och statisk injektion av injekteringsbruk, där både laborietester och fältprovning utfördes framgångsrikt.

Laborietester indikerade att injekteringshastigheten för injekteringsbruket ökade under dynamisk injektion jämfört med statisk tryckinjektion. Under dynamisk injektion visades även att injekteringsbrukets genomtränglighet, för 60- och 70 µm-öppningar, låg på en stabil flödeshastighet, jämfört med nästan inget flöde för statisk tryckinjektion. För industrin skulle detta bidra till att förbättra genomträngligheten för vanliga cementbaserade injekteringsbruk, vilket skulle minska risken för vattenläckage och behovet av kemisk injektering. Dessutom kan konceptet med en laborierigg för tryckkontrollerad injektion enkelt anpassas till industriella applikationer och användas effektivt genom att - utan större förändringar - ansluta industriella injektionspumpar.

På liknande sätt indikerar resultaten från fältprovningen att den dynamiska injektionen hjälper till att upprätthålla maximalt injektionstryck vid små flödeshastigheter. Den dynamiska injektionsmetoden ökade till och med injektionstrycket när injektionsperioden förlängdes från 4 sek till 10 sek, och perioden utan tryck ökades från 0,25 sek till 0,5 sek. För borrhål med eventuella stora öppningar minskar det statiska injektionstrycket med flödeshastigheten, vilket är tvärtom mot den dynamiska injektionens prestation; det är inte känsligt för förändringar i flödeshastigheten och upprätthåller högt tryck av injekteringsbruk även vid låga flödeshastigheter.

Det noterades att injekteringsbruket i fälttestet i allmänhet visade höga flödeshastigheter, så när den industriella injektionspumpen arbetade med sin vanliga flödeskapacitet var det inte möjligt att övervaka flödeshastigheten med flödesmätarna. Flödesmätarna i testet arbetade i alldeles för högt flöde några gånger, på grund av den höga flödeshastigheten hos den industriella injekteringsbrukspumpen, och flödesmätarna kunde inte samla in tillförlitlig data vid den höga flödeshastigheten (> 150 l/min). I slutändan var det inte möjligt att relatera injekteringsbrukets flödeshastighet till vattenflödet från Hydrotest I, som var avsett i förberedelserna av fältprovningen.

Allt som allt kan man dra slutsatsen att flödeshastigheten av injekteringsbruk med dynamisk injektion är hög jämfört med den konventionella statiska injektionsmetoden. Detta kommer att vara fördelaktigt för de industriella tillämpningarna då det kommer att öka genomträngligheten och förbättra tätningen i de fina bergsprickorna. Dessutom, baserat på lärdomar från fältprovningen, kan kunskapen för att utföra dynamisk injektion överföras till pumpoperatörer och därför kommer industrin att effektivt kunna genomföra injektering utan ytterligare injekteringsexperiment.

## 5. FRAMTIDA ARBETE

Under detta projekt testades den dynamiska injektionsmetoden både i laboratorium och i fältmiljö. Den unika erfarenheten erhöles genom att kombinera experimentell utrustning med ett industriellt injektionssystem tillsammans med ett system för labororiesensorer, där allt sedan tillämpades i fältmiljö. Denna erfarenhet är värdefull för framtida testning av dynamisk injektion i fält, där den kan användas effektivt, och fler antal borrhål (20–30 borrhål) kan injekteras samtidigt.

Flera lärdomar har dragits från detta projekt. Om fältprovningen kunde utföras på flera borrhål skulle det hjälpa till i jämförelsen mellan dynamisk och statisk injektion på grund av ett stort antal, och variationer av, sprickor.

Vid provning av flera borrhål skulle även olika parametrar för dynamisk injektion kunna registreras med olika intervall, såsom injektionens varaktighet, backventilens öppningstid, injektionens högsta tryck såväl som injektionens lägsta tryck. Detta skulle hjälpa till att identifiera ett optimalt injektionssystem med avseende på borrhålets hydrauliska öppning.

Testuppställningen skulle kunna förbättras baserat på erfarenheter från fältprovningen. I framtida fältprovningar kan problem med mätningar av stora injektionsflöden lösas genom att använda två flödesmätare med olika mätkapacitet (en för liten flödes hastighet och en annan för stor flödes hastighet) i seriekoppling. För bättre flödeskontroll kan dessutom de mindre slangarna (1/2 tum till 1/3 tum i stället för 1 tum) användas för att ansluta injekteringspump, distributionsenhet, flödesmätare och borrhål.

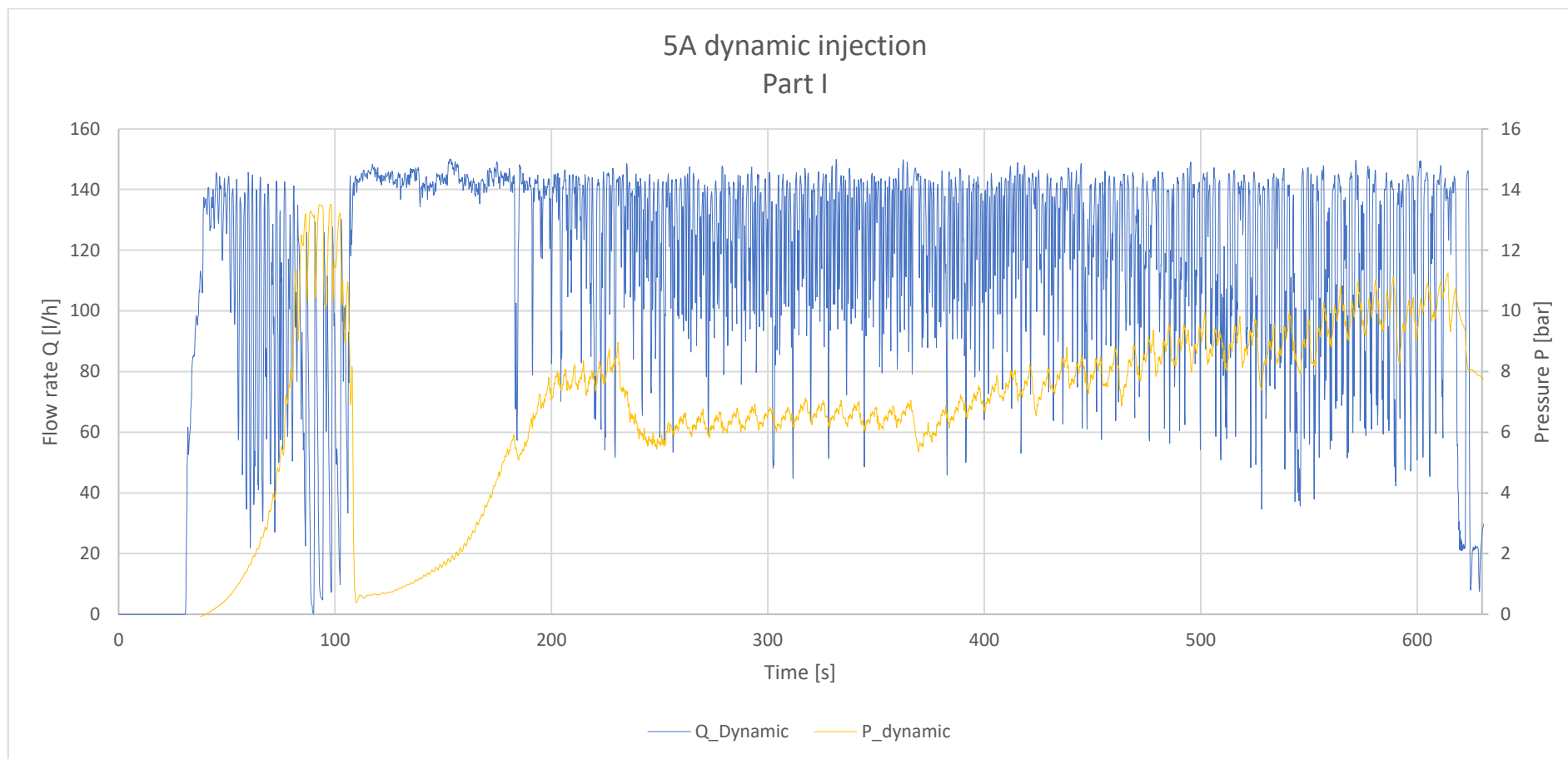
## **6. FÖRFATTARNAS TACK**

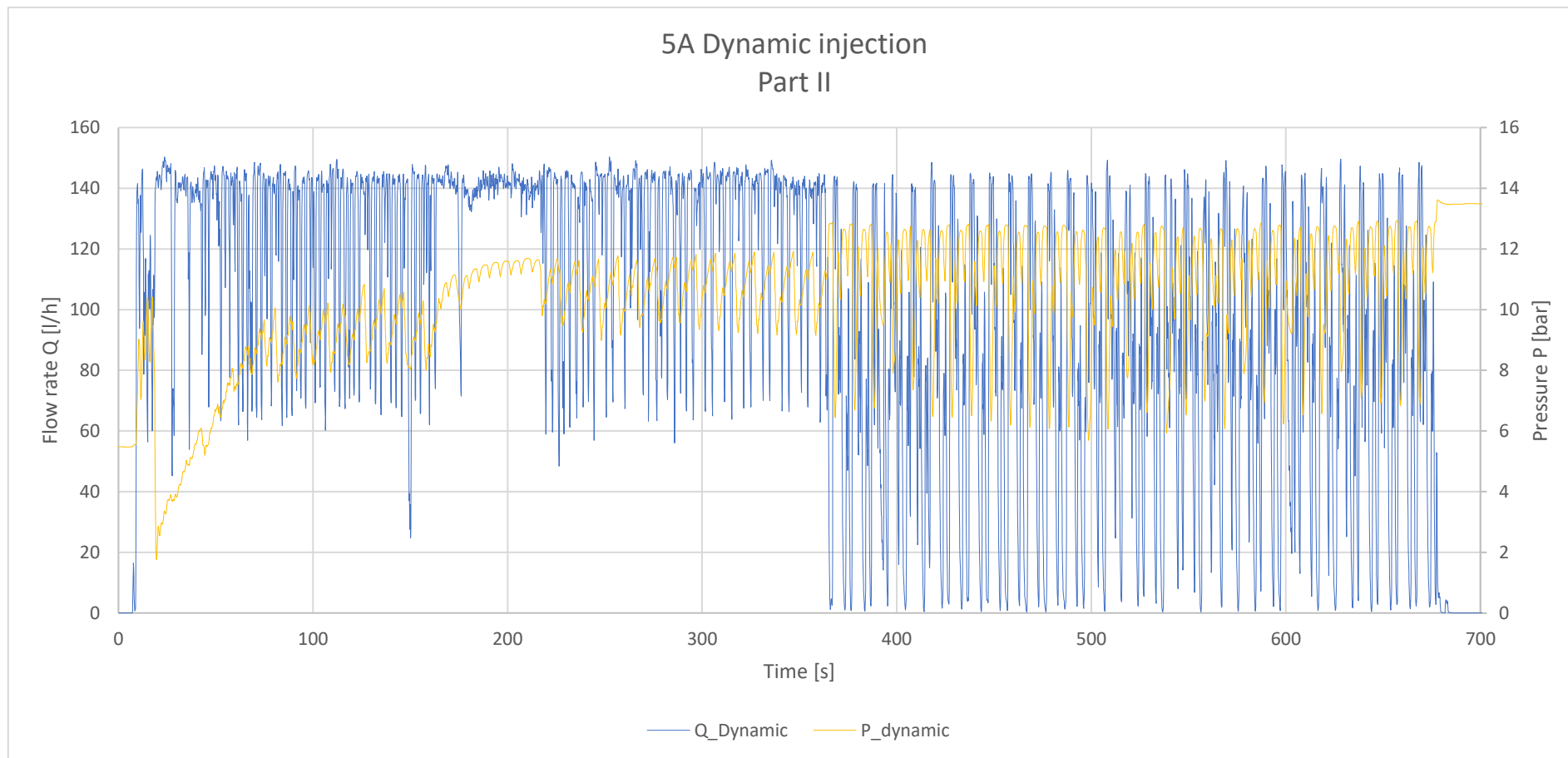
Detta projekt har fått medel från stiftelsen Bergteknisk Forskning (BeFo), Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF) och RISE (internt SK-medel). Vi vill tacka projektarbetsgruppen och referensgruppen. Dessutom uppskattade vi det aktiva stöd som vi fick från våra kollegor Johan Gunnarsson och Sandra Davidsson samt tidigare kollegor Ali Nejad Ghafar och Urs Mueller.

## 7. REFERENSER

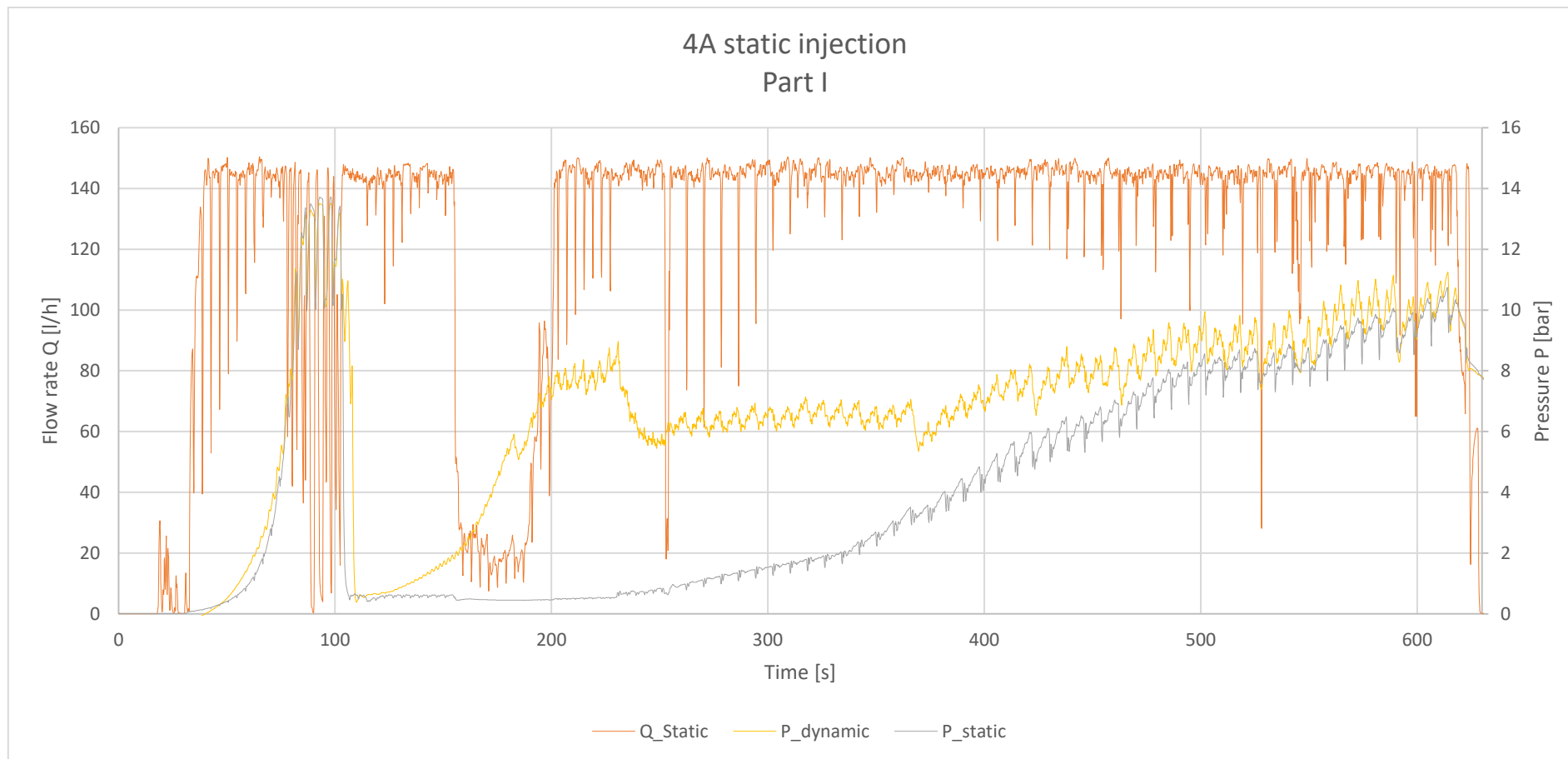
- [1] Draganovic, A., and H. Stille. 2011. "Filtration and Penetrability of Cement-Based Grout: Study Performed with a Short Slot." *Tunnelling and Underground Space Technology* 26 (4): 548–59. doi:10.1016/j.tust.2011.02.007.
- [2] Nobuto, J., M. Nishigaki, S. Mikake, S. Kobayashi, and T. Sato. 2008. "Prevention of Clogging Phenomenon with High-Grouting Pressure." *Doboku Gakkai Ronbunshuu C*. 64 (4): 813–832 (in Japanese with English abstract). doi:10.2208/jscejc.64.813.
- [3] Pusch, R., M. Erlström, and L. Börgesson. 1985. "Sealing of Rock Fractures A Survey of Potentially Useful Methods and Substances (Technical Report 85-17)." Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), Stockholm, Sweden
- [4] Mohammed, M.H., R. Pusch, and S. Knutsson. 2015. "Study of Cement-Grout Penetration into Fractures under Static and Oscillatory Conditions." *Tunnelling and Underground Space Technology* 45: 10–19. doi:10.1016/j.tust.2014.08.003.
- [5] Ghafar, A.N., A. Montesidis, A. Draganovic, and S. Larsson. 2016. "An Experimental Approach to the Development of Dynamic Pressure to Improve Grout Spread." *Rock Mechanics and Rock Engineering* 49 (9). Springer: 3709–3721. doi:10.1007/s00603-016-1020-2.
- [6] Ghafar, A.N., S. Sadrizadeh, A. Draganovic, F. Johansson, U. Håkansson, and S. Larsson. 2017. "Application of Low-Frequency Rectangular Pressure Impulse in Rock Grouting." In *Grouting 2017: Grouting, Drilling, and Verification*. ASCE Geotechnical Special Publication 288: 104-113. doi:10.1061/9780784480793.010.
- [7] Standard SS EN 445. (2007). Grout for prestressing tendons - Test methods.

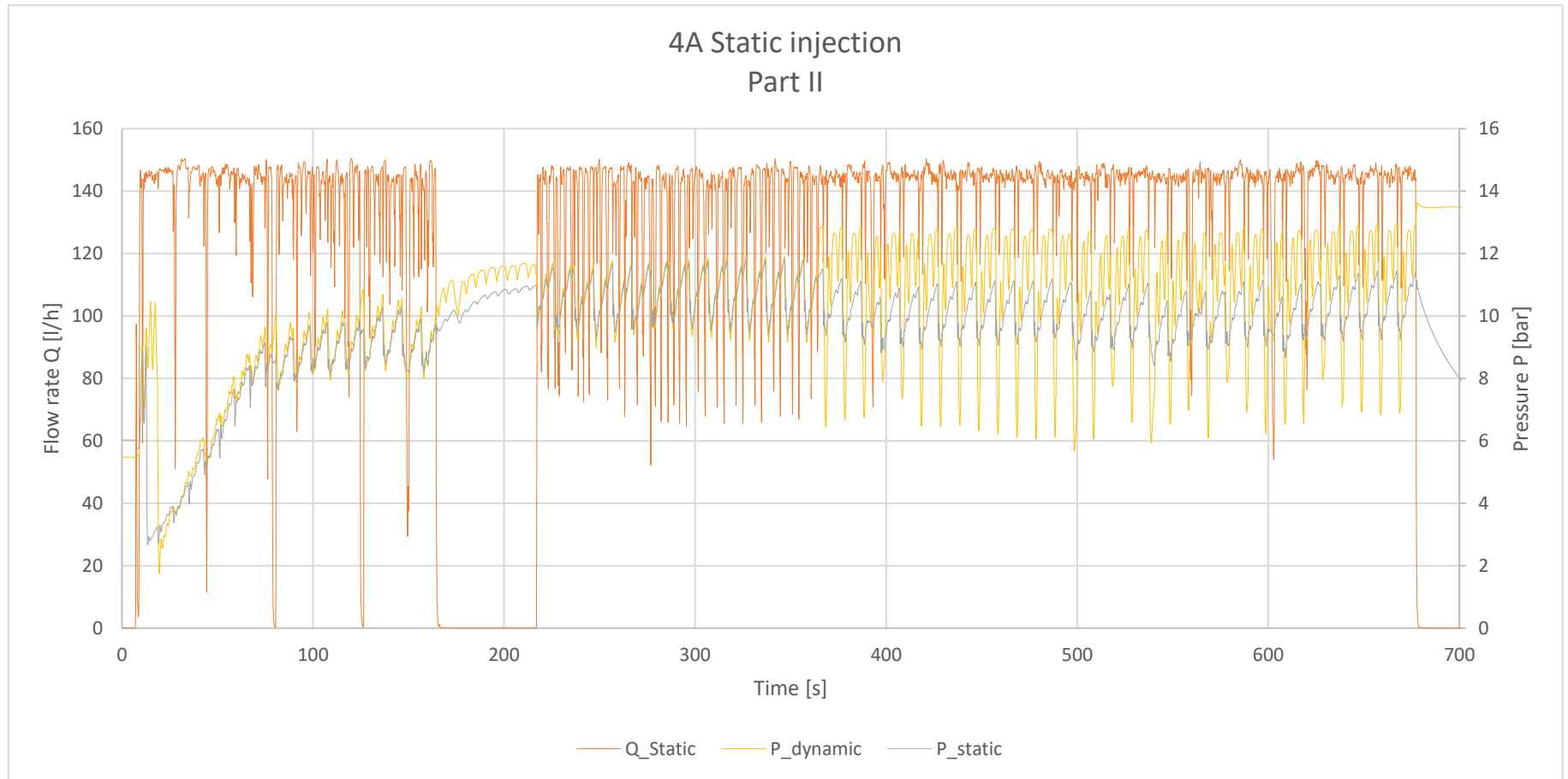
## **8. BILAGA**

**8.1 Testpar 5A-4A**

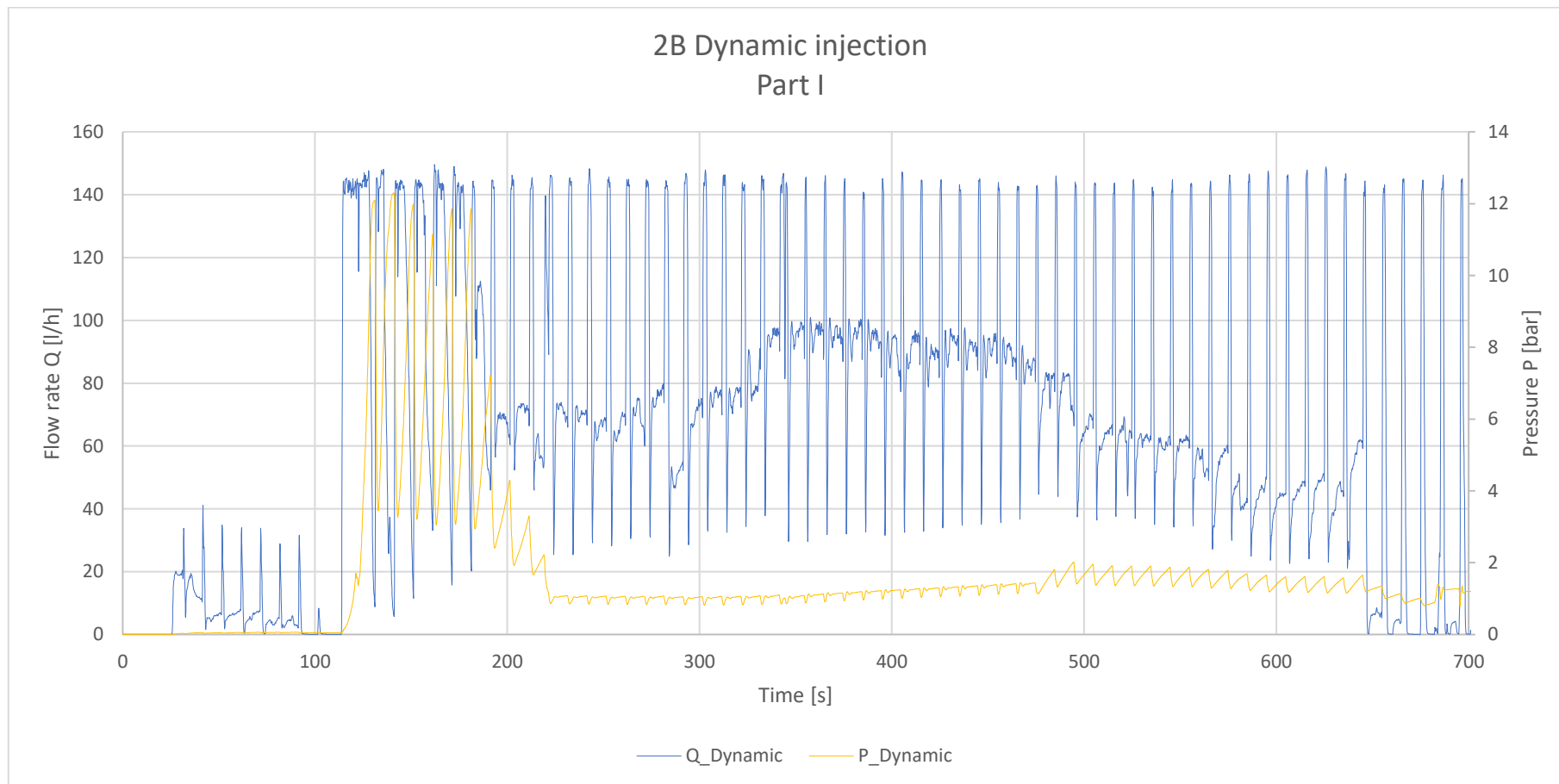


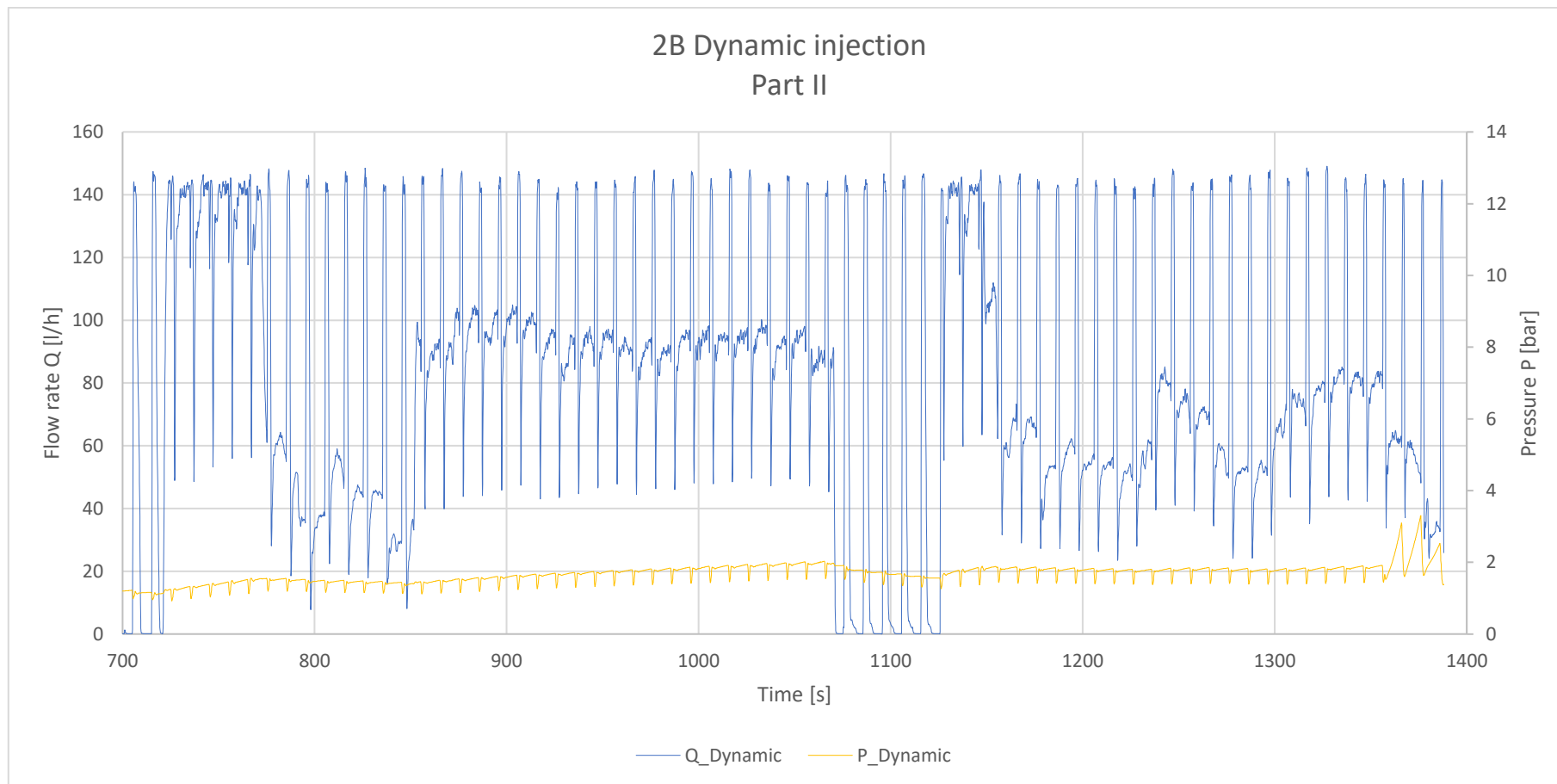


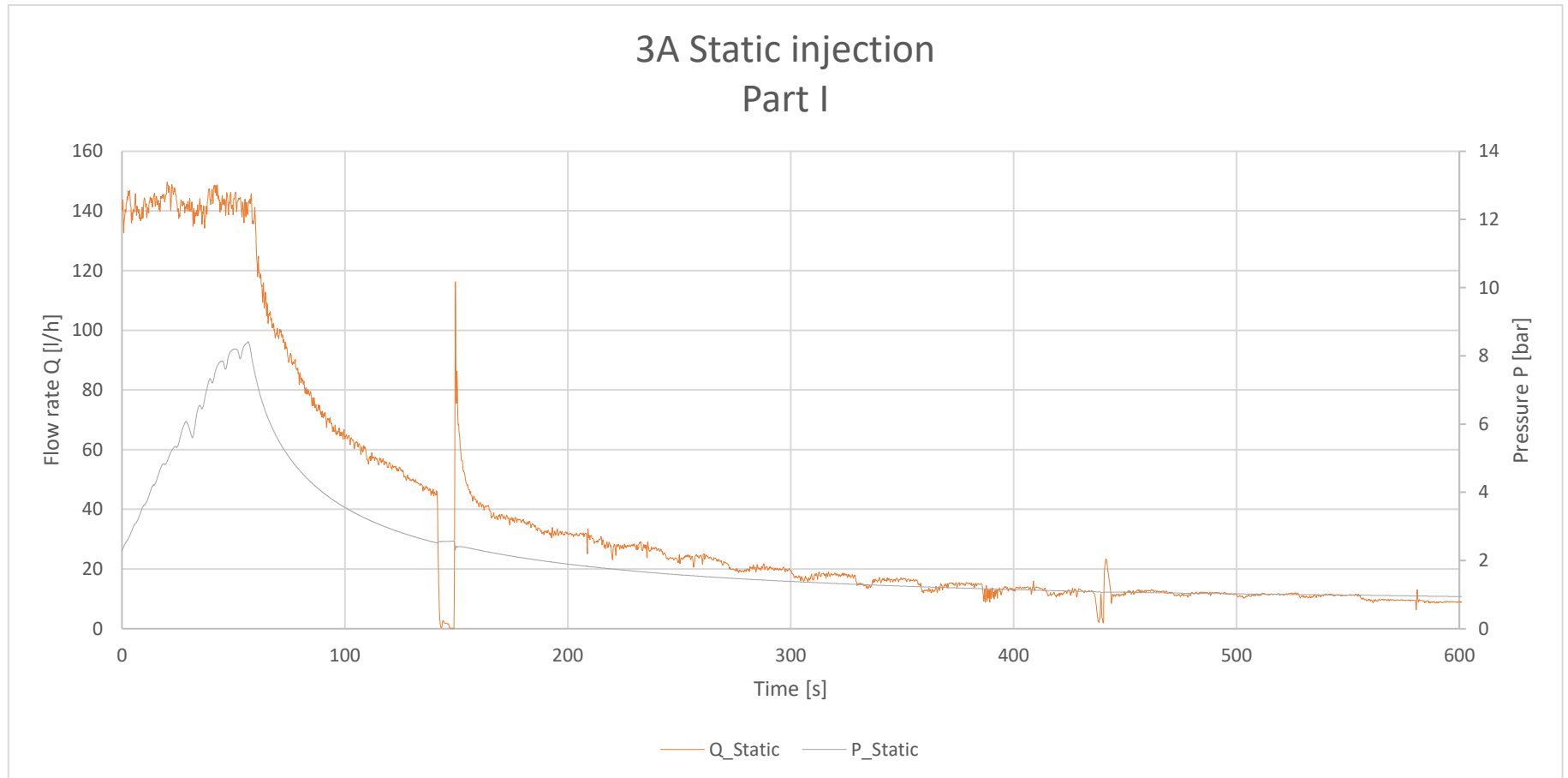


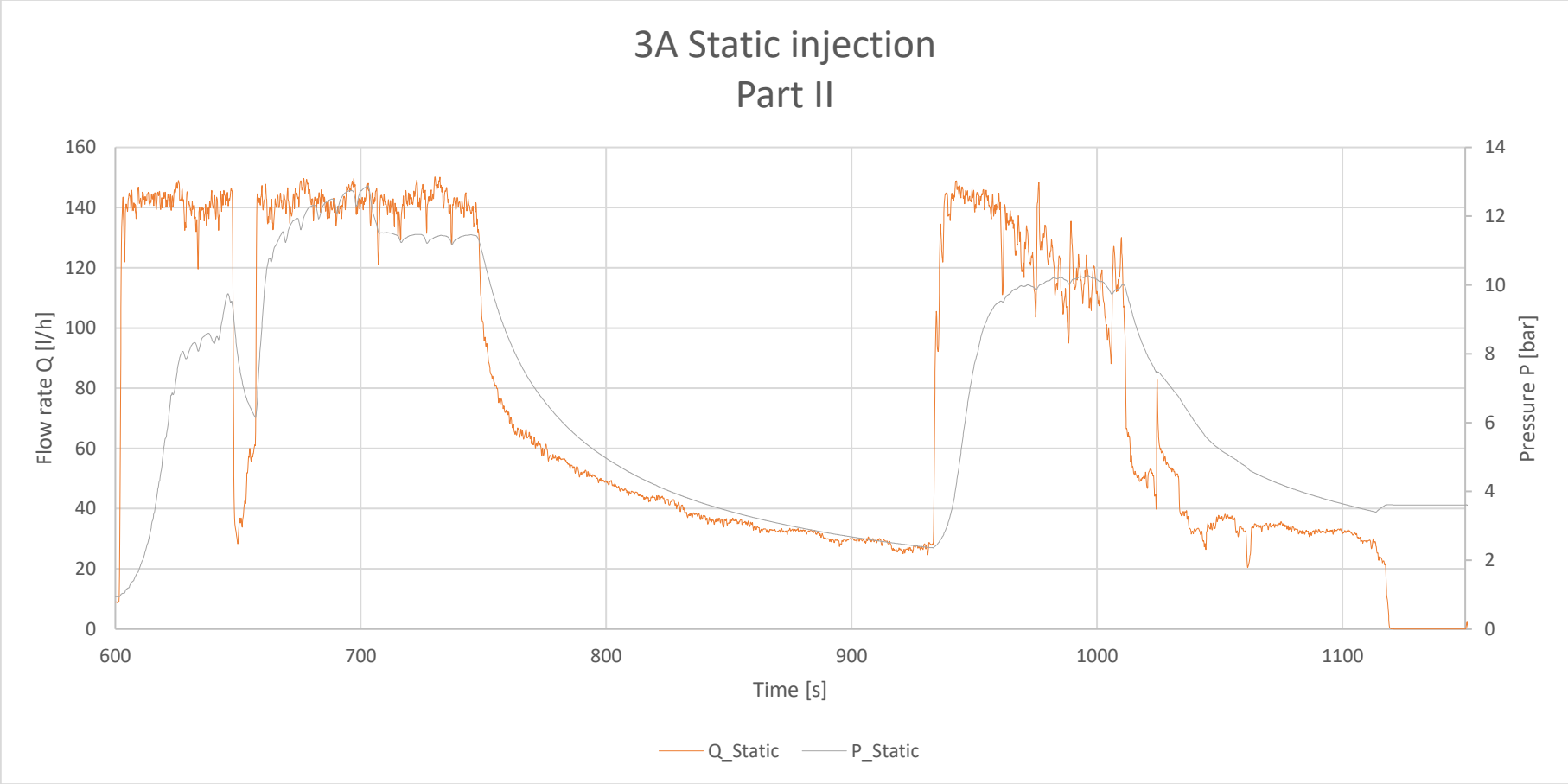


## 8.2 Testpar 3A-2B









**8.3 Testpar 1A-4B**