SBUF

ID: 13668

Dynamisk Injektering

Tryckslag och återkopplad resonans

Kavitationsmoln

Peter Ulriksen

2021-04-30

FÖRORD

I föreliggande projekt studeras metodik för att förbättra injekteringsarbetet med avseende på inträngningsförmåga. Kan denna förbättras uppnås tidsvinster i arbetet och kanske mängden kemiska tillsatser i injekteringsbruket minskas.

Effekten åstadkoms genom att trycket i injekteringsbruket oscilleras antingen cykliskt eller transient (tryckslag). Därigenom hålls bruket flytande, trots de tixotropa egenskaperna, och uppbyggnaden av filterkakor i trånga passager antas förhindras.

Dessutom uppstår det vid tryckslag kavitation som bidrar till att lösa upp aggregat av cementpartiklar. Dessa aggregat fördröjer annars hydratiseringen och försämrar penetrationsförmågan.

Dynamisk injektering har tidigare varit föremål för insatser från BeFo. Det nya i detta projekt är att injekteringssystemets naturliga resonanser eller inneboende interferenser utnyttjas för att åstadkomma ett optimalt utbyte av tillförd energi.

Projektet har samfinansierats av BeFo och SBUF och en gemensam referensgrupp har tillsats. Denna har lämnat väsentliga bidrag till arbetet, bla. genom tidigare förslaget att en borrhålssimulator adderas till övriga komponenter, vilket har skett, samt att effekten av densitet och viskositet bör studeras i kommande etapper.

Referensgruppen består av Ulf Håkansson (Skanska), Tommy Ellison (Besab), Mikael Creütz (Golder Associates), Anders Selander (Cementa), Thomas Dalmalm (Trafikverket) och Per Tengborg (BeFo). Mikael Westerholm (Cementa) ersatte en tid Anders Selander.

Forskningsinsatsen är utförd av Peter Ulriksen, LTH.

SAMMANFATTNING

Försöken har visat att det med ett statiskt "pumptryck" av vattenledningens 4 Bar är möjligt att skapa tryck mellan -4 Bar absolut till +15 Bar absolut, genom att tvärt avbryta vätskeströmningen och skapa ett tryckslag. Detta vid flödet 20 l/min, vilket skall jämföras med att verkliga injekteringsflöden initialt kan vara så höga som 40, ibland 50 l/min. Tryckslag skapar tryck i direkt proportion till flödeshastigheten. Tryckslagsmetoden är därför mest användbar i inledande skeden av injekteringsarbete.

Tryckvariationerna antas kunna minska filterbildningen i trånga passager och dessutom hindra att viskositeten ökar på grund av injekteringsbrukets tixotropa egenskaper.

Förekomsten av kavitation vid tryckslag kan förväntas förbättra flödes- och hydratiseringsegenskaperna hos injekteringsbruket genom att de imploderande kavitationsbubblorna slår sönder aggregat av cementpartiklar.

Återkopplad resonans förmodas ge högre tryckamplituder när motståndet mot flödet ökar. Metoden kan därför användas i hela injekteringsprocessen. Effekten av varierande mottryck har inte kunnat kvantifieras i denna etapp pga. instrumentfel.

Nyckelord: Injektering, tryckslag, dynamisk, resonans, återkoppling

SUMMARY

The experiments have demonstrated that with a static "pump pressure" from the water service as low as 4 Bars it is possible to create dynamic pressures between -4 Bars and +15 Bars, just by rapidly closing a valve and create a water hammer effect. This was obtained at a flow-rate of 20 l/min which should be compared to real initial grouting flow-rates that may be as high as 40-50 l/min. The water hammer effect is directly proportional to the flow-rate. This means that the method will work best initially in the grouting of a borehole.

The pressure variations are supposed to decrease the development of filters in narrow passages and prevent that the grout viscosity increases due to tixotropy.

The presence of cavitation caused by the water hammer effect may be expected to improve the flow characteristics and hydration in the grout since the implosion of cavitation bubbles will disperse aggregates of cement particles.

Resonant feedback is assumed to work in all parts of the grouting cycle and improve as the resistance to flow increases, i.e. at the end of the grouting cycle.

Keywords: Grouting, water hammer, dynamic, resonance, feedback

INNEHÅLL

1. INTRODUKTION 0

1.1 CYKLISK TRYCKVARIATION 1
1.2 TRYCKSLAG 5

2. SIMULERING AV INJEKTERINGSHÅL 11

2.1 SYNGLAS OMEDELBART FÖRE INLOPPET TILL INJEKTERINGSRÖRET 11
2.2 TRYCKGIVARE STRAX FÖRE INJEKTERINGSRÖRET 12
2.3 INJEKTERINGSRÖRET 12
2.4 SYNGLAS 2 EFTER INJEKTERINGSRÖRET 14
2.5 12 M ROSTFRITT RÖR MED SENSORER OCH ANDRA DETALJER 14
2.6 SPRICKSIMULATOR I FORM AV ETT SLANGTRÄD 15
2.7 KORT SPALT 17
2.8 SIMULATORNS ÄNDUTLOPP 19
2.9 KRAFTGIVARE 20

3. UTFÖRDA EXPERIMENT 21

3.1 TRYCKMÄTNING NEDSTRÖMS KOAXIALVENTILEN VID ENSKILT TRYCKSLAG 23
3.2 TRYCKMÄTNING NEDSTRÖMS KOAXIALVENTILEN VID UPPREPADE TRYCKSLAG. TAKTNING. 32
3.3 INSPÄNNINGSKRAFT VID RÖRSLUT EFTER ETT TRYCKSLAG 35
3.4 TRYCKMÄTNING EFTER SPRICKSIMULATOR I FORM AV SLANGTRÄD 38
3.5 TRYCKMÄTNING VID UTLOPP I RÖRETS MITT 42
3.6 ÅTERKOPPLAD RESONANS 48

4. RESULTAT I SAMMANFATTNING 50

4.1 TRYCKMÄTNING VID UTLOPP I RÖRSLUT 50
4.2 TRYCKMÄTNING VID UTLOPP I RÖRMITT 52
4.3 TRYCKMÄTNING KRING SLANGTRÄDET VID UTLOPP GENOM DETTA 54
4.4 KRAFTPÅVERKAN FRÅN SIMULATORRÖRET MED UTLOPP I RÖRSLUT 55
4.5 ÅTERKOPPLAD RESONANS 56
4.6 SAMMANFATTNING AV RESULTAT 57

5. SLUTSATSER 59

6. FORTSATT ARBETE 61

6.1 ÅTERKOPPLAD RESONANS 61
6.2 TRYCKSLAG 62
6.3 MODIFIERING AV SIMULATORN 63
6.4 ALLMÄNT 65

7. REFERENSER 69

1. INTRODUKTION

Vanligtvis sker injektering med statiskt tryck i injekteringsbruket. Ofta används kolvpumpar med två eller tre cylindrar som reciprociterar, dvs kolvarna arbetar i otakt, så att det alltid finns ett positivt tryck i flödet.

Två problem som då uppstår är uppbyggnad av filterkakor i trånga passager och minskande fluiditet i bruket, på vägen ut i berget, på grund av dess tilltagande tixotropa egenskaper. Denna beror på brukets karaktär av Bingham-vätska, som gör att så kallat pluggflöde kan uppstå. Det innebär att flödet i huvudsak är laminärt (?) och att hydratiseringen därför inte motverkas av turbulens. En Bingham-vätska flyter inte förrän skjuvkrafterna invid omgivande väggar har övervunnits av vätsketrycket. Hastighetsprofilen genom flödet är alltså tillplattad i mitten jämfört med en Newtonsk vätska, som vatten.

Måttet på laminär eller turbulent strömning är Reynolds' tal Re (L Jönsson).

I icke-cirkulärt rör definieras Re som:

$Re = U \cdot 4 \cdot R/v$

Där U = vattenhastigheten (m/s)

R = hydrauliska radien = tvärsnitsarean/våta perimetern = A/P (m)

För cirkulära rör med radien r blir $A = \pi \cdot r^2$ och $P = 2 \cdot \pi \cdot r$

dvs $R = r/2$ och $Re = U \cdot Diam/v$

v = kinematiska viskositeten (m^2/s) = dynamiska viskositeten/vattnets densitet. För vatten är v ungefär 10^{-6} (m^2/s)

Gränsen för övergång till turbulent strömning är c:a Re =2000, dvs. är Re mindre än så blir strömningen laminär och vice versa.

För en smal, bred spalt (höjd h och bredd b, b mycket större än h) blir hydrauliska radien ungefär R = h/2. För injekteringsbruk får v ett större värde och det gör att flödeshastigheten kan vara högre än för vatten med bibehållet Reynolds tal.

I de här redovisade försöken med vatten i stället för injekteringsbruk blir strömningen aldrig laminär enligt ovanstående kriterium.

Ett tredje problem vid injektering har med blandningen av cementbruk och vatten att göra. Det består däri att flera cementkorn sitter ihop i en omgivande kappa av vatten (aggregering). Konsekvensen av det är tvåfaldig, dels blir den effektiva kornstorleken större, vilket minskar penetrationsförmågan, dels blir hydratiseringen inte så fullständig som om varje cementkorn omgivits av vatten.

Redan Pusch (1,2) undersökte om korta tryckstötar kunde förbättra injekteringsbrukets penetrationsförmåga. Dessa tryckstötar upprepades 40 ggr per sekund. En tryckstöt är en transient och som sådan bredbandig, dvs. energin är spridd över ett brett frekvensområde.

En hypotes för att motverka filterbildning är att man genom att skapa ett undertryck framför filtret, det bakom filtret kvarvarande trycket skall demolera filtret när det jämnas ut. Tryckoscillationer

försvagar samtidigt den tixotropiska effekten. Kavitation, som kan skapas med ultraljud eller tryckslag, har visat sig kunna slå sönder cementaggregat.

Om man vill alstra ett dynamiskt tryck i injekteringsvätskan, till skillnad från ett statiskt, måste man ta hänsyn till hela injekteringssystemets dynamiska egenskaper. Man kan säga att systemet fungerar som ett frekvensfilter, där oscillationsfrekvenser nära resonans tillväxer i princip obegränsat, medan andra frekvenser snabbt dämpas ut. Det är därför mest effektivt att excitera vid resonans.

Ett snarlikt fenomen kan skapas med korta tryckstötar, då man försöker få de sekventiella tryckstötarna att samverka. Det är inte resonans i egentlig mening utan snarare konstruktiv interferens. I denna rapport kallas fenomenet taktning, eftersom det innebär att ryckstötarna *går i takt*.

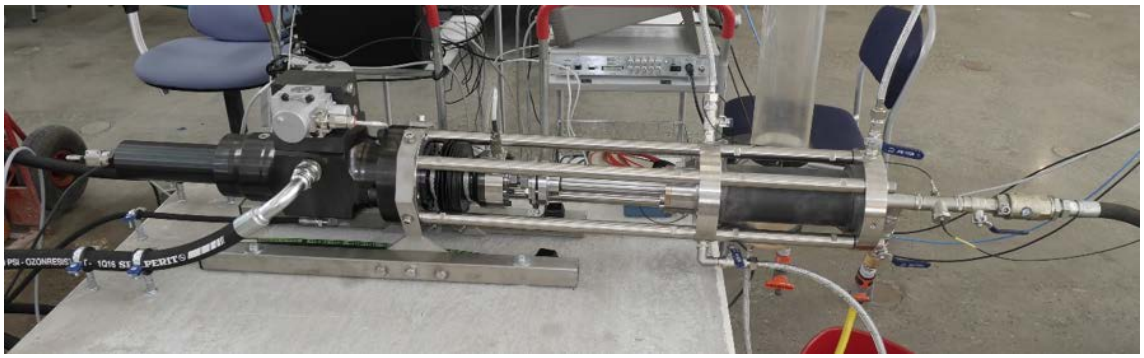
Om systemet är fritt från dispersion kommer alla frekvenskomponenter att samverka. Dispersion innebär däremot att dessa rör sig olika fort och samverkan kan då inte uppnås.

Denna rapport behandlar resonansfenomen vid cyklisk tryckändring samt taktningsfenomen vid transienta tryckändringar genom tryckslag. Även mer exotiska tryckvariationer behandlas i någon mån.

Alla försök är gjorda i vatten. Orsaken är att undvika tidsödande rensning av systemet om riktigt injekteringsbruk skulle använts. Eftersom det är resonansfenomen och liknande som studeras går detta utmärkt då vågutbredningshastigheten i injekteringsbruk och vatten är ungefär den samma 1500 m/s i fri volym. I stålrör är hastigheten lägre och i gummislang väsentligt lägre än i fri vattenvolym. Akustiska fenomen kan också utbreda sig i stålrörens väggar och då erhålls hastigheter i området 4000-5000 m/s.

1.1 Cyklisk tryckvariation

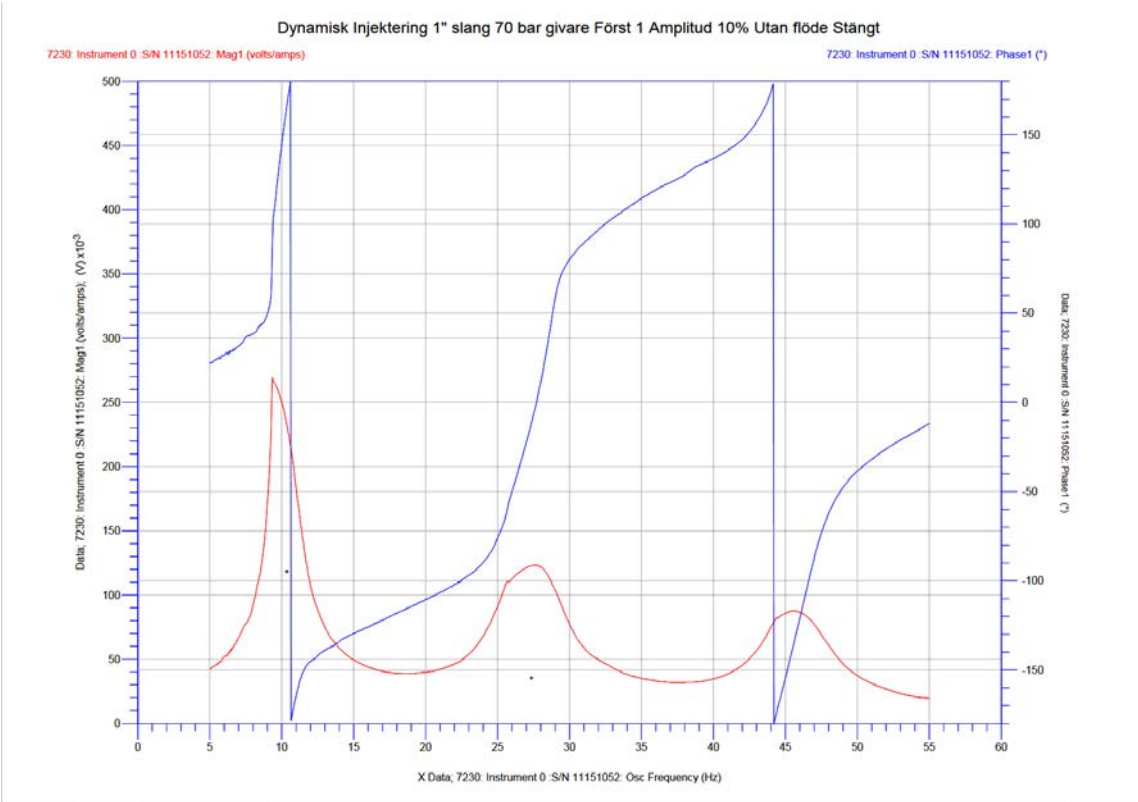
I tidigare etapper av projektet har framkommit att det lämpligaste sättet att åstadkomma kraftiga, cykliska tryckoscillationer är att använda en elektriskt styrd hydraulcylinder. Utöver den elektriska signalen kräver en sådan cylinder också tillgång till en hydraulpumpstation som kan leverera tillräckligt oljetryck och flöde. Typiska värden är 200 Bar och 90 l/min. Hydraulcylindern kopplas mekaniskt till kolven i en cylinder som innehåller injekteringsbruk eller den vätska som skall studeras. En elektriskt styrd hydraulcylinder från företaget MOOG valdes och den kopplades mekaniskt till en injekteringscylinder med kolv från EPIROC. Sammankopplingen av dessa enheter gjordes vid den mekaniska verkstaden vid Fasta Tillståndets Fysik efter ritningar av författaren till denna rapport. Programvaran som följde med MOOG-systemet innehåller möjlighet att bestämma med vilken frekvens och amplitud den elektriskt styrda hydraulcylindern skall röra sig. Man kan också styra cylindern med en extern elektriskt signal av godtycklig sammansättning. Styrningen kan ske på kraft i, eller läge för den hydrauliska kolvstången.



Figur 1. Den i projektet tillverkade dynamiska injekteringspumpen. *The dynamic grouting pump developed in the project.*

1.1.1 Frekvenssvep

Det konventionella sättet att finna resonanstoppar är att utsätta systemet som skall undersökas för ett frekvenssvep. Genom att på något sätt mäta systemet respons ser man var denna är starkast och därmed har man identifierat resonansfrekvenserna.



Figur 2. Frekvenssvep av trycket i injekteringsslang. Röd kurva visar amplitudrespons och blå kurva visar fas. *Frequency sweep of the pressure in a grouting hose. Red curve is the amplitude, blue is the phase.*

Hur stark en resonans är brukar beskrivas med Q-värdet, ju smalare och högre resonanstopp, desto större Q-värde:

$$Q = \frac{f_r}{B}$$

där

f_r = resonansfrekvensen, frekvensen vid det högsta värdet för amplitudkurvan

B = Bandbredden = frekvensomfånget där amplituden är större än halva maxamplituden

För den starkaste resonansen i kurvan ovan blir Q-värdet ungefär 3 (9/3).

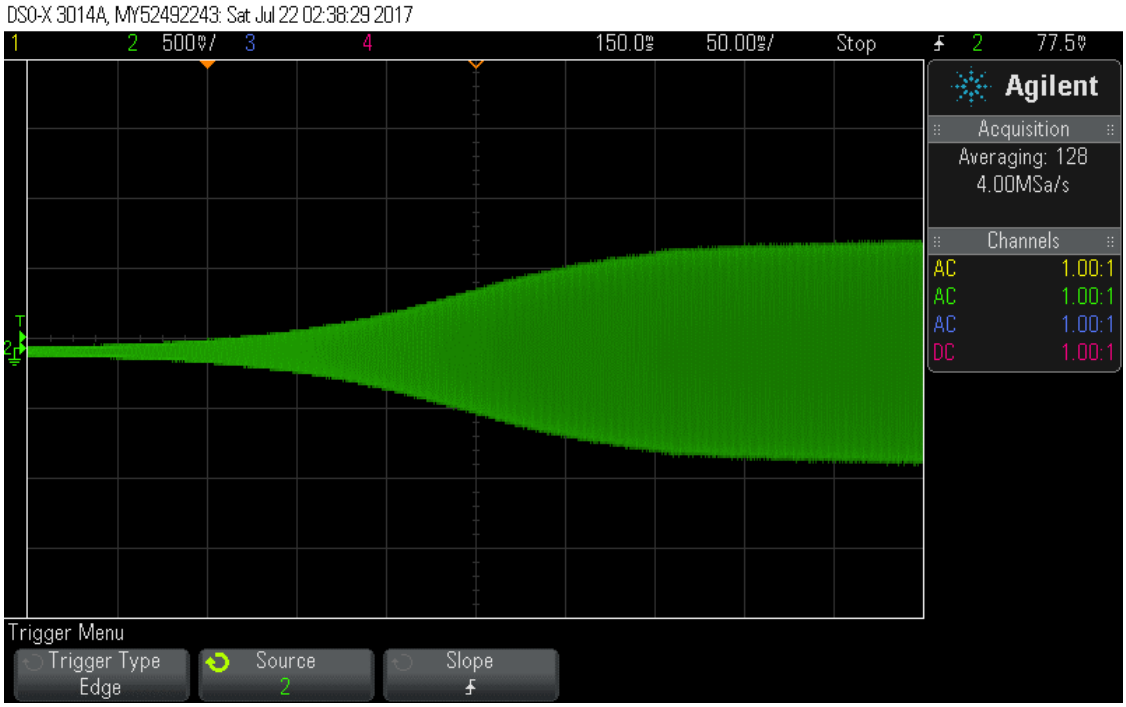
Ju högre Q är desto mindre dämpat sägs systemet vara och desto högre amplituder kan nås vid excitering vid resonansfrekvensen. En hög smal resonanstopp kan alltså utnyttjas för att skapa mycket höga tryckamplituder i systemet med måttlig energitillförsel.

1.1.2 Återkoppling

Med frekvenssvep får man besked om vilka frekvenser som sätter systemet i resonans vid aktuella förhållanden. Säg nu att något i systemet förändras, t ex mottrycket, vilket inte är orimligt i injekteringssammanhang. Då förändras kanske också resonansfrekvensen. Genom återkopplad resonans kan man få systemet att automatiskt följa den verkliga resonansfrekvensen. Det kan ske genom att man sätter en tryckgivare så nära berget som möjligt, dvs i anslutning till injekteringsröret. Signalen från denna tryckgivare får styra pumpens oscillation. Därmed arbetar injekteringssystemet hela tiden under ideala förhållanden, nämligen systemets resonansfrekvens. Om man kontinuerligt registrerar vilken frekvens systemet har i varje ögonblick, får man en ny parameter att inkorporera i metoden Real Time Grouting Control, RTGC.

Ibland förekommer det flera starka resonansfrekvenser och normalt dominerar då den starkaste i återkopplingsförloppet. Skulle man av någon orsak vilja utnyttja någon av de andra frekvenserna kan man välja denna genom att koppla in ett passbandfilter i signalvägen. Det kan t ex vara så att man är mer intresserad av en resonansfrekvens som alstras i borrhålet än en annan som uppstår i injekteringsslangen. Amplitudens tillväxthastighet och slutamplitud beror på dämpningen av det svängande systemet. Är dämpningen liten blir tillväxten snabb. Amplituden kan öka tills något går sönder. Därför vill man ha ett övervakningssystem som kan sätta ett tak för förstärkningen i återkopplingskedjan. Det kan man göra med en sk PID-regulator.

Nedan visas ett återkopplingsförlopp från projektets Etapp 1.

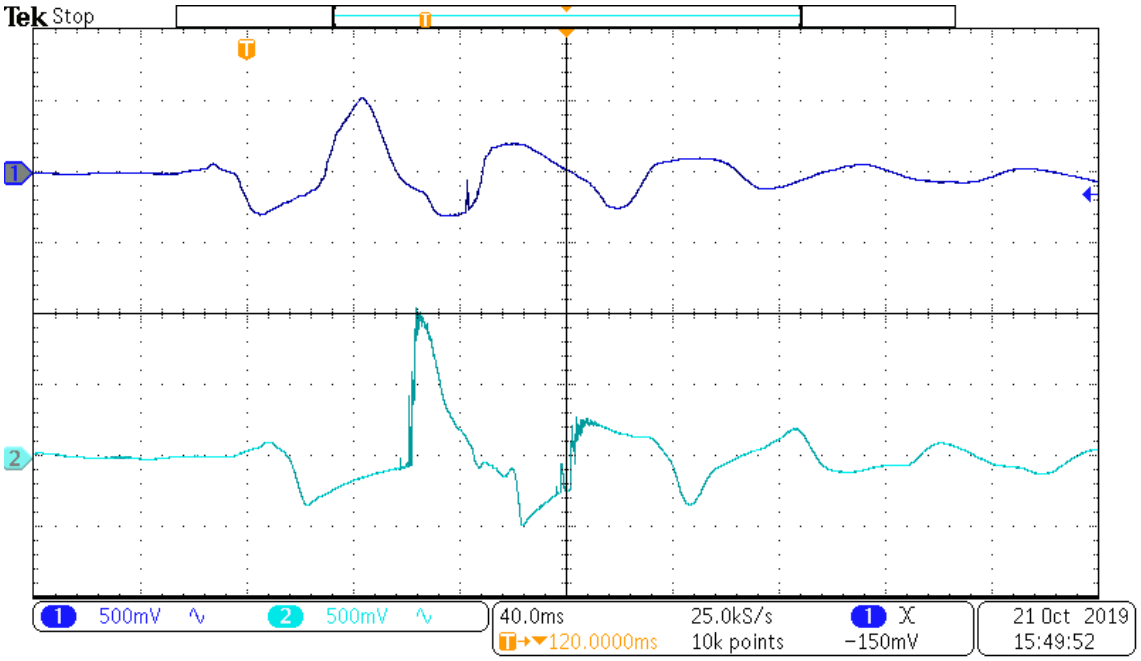


Figur 3. Naturligt återkopplat insvängningsförlopp med geofon som källa, utan startsignal injicerad i systemet. *Natural build-up of feedback resonance with a geophone as a source, no startsignal injected into the system.*

1.1.3 Dispersion och Chockvågor

Ovan har nämnts fenomenet dispersion, dvs att olika frekvenskomponenter rör sig med olika hastighet. I ett elastiskt system kan även en tryckpuls amplitud påverka utbredningshastigheten. Säg då att man har en transient signal, alltså begränsad i tiden, som börjar med en svag amplitud och slutar med en stark. Den inledningsvis skapade tryckvågen rör sig långsammare än den gör i ett senare skede. Resultatet blir att någonstans nedströms kommer den senast genererade delen av vågen, den starkare, att hinna ifatt alla de tidigare genererade vågdelarna. Därmed skapas en chockvåg, som har högre amplitud och kortare varaktighet än den ursprungliga vågformen. Man kan naturligtvis justera vågformen så att chockvågen uppträder där man vill ha den.

I nedanstående figur visas hur den vid källan harmoniskt formade tryckvågen "cardiac" i vågformsgeneratorn omformas till en brant puls efter att ha passerat 20 m 1/2" stålarmerad gummislang. Notera att den branta pulsen i Ch2 reflekteras åter till källan och kan ses som en kort tryckstegring i Ch1 20 ms senare.



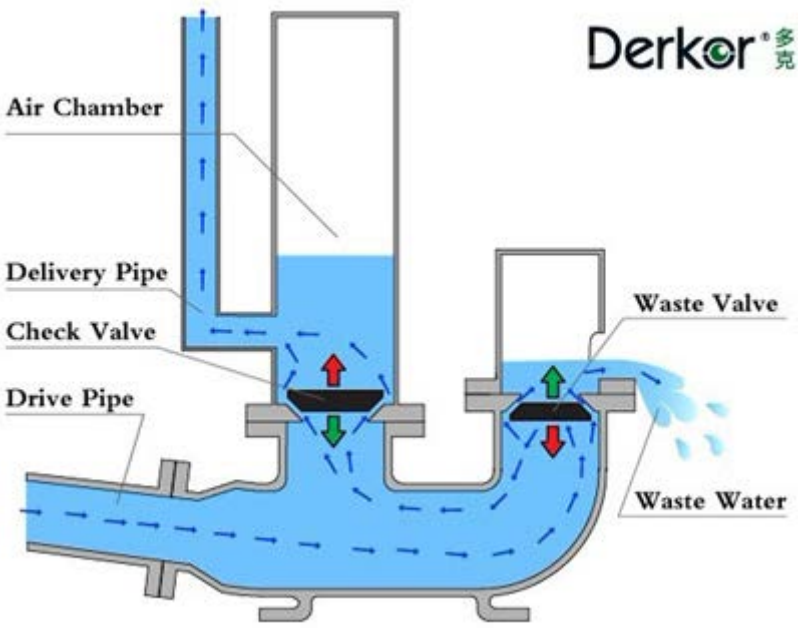
Figur 4. Tryckberoende dispersion. Vågutbredning i 1/2" slang utan flöde. Ch 1 tryck vid källan. Ch2 tryck efter 20 m i slangen. *Pressure dependent dispersion - a shock wave. Pressure in 1/"" hose with no flow. Ch1 is pressure at the source, Ch2 is pressure 20 m downstream.* [TEK443]

En mycket brant puls har skapats, kanske beroende på tryckberoende vågutbredningshastighet i slangen.

1.2 Tryckslag

Alla är bekanta med de smällar som kan uppstå i vattenledningsrör när någon hastigt stänger en kran. Fenomenet beror på att när kranen stängs är en tung vattenpelare fortfarande på väg mot kranen. När den bromsas in uppstår ett övertryck, som reflekteras uppströms i vattenledningen. Därmed utsätts kranen för en kraft i strömningsriktningen. Finns det ett långt rör nedströms kommer även den vattenpelaren att vilja fortsätta, trots att inget nytt vatten tillförs vid kranen. Då uppstår emellertid ett undertryck i nedströmsledningen.

Tryckslag kan nyttiggöras till exempel i en sk vädur, som används för att transportera strömmande vatten till en högre position. Väduren innehåller mekanik som låter strömmande vatten i ett rör passera ut genom en läckventil tills vattenströmmen uppnår en viss hastighet. Då stängs ventilen momentant och det uppstår ett tryckslag. Framför ventilen finns en T-koppling med en backventil på det vertikala röret. Det tryck som tryckslaget givit upphov till pressar upp vatten i detta rör och där blir det kvar på grund av backventilen. När flödet upphör därför att luckan stängts och trycket minskat öppnar sig läckventilen automatiskt och processen upprepas när vattenflödet åter har accelererat. En hydrofor hjälper till att pressa upp vattnet till högre nivå.



Figur 5. Principen för en vädur, som bygger på tryckslag. *The principle for a ram pump is a water hammer.* (Derkor)

1.2.1 Negativa tryck

Om flödeshastigheten är tillräckligt stor när ventilen stänger kan det uppstå negativa tryck nedströms. Med negativa tryck förstås tryck lägre än 1 Bar under atmosfärstryck, alltså lägre än vakuum. Sådana tryck kan inte förekomma i gaser, men kan göra det under en kortare tid i vätskor. I fasta ämnen som stål har vi inga problem med att hantera dragspänningar.

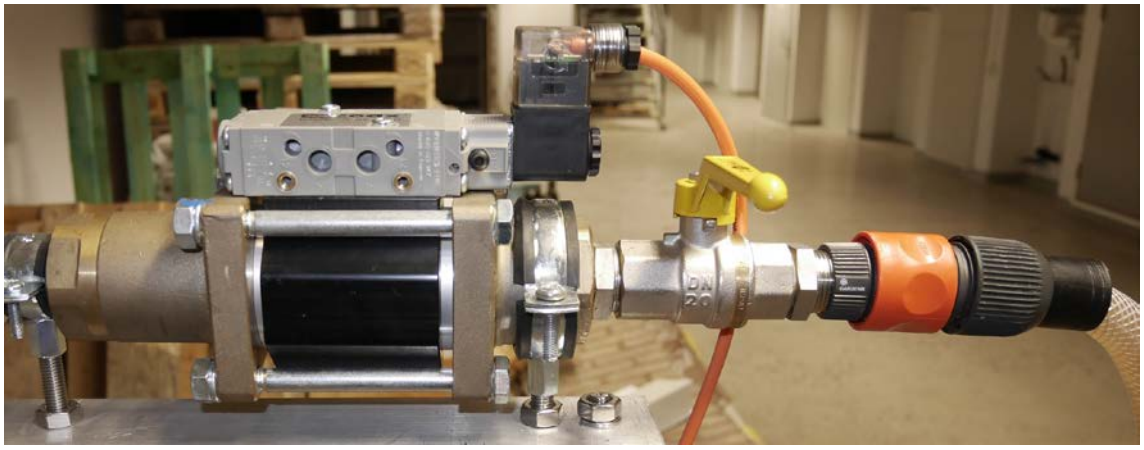
1.2.2 Kavitation

Att negativa tryck bara förekommer under kortare tid i vätskor beror på att vätskan snabbt börjar koka, i vatten talar man om kavitation. Det bildas små ångbubblor som fyller ut det utrymme den framrusande vattenmassan i röret tidigare upptog. När undertrycket fått stopp på vattenmassan rusar denna tillbaka och slår med betydande kraft in i ventilen som stängt av vattenströmmen. Detta, andra ordningens tryckslag, reflekteras därefter ut i det vattenfyllda röret nedströms.

Figur 6. Långtidsexponering kavitationsbubblor. *Long-term exposure of cavitation bubbles.*

1.2.3 Elektro-pneumatisk koaxialventil

Valet av ventil styrdes av att den skulle ha så kort stängningstid som möjligt. Detta för att skapa ett så kraftigt tryckslag som möjligt. Leverantörens svar på den specifikationen var entydigt att man i så fall skall använda en elektropneumatiskt styrd koaxialventil. Denna styrs med en elektrisk signal. Denna i sin tur påverkar en tryckluftventil som styr en pneumatisk kolv, som är den som åstadkommer stängningen av koaxialventilens kägla. Beteckningen koaxial kommer av att själva ventilen sitter mitt i flödet och ventiltätningen sker runt flödeskanalens periferi, mot vilken käglan tätar. Flödesriktningen påverkas alltså inte av ventilens utformning, då ventilen är öppen strömmar vätskan rakt igenom den. Käglans rörelse vid stängning av flödet sker i nedströms riktning. Anslaget mot tätningen är så snabb att det skapar en tryckvåg i vattnet nedströms omedelbart innan vattenflödet helt upphör och trycket sjunker.

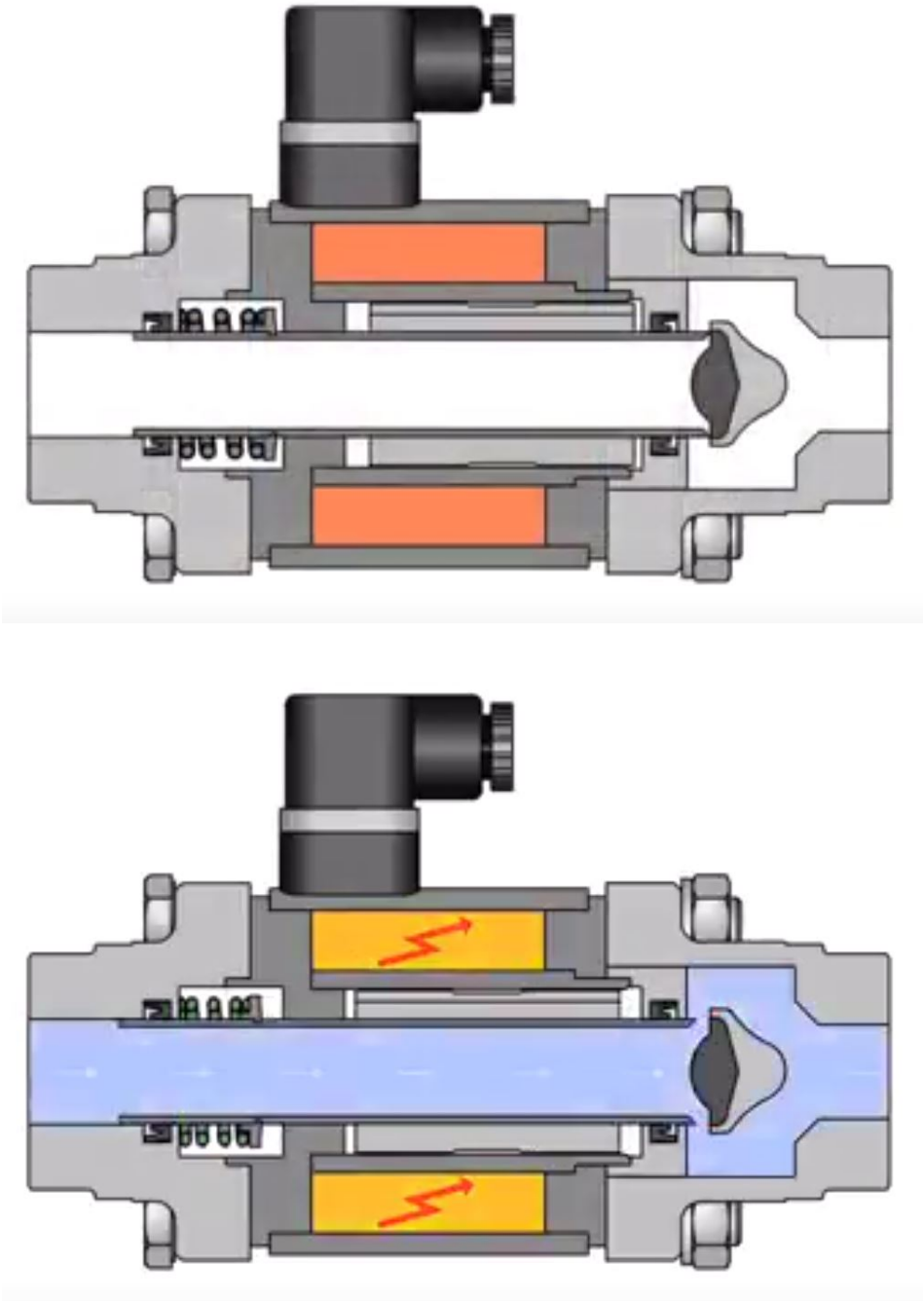


Figur 7. Den använda koaxialventilen. *The coaxial valve.*

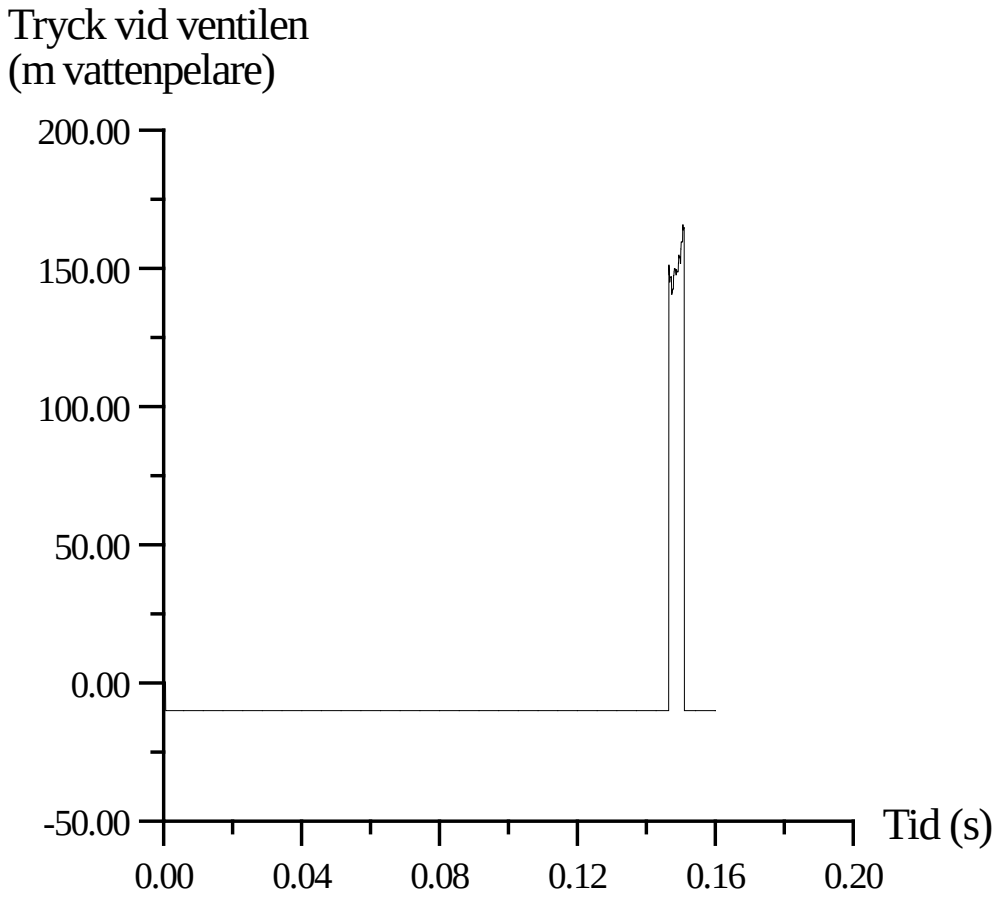
Den orange kabeln går till en elektromagnet som styr luftflödet i den grå pneumatiska ventilen. Denna i sin tur påverkar ventilens kägla.

Nedan visas genomskärning av en elektriskt styrd koaxialventil. En sådan är inte lika snabb som en elektropneumatisk ventil, men själva ventilmekanismen är likartad. Den visade ventilen är i normalläget stängd. Den i projektet använda är i normalläget öppen.

När ventilkäglan rör sig mot ventilsätet skjuts en liten mängd vatten framför käglan och skapar under en kort stund ett ökat tryck nedströms ventilen.



Figur 8. Överst koaxialventil i slutet läge, därunder i öppet läge. *Upper: Closed coaxial valve. Lower: Open valve.*

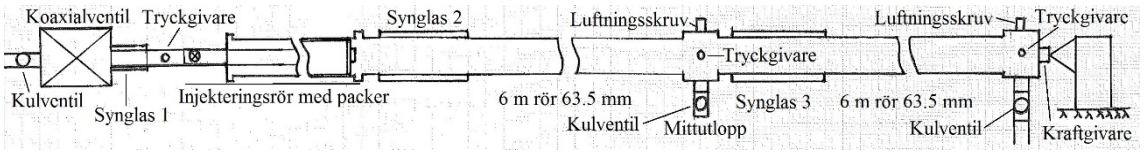


Figur 9. Teoretisk beräkning (L Jönsson) av tryckhöjningen vid ventilen då vattenpelaren slår in. Tryckhöjningen blir c:a 160 m vattenpelare vilket svarar mot att vattenpelaren slår i den stängda ventilen med 1.33 m/s. *Theoretical calculation of the pressure increase as the returning water-pillar rams the valve. The theoretical pressure reaches 160 m water-pillar. This corresponds to a speed of 1.33 m/s.*

2. SIMULERING AV INJEKTERINGSHÅL

På förslag av Referensgruppen konstruerades en borrhålssimulator i Etapp 2. Den består av 12 m mejerirör diameter 63.5 mm, som nära ansluter till vanliga diametrar för injekteringshål. Syftet med simulatorn är dels att kunna avsluta injekteringsröret på ett verklighetstroget sätt, dvs. ut i en större volym, dels att kunna studera vad som händer i borrhålet, något som inte är möjligt i verkliga injekteringshål. Simulatorn består i slutet av Etapp 3, efter flera omgångar av om- och tillbyggnad, av de komponenter som listas nedan, i den ordning flödet sker. Simulatorn är inte avsedd för att fyllas med verkligt injekteringbruk, eftersom den innehåller många partier som skulle vara mycket svåra eller omöjliga att rensa. Alla rördelar är sammanfogade med s.k. TC-kopplingar som hålls ihop av snabbt monterade klämmor. Den är avsedd för att studera tryckfenomen i vätska och då är det, som tidigare nämnts så att injekteringsbruk och vatten har samma ljudhastighet och fenomen relaterade till resonans och stående vågor ändå blir jämförbara. Spännande framtida möjligheter är emellertid att testa vätskor med modifierad densitet och viskositet, vätskor som inte hydratiserar.

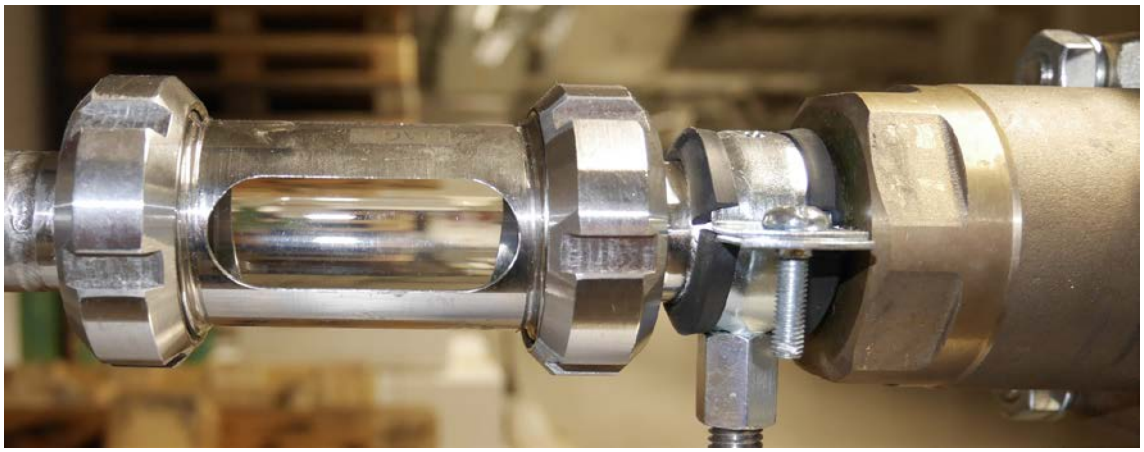
Om man skall ersätta kranvatten med annan blandning måste systemet kompletteras med en reservoar för blandningen och en pump, som kan leverera erforderligt tryck och flöde.



Figur 10. Principskiss av borrhålssimulatorn. Av luftevakueringsskäl är röret högre i högra delen. *Principle sketch of the grouting drill-hole simulator.*

2.1 Synglas omedelbart före inloppet till injekteringsröret

Källan kan i dessa försök antingen vara den elektrohydrauliskt styrda kolvpumpen eller koaxialventilen. Om man vill kontrollera huruvida det uppstår kavitation i systemet beroende på ett snabbt skapat undertryck är det enklaste sättet att göra det att installera ett synglas. Det är en kort bit glasrör som ersätter en bit rostfritt rör av samma diameter.



Figur 11. Synglas monterat omedelbart nedströms koaxialventilen (t.h.). *Sight-glass installed immediately downstream the coaxial valve (to the right).*

2.2 Tryckgivare strax före injekteringsröret

Innan flödet leds in i injekteringsröret passerar det två sensorer använda för att mäta tryck i vätskan. Det rör sig om en dynamisk tryckgivare och en statisk tryckgivare alternativt manometer. Vill man veta det statiska trycket i vätskan, det som alstras av trycket i vattenledningen, måste man använda en statisk tryckgivare. Man måste ha båda trycken därför att om det statiska trycket är 3 bars övertryck (atö), så är det 4 Bar absolut och om man då mäter upp ett dynamiskt undertryck om 5 Bar, så är det verkliga undertrycket 4-5 Bar dvs. -1 Bar absolut, vilket ju som tidigare berörts är ett tryck lägre än vakuum.

Figur 12. Dynamisk tryckgivare 70 Bar överst och statisk tryckgivare 0-29 Bar underst. *Dynamic and static pressure sensors.*

2.3 Injekteringsröret

Detta är till sin utformning en exakt avbild av ett kommersiellt tillgängligt injekteringsrör, se Figur 13. Men det har konstruerats om i rostfritt stål, för att inte förorsaka korrosion och därmed dålig synbarhet i de olika synglasen som finns i simulatorn. Det rostfärgade vattnet innehåller nämligen partiklar som fastnar på glaset. När detta hade hänt rensades röret med hjälp av en rörrensare till högtryckstvätt och alla delar som inte var tillverkade i rostfritt material byttes ut. Den enda detalj som finns kvar från det ursprungliga injekteringsröret är packern, den bit gummirör som pressas

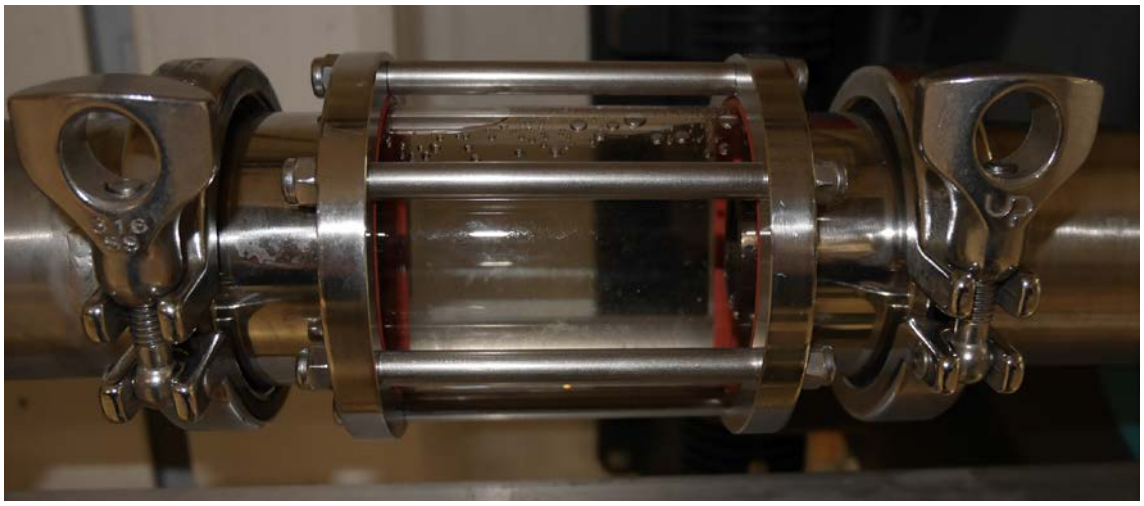
samman i längsled med en mekanisk anordning och tätar mot bergväggen. För att göra simulatorn mer modulär spänner man in injekteringsröret i ett 1 m långt rostfritt rör med samma diameter som resten av simulatorn. Detta rör har TC-hylsor i båda ändar och kan därför kopplas ihop med mejerirören. Röret har också en centreringsbricka som gör att injekteringsröret centreras i röret och att packern därför tätar optimalt mot detsamma. Denna rördel har också den viktiga funktionen att göra det möjligt att i ett synglas observera vad som sker när flödet mynnar ut i simulatorns grövre del, den som motsvarar det öppna borrhålet.

Figur 13. Injekteringsrör med packer, spännhandtag, kulventil och slangkoppling. *Grouting pipe with packer, handle, ball valve and hose coupling.*

Figur 14. Ytterrör till injekteringsröret ger stöd och medger förskjutning av packerns placering relativt simulatorröret. *Cover tube for the grouting pipe which provides support and allows the packer position to be adjusted relative the simulator.*

2.4 Synglas 2 efter injekteringsröret

För att kunna studera vad som sker där vätskan flödar ut i simulatorn / injekteringshålet finns ett 150 mm långt synglas monterat omedelbart efter den rördel som omsluter injekteringsröret. Med lite teknik kan man få injekteringsrörets utlopp att sitta så att det går att observera dess mynning genom synglaset. Därigenom kan man studera effekten av olika utformning på injekteringsrörets avslutning. Denna är i vanliga fall bara ett kapat stålrör i dimensionen halvtum.



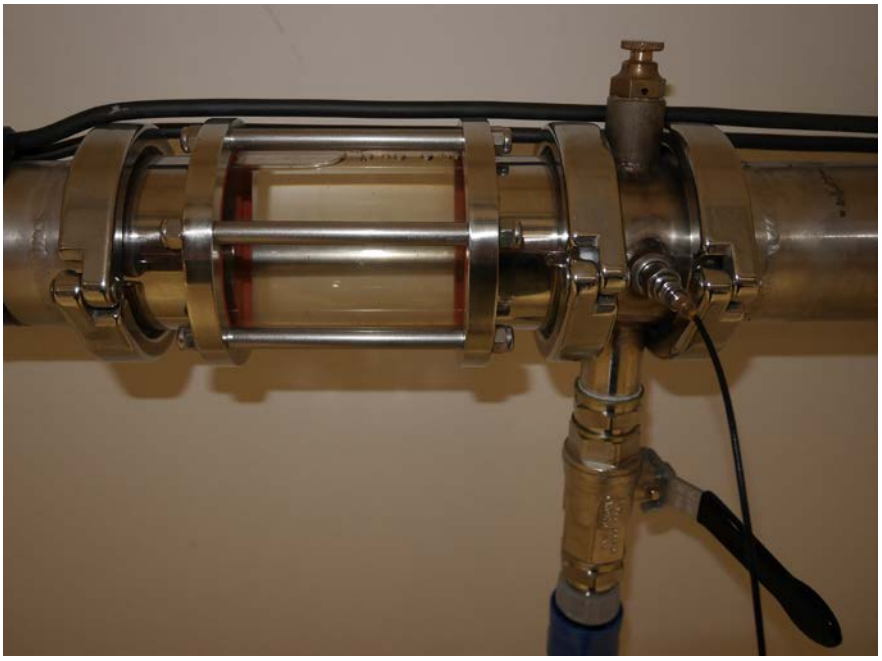
Figur 15. Synglas placerat omedelbart nedströms injekteringsrörets ytterhölje, i syfte att kunna observera när vätskan lämnar injekteringsröret. *Sight-glass located downstream the packer shows when liquid enters the bore-hole simulator.*

2.5 12 m rostfritt rör med sensorer och andra detaljer

Efter det andra synglaset monteras ett 6 m långt rostfritt rör med ytter-dimensionen 63.5 mm. Det följs av ett likadant för att ge den sammanlagda längden 12 m. Mellan rören sitter en dubbel TC-fläns som innehåller rörkopplingar för en hydrofon, en dynamisk tryckgivare (7 Bar) och en luftningsventil på ovansidan. Det finns också ett utlopp neråt med en kulventil.

En hydrofon är avsedd för att mäta ljud under vatten, men ljud är ju tryck, så man kan kalibrera en hydrofon att avläsa tryck. Liksom den dynamiska tryckgivaren ger hydrofonen endast information om kortvariga tryckförändringar.

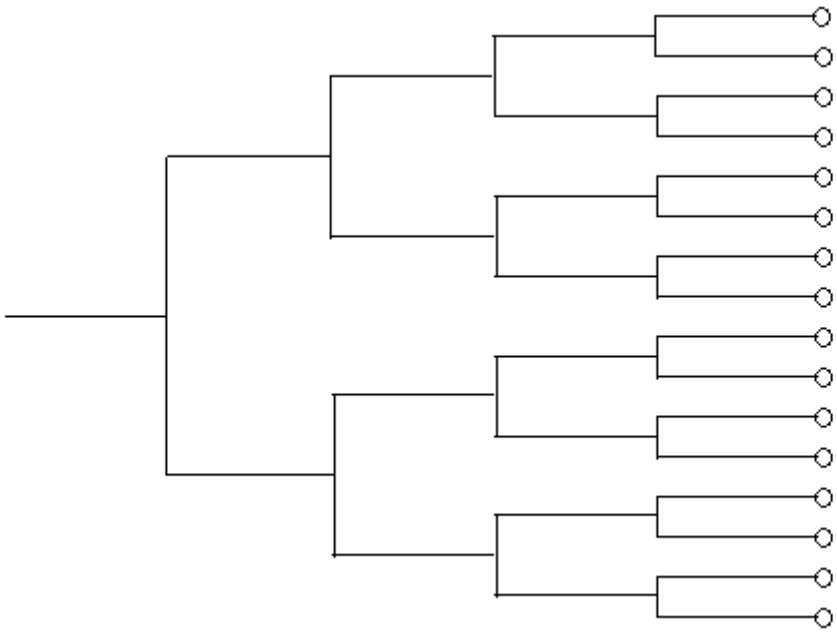
Att det på samma plats, eller snarare mitt emot varandra, sitter en hydrofon och en tryckgivare på den dubbla TC-hylsans sidor, gör att man kan kalibrera hydrofonen med hjälp av tryckgivarens kända data, sådana de lämnats av tillverkaren. Eftersom alla hydrofoner som används är av samma fabrikat och modell får denna kalibrering gälla för alla hydrofonerna, t ex också den i det 12 m långa rörets slut. Röret är fäst med konsoler mot en vägg i laboratoriet.



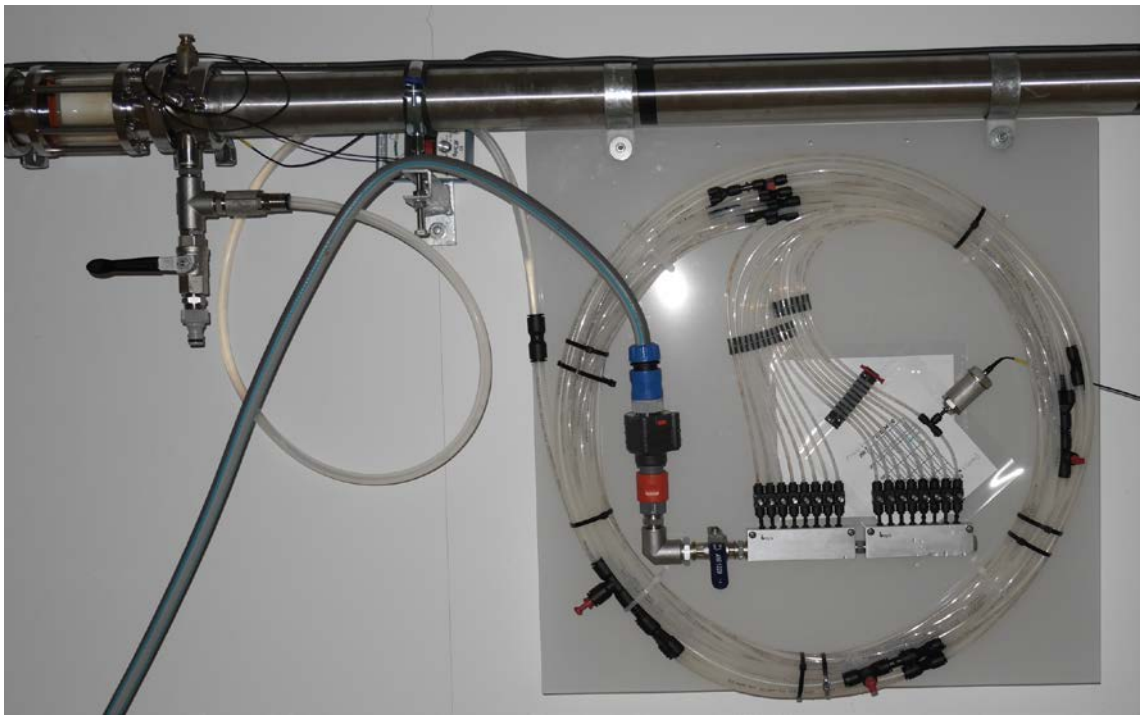
Figur 16. Synglas i simulatorns mittpunkt. Luftningsskruv, 7 Bar tryckgivare och kulventil till höger i bilden. *Sight-glass i the center of the simulator. Air-vent screw, 7 Bar pressure sensor and ball-valve to the right.*

2.6 Spricksimulator i form av ett slangträd

Det är inte lätt att simulera sprickor i berg. För att ändå på något sätt simulera den hydrauliska impedansen ut från injekteringshålet har ett slangträd konstruerats. Naturligtvis är det verkliga spricksystemets geometri okänd och därför sker här en grov approximation, som ändå har ett uns av intuitiv riktighet. Slangträdet börjar med en styv, genomskinlig plastslang med ytterdiametern 12 mm. Liksom alla följande slangdelar bifurkerar denna efter 2 m i två slangdelar med 10 mm ytterdiameter. Denna i sin tur i 2 m långa delar av slang med ytterdiametrarna 8, 6 och 4 mm, så att de senare är 16 till antalet. Slangarna med 4 mm ytterdiameter avslutas med 16 st ventiler så att man kan reglera flödet. Det samlade flödet går in i ett block vars utlopp via en kulventil och en Gardena-koppling leds till en golvbrunn. Vid Gardena-kopplingen kan man ansluta en enkel flödesmätare. Vid alla bifurkationspunkter kan man ansluta en tryckgivare. Mest intressant är att ha en givare på en av 4 mm ledningarna, strax före ventilerna. De värden man där får på trycket blir ett mått på hur långt in i systemet tryckvågor alstrade långt uppströms förmår tränga in.



Figur 17. Spricksimulatorns principdiagram. Slangdelarna (2m) är från vänster 12, 10, 8, 6 respektive 4 mm ytterdiameter. *Principle diagram of the fissure simulator. The parts are 2 m long pieces of 12, 10, 8, 6 and 4 mm plastic pipe.*



Figur 18. Spricksimulatorns fysiska utformning. *The physical version of the fissure simulator.*

Slangarnas diametrar är sådana att det summerade tvärsnittet i varje slangdimension är approximativt densamma.

2.7 Kort spalt

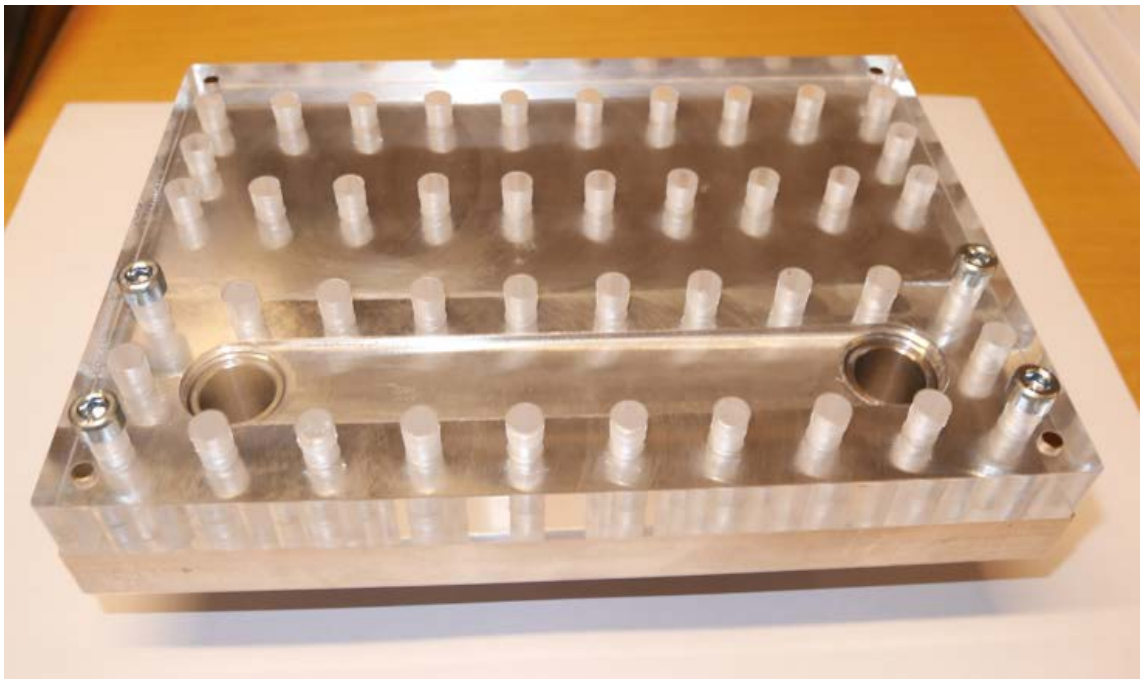
En 4 mm plastslang har naturligtvis en innerdiameter som är väsentligt grövre än de fina sprickorna i berggrunden. Därför kan man framöver tänka sig att ansluta en s.k. kort spalt efter de sista delarna i slangträdet för att öka utströmningsmotståndet. Spalterna kan naturligtvis också anslutas närmare källan till tryckvariationerna, dvs. utan simulatorn. Därmed kommer injekteringsbruk att kunna användas och då erhålles signifikanta värden på inträngningsförmågan. De korta spalterna har ett inlopp som grenar ut i fyra kanaler. I varje kanal finns en tröskel, eller spalt, som är olika i de fyra kanalerna. Varje kanal har ett individuellt utlopp som gör att man kan studera flödet vid olika spaltöppningar, för samma tryck i inloppet.

Figur 19. De två korta spalterna tillverkade på uppdrag av KTH och LTH. De innehåller 8 olika spaltvidder från 40 till 140 µm. Ytterdiameter 300 mm. *Two "kort spalt" devices with thresholds of 40 to 140 µm. Outer diameter 300 mm.*

En mindre version av kort spalt har tillverkats vid LTH. Syftet med denna är att man skall kunna studera flödesmönstret genom glasskivan. Det kan ske genom att man blandar i partiklar i vätskan och långtidsexponerar.

Figur 20. En mindre version av kort spalt tillverkad vid LTH. Ytterdiameter 120 mm. *A smaller version of the "kort spalt" concept manufactured at LTH. The outer diameter is 120 mm.*

Vid LTH har också tillverkats en anordning för att kunna studera partikelrörelser invid sprickvägg. Den består av en aluminiumplatta med urfräst spår och med två genomföringar och en plexiglasskiva som skruvas fast på denna. Plexiglasskivan är utformad så att den kan vändas när den blivit repad.



Figur 21. Anordning för att studera partikelrörelser invid sprickvägg. *Device making it possible to study particle flow close to a surface.*

2.8 Simulatorns ändutlopp

Det har redan nämnts att det finns ett utlopp i simulatorns mittdel. Det är naturligtvis inte realistiskt att utströmningen ur ett injekteringshål sker koncentrerat, men med ett andra utlopp vid rörslut finns det åtminstone möjlighet att studera skillnader i det avseendet. Utloppet består av en dubbel TC-hylsa i vilken rördelar har svetsats fast så att en hydrofon eller en tryckgivare kan anslutas. Liksom i rörmitt finns det en luftningsskruv upptill. Det 12 m långa röret lutar svagt uppåt mot utloppet i rörslut, så att eventuell luft i systemet skall samlas i den högsta punkten är där kunna luftas bort. I utloppsröret sitter en kulventil. När luft i röret skall ventileras bort stängs kulventilen och vattentrycket i röret hjälper till att pressa ut luften.

Figur 22. Utloppet från borrhålssimulatorn. Mothåll, kraftgivare, luftningsventil, hydrofon, kulventil. *Outlet from the simulator tube. Anvil, force transducer, air-vent, hydrophone and ball valve.*

2.9 Kraftgivare

Efter utloppet finns ett ändstycke monterat i TC-hylsan, det är en platta som täcker rörets hela yta och är tätad mot detta med en gummipackning. Plattan är försedd med en påsvetsad mutter. Eftersom det vid oscillerande tryck i röret eller tryckslag uppstår reaktionskrafter kan det vara motiverat att mäta hur stora dessa är. Det problem som då måste lösas är det traditionella med en fixpunkt. Det har lösts på så sätt att en rostfri bygel i 80 x 40 mm fyrkantprofil är inspänd mot en betongpelare 500 x 500 mm i väggkonstruktionen. Bygeln sticker ut så att den ligger i nivå med simulatorns ändutlopp. En mässingsskruv går genom bygeln och kan spännas upp mot en kraftgivare som är fäst i ändstycket vid TC-hylsan.

Figur 23. Kraftgivaren vid rörslut / utlopp. *Force transducer at the end of the tube.*

3. UTFÖRDA EXPERIMENT

Ett av de övergripande problemen med dynamisk injektering är att få tryckoscillationerna att tränga ut i sprickorna som skall injekteras. Att studera det *in situ* är omöjligt. De försök som redovisas här försöker därför dokumentera det i laboratoriemiljö. Andra försök är inriktade mot att studera kavitationsfenomenet.

Hundratals experiment med koaxialventilen har utförts, de flesta i en lärandeprocess som omfattat korrekt hantering av signaler från hydrofoner och förbättring av försöksuppställningen. Endast ett fåtal redovisas i det följande. (Avsnitt 3.1-3.6)

Några för tryckslag relevanta ekvationer presenteras nedan

$$\Delta h = \frac{v_0 \cdot a}{g} \cdot L$$

Juokowskis ekvation för tryckfallet Δh när
v0 = vattnets strömningshastighet (m/s)
a = vågutbredningshastigheten (m/s)
g = tyngdkraften 9.81 (m/s)
L = ledningens längd (m)

Vågutbredningshastigheten i rör.

$$a = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho}}{1+\frac{K \cdot D}{E \cdot e} \cdot F}}$$

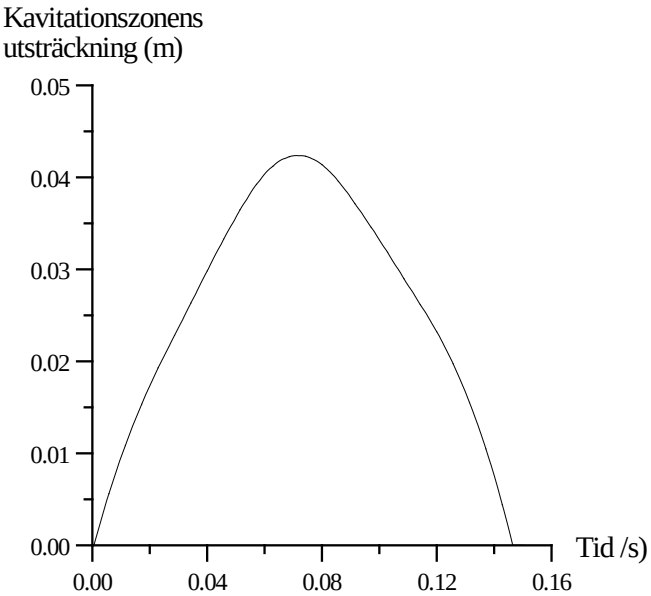
a= Vågutbredningshastighet [m/s]
K =Vattnets elasticitetsmodul = $1 \cdot 1\ 0^9$ [N/m2]
ρ = Vattnets densitet = 1000 [kg/m3]
E = Rörmaterialets elasticitetsmodul [N/m2]
e = Rörväggens tjocklek [m]
D = Rörets inre diameter [m]
F = Rörets inspänningsfaktor

Försök har gjorts att bestämma hur stor skillnaden mellan olika rördiametrar skall vara för att man skall kunna räkna med att det sker en total reflektion av en tryckvåg i övergången (3). Om skillnaden i diameter på rören är 8-10 ggr verkar det som att man skulle kunna räkna med total reflektion. I de här redovisade försöken rör det sig om övergången mellan injekteringsröret med innerdiameter 14 mm och det grova rostfria mejeriröret med innerdiameter 60 mm. Kvoten blir inte så stor att villkoret för totalreflektion uppfylls. Därför kommer en betydande del av vågrörelsen som koaxialventilen skapar att fortplantas från injekteringsröret ut i mejeriröret.

Tryckslag är vanligen förknippat med uppströms övertryckstötar, men det uppstår också nedströms undertryck-stötar då en ventil hastigt stängs.
Kavitation inträffar när det uppstår bubblor i vattnet vid en plötslig tryckminskning. I dessa bubblor finns dels i vattnet löst luft, dels vattenånga. Man försöker vanligen undvika kavitation och tryckslag i vattenledningssystem, men försök på KTH (4) har visat att vid insonifiering med ultraljud och därvid skapad kavitation erhålls förbättrade egenskaper för injekteringsbruk baserat på fincement. Aggregeringen av cementkorn bryts upp under kavitation och leder till förbättrad fluiditet och hydratisering.

Kavitation är svårberäknat eftersom det får sägas vara ett kaotiskt system. I ett rör får man tänka sig att när bubblorna börjar bildas ett allt större avsnitt av röret fylls av bubblor tills den framrusande vattenpelaren stoppas av det snabbt minskande trycket efter ventilen. När kraftbalans råder mellan rörelseenergi och undertryck avstannar processen och bubblorna börjar återbildas (imploderar). Slutligen kollapsar molnet under en kraftig tryckstöt mot ventilen när alla bubblor imploderat. Ett försök att teoretiskt beräkna vad som sker visas nedan.

Bilden visar hur kavitationszonen växer till, når sitt största omfång och därefter imploderar.



Figur 24. Teoretisk beräkning av kavitationszonens utbredning med tiden. (L Jönsson). *Theoretical calculation of the extension of the cavitation zone with time.*

Försök med den elektrohydrauliskt styrda injekteringspumpen utfördes huvudsakligen i föregående etapp av projektet och i denna etapp planerades ett försök att verifiera återkopplad resonans, dvs. att när ett system väl kommit i resonans kommer det att följa förändringar i resonansfrekvensen helt automatiskt (Avsnitt 3.6). Det sker genom att man låter tryckoscillationerna strax innan injekteringsröret styra injekteringspumpens arbete. För det krävs tidigare utvecklad elektronik som kan hålla återkopplingen på specificerad nivå så att systemet inte exploderar.

Alla försök dokumenteras genom avbildning av oscilloskopets skärm. För att knyta varje figur i rapporten till försöksmaterialet finns ett ID med för varje oscilloskopbild, den har formen [TEKXXX].

3.1 Tryckmätning nedströms koaxialventilen vid enskilt tryckslag

Tryckhistorik nedströms injekteringsröret i borrhålssimulatorn skall demonstrera vad man kan förvänta sig sker i den volym injekteringsbruk som befinner sig i injekteringshålet. Inledningsvis studeras detta för ett enskilt tryckslag, dvs. att observationsperioden definieras av att ett flöde plötsligt avbryts. Flödet återkommer inte under observationsperioden och därför uppstår inga interfererande effekter när flödet kopplas på igen eller från nästa avbrott i flödet. Ett enskilt tryckslag demonstrerar därför de grundläggande effekterna.

De dynamiska tryckgivarna och hydrofonerna har en tidskonstant, som anger hur lång tid de tar för att ställa in signalen på nollvärde.

För att få reda på absoluttrycket måste man referera till det statiska trycket i röret, vilket fås t ex via en manometer. Fritt flöde genom röret är c:a 20 l/min vid c:a 3.2 atö vatten-ledningstryck. Detta tryck är det som råder i diagrammens vänstra kant. Trycket i vattenledningen när flödet är avstängt är 4.0 atö.

I borrhålssimulatorn, det 12 m långa rostfria röret, kan trycket mätas på tre olika platser: 1. Omedelbart nedströms koaxialventilens synglas (tryckgivare 70 Bar), 2. I rörmitt (tryckgivare 7 Bar och hydrofon) samt 3. Vid utloppet (hydrofon). Tryckfunktionerna redovisas nedan.

Tryckgivarna är av ICP-typ (PCB) och skall kopplas till en förförstärkare (PCB). Denna kan förstärka tryckgivarens signal 1, 10 eller 100 ggr. Hydrofonerna (Reson) måste kopplas till en laddningsförstärkare (Bruel&Kjaer 2635). Denna har ett mycket stort förstärkningsområde. Hydrofonerna har ingen angiven känslighet i Volt/Bar och därför kalibrerades de mot tryckgivaren i mitten av borrhålssimulatorn där det sitter både en specificerad tryckgivare och en hydrofon.

Givarnas känslighet:

70 Bar tryckgivare 0.72 V/Bar (Efter 10 ggr förstärkning)

7 Bar tryckgivare 7.15 V/Bar (Efter 10 ggr förstärkning)

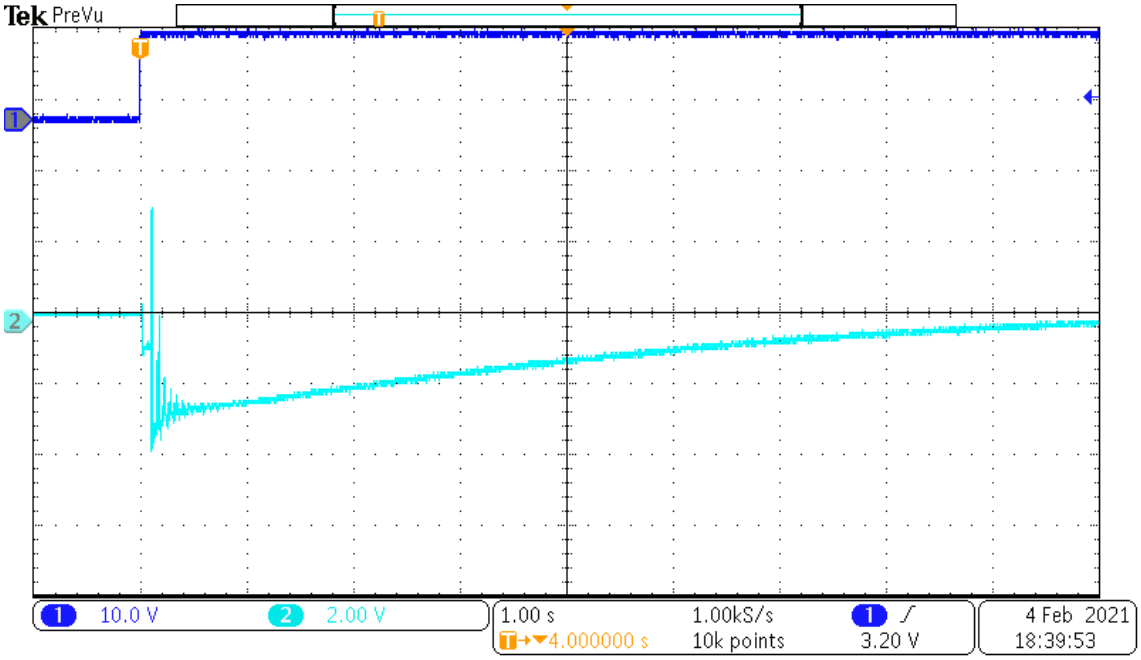
Hydrofon 1.607 V/Bar (efter kalibrering mot 7 Bar tryckgivare i rörmitt)

Statiska trycket i röret vid fullt flöde är 1.239 Bar absolut.

3.1.1 Tryckmätning nära koaxialventilen före injekteringsröret

I nedanstående figurer visas den elektriska styrsignalen, som åstadkoms manuellt, och tryckmätningen mellan koaxialventilen och injekteringsröret.

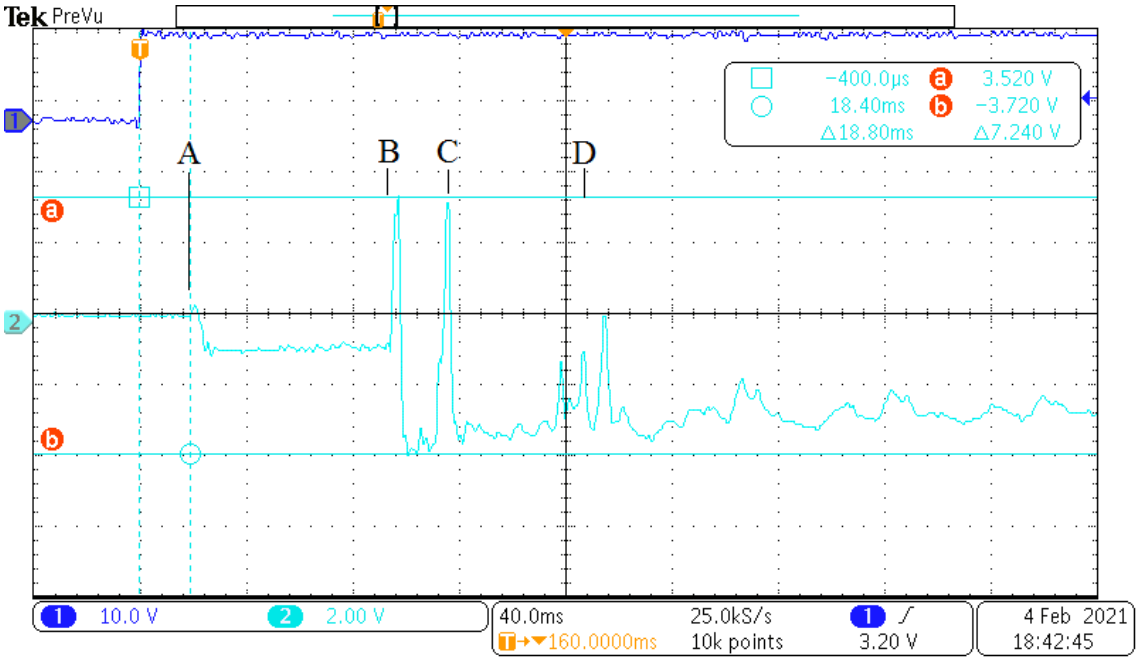
Händelseförloppet visas i olika tidsskalor för att ge översikt i det kompakta format en rapportsida medger.



Figur 25. Koaxialventilen stänger. Översikt. Diagrammet omfattar 10 s. *The coaxial valve closes. Overview. The diagram encompasses 10 s.* [TEK657]

Ch 1 (mörkblå) visar styrsignalens positiva flank vid stängning av koaxialventilen.

Ch2 (turkos) visar signalen från tryckgivaren omedelbart nedströms koaxial-ventilen och det första synglaset. Den långa återhämtningsperioden tillskrivs den dynamiska tryckgivarens tidskonstant. 70 Bar tryckgivare 0.72 V/Bar.



Figur 26. Förstoring av det inledande skedet i föregående figur omfattande 400 ms. *Magnification of the initial part of the previous diagram covering 400 ms.* [TEK658]

Vid A, 18.8 ms efter styrsignalens flank, börjar ventilkäglan röra sig och några ms senare har flödet upphört helt. Den korta positiva pulsen orsakas av att koaxialventilkäglan rör sig nedströms när den stänger ventilen och då skjuts en vattenmassa framför, som skapar ett ökat tryck.

När ventilen är helt stängd sjunker trycket drastiskt under det att ett kavitationsmoln utvecklas under perioden A-B. Kavitationsmolnet kollapsar därefter vid tiden B och ett mycket stort tryck alstras invid ventilen. Tryckpulsen reflekteras troligen i injekteringsrörets slut och återvänder i punkt C till tryckgivaren vid ventilen.

Sekvensen vid punkt D är ännu oförklarade reflektioner ute i borrhålssimulatorns grova del. För att förklara dessa skulle man via tiden de inträffar vid och tryckvågornas utbredningshastighet i borrhålssimulatorn kunna ta reda på läget. Tyvärr har det visat sig omöjligt att få konsistenta värden på utbredningshastigheten i borrhålssimulatorn. Hypotesen är att den påverkas av mängden luftbubblor i vattnet och att denna inte är konstant eller jämnt fördelad. I fall med kavitation är detta uppenbart.

<u>Resultat för 70 Bar tryckgivare, dynamiska tryck re +1.239 Bar</u>

Övertrycksnivå (3.52 V) = +4.89 Bar vid två tillfällen efter kavitationskollaps

Kavitationsundertryck A-B (-1.0V) = -1.39 Bar

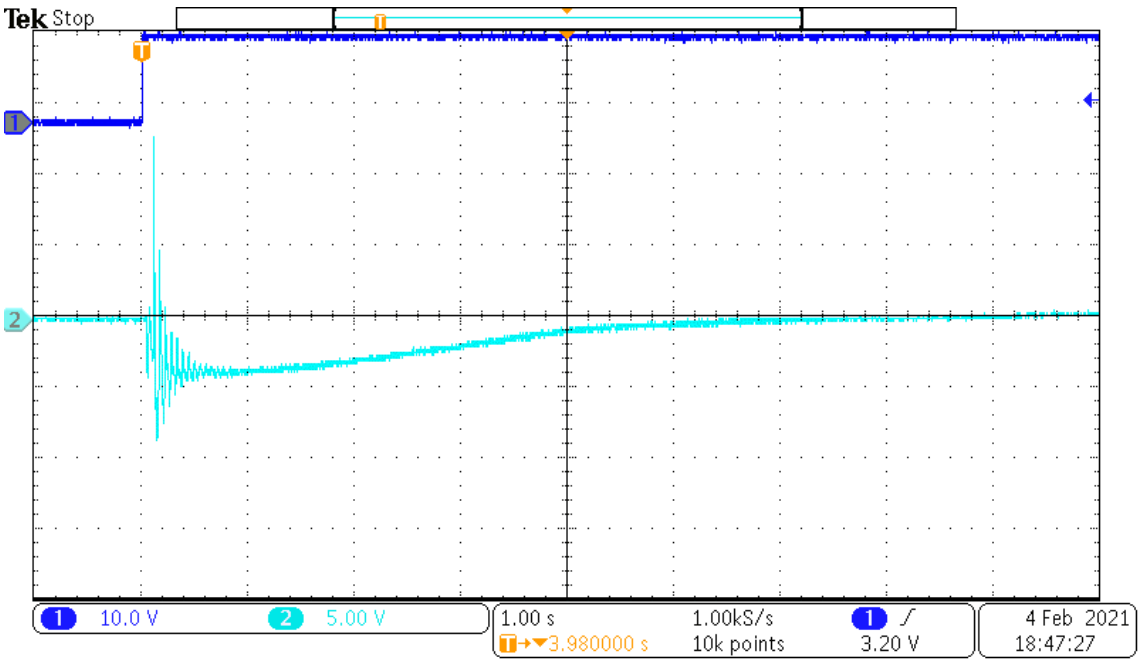
Undertrycksnivå (-3.72 V) = -5.17 Bar

Statiska övertrycket i röret är +1.239 Bar absolut och då blir undertrycket 1.239-5.17 = -3.93 Bar absolut, vilket är betydligt lägre än vakuum = 0 Bar absolut.

Noteras bör att detta inte inträffar under kavitationsfasen utan i samband med kavitationsmolnets implosion.

3.1.2 Tryckmätning vid rörmitt

I detta avsnitt visas tryckmätning i rörmitt, dvs 6 m in i borrhålssimulatorn. Liksom i föregående avsnitt visas historiken i olika tidsskalor för att ge en god översikt. I nedanstående figurer har en andra tryckgivare med högre känslighet kopplats till Ch2 i oscilloskopet. Trycket i rörmitt karaktäriseras av att det inte har påverkats av förhållandena vid rörets utlopp, där ju i princip atmosfärstryck råder.

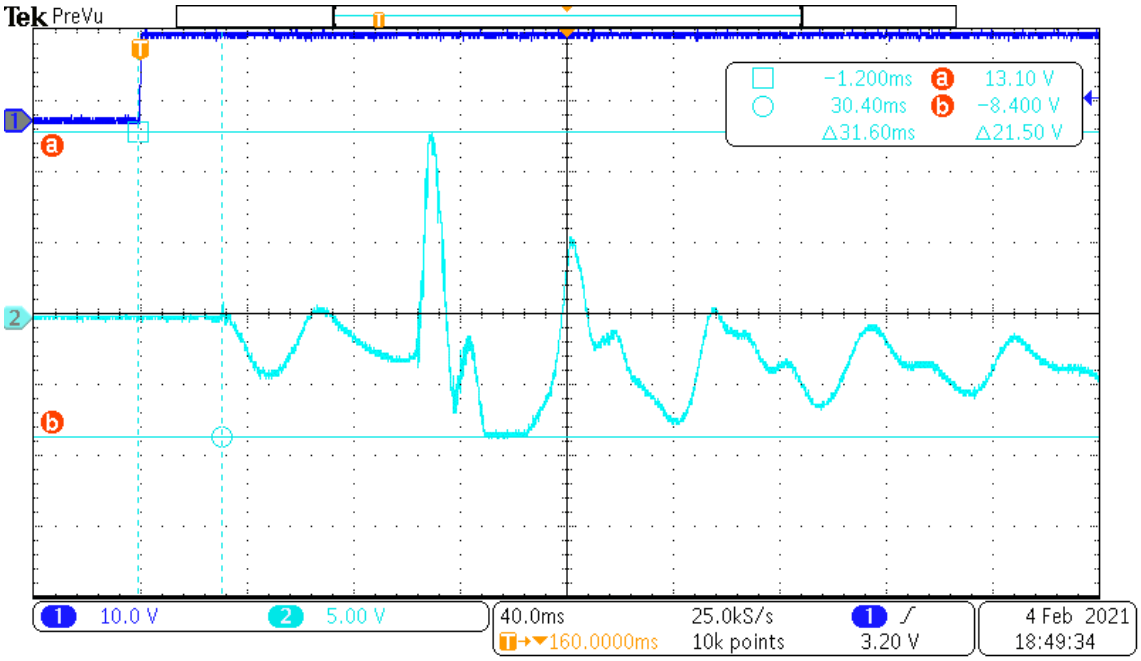


Figur 27. Översiktsbild av tryckhistorik i rörmitt. Hela perioden 10 s. *Overview of the pressure history i the center of the simulator tube. Period shown is 10 s.* [TEK659]

Ch1 Styrsignal

Ch2 Tryckgivare 2 i rörmitt 7.15 V/Bar.

Den långa återhämtningsperioden för tryckgivaren i Ch2 tillskrivs den dynamiska tryckgivarens tidskonstant.



Figur 28. Tryckgivarsignal rörmitt. Förstoring av det inledande skedet i föregående figur omfattande 40 ms per ruta. *Pressure sensor signal in the center of the tube. Magnification of the initial part of the previous diagram.* [TEK 660]

Ch1 styrsignal

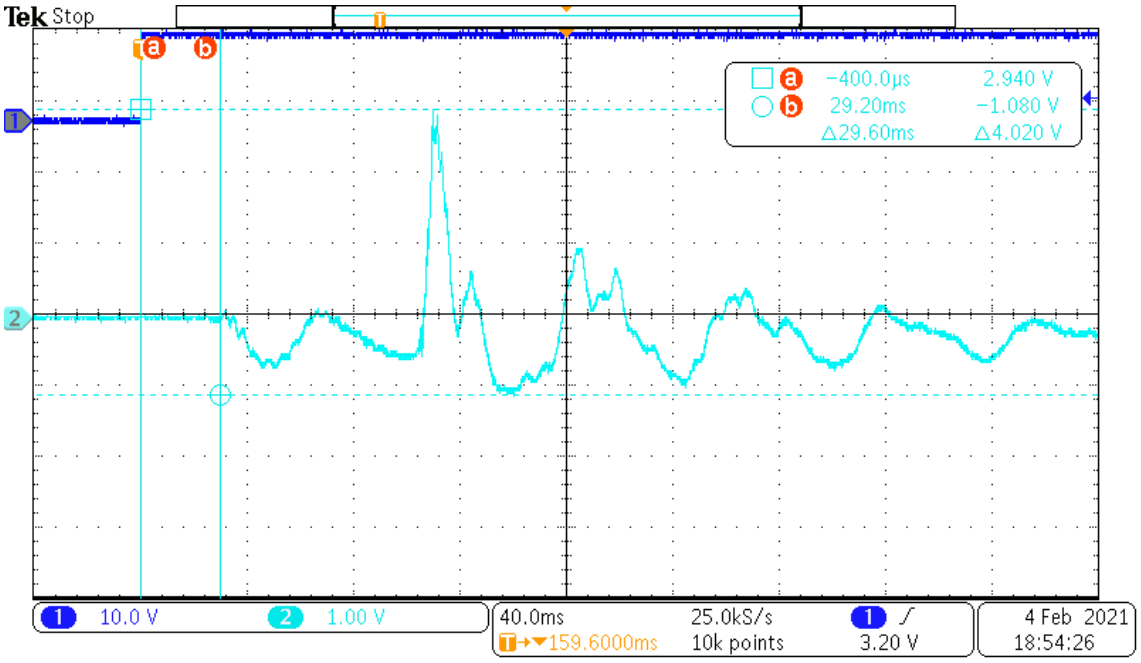
Ch2 tryckgivare 2 i rörmitt. Fördröjningen mellan styrsignalens flank och brytpunkten i Ch2 är 31.6 ms.

Resultat för 7 Bar tryckgivare (7.2 V/Bar) dynamiska tryck re +1.239 Bar

Övertrycksnivå (+13.10 V) = +1.83 Bar

Tryck under kavitationsfasen (-4.5 V) = -0.63 Bar

Undertrycksnivå (-8.4 V) = -1.18 Bar



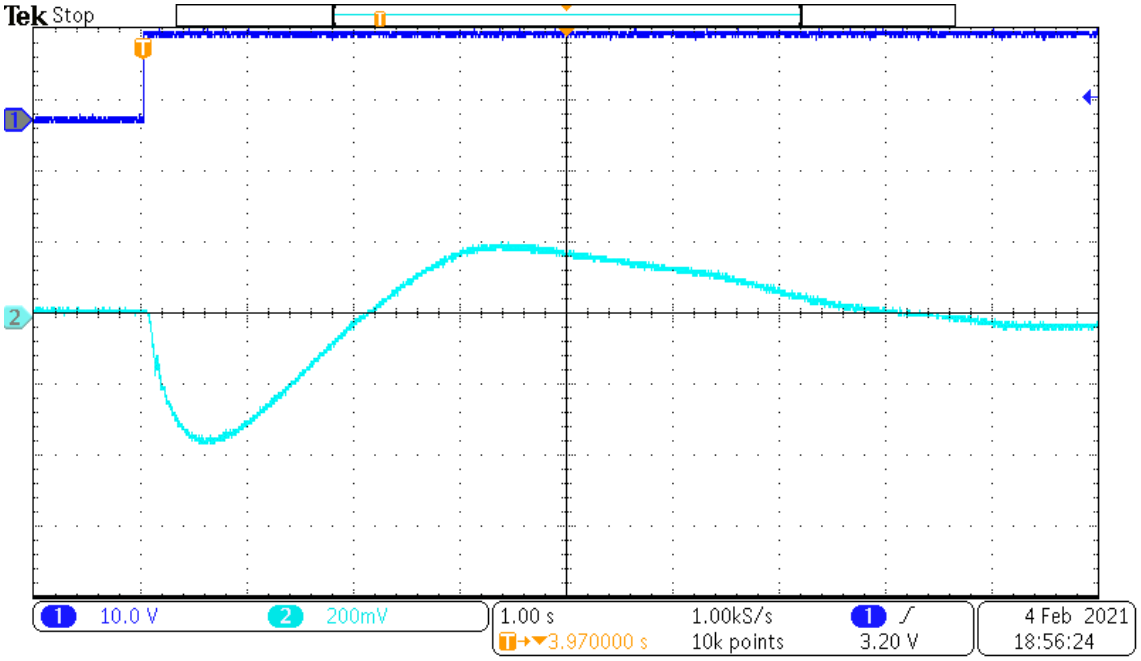
Figur 29. Hydrofonsignal rörmitt. Detalj 400 ms. Bilden demonstrerar att en hydrofon fungerar som tryckgivare. *Hydrophone signal from the center of the tube. Detail 400 ms. The diagram demonstrates that a hydrophone works as a pressure sensor.* [TEK662]

Ch1 styrsignal

Ch2 hydrofon 1 i rörmitt 1.607 V/Bar (efter kalibrering mot 7 Bar tryckgivare i rörmitt)

3.1.3 Tryckmätning vid utloppet

Förhållandena vid utloppet skiljer sig från resten av röret därigenom att det finns en direkt utgång till atmosfärstryck via utloppsslangen. Det kan därför vara av intresse att registrera tryckhistoriken också där. I denna punkt sitter enbart en hydrofon, men en hydrofon identisk med den i rörmitt avseende specifikationer.



Figur 30. Översikt 10 s. Tryckmätning med hydrofon vid utloppet från borrhålssimulatorn. *Overview 10 s. Pressure measurement with a hydrophone at the outlet from the tube.* [TEK663]

Ch1 styrsignal

Ch2 hydrofon 1 i rörmitt

<u>Resultat för hydrofon vid utloppet. Dynamiska tryck re +1.239 Bar absolut</u>

Övertrycksnivå (+200 mV) = +0.124 Bar

Undertrycksnivå (-0.372 V) = -0.231 Bar.

Dessa tryck ligger, som förväntat, nära det statiska trycket i röret eftersom mätningen sker så nära utloppet.

<u>Vågutbredningshastighet i röret enligt ovanstående mätningar.</u>

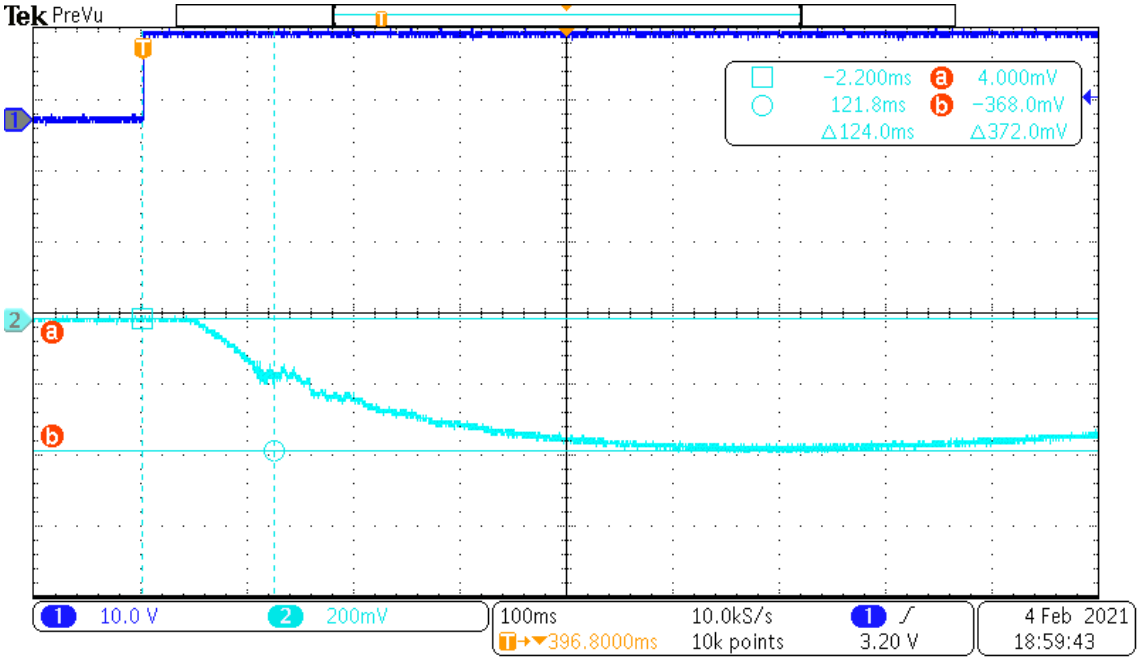
Referenstid (0) är styrsignalens flank. Injekteringsröret är ungefär 1 m långt, varje halva av borrhålssimulatorn är 6 m.

Tryckgivare 1 nedströms första synglaset: 18.8 ms

Tryckgivare 2 i rörmitt: 31.6 ms; 7.0 / (31.6-18.8) = 547 m/s

Hydrofon 1 i rörmitt: 29.6 ms; 7.0 / (29.6-18.8) = 648 m/s

Hydrofon 2 vid rörets utlopp: 49.6 ms; 13 / (49.6-18.8) = 422 m/s

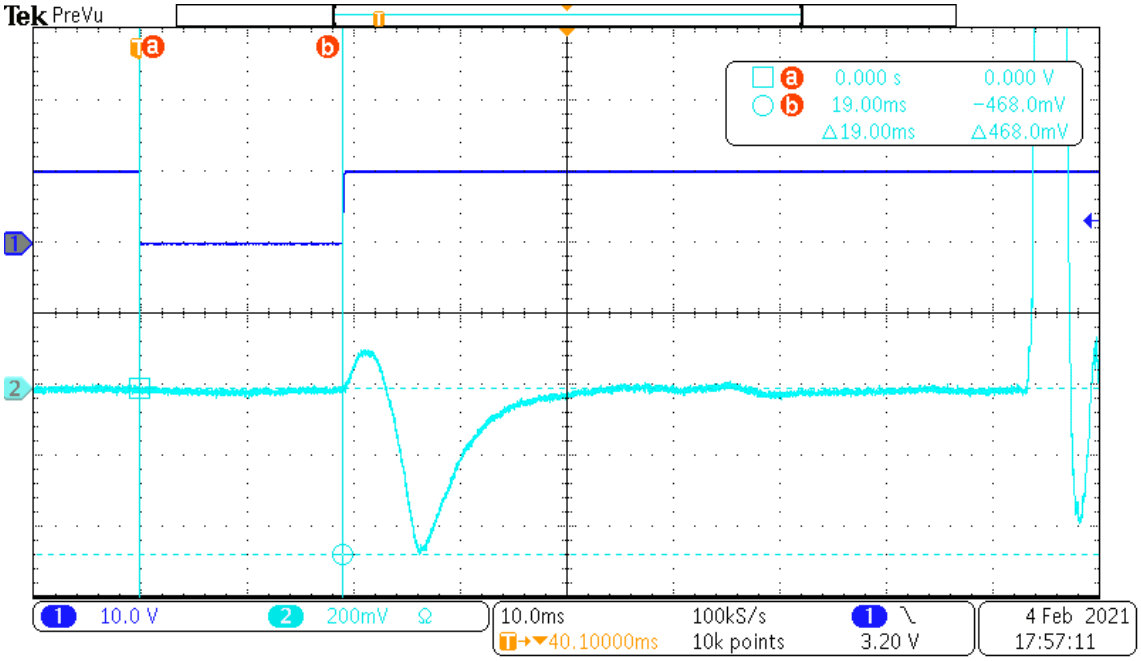


Figur 31. Detaljbild 1 s. Utlopp, hydrofon. *Detailed diagram 1 s. Hydrophone at the outlet from the tube.* [TEK665]

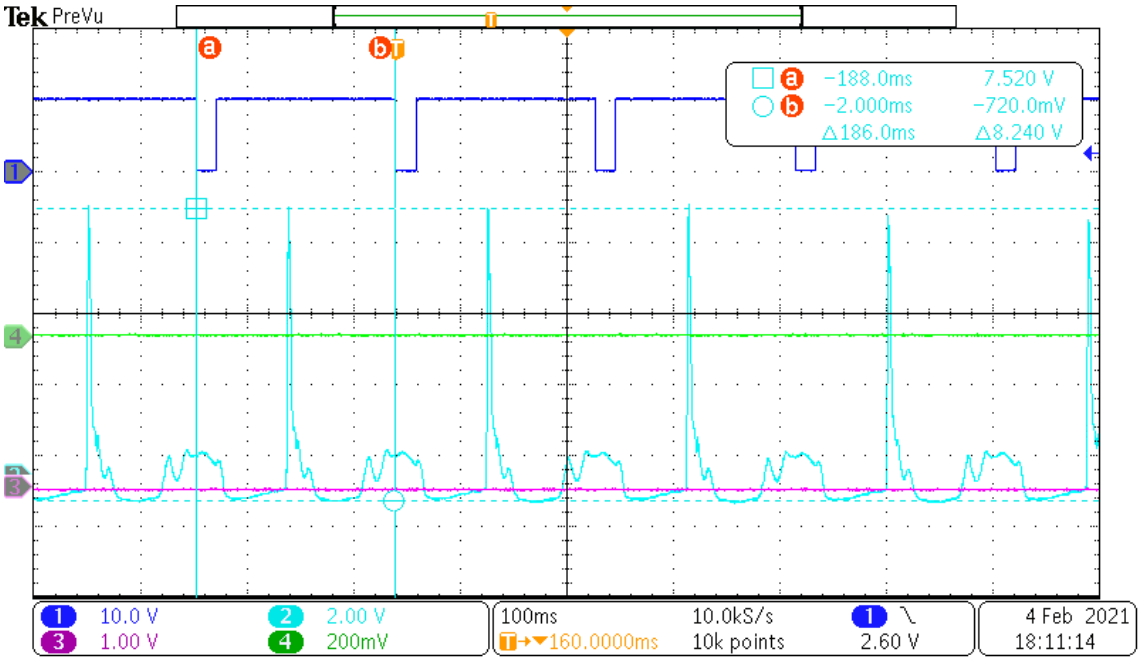
3.2 Tryckmätning nedströms koaxialventilen vid upprepade tryckslag. Taktning.

I dessa försök stängs och öppnas koaxialventilen med hjälp av ett pulståg från en pulsgenerator. Denna kan variera pulslängd och pulsavstånd. Båda parametrarna påverkar de tryckvariationer man erhåller. Om pulsen är kort och observationstiden lång kommer tryckvariationerna som skapas av ventilstängning att blandas med de som skapas vid ventilöppning. Är dessutom tiden mellan pulserna kort kommer flera öppningar och stängningar att samverka och en komplex tryckhistorik skapas. Vad man här är intresserad av är taktning, dvs. att att pulslängd och pulsfrekvens är sådana att man erhåller maximala tryckskillnader i injekteringsröret. Detta är konstruktiv interferens snarare än resonans, men får en likartad effekt.

Man inser att hög täthet mellan pulserna gör att medelflödet minskar och att maximal flödeshastighet i röret inte hinner uppnås innan flödet åter bromsas. Det motverkar utbildandet av stora tryckslagseffekter. Möjligen skall man anpassa tryckslagsfrekvensen efter flödet. I början av injekteringen behövs kanske inga tryckslag och mot slutet blir det inga pga. det låga flödet.



Figur 32. Detalj av inledande tryckförlopp när pulslängden är 19 ms. *Detail of the initial pressure history at a pulse length of 19 ms.* [TEK653]



Figur 33. Maximal tryckvariation vid försök till manuell optimering av pulslängd och pulsavstånd på pulsgeneratorn. *Maximum pressure variation obtained in manual attempt to adjust pulse rate and length.* [TEK654]

Ch1 styrsignal från pulsgenerator. Pulsavstånd 186 ms, pulsbredd 21 ms.

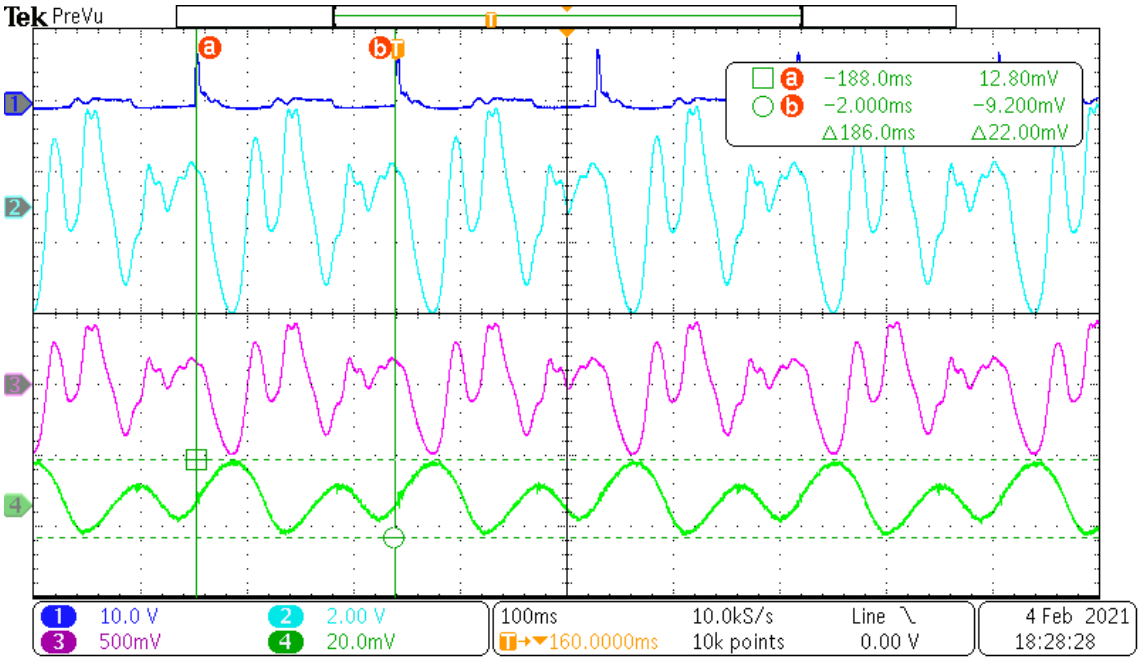
Ch2 tryckgivare 1 nedströms första synglaset. Tydlig kavitation kan iakttas i de båda första synglasen, det vill säga både före och efter injekteringsröret. *Hela detta är alltså fyllt med kavitationsbubblor som kan bryta ner cementpartikelaggregat när de imploderar.* Hur långt in i borrhålssimulatorn bubblorna sprider sig är för närvarande okänt. Det syns inga kavitationsbubblor i det tredje synglaset i rörmitt.

<u>Resultat för 70 Bar tryckgivare (0.72 V/Bar) Dynamiska tryck re +1.239 Bar</u>

Övertrycknivå (+7.520 V) = +10.44 bar (rel 3.2 Atö)

Undertrycknivå (-0.720 V) = -1 bar (rel 3.2 Atö)

Från mätresultaten under Avsnitt 3.1 förstår man att den starka tryckpulsen skapas när kavitationsmolnet imploderar mot den stängda koaxialventilen.



Figur 34. I denna presentation har styrsignalen utgått och i stället har hydrofonsignalen vid rörets utlopp lagts till. *In this presentation the electric control signal is removed instead the hydrophone signal at the outlet is added.* [TEK656]

Ch1 Tryckgivare 1 efter koaxialventilen

Ch2 Tryckgivare 2 i rörmitt

Ch3 Hydrofon 1 i rörmitt

Ch4 Hydrofon 2 vid utloppet där följande max och mintryck uppmättes

<u>Resultat för hydrofon 2 (1.607 V/Bar) Dynamiska tryck re +1.239 Bar abs.</u>

Övertrycknivå (12.80 mV) = 0.01 bar

Undertrycknivå (-9.2 mV) = 0.01 bar

Invid utloppet skapas alltså inga nämnvärda tryckvariationer. Utloppet var öppet, eftersom tryckslagsprocessen förutsätter ett flöde. I ett verkligt borrhål sker utloppet längs hela injekteringshålet.

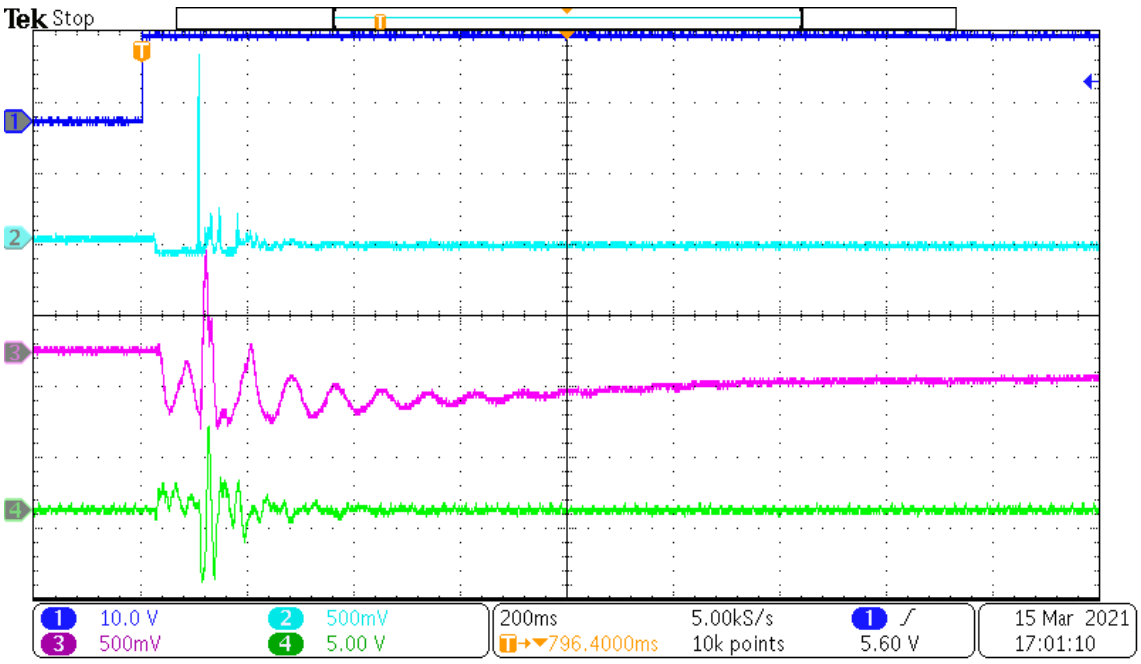
3.3 Inspänningskraft vid rörslut efter ett tryckslag

Frågan kan ju uppstå om vilka spänningar tryckslagsprocessen skulle skapa i berget. Detta mot bakgrund att man inte vill åstadkomma oavsedd fracking.

Därför installerades en kraftgivare i slutet av simulatorn, montaget av denna presenteras i avsnitt 4.9.

Fullt flöde c:a 20 l/min rådde vid försöket. Statiskt tryck i röret var 3.2 Bar. Utlopp skedde vid rörslut.

3.3.1 Inspänningskraft vid enskilt tryckslag



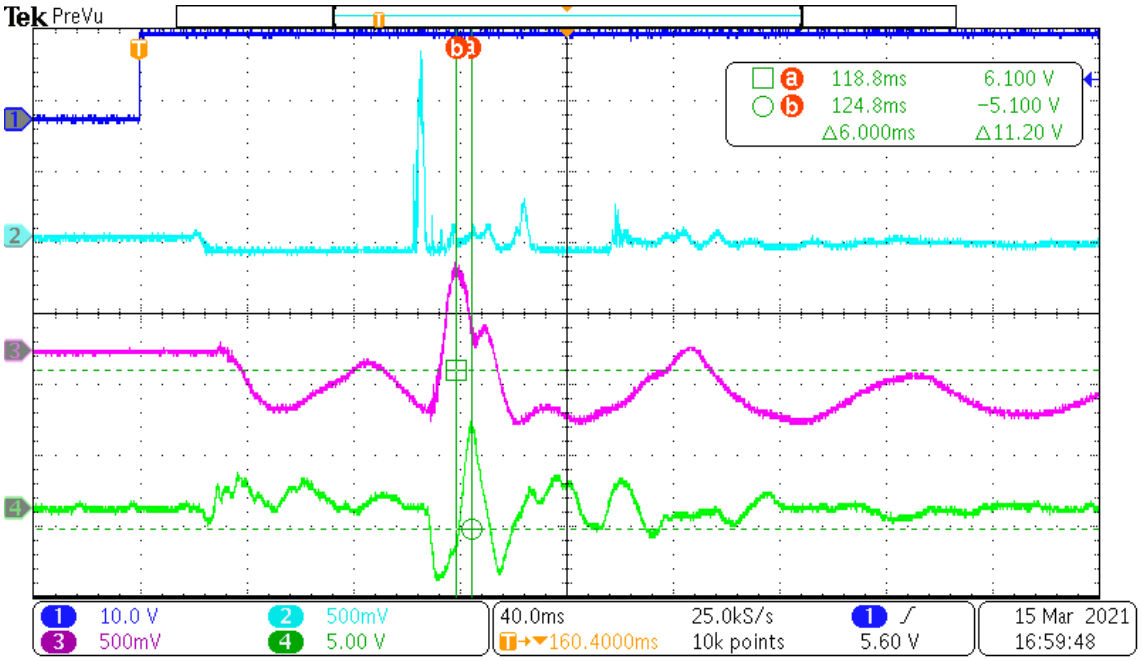
Figur 35. Översiktsbild 2s. Mätning av reaktionskrafter vid rörslut i samband med tryckslag. *Overview 2s. Measurement of reaction forces at the end of the tube in connection with water hammer.* [TEK681]

Ch1: Styrsignal

Ch2: Tryckgivare 70 bar nedströms koaxialventil PCBx1 (utvärderas ej).

Ch3: Tryckgivare 7 bar i rörmitt PCBx1 (utvärderas ej).

Ch4: Kraftgivare vid rörslut PCBx100 ger 5.74 mV/N.



Figur 36. Detaljbild 400ms. Mätning av reaktionskrafter vid rörslut i samband med tryckslag. *Detailed diagram 400 ms. Measurement of reaction forces at the end of the tube in connection with water hammer*. TEK680

Det förefaller vara det kollapsande kavitationsmolnet som ger upphov till den största kraften vid upplaget av röret.

Mätning med markörer i Ch4 ger följande

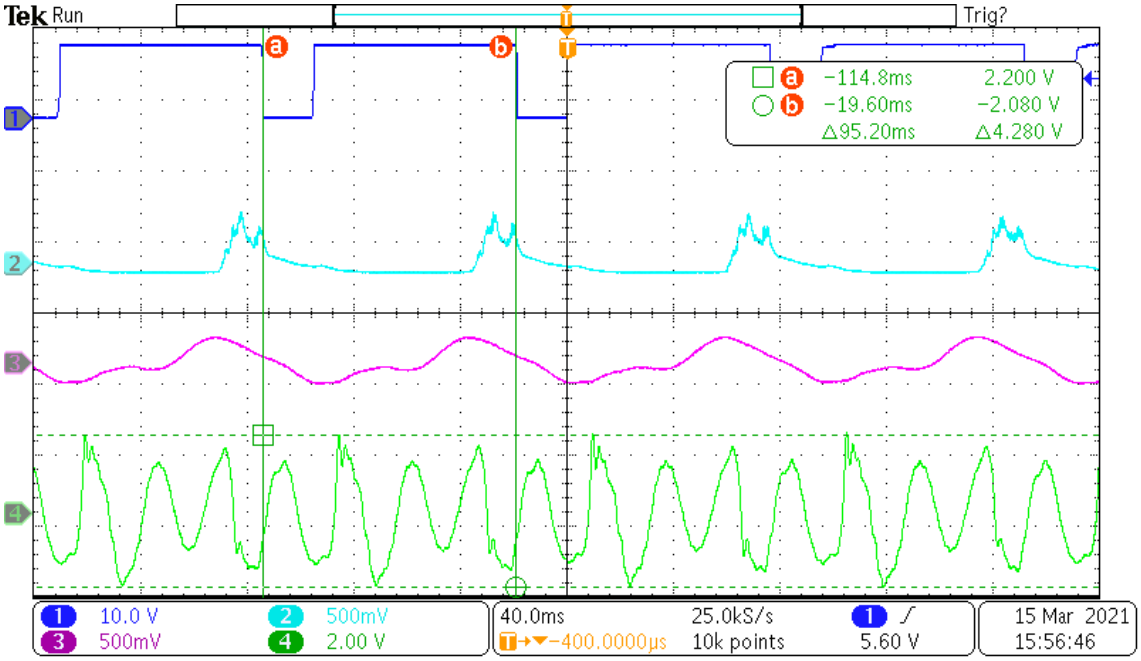
<u>Resultat av kraftmätning (5.74 mV/N)</u>

Dragkraft (-5.100 V) = -889 N

Tryckkraft (+6.100 V) = +1063 N

Beräkning av tryckvåghastighet: Tidskillnaden mellan toppvärdet i Ch3 och Ch4 är 6 ms och avståndet är 6 m, det vill säga att den motsvarande hastigheten är 1000 m/s.

3.3.2 Inspänningskrafter vid upprepade tryckslag. Taktning.



Figur 37. Pulsfrekvensen manuellt inställd för att ge maximal reaktionskraft vid rörslut. *The pulse rate manually optimized to give maximum force at the end of the tube.* [TEK678]

Mätning med markörer i Ch4 ger

<u>Resultat av kraftmätning (5.74 V/N)</u>

Dragkraft (-2.080 V) = -362 N

Tryckkraft (+2.200 V) = +383 N

De största krafterna vid upprepade tryckslag sker för periodtiden 95.2 ms dvs frekvensen 10.5 Hz för de 20 ms långa pulserna.

3.4 Tryckmätning efter spricksimulator i form av slangträd

Slangträdet skall vara en analogi till de grövre delarna av ett spricksystem och syftet med mätningarna är att se hur långt in i ett sådant spricksystem trykslagsalstrade tryckvågor förmår penetrera. Slangträdet kan också användas för att skapa en någorlunda realistisk avslutning av det simulerade injekteringshålet, vad avser strömningsmotstånd.

Flödet sjunker till 3.2 l/min (Obs flödet är 20 l/min vid utlopp vid rörslut och statiska trycket är då 1.239 Bar absolut). Statiskt övertryck i röret vid flödet 3.2 l/min genom slangträdet är 3.8 Bar, dvs 4.8 Bar absolut. Båda värdena indikerar att strömningsmotståndet är högre genom slangträdet, vilket är avsikten.

Vid detta låga flöde kunde ingen kavitation konstateras i det första synglaset, monterat strax efter koaxialventilen. I ett verkligt borrhål finns det ju många sprickor, motsvarande flera slangträd. Skulle flera sådana anslutas till simulatorröret skulle ju flödet öka och därmed skulle kavitation kunna uppstå uppströms.

Ch1 Styrsignal (manuell)

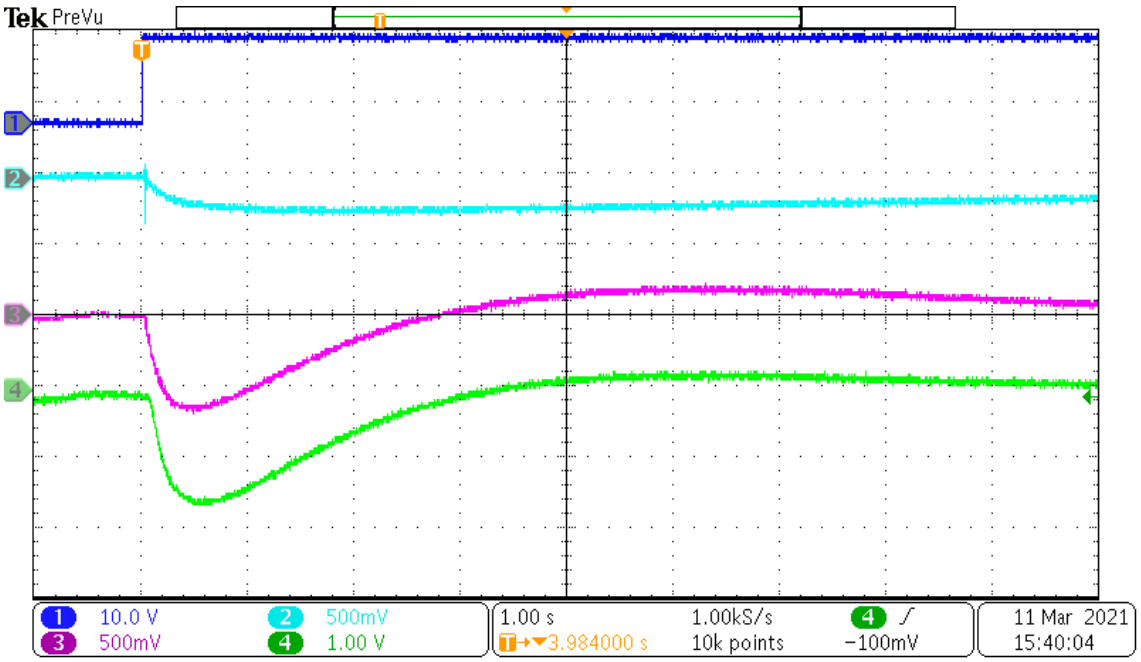
Ch2 Tryckgivare 70 Bar nedströms koaxialventil. PCB x 1 ger proportionalitetsfaktorn 0.072 V/Bar

Ch3 Hydrofon i rörmitt. Via B&K 2635 Sens=4.0 (alltså dämpad 4 ggr jämfört med Sens=1.0) En känsligare hydrofon har ett högre värde på Sensitivity, alltså skall proportionalitetsfaktorn minskas när Sensitivity ökas. Det ger proportionalitetsfaktorn 1.607/4 = 0.401 V/Bar.

Ch4 Hydrofon i slutet av slangträdet i 4 mm slang. B&K 2635 Sens=1.0 ger proportionalitetsfaktorn 1.607 V/Bar.

Statiskt vattentryck i röret vid utlopp genom slangträdet i rörmitt är 4.8 Bar absolut.

3.4.1 Tryckmätning efter slangträd vid enskilt tryckslag



Figur 38. Mätning av tryckhistorik efter slangträd Ch 4. *Measurement of pressure history after the fissure simulator.* [TEK672]

<u>Resultat för hydrofon 1 Ch3, Sens=4.0 ger proportionalitetsfaktor 0.401 V/Bar Dynamiska tryck re 4.8 Bar absolut.</u>

Övertryck (+200 mV) = +0.124 Bar

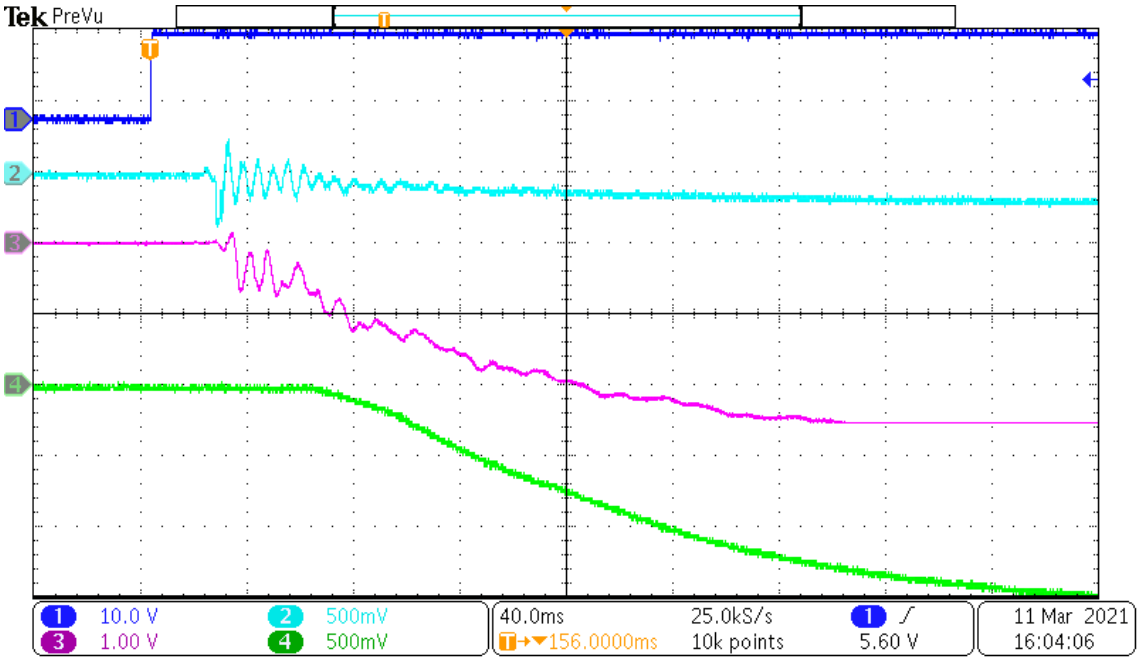
Undertryck (-680 mV) = -1.696 Bar

<u>Resultat för hydrofon 2 Ch4, Sens=1.0 ger 1.607 V/Bar</u>

Övertryck (+260 mV) = +0.162 Bar

Undertryck (-1.600 V) = -1 Bar

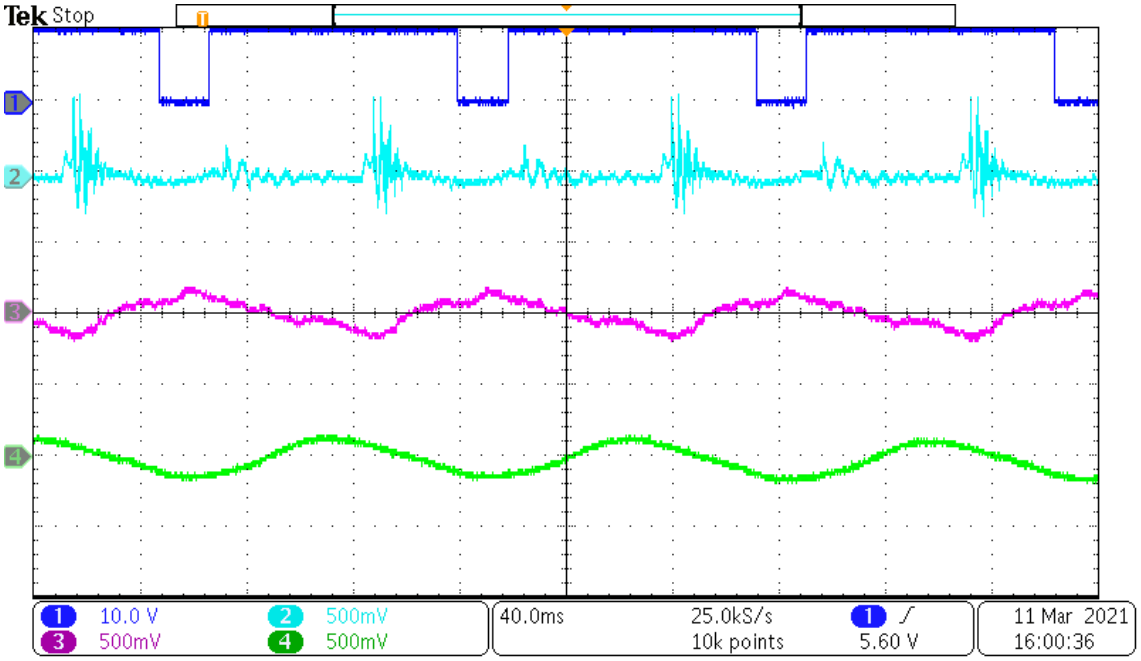
Slangträdet har alltså ganska liten inverkan på trycknivåerna. Det innebär att tryckstötarna penetrerar de grövre sprickorna.



Figur 39. Detalj av föregående figurs första del, som visar det initiala tryckförloppet efter slangträdet (Ch4) vid enskild stängning av koaxialventilen. *Detail from the previous diagram initial part from a single closure of the coaxial valve.* [TEK674]

3.4.2 Tryckmätning efter slangträd vid upprepade tryckslag. Taktning.

Ju längre ut i systemet man kommer desto fler möjliga interferenser kan inträffa. Därför är det intressant att mäta tryckhistoriken i samband med upprepade tryckslag.



Figur 40. Mätning av tryckhistorik efter slangträd och upprepade trycksalg. *Measurement of pressure history after the fissure simulator at repeated closures of the coaxial valve.* [TEK673]

<u>Resultat för hydrofon 1 Ch3, Sens=4.0 ger proportionalitetsfaktor 0.401 V/Bar Dynamiska tryck re 4.8 Bar absolut.</u>

Övertryck (+190 mV) =+ 0.474 Bar

Undertryck (-210 mV) = -0.524 Bar

<u>Resultat för hydrofon 2 Ch4, Sens=1.0 ger 1.607 V/Bar</u>

Övertryck (+150 mV) = +0.09 Bar

Undertryck (-200 mV) = -0.124 Bar

Tryckfallet över slangträdet är måttligt. Det innebär att tryckstötarna penetrerar de grövre sprickorna även vid upprepade tryckslag, även om detta medför en mer komplex interferensbild. Tryckvariationerna är dock ganska små.

3.5 Tryckmätning vid utlopp i rörets mitt

I de följande mätningarna är slangträdet bortkopplat och mätningarna sker med utlopp i simulatorns mitt. Motståndet i slangträdet är borta så flödet ökar och uppmättes med Gardenamätaren till 13.2 l/min.

Ch 1 är styrsignalen från den manuella boxen eller från den fjärrstyrda (cykliska) manöverboxen för koaxialventilen.

Ch2 är signalen från tryckgivaren 70 bar strax efter koaxialventilen efter passage PCB förstärkare x1 ger proportionalitetsfaktorn= 0.072 V/Bar

Ch3 är signalen från hydrofon i rörmitt efter att ha passerat B&K 2635 med Sens=2.0 som ger proportionalitetsfaktorn= 1.607/2 = 0.804 V/bar.

Ch4 är signalen från hydrofon i rörslut efter B&K 2635 med Sens=4.0 som ger proportionalitetsfaktorn = 1.607/4 = 0.401 V/bar.

Statiska tryck

Eftersom utloppsslangen är längre och av klenare dimension än i tidigare försök minskar flödet från c:a 20 l/min till 13.2 l/min och mottrycket ökar.

För att mäta det statiska trycket i röret användes en vanlig manometer graderad till 10 bar övertryck med noll avläst för atmosfärstryck.

1. Mätning då inget vattentryck är inkopplat ger 0 bar övertryck.

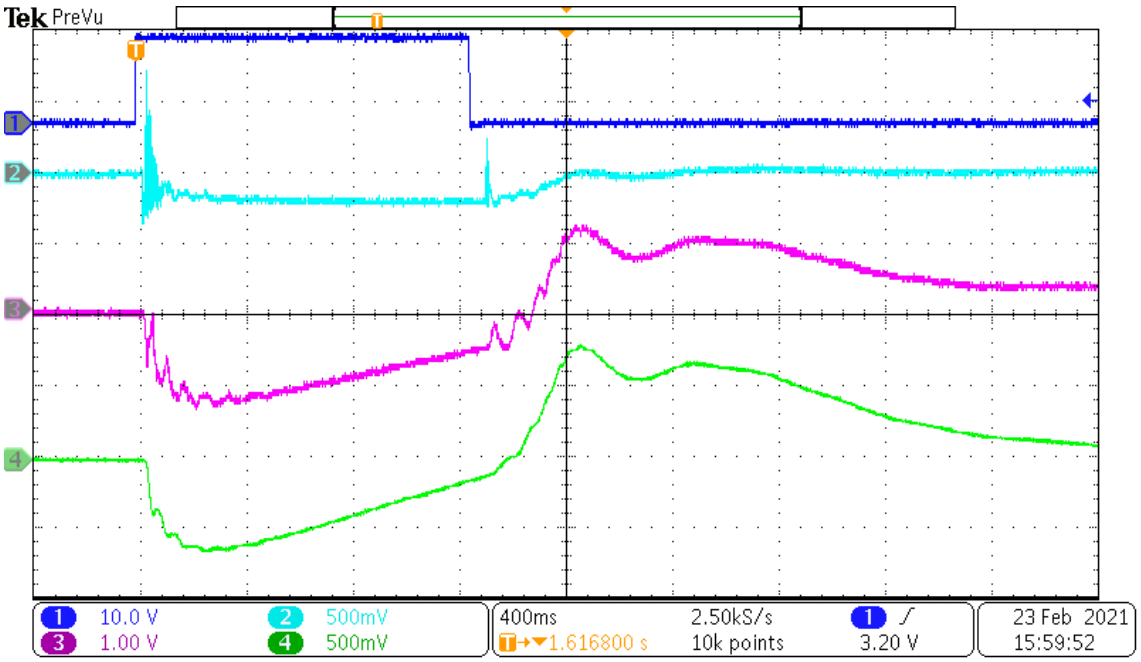
2. Mätning då vattenledningstrycket är påkopplat men inget flöde förekommer ger 4.0 bar.

3. Mätning då fullt flöde genom röret råder ger 2.5 bar.

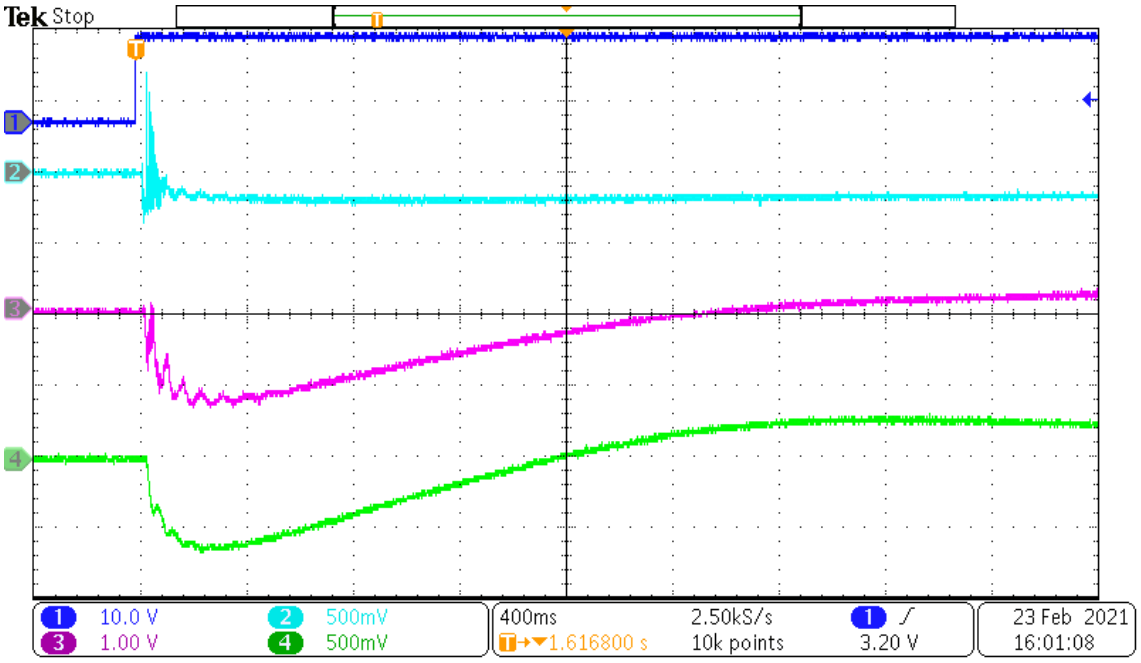
4. Mätning när utloppsventilen nedströms är halvöppen (45/90 grader) ger 3.25 bar.

Alla dynamiska tryckmätningar nedan skall alltså utgå ifrån att det statiska trycket i röret är 3.5 bar absolut. Det innebär att vakuum tangeras då det dynamiska trycket avläses till -3.5 bar och lägre tryck är negativa absoluttryck.

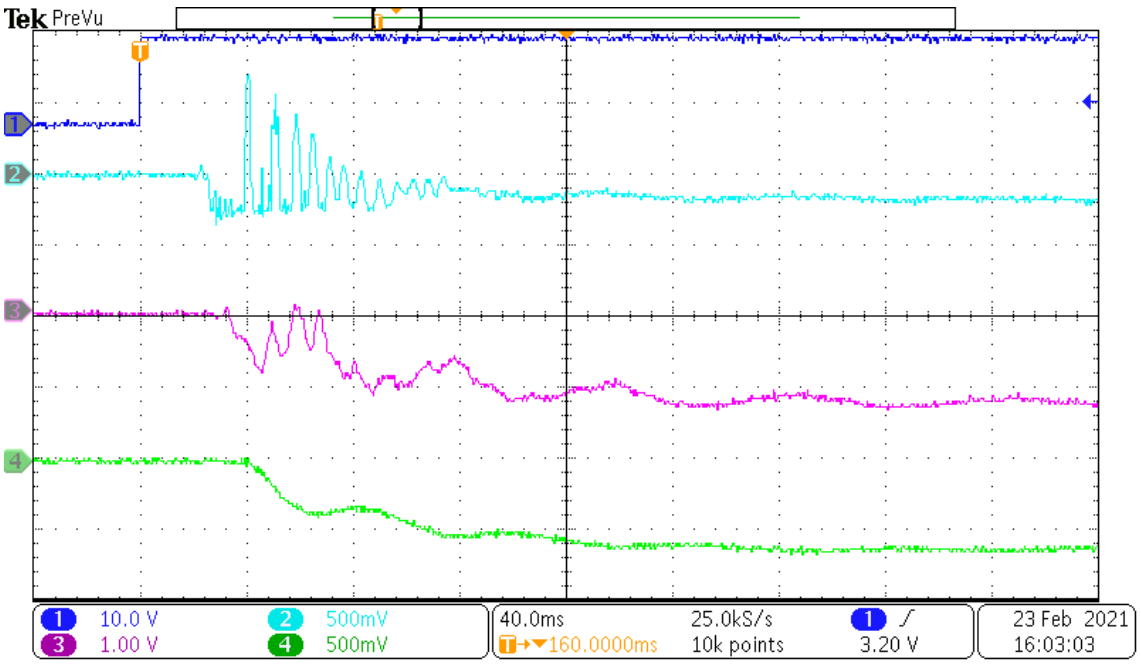
3.5.1 Tryckmätning vid enskilt tryckslag och utlopp i rörmitt



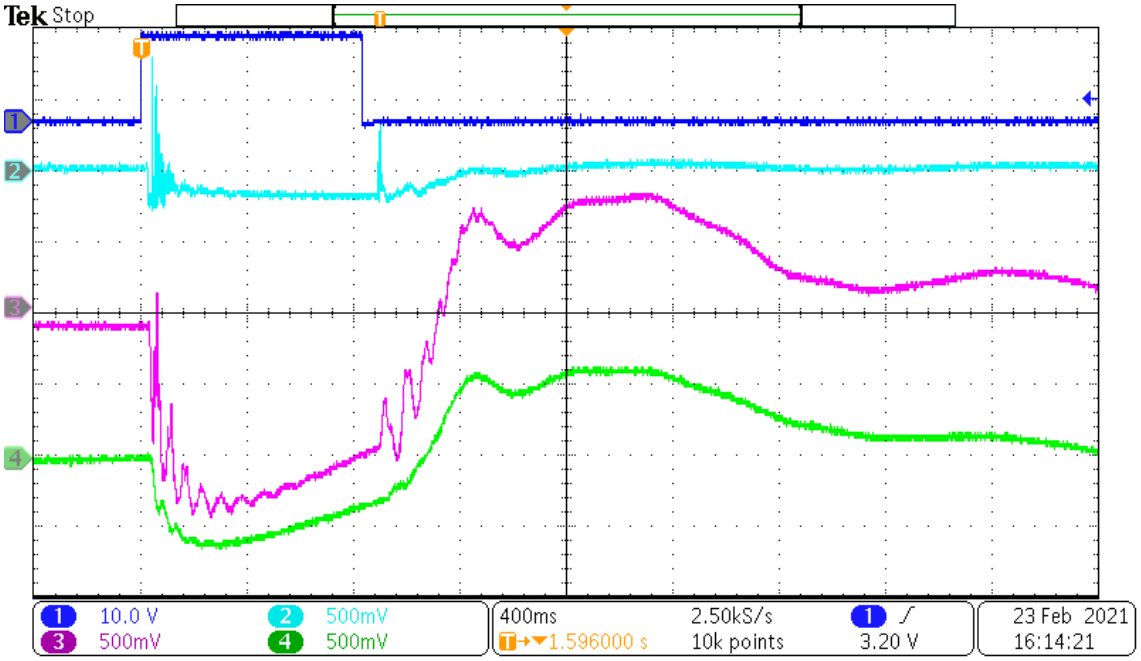
Figur 41. Översiktsbild 4 s. Manuellt styrd stäng/öppna koaxialventil. 400 ms per ruta. Ventilen är stängd 1.24 s inom observationsfönstret. *Overview 4 s. Manually controlled close/open cycle of the coaxial valve. The valve is closed for 1.24 s in the window.* [TEK666]



Figur 42. Översiktsbild. Manuellt styrd stäng-operation. Ventilen öppnas inte förrän det att registreringen är slut. 400 ms per ruta. Overview. *Manually controlled close operation of the coaxial valve.* [TEK667]



Figur 43. Detaljbild. Manuellt styrd stäng-operation. Ventilen öppnas inte förrän det att registreringen är slut. 40 ms per ruta. Detailed diagram. *Manually controlled close-operation. The valve is not opened again in the displayed window.* [TEK668]



Figur 44. Manuellt styrd stäng/öppna-operation. *Manually controlled close/open operation.* [TEK669]

I denna registrering företogs mätningar av tryck med hjälp av markörerna i oscilloskopet. Resultet presenteras nedan.

<u>Resultat tryckgivare 1 koaxialventil Ch2 (0.072 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut</u>

Övertryck (+790 mV) = +10.97 Bar Mycket kortvarigt.

Undertryck (-290 mV) = -4.027 Bar Det är -0.527 Bar absolut under 400 ms

<u>Resultat hydrofon 1Rörmitt Sens 2.0 Ch3 (0.804 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut</u>

Övertryck (+780 mV) = +0.97 Bar

Undertryck (-1.490 V) = -1.910 Bar

<u>Resultat hydrofon 2 Utlopp Sens 4.0 Ch4 (0.401 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut</u>

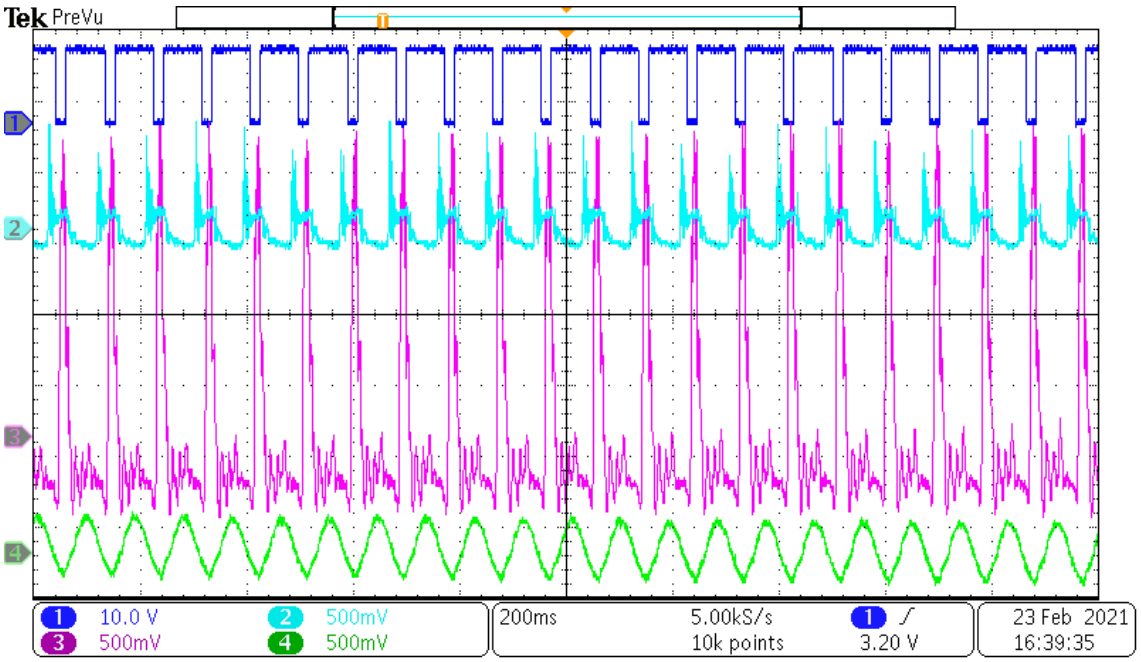
Övertryck (+630 mV) = +1.57 Bar

Undertryck (-640 mV) = -1.60 Bar

I ett borrhål, som vanligtvis är dubbelt så långt som simulatorröret, kan man anta att det negativa trycket sjunker ytterligare och att dess varaktighet blir längre.

3.5.2 Tryckmätning vid upprepade tryckslag och utlopp i rörmitt. Taktning.

Pulsfrekvensen är satt för att få maximalt värde på trycket i rörmitt (Ch3).



Figur 45. Detta är cyklisk operation av koaxialventilen. Pulsfrekvens 11 Hz, pulstid 19 ms. *Cyclic operation of the coaxial valve.* [TEK670]

Mätningar har utförts med markörerna i oscilloskopet. Resultat presenteras nedan.

<u>Resultat tryckgivare 1 efter koaxialventil **Ch2** (0.072 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut</u>

Övertryck (+740 mV) = +10.27 Bar

Undertryck (-160 mV) = -2.22 Bar

<u>Resultat hydrofon 1Rörmitt Sens 2.0 **Ch3** (0.804 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut</u>

Övertryck (+2.160 V) = +2.69 Bar

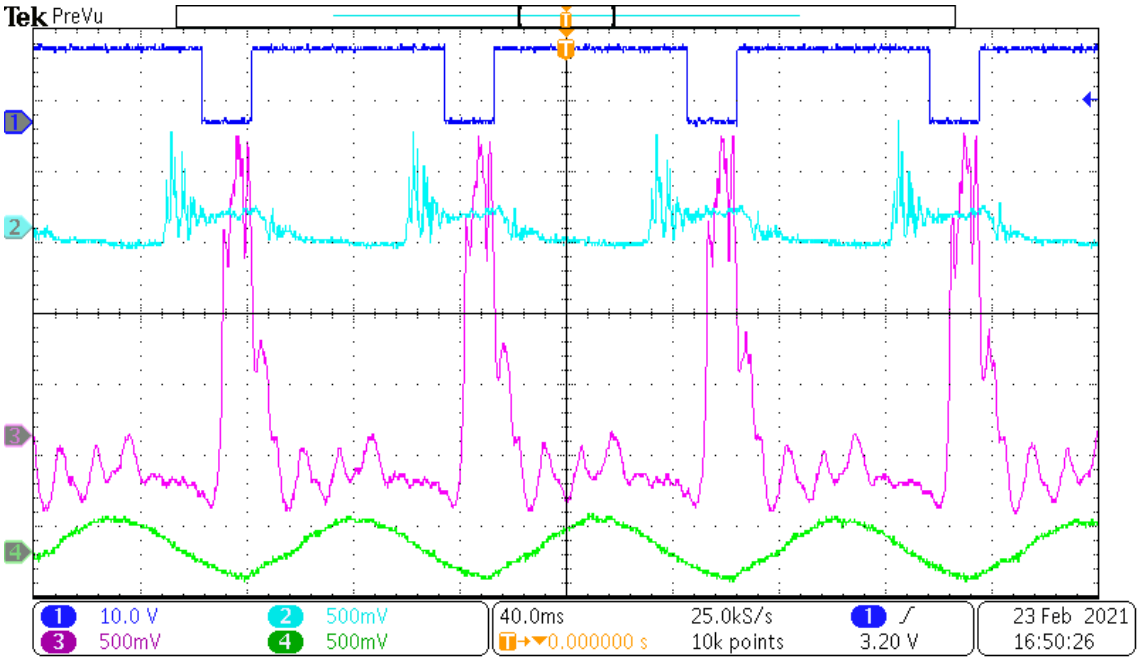
Undertryck (0.540 V) = -0.672 Bar

<u>Resultat hydrofon 2 Utlopp Sens 4.0 **Ch4** (0.401 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut</u>

Övertryck (+230 mV) = +0.57 Bar

Undertryck (-230 mV) = -0.57 Bar

Vid cyklisk operation sjunker medelhastigheten på det strömmande vattnet i röret och därför blir undertrycken lägre än vid enstaka tryckslag.



Figur 46. Detaljstudie av föregående cykliska försök. *Detailed study of the previously showed cyclic tests.* [TEK671]

Mätningar av flanktider har gjorts med hjälp av oscilloskopets markörer. Då detta är en löpande mätning triggas oscilloskopet inte av styrsignalen, vilket innebär att denna inträffar vid godtycklig tid relativt oscilloskopet mittlinje 0 s. De andra tiderna relateras till styrsignalens negativa flank.

Ch1, styrsignal negativ flank: -137.2 ms, periodtid 0.09 s.

Ch2, ventilen stänger (trycket börjar sjunka): -108.8 ms (dvs 137.2-108.8 = 28.4 ms)

Ch2, den inledande positiva flanken (kavitationen slår tillbaka): -152 ms i oscilloskopets tid

Ch3, rörmitt positiv flank #1: -129.0 ms

Ch3, rörmitt positiv flank #2: -42.08 ms (dvs 137.2-42.08 = 95.1 ms)

Ch4, rörslut: Inga transienta flanker finns i den signalen. Periodtiden motsvarar styrsignalens.

Mellan tryckmätaren i Ch2 och hydrofonen i Ch 3 är det c:a 7 m. Om den positiva flanken i Ch2 propagerar ner genom röret och utvecklas till den kraftiga positiva flanken i Ch 3 har förflyttningen tagit 152 - 129 = 23 ms. Då blir utbredningshastigheten 304 m/s.

Som framgår är det mycket svårt att dra någon entydig slutsats efter försöken att beräkna en utbredningshastighet för tryckvågor i simulatorröret.

3.6 Återkopplad resonans

Resonans är ett fenomen som bygger på att ett mekaniskt system vill svänga vid vissa frekvenser, men inte vid andra. Om man tillför energi vid just den frekvens vid vilken resonans inträffar kan man bygga upp mycket höga energinivåer i det svängande systemet med små energitillskott i varje cykel. Att gunga någon är ett exempel på fenomenet. I avsnitt 1.1.1 visas hur man genom ett frekvenssvep kan bestämma vilka resonansfrekvenserna är. Detta har utförts i tidigare etapper av projektet, särskilt i Etapp 2. Försöken visade att injekteringsslangen är ett resonant system. Klenare slangar har högre resonansfrekvens. Resonansen blir starkare när utloppet från slangen är stängt än när det är öppet. Detta innebär att ett resonant injekteringssystem verkar bättre i slutet av injekteringen än i början. Detta är i motsats till ett system med tryckslag som energikälla, vilket verkar bäst när flödeshastigheterna är stora, dvs i början av injekteringen.

Om nu det svängande systemet får för sig att ändra resonansfrekvensen blir det mer komplicerat att excitera det. Ett i princip enkelt sätt att lösa detta problem är att återkoppla systemets svängning till aktuatorn, den mekanism som tillför energi. Det är det återstående momentet som därför behandlas i denna projektetapp, Etapp 3.

I fallet med injektering är aktuatorn den elektrohydrauliska pumpen som beskrivs i Kapitel 2. Den kan styras av en extern elektrisk signal. Den signal vi vill återkoppla skall hämtas så nära berget som möjligt, dvs. i kopplingen mellan injekteringsslang och injekteringsrör. Där placerar vi en tryckgivare som är okänslig för statiska tryck, men registrerar dynamiska tryck, dvs. tryckväxlingar.

I utgångsläget finns inga tryckväxlingar att registrera och man kan då förfara på två sätt: Det första är att skicka iväg en puls innehållande en frekvens som ligger nära den antagna resonansfrekvensen till aktuatorn och därefter koppla om så att aktuatorn tar emot signalen från tryckgivaren vid injekteringsröret. Det andra sättet är att skicka en kort puls till aktuatorn och därefter koppla om till tryckgivaren. Systemet skall då ge en respons som motsvarar dess resonans.

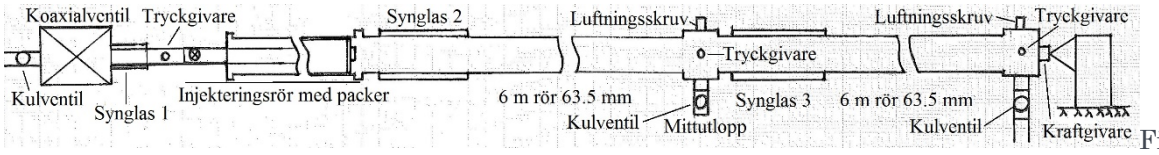
Huvudhypotesen är att resonansfrekvensen påverkas av motståndet injekteringsbruket utsätts för från bergets sprickor. En annan faktor är injekteringsslangens elasticitet. Man kan se systemet som slang plus en öppning vars storlek kan variera och med den injekteringsmotståndet. Därmed skulle resonansfrekvensen indikera injekteringsmotståndet och därför kunna bli en parameter i sk Real Time Grouting Control - RTGC.

För att testa detta har 20 m stålarmerad gummislang av samma typ som används vid injektering rullats upp på ett plastkärl och försetts med tryckgivare vid slangens slut. Där sitter också en kulventil, vilken gör att utströmningsmotståndet kan varieras, se Figur x

Figur 47. Anordning för att mäta tryckvariationer när tryckvågor passerat 20 m stålarmerad gummislang snarlik injekteringsslang. *Device for measuring pressure variations when pressure waves passed a 20 m long hose.*

4. RESULTAT I SAMMANFATTNING

Nedan visas en bild av försöksutrustningen i syfte att underlätta identifieringen av hur mätningarna gjorts.



Figur 48. Principskiss av borrhålssimulatorn. *Borehole simulator sketch.*

4.1 Tryckmätning vid utlopp i rörslut

4.1.1 Tryckmätning vid enskilt tryckslag

Dessa mätningar görs för att man skall kunna studera vad själva tryckslaget får för effekter i simulatorn. Med ett enda tryckslag får man inga störningar från reflexer eller ventilöppningar.

4.1.1.1 Tryckmätning mellan koaxialventil och injekteringsrör

Resultat för 70 Bar tryckgivare, dynamiska tryck re +1.239 Bar TEK658

Övertrycksnivå (3.52 V) = +4.89 Bar. I två toppar efter kavitationskollaps

Kavitationsundertryck A-B (-1.0V) = -1.39 Bar

Undertrycksnivå (-3.72 V) = -5.17 Bar

Statiska övertrycket i röret är +1.239 Bar absolut och då blir undertrycket 1.239-5.17 = -3.93 Bar absolut, vilket är betydligt lägre än vakuum = 0 Bar absolut. Noteras bör att detta inte inträffar under kavitationsfasen utan i samband med kavitationsmolnets implosion.

4.1.1.2 Tryckmätning vid rörmitt

Resultat för 7 Bar tryckgivare (7.2 V/Bar) dynamiska tryck re +1.239 Bar TEK660

Övertrycksnivå (+13.10 V) = +1.83 Bar

Tryck under kavitationsfasen (-4.5 V) = -0.63 Bar

Undertrycksnivå (-8.4 V) = -1.18 Bar

4.1.1.3 Tryckmätning vid utloppet

Resultat för hydrofon vid utloppet. Dynamiska tryck re +1.239 Bar absolut TEK663

Övertrycksnivå (+200 mV) = +0.124 Bar

Undertrycksnivå (-0.372 V) = -0.231 Bar.

4.1.2 Tryckmätning vid upprepade tryckslag. Taktning.

4.1.2.1 Tryckmätning mellan koaxialventil och injekteringsrör

Resultat för 70 Bar tryckgivare (0.72 V/Bar) Dynamiska tryck re +1.239 Bar TEK654

Övertrycknivå (+7.520 V) = +10.44 Bar (rel 3.2 Atö)

Undertrycknivå(-0.720 V) = -1 Bar (rel 3.2 Atö)

4.1.2.2 Tryckmätning i rörmitt

Resultat för 7 Bar tryckgivare i rörmitt TEK655

Övertrycksnivå (3.040 V) = +0.43 Bar

Undertrycknivå (-2.040 V) = -0.29 Bar

4.1.2.3 Tryckmätning vid rörslut

Resultat för hydrofon 2 (1.607 V/Bar) Dynamiska tryck re +1.239 Bar abs. TEK656

Övertrycknivå (12.80 mV) = +0.01 Bar

Undertrycknivå (-9.2 mV) = -0.01 Bar

Invid utloppet skapas alltså inga nämnvärda tryckvariationer. Utloppet var öppet, eftersom tryckslagsprocessen förutsätter ett flöde. I ett verkligt borrhål sker utloppet längs hela injekteringshålet.

4.2 Tryckmätning vid utlopp i rörmitt

4.2.1 Tryckmätning vid enskilt tryckslag

4.2.1.1 Tryckmätning mellan koaxialventil och injekteringsrör

Resultat tryckgivare 1 koaxialventil Ch2 (0.072 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut TEK669

Övertryck (+790 mV) = +10.97 Bar Mycket kortvarigt.

Undertryck (-290 mV) = -4.027 Bar Det är -0.527 Bar absolut under 400 ms

4.2.1.2 Tryckmätning i rörmitt

Resultat hydrofon 1 rörmitt Sens 2.0 Ch3 (0.804 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut

Övertryck (+780 mV) = +0.97 Bar

Undertryck (-1.490 V= -1.910 Bar

4.2.1.3 Tryckmätning vid rörslut

Resultat hydrofon 2 Utlopp Sens 4.0 Ch4 (0.401 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut

Övertryck (+630 mV) = +1.57 Bar

Undertryck (-640 mV) = -1.60 Bar

I ett borrhål, som vanligtvis är dubbelt så långt som simulatorröret, kan man anta att det negativa trycket sjunker ytterligare och att dess varaktighet blir längre.

4.2.2 Tryckmätning vid upprepade tryckslag

4.2.2.1 Tryckmätning mellan koaxialventil och injekteringsrör

Resultat tryckgivare 1 efter koaxialventil **Ch2** (0.072 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut TEK670

Övertryck (+740 mV) = +10.27 Bar

Undertryck (-160 mV) = -2.22 Bar

4.2.2.2 Tryckmätning i rörmitt

Resultat hydrofon 1Rörmitt Sens 2.0 **Ch3** (0.804 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut

Övertryck (+2.160 V) = +2.69 Bar

Undertryck (-0.540 V) = -0.672 Bar

4.2.2.3 Tryckmätning vid rörslut

Resultat hydrofon 2 Utlopp Sens 4.0 **Ch4** (0.401 V/Bar). Dynamiska tryck re +3.5 Bar absolut

Övertryck (+230 mV) = +0.57 Bar

Undertryck (-230 mV) = -0.57 Bar

4.3 Tryckmätning kring slangträdet vid utlopp genom detta

4.3.1 Tryckmätning vid enskilt tryckslag

4.3.1.1 Tryckmätning före slangträd

Resultat för hydrofon 1 Ch3, Sens=4.0 ger proportionalitetsfaktor 0.401 V/Bar Dynamiska tryck re 4.8 Bar absolut.TEK672

Övertryck (+200 mV) = +0.124 Bar

Undertryck (-680 mV) = -1.696 Bar

4.3.1.2 Tryckmätning efter slangträd

Resultat för hydrofon 2 Ch4, Sens=1.0 ger 1.607 V/Bar

Övertryck (+260 mV) = +0.162 Bar

Undertryck (-1.600 V) = -1 Bar

Slangträdet har alltså ganska liten inverkan på trycknivåerna. Det innebär att tryckstötarna penetrerar de grövre sprickorna.

4.3.2 Tryckmätning vid upprepade tryckslag

4.3.2.1 Tryckmätning före slangträd

Resultat för hydrofon 1 Ch3, Sens=4.0 ger proportionalitetsfaktor 0.401 V/Bar Dynamiska tryck re 4.8 Bar absolut.TEK673

Övertryck (+190 mV) =+ 0.474 Bar

Undertryck (-210 mV) = -0.524 Bar

4.3.2.2 Tryckmätning efter slangträd

Resultat för hydrofon 2 Ch4, Sens=1.0 ger 1.607 V/Bar

Övertryck (+150 mV) = +0.09 Bar

Undertryck (-200 mV) = -0.124 Bar

4.4 Kraftpåverkan från simulatorröret med utlopp i rörslut

Då apparaturen enkelt medger att dessa krafter mäts och frågan kan tänkas uppstå om hur den här typen av belastning påverkar den injekterade berggrunden görs några enkla mätningar enligt nedan.

4.4.1 Inspänningskraft vid enskilt tryckslag

Resultat av kraftmätning (5.74 mV/N) TEK680

Dragkraft (-5.100 V) = -889 N

Tryckkraft (+6.100 V) = +1063 N

4.4.2 Inspänningskrafter vid upprepade tryckslag

Resultat av kraftmätning (5.74 V/N) TEK678

Dragkraft (-2.080 V) = -362 N

Tryckkraft (+2.200 V) = +383 N

De största krafterna vid upprepade tryckslag sker för periodtiden 95.2 ms dvs. frekvensen 10.5 Hz för de 20 ms långa pulserna.

4.5 Återkopplad resonans

Då PID-regulatorn visade sig inte fungera när den skulle inkopplas har detta moment fått föras till nästa etapp av projektet när regulatorn blivit reparerad.

4.6 Sammanfattning av resultat

Det vi vill åstadkomma med återkopplad resonans och tryckslag är stora tryckvariationer, se inledningen. Därigenom antas filterbildning motverkas och injekteringsbruket tänkta viskositet vidmakthållas. Flödet i de försök som har utlopp i rörslut är 20 l/min att jämföra med upp till 50 l/minut i verkliga injekteringsprojekt. Flödet avtar vanligtvis successivt och med flödet avtar också effekten av tryckslag. Tryckslagsmetoden är alltså fördelaktigast i början av injekteringen.

De största dynamiska övertrycken uppmäts till drygt 10 Bar relativt det statiska vattentrycket i simulatorn. Det sker för enskilt tryckslag mellan koaxialventilen och injekteringsröret vid utlopp i rörmitt och är +10.97 Bar relativt statiska trycket +3.5 Bar det vill säga **+14.5 Bar absolut**. Vid utlopp i rörslut fås på samma sätt för upprepade tryckslag +10.44 Bar relativt det statiska trycket +1.239 Bar det vill säga +11.7 Bar absolut, samt för upprepade tryckslag med utlopp i rörmitt +10.27 Bar relativt det statiska trycket +3.5 Bar det vill säga +13.8 Bar absolut.

Det lägsta dynamiska undertrycket registreras mellan koaxialventil och injekteringsrör för enskilt tryckslag och utlopp i rörslut och är -5.17 Bar relativt +1.239 Bar statiskt tryck det vill säga **-3.93 Bar absolut**, näst lägsta trycket registreras för enskilt tryckslag vid utlopp i rörmitt och är -4.027 Bar relativt +3.5 Bar statiskt det vill säga -0.5 Bar absolut. I två fall åstadkommer alltså tryckslagsmetoden undertryck som är lägre än vakuum. Upprepade tryckslag leder alltså till interferenssituationer som gör att man inte uppnår lika låga tryck som vid enskilda tryckslag.

I rörmitt, som kanske ger de mest signifikanta mätvärdena avseende likhet med verkliga förhållanden, i synnerhet om utloppet sker vid rörslut, får man en tryckdifferens om 3.01 Bar för enskilt tryckslag och 0.72 Bar för upprepade tryckslag. Tryckdifferens är troligen det man vill ha för att bryta ned eller helt förhindra uppkomsten av filter i trånga passager. Det indikerar att uppnådd tryckdifferens skulle kunna vara beroende av pulsrepetitionsfrekvensen. Vid utlopp i rörmitt erhålles högre differenstryck för upprepade tryckslag än för enskilt, nämligen 3.36 Bar. Detta har för stunden ingen annan förklaring än tänkbart mätfel.

Medan +1 Bar inte är märkvärdigt i injekteringssammanhang är -1 Bar absolut tryck synnerligen anmärkningsvärt och redan 0 Bar absolut (vakuum) omöjligt att uppnå med konventionella ventilmanipulationer.

Kavitationsbubblor kan iaktas i det första synglaset i alla testsituationer utom för utlopp i rörmitt och genom slangträdet. Det beror på att flödeshastigheten i det grova röret är lägre för dessa fall än vid utlopp i rörslut. I flera fall syns bubbelmoln även i det andra synglaset placerat precis vid injekteringsrörets mynning ut i simulatorröret. Vid upprepade tryckslag fylls det andra synglaset med bubblor och framtida undersökningar skall klarlägga hur långt in i simulatorröret bubbelmolnet sträcker sig. Vid enskilt tryckslag är kavitationsmolnet transient och finns bara en kort tid efter att koaxialventilen stängt. Vid upprepade tryckslag får man ett kvarvarande kavitationsmoln eftersom alla bubblor inte hinner implodera innan nästa tryckslag inträffar och undertrycket expanderar de kvarvarande bubblorna.

Man bör notera att det imploderande molnet av kavitationsbubblor skapar ett återgående flöde i simulatorn, inte bara stora tryckdifferenser. Noggranna flödesmätningar bör ske i kommande försök.

Som KTH har demonstrerat kan partikelaggregat av cement också brytas upp genom ultraljudbehandling av injekteringsbruket i blandningsfasen. Principen är densamma, ultraljudet skapar kavitationsbubblor som imploderar med hög tryckutveckling som slår sönder aggregaten.

Taktning innebär att man försöker få två på varandra följande ventilstängningar att skapa optimal positiv interferens avseende trycknivå. I dessa försök har optimeringen gjorts genom manuell inställning av frekvens och pulslängd på en pulsgenerator och observation av tryckamplituden på oscilloskop. I ett verkligt system bör elektronik kunna byggas som sköter optimeringen automatiskt. Parametrarna kan då bli ett bidrag till RTGC.

Med den manuella taktningsmetoden får man fram att optimala pulsrepetionsfrekvensen är c:a 10 Hz och att pulslängden, alltså hur länge koaxialventilen är stängd, bör vara c:a 20 ms. Pulsrepetitionsfrekvensen påverkar naturligtvis också det genomsnittliga flödet genom systemet och en verklig optimering kan inte göras som här, endast fokuserat på maximala extremtryck. Flöde och uppnådda maximala tryckdifferenser tycks tydligen vara parametrar som minskar vi högre pulsfrekvenser.

Utbredningshastigheten för tryckvågor i simulatorröret har inte varit möjlig att bestämma på ett entydigt sätt. Flera försök har gjorts, men värdena skiljer sig mycket. Hypotesen är att detta kan förklaras av att det funnits olika mängd luftbubblor vid olika tillfällen.

5. SLUTSATSER

Försöken har visat att det med ett statiskt "pumptryck" av endast vattenledningens 4 Bar är möjligt att skapa tryck mellan -4 Bar absolut till +15 Bar absolut, endast genom att tvärt avbryta vätskeströmningen. Detta vid flödet 20 l/min, vilket skall jämföras med att verkliga injekteringsflöden kan vara så höga som 40, ibland 50 l/min. Tryckslag skapar tryck i direkt proportion till flödeshastigheten. Tryckvariationerna antas kunna minska filterbildningen i trånga passager och dessutom hindra att viskositeten ökar på grund av injekteringsbrukets tixotropa egenskaper.

Tryckslagsmetoden är därför mest användbar i inledande skeden av injekteringsarbetet, eftersom tanken med injektering är att flödet skall avta efterhand som injekteringen blir mer fullständig.

Förekomsten av kavitation kan förväntas förbättra flödes- och hydratiseringsegenskaperna hos injekteringsbruket genom att de imploderande kavitationsbubblorna slår sönder aggregat av cementpartiklar.

Återkopplad resonans förmodas ge högre tryckamplituder när motståndet mot flödet ökar. Metoden kan därför användas i hela injekteringsprocessen. Effekten av varierande mottryck har inte kunnat kvantifieras i denna etapp pga. instrumentfel.

6. FORTSATT ARBETE

Under projektets gång har det framkommit att en lämplig fortsättning på arbetet skulle vara ett doktorandprojekt. Ett sådant måste naturligtvis utformas i samarbete med den tänkta doktoranden, men nedan finns ett antal frågeställningar som kan vara en bas för fortsatt arbete. Synpunkter bör också inhämtas från referensgruppen och andra injekteringssakkunniga innan ett doktorandprojekt startas. Det hittillsvarande projektets målsättning har varit att utveckla mätutrustning som möjliggör att besvara frågan om man kan skapa stora tryckvariationer i injekteringsbruket och vad detta leder till. Ett sådant system finns nu och med det har bekräftats att mycket stora tryckvariationer kan skapas redan vid så små statiska övertryck som 4 Bar och ett flöde av 20 l/min. Särskilt betraktas effekten på inträngningsförmågan. Oscillationer förmodas upprätthålla designad viskositet genom att motverka förtjockning via tixotropi samt att bryta ned eller förhindra utbildande av filterkakor i tränga passager. Kavitation bryter ner aggregat av cementpartiklar, vilket bör leda till snabbare hydratisering och bättre inträngning då effektiva partikelstorleken minskas.

För att klargöra fenomenologin djupare föreslås följande frågeställningar belysas. De är indelade i fyra avsnitt avseende återkopplad resonans, tryckslag, ytterligare förbättringar av simulatorsystemet och fältförsök.

Det förutses att elektronik för att automatiskt styra de processer som i denna etapp skett manuellt kommer att kunna utvecklas inom ett doktorandprojekt, dock kanske inte av doktoranden själv.

6.1 Återkopplad resonans

Här syftas på försök som baseras på den elektrohydrauliskt styrda brukspumpen. Eventuellt kompletterad med en cirkulationspump och en reservoar för andra fluider än vatten.

6.1.1 Växling mellan två resonanstoppar ger olika stående vågmoder

När systemet har återkopplat en stark resonans kommer det att leda till att det uppstår en stående våg i injekteringshålet. Det innebär att de stora tryckvariationerna är koncentrerade till de sk bukarna i svängningmönstret - moderna. I noderna är tryckvariationerna däremot små. Då det oftast finns flera resonanstoppar i ett system kan det finnas skäl att växla mellan två eller flera för att få jämnare fördelningen av de stora tryckoscillationerna längs borrhålet.

6.1.2 RTGC - resonansfrekvens vs flödesmotstånd

Det förmodas vara så att resonansfrekvensen påverkas av utströmningsmotståndet för bruket ur injekteringshålet. Detta kan undersökas om man med en ventil kan justera utflödet ur simulatorn och registrera resonansfrekvensens variation med flödesmotståndet. En sådan variation kommer att innehålla information om spricksystemets egenskaper och skulle därför kunna vara en kompletterande variabel i Real Time Grouting Control.

6.1.3 Flödesreversering med bakvänt pumpslag vid statiskt injekteringstryck

Om den hydraulcylinderstyrda brukspumpen kopplas in i flödet från en brukspump som levererar ett konstant flöde skulle man kunna suga in bruk i brukscylindern så att flödet ut i borrhålet blev negativt, dvs. man suger tillbaka bruk. Det blir alltså ett negativt flöde till skillnad från ett negativt tryck. När man sedan pumpar ut detta bruk får man ett flödestillskott. På detta sätt kan man få ett fram och återgående flöde som skulle kunna hindra utbildning av filterkakor i trånga passager.

6.1.4 Optimering av PID-regulatorns parametrar

PID-regulatorn fungerar så att den jämför ett uppmätt värde från den styrda processen med ett angivet bör-värde. Med ledning av jämförelsen skickas det ut en förstärkningsparameter från regulatorn, som håller tryckamplituderna på en bestämd nivå. Denna parameter kan kontrolleras på tre sätt: Förstärkning P, Integration I och Differentiering D. Frekvensen påverkas inte. Man kan alltså bestämma att även om styrsignalen hämtas från tryckvariationerna i inflödet till injekteringsröret så kommer styrsignalen aldrig att överskrida en viss spänning, t ex 1.0 Volt. På så sätt får man ett system i återkopplad resonans som inte tillväxer okontrollerat i amplitud.

6.2 Tryckslag

Här syftas på försök som baseras på koaxialventilen. Eventuellt kompletterad med en cirkulationspump och en reservoar för andra fluider än vatten.

6.2.1 Hur långt in i simulatorn kan kavitationsmolnet fås att utsträcka sig

I syfte att undersöka hur långt in i simulatorröret kavitationsmolnet kan fås att sträcka sig har det i aktuell etapp av projektet tillverkats två genomskinliga polykarbonatrör med mejerikopplingar, i samma dimension som simulatorns övriga delar. Därigenom blir det möjligt att visuellt bedöma hur långt kavitationsmolnet sträcker sig.

6.2.2 Brukets uppehållstid i kavitationsmolnet

Flödeshastigheten och kavitationsmolnets utsträckning är troligen de parametrar som avgör hur god sönderdelningen av cementpartikelaggregat blir. Dessa båda parametrar avgör hur länge bruket utsätts för de imploderande kavitationsbubblorna. De gjorda försöken visar, att vid upprepade tryckslag (taktning), kommer åtminstone hela injekteringsröret (1m) att fyllas av bubblor. Detta framgår av att man kan se bubblor komma ut ur synglaset efter injekteringsröret.

6.2.3 Noggrann flödesmätning i simulatorn

Det vore önskvärt att kunna mäta absolutflödet i simulatorröret. Med absolut menas att även flödesriktningen skall bestämmas. Tekniken för detta är inte utvecklad i projektet, men man kan tänka sig t ex. optiska metoder med intervallavbildning.

6.2.4 Mätning av kavitationsmolnets utveckling

När en vätska fylls med bubblor kommer dess elektriska ledningsförmåga att minska. Man vet också att ledningsförmågan för ljudvågor reduceras kraftigt. Det finns en ansats att utveckla en elektriskt baserad teknik för att mäta mängden kavitationsbubblor i ett tvärsnitt av simulatorröret. Ett antal elektroder som mäter strömmen genom vätskan för en viss pålagd spänning kunde vara en lösning på mätproblemet.

6.2.5 Optimering av tryckslagsmetodens f och t avseende flöde och tryckvariationer

Hittillsvarande försök att optimera tryckslagsfrekvensen och längden på den avstängda perioden baseras på manuell teknik. Som kontrollvariabel har uppnådda trycknivåer använts, avlästa på oscilloskop. Det skulle vara möjligt att utveckla en algoritm som sköter optimeringen med avseende på en eller flera variabler.

6.2.6 Effekt av uppströms tryckackumulator

När koaxialventilen stänger har de genomförda försöken enbart fokuserat på vad som händer nedströms ventilen. Men när ventilen stänger uppstår två tryckslag, det studerade nedströms, som inledningsvis är negativt och ett positivt uppströms. I försöken har det positiva tryckslaget absorberats av vattenledningsröret. Om man sätter en tryckackumulator i ledningen uppströms koaxialventilen och en backventil uppströms denna kan man åstadkomma en vädurliknande effekt. Det framrusande vattnet som plötsligt inte har någonstans att ta vägen tvingas då in i ackumulatortanken. Där skapar det ett tryck som är högre än i tilloppsledningen. När sedan koaxialventilen öppnar kommer flödet att starta med ett högre tryck än det som råder i tilloppsledningen. Därmed blir tryckdifferensen större. Att optimera det inre vilotrycket i ackumulatortanken borde vara en intressant uppgift.

6.3 Modifiering av simulatorn

Som framgår av rubriken avser detta den tekniska utrustningen som övergripande kallas simulatorn.

6.3.1 Effekt av impedansanpassning i slutet av injekteringsröret

Injekteringsröret är ofta ett vanligt halvtumsrör som sticker ut en liten bit ur packern in i borrhålet. Vid statiska tryck är utformningen av denna detalj inte av någon större vikt eftersom ett statiskt tryck utbreder sig i alla riktningar. Men när det gäller dynamiska tryck, alltså tryckstötar spelar övergången från injekteringsrör till borrhål större roll. Det blir nämligen en impedanskontrast mellan de två rördiametrarna och därmed kommer en viss del av tryckstötarna att reflekteras tillbaka in i injekteringsröret. Att kunna förstå och kontrollera detta fenomen är avgörande för framgångsrik tillämpning av taktningsfenomenet.

6.3.2 Pump och reservoar för cirkulering av specialblandningar avseende viskositet och densitet hos fluiden

Referensgruppen uttryckte vid senaste mötet intresse av att studera hur viskositet och densitet hos injekteringsfluiden påverkar dynamisk injektering och om detta rådde samsyn. För att göra detta måste systemet kompletteras med en cirkulationspump och en reservoar, så att den blandade fluiden kan cirkuleras i injekteringsslang, injekteringsrör och simulatorröret. Med cirkulationspump menas inte den sorts pump som brukar bära detta namn. Det måste vara en pump med kapacitet att skapa tryck uppemot 20-30 Bar och ett flöde uppemot 40 l/min.

6.3.3 Distribuerat läckage längs simulatorröret

Den nuvarande simulatorn kan endast förses med läckage i rörets mitt. De verkliga sprickorna i ett injekteringshål får anses vara jämnt fördelade längs hålet. Hur detta kan påverka möjligheterna att uppnå resonans och taktning kräver att det finns ett distribuerat läckage längs simulatorröret. Det enklaste sättet att åstadkomma detta är att lägga in ett perforerat rör eller slang inuti simulatorröret. Läckaget blir då helt distribuerat och flödet kan regleras med en extern kulventil. Med ett sådant rör kan man till och med studera effekten av mottryck i spricksystemet. Det är ju inte så ofta man injekterar torra sprickor utan det finns ju oftast ett flöde man vill stoppa. För djupa tunnlar, t ex den genom Hallandsåsen, kan mottrycket bli mycket högt, i det fallet över 10 Bar.

En intressant frågeställning är om det blir ekvivalenta förhållanden om man injekterar med 40 Bar och har ett mottryck av 10 Bar jämfört om man injekterar med differenstrycket 30 Bar utan mottryck. Summatrycket i det första fallet blir ju inte 50 Bar utan 40. Mottrycket medför enbart en flödesreduktion, kan man tänka.

6.3.4 Laser-ridå för fotografering av bubbelmoln vid kavitation

I syfte att lättare kunna fotografera kavitationsmolnets tvärsnitt har en linjelaser anpassats så att den kan fästas mot ett siktglas. Lasern belyser då ett tunt skikt i flödet och om man fotograferar det från sidan får man ett längsgående tvärsnitt genom bubbelmolnet. Genom att exponera under lämplig tidsrymd fås möjlighet att studera kavitationsbubblornas trajektorier.

6.4 Allmänt

Under denna rubrik presenteras några frågeställningar som är övergripande

6.4.1 Kort spalt

Som nämnts i denna rapport har försöksutrustning avseende brukspenetration i smala spalter tillverkats i detta projekt och vid KTH. Det är fullt möjligt att köra en blandning av verkligt injekteringsbruk både genom koaxialventilen och genom brukscylindern i det elektrohydrauliska systemet. Men det kräver tillgång till den ovan beskrivna pumpen och reservoaren (6.3.2), den senare då kompletterad med en omrörare. När det gäller tryckslag är en komplikation att man inte kan räkna med någon nämnvärd flödeshastighet om man kör hela flödet genom den korta spalten. Här krävs lite skarpsinnighet för att lösa problemet.

I samband med "kort spalt" är den ständigt debatterade frågan om mottryck aktuell. I en verklig injekteringssituation arbetar injekteringsbruket mot ett vätsketryck i bergets sprickor. Detta kan som redan nämnts bli högt. Ett problem man måste lösa om man trycker bruk genom en spalt är hur man skall kunna mäta genomströmmad mängd bruk vid varje spalt. Det första man kommer att tänka på är ett membran som skiljer mottrycksvätskan från injekteringsbruket rent fysiskt, men låter trycken samverka och bilda ett differenstryck över spalten.

6.4.2 Viskositet och densitet

Även om det är så att oscillationer och resonans kan studeras lika bra i vatten som i verkligt injekteringsbruk beroende på att ljudhastigheten är densamma i injekteringsbruk som i vatten, så att resonansfrekvenser, våglängder och hastigheter följer samma ekvationer, så är ju förlusterna i systemet beroende på parametrar som viskositet och densitet. För att inverkan av dessa parametrar skall kunna studeras krävs att fluiden kan recirkuleras och för det krävs en pump och en reservoar (6.3.2).

6.4.3 Fältförsök

Tryckslagsmetoden är så gott som färdig för fältförsök och ett sådant planeras för nästkommande mellanetapp, alltså innan ett doktorandprojekt startas.

En koaxialventil med tillhörande styrelektronik monteras på ett skarpt injekteringsrör och injekterinsprocessen övervakas med olika taktningsparametrar valda. Som pump används en konventionell sådan. Flödet leds genom koaxialventilen som då är försedd med en ackumulatortank och en backventil (6.2.6). Dessa två komponenter skyddar injekteringspumpen mot de uppströmsgående tryckslagen. Injekteringsslangen kan också fungera som tryckutjämnare uppströms, men den har annars ingen roll i tryckslagsmetoden.

Den andra tekniken, elektriskt styrd hydraulcylinder kopplad till brukscylinder är något mer komplicerad att testa i fält beroende av vilket körsätt man vill använda. Reverseringstekniken (6.1.3) är nog lättast att prova, då den kan genomföras med befintlig utrustning kopplad till en "standard" injekteringspump. I princip skulle även återkopplad resonans kunna provas på detta sätt då man kan överlagra oscillationerna på det statiska trycket. Det innebär att man leder flödet från en konventionell injekteringspump genom den av hydraulcylindern kontrollerade brukscylindern. När pistongen i denna rör sig fram och tillbaka skapas en oscillation som överförs till bruksflödet. Man måste se till att övertrycken går ut i injekteringshålet och inte tillbaka till pumpen.

Injekteringsslangen spelar avgörande roll för vilka resonansfrekvenser man erhåller. En tunnare slang leder till högre resonansfrekvenser. Det har påvisats i föregående etapp av projektet.

Tryck längs injekteringshålet är intressant att studera. Man kan räkna ut det teoretiskt avseende sinusformade oscillationer, men det är alltid tillfredställande att kunna verifiera sin beräkningsmodell. Tryckfördelningen skulle kunna mätas genom att man monterar ett långt rör med en tryckgivare i ena ändpunkten, kabeln genom röret och en yttre tätning i form av o-ringar i simulatorrörets utloppsgavel. Därefter förflyttas tryckgivaren genom hela rörlängden i lämpliga steg, säg en tiondels våglängd, genom att man drar ut röret bit för bit. När det gäller tryckslag är det osäkert om detta kan vara en framkomlig väg att mäta tryckfördelningen.

ERKÄNNANDEN

Tekn Dr Lennart Jönsson har bistått med givande diskussioner och förklarande teoretiska beräkningar av de fenomen som observerats för att inte tala om stora mängder erfarenhet som tillämpats på försöken.

Utvecklingen av apparaturen hade inte varit möjlig utan hjälpen från verkstaden på Institutionen för Fasta Tillståndets Fysik, där Johan Stjernholm särskilt bör tackas för fina arbeten.

7. REFERENSER

1. PUSCH, R., (1992), Executive Summary and general conclusions of the Rock Sealing Project. Stripa Project, Technical Report TR 92-27, SKB, Stockholm

2. ROSENKVIST, M., (2011), ” Vägledning för cementinjektering av betongkonstruktioner – Projektering, utförande och kontroll. ELFORSK Rapport 11:60

3. EKSTRÖM, P.(1996), "Tryckslag i tappvattensystem", Examensarbete 1996:2, Inst för Vattenbyggnad, Chalmers.

4. DRAGANOVIC´ A., KARAMANOUKIAN, A., ULRIKSEN, P. och LARSSON, S., (2020) "Dispersion of microfine cement grout with ultrasound and conventional laboratory dissolvers", Construction and Building Materials (251) 2020. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119068

Av referensgruppen tidigare rekommenderade arbeten i området

Daniel Eklund, (2006), "Inträngningsförmåga hos cementbaserade injekteringsmedel", BeFo R73

Magnus Axelsson, (2009) "Prevention of Erosion of Fresh Grout in Hard Rock", Doktorsavhandling, Chalmers, Bygg- och miljöteknik, Geologi och geoteknik, ISBN 978-91-7385-234-0, serie 2915

Miriam Zetterlund, (2014) "Value of information Analysis in Rock Engineering Investigations", Doktorsavhandling, Chalmers, Bygg- och Miljöteknik, Geologi och geoteknik, ISBN 978-91-7597-023-3, serie 3704