

## SPECIALSTUDIE AVSEENDE OPTIMERING AV PARAMETRAR FÖR TRYCKSLAGSEFFEKTER

Dynamisk Injektering, Lunds tekniska  
högskola, etapp 4

Peter Ulriksen



# **SPECIALSTUDIE AVSEENDE OPTIMERING AV PARAMETRAR FÖR TRYCKSLAGSEFFEKTER**

**Dynamisk Injektering, Lunds tekniska högskola, etapp 4**

**Study focused on on optimization of  
parameters for water hammer effects**

**Dynamic Grouting, Lunds tekniska högskola, stage 4**

Peter Ulriksen, Teknisk Geologi, LTH



## FÖRORD

Injekteringsforskning har varit en del av BeFo:s program under 30 år och utgör en viktig del av skandinaviskt bergbygande. Injektering sker för att stabilisera berget, stoppa vatteninläckage och hindra dränering av ovanliggande mark.

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. Därigenom hålls bruket flytande, trots de tixotropa egenskaperna, och uppbyggnaden av filterkakor i trånga passager antas förhindras. Ett speciellt sätt att göra detta är genom att utnyttja tryckslagseffekten i samband med en så kallad koaxialventil som snabbt kan stoppa flödet helt. I denna studie undersöks hur relationen mellan ventilens öppna och slutna tid påverkar strömningsförloppet.

Referensgruppen har tidigare lämnat väsentliga bidrag till arbetet, bl. a. genom att förslå att en borrhålssimulator adderas till övriga komponenter. Så har också skett i form av ett 12 m långt rostfritt rör med diametern 63.5 mm och därmed föreligger en komplett laboratorietrustning för studier av dynamiska effekter vid injektering. Referensgruppen består av Ulf Håkansson (Skanska), Tommy Ellison (Besab), Mikael Creütz (Golder Associates), Anders Selander (Cementa), Thomas Dalmalm (Trafikverket) och Per Tengborg (BeFo). Forskningsinsatsen är utförd av Peter Ulriksen, LTH.

Forskningsprojektet är finansierat av Stiftelsen Bergteknisk Forskning – BeFo samt med naturainsats från LTH.

När detta skrivs söks medel för ett doktorandprojekt inom området dynamisk injektering. Referensgruppen har rekommenderat att arbetet inriktas mot att studera inverkan av fluidens densitet och viskositet på den dynamiska injekteringen.

Stockholm 2021

*Per Tengborg*



## **SAMMANFATTNING**

Detta är fjärde etappen i LTH-projektet Dynamisk Injektering och den är inriktad mot att studera tryckslagsmetodens beroende av parametrarna pulslängd och pulsavstånd samt hur dessa påverkar kavitationsmolnets utsträckning och injekterings duty-cycle. Ett viktigt resultat är att man måste vara beredd att sänka verkningsgraden i flödet väsentligt för att uppnå maximal utbredning av kavitationsmolnet. Tryckslagsmetoden är troligen mest lämpad i det inledande skedet av injekteringsarbetet i varje borrhål, då flödet är störst och dess effekter är huvudsakligen att motverka filterbildning och ökning av viskositeten genom tixotropiska effekter.

**Nyckelord:** Dynamisk injektering, Tryckslag, Duty-cycle





## SUMMARY

This is the fourth part of the LTH-project Dynamic Grouting and it is focused on studying the water-hammer methods dependence on the parameters pulse width and spacing and how these influences the extension of the cavitation cloud and the duty-cycle for the grouting.

An important result is that optimizing the extent of cavitation requires that the duty-cycle is reduced substantially. The water-hammer method is probably most suitable for application in the first part of the grouting process in each borehole, that is when the flow is largest and the effects are mainly to reduce filter build-up and increase of viscosity due to tixotropic effects.

**Keywords:** Dynamic grouting, Water Hammer, Duty-cycle



## INNEHÅLL

1. INTRODUKTION .....	1
2. DUTY-CYCLE.....	1
2.1 Teoretisk duty-cycle .....	1
2.2 Flödets beroende av duty-cycle .....	5
3. KAVITATIONSMOLNETS UTSTRÄCKNING .....	7
4. TRYCKVÅGSHASTIGHET I SIMULATORN.....	9
4.1 Bestämning av optimal frekvens för transmission.....	9
4.2 Bestämning av ankomsttider i rörmitt och vid utlopp.....	12
4.3 Mätning med chirpsignal.....	13
4.4 Mätning med simulatorröret tömt på vatten.....	14
5. FÖRBÄTTRING AV EXPERIMENTANLÄGGNINGEN.....	15
5.1 Längre mätsträcka.....	15
5.2 Rör av polykarbonat.....	16
5.3 En andra koaxialventil med styrelektronik.....	18
5.4 Synglas nedströms koaxialventilen.....	19
5.5 Laserrida.....	20



## 1. INTRODUKTION

Vid injektering av berg med cementbruk minskas effektiviteten av tixotrop fluiditetsminskning i det färdigblandade bruket samt separation av bruk och vatten i trånga passager - filtrering. Det senare leder till valvbildning, som hindrar vidare inträngning av bruket. Om man kan vidmakthålla brukets ursprungliga fluiditet och hindra eller bryta ned valvbildningar åstadkoms förbättrad effektivitet genom ökad och snabbare penetration. En möjlighet att åstadkomma detta kan vara att utsätta bruket för alternerande tryck. Uppbyggt tryck bakom ett filter antas då bryta ned filtret om trycket framför filtret sänks. Sinusoidalt varierande tryck vid resonans, samt tryckslag vid snabb ventilstängning har studerats med vatten som fluid. Injekteringsbruk har nämligen ungefär samma akustiska utbredningshastighet som vatten, så flera av de hydrauliska effekterna kan studeras på detta sätt. Vid tryckslag uppstår en propagerande negativ tryckvåg, som har så lågt tryck att kavitation inträffar i vätskan nedströms ventilen. Kavitation har visat sig kunna bryta ned aggregerade cementpartiklar, vilket märkbart förbättrar brukets penetrationsförmåga (KTH). I denna etapp har försöksutrustningen förbättrats och byggts ut och ytterligare ett injekteringsrör med koaxialventil och styrutrustning har byggts, i syfte att det skall kunna användas vid försök med cementbaserat injekteringsbruk.

## 2. DUTY-CYCLE

### 2.1 Teoretisk duty-cycle

Koaxialventilen kan sägas ha två funktioner: Den skapar stora tillfälliga undertryck, som kan hålla injekteringsbruket lättflytande genom att motverka tixotropi samtidigt som de bryter ner filter eller hindrar att sådana uppstår. Den skapar också kavitationsbubblor, som när de imploderar kan hjälpa till att bryta ner cementpartikelaggregat och därmed minska filterbildningen och snabba upp hydratiseringen.

I projektets nuvarande utvecklingssteg kan inte effekten på cement studeras eftersom alla försök är gjorda med rent vatten som fluid. Därför måste optimering fokusera på de skapade undertrycken och mängden bildade kavitationsbubblor.

Det fenomen som studeras kallas i tidigare rapporter för taktning. Det innebär att två på varandra följande avstängningar av flödet samverkar på något sätt.

De varierade parametrarna är längden på den tid koaxialventilen är sluten  $t$  och tiden mellan att två sådana perioder börjar  $T$ . Av mättekniska skäl är det den elektriska signalen som studeras men man måste ta hänsyn till att ventilen har effektueringstider, dels vid stängning, dels vid öppning. Dessa effektueringstider består av en elektromekanisk aktiveringstid och en hydraulisk aktiveringstid som skall adderas. Hydrauliskt innebär detta att flödet inte blir strypt förrän en viss tid efter det att den elektriska signalen slagit om och att flödet inte återhämtar sig förrän en viss tid efter det att den elektriska signalen slagit om.

Skulle effektueringstiderna vara lika vid stängning och öppning blir tiden utan flöde densamma som styrsignalens längd  $t$ . Det innebär i så fall att flödesreduktionen blir samma tal som signalens duty-cycle, dvs  $t / T$ . Ju längre ventilen är stängd och ju oftare den stänger, desto mindre blir flödet. Flödet reduceras till  $Q_0 (T-t) / T$ .

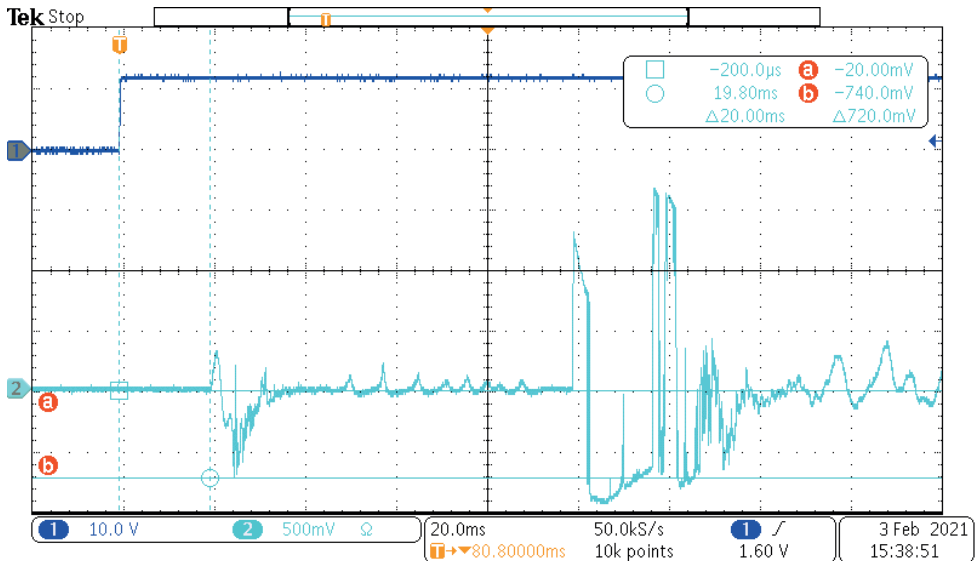
De genomförda mätningarna anger att effektueringstiden vid stängning är 24 ms och vid öppning 64 ms. Det innebär att den tid flödet är avstängt är  $t+40$  ms. Man kan tänka sig att detta beror på att vid stängning rör sig ventilens kolv med vätsketrycket men vid öppning rör den sig mot vätsketrycket uppströms.

Vad skall man då anse vara optimalt värde på  $(T-t)/T$ ? Det positiva med det momentana avbrottet är dels det skapade undertrycket, dels kavitationsbubblorna som hjälper till att dispergera partikelaggregat av cement. Kavitationsbubblorna imploderar under en bestämd tid och därefter händer ingenting i det avseendet. Om man vill att all cement som befinner sig i injekteringsröret skall dispergeras genom kavitation får man ett litet värde på  $T$ , dvs ventilen stänger ofta, med resulterande lågt flöde. Om man nöjer sig med att fokusera på de skapade undertrycken som bryter ner filterbildningar i sprickorna kan man ha ett högt värde på  $T$  och se det som att tillhörande kavitationsdispergering är en bonuseffekt.

Låt oss säga att  $T$  är mycket större än  $t$ . Det innebär att det inte inträffar någon samverkan mellan efter varandra följande stängningar av flödet. Man inser att för full effekt av ventilstängningen måste flödet hinna bli helt avstängt, dvs  $t$

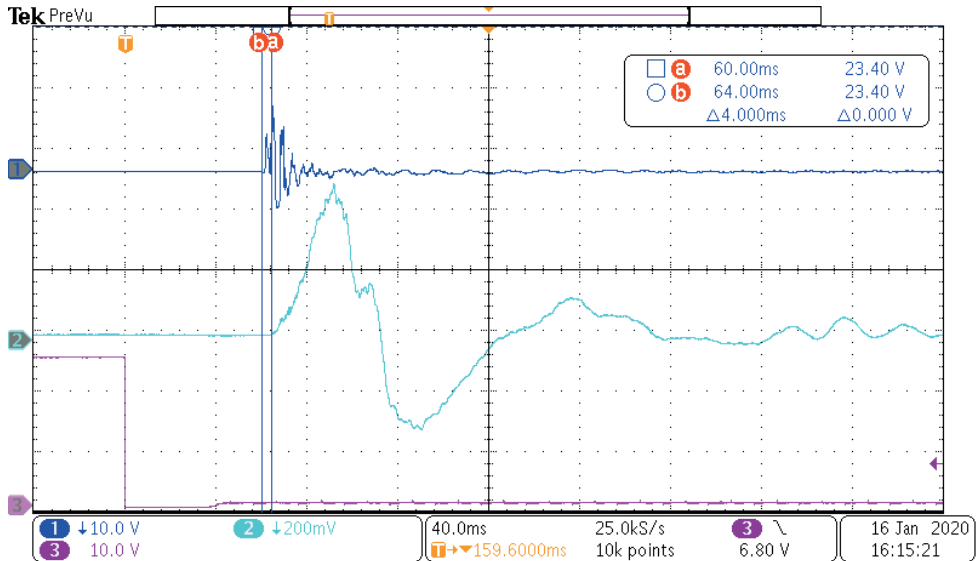
måste minst vara minst 20 ms, gärna några ms längre. I denna situation avgörs T av hur stor flödesreduktion man är beredd att acceptera.

Antag i stället att T bara är så mycket större än t att reflekterade tryckvågor från injekteringshålet samverkar med nästa cykel. Eftersom vi har mätt upp ljudhastigheten i borrhålssimulatore till c:a 1600 m/s, vilket vi anser vara högt, kommer det att ta  $2 \times 25 / 1600$  s för en tryckvåg att reflekteras i ett borrhål som är 25 m långt. Grundläggande taktingsperiod T blir då 31 ms. Eftersom denna tid är kortare än 2t är det ingen mening med att ha två tryckvågor i injekteringsröret samtidigt.



Figur 1. Ch 1 är den elektriska styrsignalen (stäng) till koaxialventilen. Ch2 är signalen från 70 bar tryckgivaren nedströms det första siktblaset efter koaxialventilen. Ch1 is the electrical control signal (close), Ch2 is the signal from the 70 Bar pressure sensor downstream the valve and sight-glass. TEK638.

Fördröjning mellan styrsignal och det att koaxialventilen stängt flödet helt är 24 ms. När stängning sker uppstår ett kort övertryck efter 20 ms, Figur , Ch2, när ventilen slår in i ventilsetet. Detta övertryck varar i 4 ms.

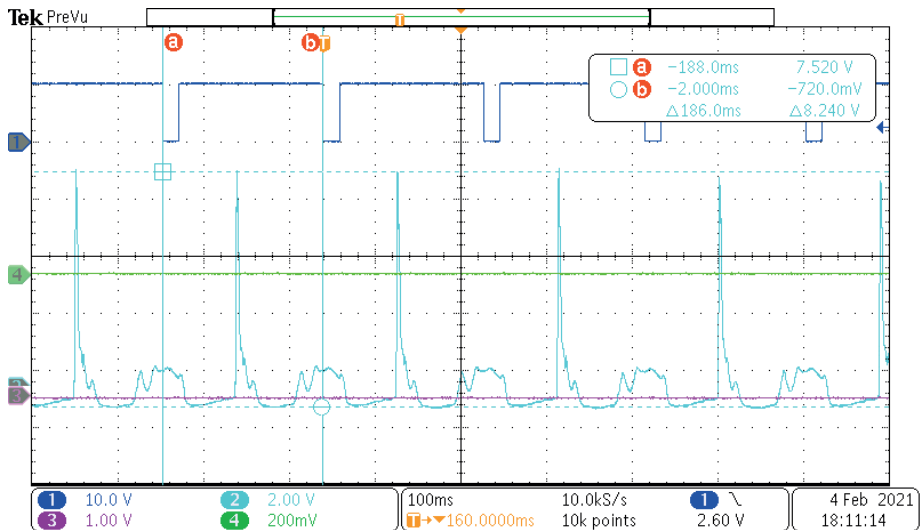


Figur 2. Registrering vid öppning av koaxialventilen. Ch1 och Ch2 tryck nedströms, Ch3 styrsignal (öppna). Det tar 64 ms efter styrsignalens omslag för flödet att börja. Record of the pressure when the coaxial valve is opened. Ch1 and Ch2 pressure downstream, Ch3 control signal (open). It takes 64 ms from the electric signal flank to full flow to establish. TEK509

Som framgår av Figur 2 ovan tar det längre tid för flödet att återhämta sig än det tar för att avbryta det helt. Man kan räkna med att flödet är helt eller delvis avstängt under tiden för pulslängden plus  $64 - 24 = 40$  ms.

I ett försök att se hur stora tryckvariationer man kan åstadkomma med tryckslagsmetoden gjordes ett manuellt test. Det visade sig att tryckskillnaderna blev störst då pulslängden var 21 ms och pulsavståndet 186 ms. Då uppmättes de största dynamiska tryckvariationerna strax nedströms koaxialventilen till 11.44 Bar, 10.44 Bar övertryck och -1 Bar undertryck relativt trycket i röret vid fullt flöde, som var 1.24 Bar statiskt. Den starka tryckpulsen skapas när kavitationsmolnet imploderar. Se Figur 3.





Figur 3. Maximal tryckvariation vid försök till manuell optimering av pulslängd (21 ms) och pulsavstånd (186 ms) på pulsgeneratorn. *Maximum pressure variation obtained in manual attempt to adjust pulse rate and length.* [TEK654]

## 2.2 Flödets beroende av duty-cycle

Koaxialventilen styrs av en pulsgenerator. Man utnyttjar två funktioner på generatorn, pulslängden (pulse length/width) och pulsavståndet (pulse spacing/rate)

Inom samma parameterområde kan pulsavståndet justeras kontinuerligt från 124 ms till 1.142 s. På samma sätt kan pulslängden inom ett område justeras från 11 ms till 98 ms. Det finns andra parameterområden, men dessa är de som är rimligast att undersöka.

Systemet är kopplat så att flödet stängs av under tiden motsvarande pulslängden.

Tidigare försök har visat att koaxialventilen hinner göra en komplett stängning när pulslängden är 20 ms. Det tar 24 ms för flödet att upphöra helt efter det att styrsignalen ändrats. Att öppna ventilen tar emellertid 64 ms från det att den elektriska signalen ändrats.

*Duty cycle* kan definieras som  $(T-t)/T$  där  $t$  är pulslängden och  $T$  är pulsavståndet. När ingen avstängning sker är  $t = 0$  och då är *duty cycle* = 1. Detta förutsätter att eftersläpningen efter stängningssignalen är lika stor som efter öppningssignalen. Den öppna tiden blir då lika med pulsavståndet  $T$ .

Men vi har sett att eftersläpningen vid öppning är 64 ms, alltså 40 ms längre än eftersläpningen vid stängning, vilken är 24 ms. Det teoretiska uttrycket blir då i stället  $(T-(t+40))/T$ .

För pulslängden 21 ms har flödet avlästs på en propellerflödesmätare av fabrikat Gardena, alltså enkla verktyg, som i senare projektskede ersätts av annan typ av flödesmätare, t ex doppler, som även bör fungera med blandningar med från vatten avvikande viskositet och densitet.

Tabell 1. Pulsavstånd och pulslängd och dess inverkan på uppmätt flöde  $Q$ , med beräkning av verklig och teoretisk *duty-cycle* []. *Pulse spacing and pulse width influence on measured and theoretical duty-cycle.*

T (pulsavstånd) s / Hz	t (pulslängd) ms	Q (flöde) l/min / Duty cycle
1.142 / 0.88	21	19-20 / 0.93 [0.95 teor.]
0.992 / 1.01	21	20.0 / 0.95 [0.94]
0.824 / 1.21	21	19.5 / 0.93 [0.93]
0.674 / 1.48	21	18.5 / 0.88 [0.91]
0.542 / 1.85	21	17.8 / 0.85 [0.89]
0.398 / 2.51	21	17.1 / 0.81 [0.85]
0.282 / 3.55	21	16.6 / 0.79 [0.78]
0.124 / 8.06	21	15.2 / 0.72 [0.51]

### 3. KAVITATIONSMBLNETS UTSTRÄCKNING

Kavitationsbubblor kan studeras i det 10 cm långa synglaset, Figur 4, strax nedströms koaxialventilen samt i det efter injekteringsröret inkopplade polykarbonatröret om 2 + 2 m. Renodlade kavitationsbubblor innehåller endast vattenånga, som kondenserar tillbaka till vatten under implosion. Eftersom luft alltid är löst i kranvatten kan det inte undvikas att bubblorna i aktuellt experiment även innehåller en del expanderad luft.

För glesa avstängningar, d.v.s. höga värden på T syns kavitationsbubblor enbart i synglaset närmast koaxialventilen. Så är t ex fallet för parametrarna  $T=1.142$  s,  $t= 17.2$  ms och  $Q=20$  l/min. (Fritt flöde i simulatorm är 21 l/min.)

Mängden små bubblor i synglaset ökar när pulslängden  $t$  minskas från 98 ms till 11 ms.



Figur 4. Synglas med passerande kavitationsbubblor i laserridå. *Sight-glass with cavitation bubbles passing the laser-curtain.*

För  $t=21$  ms kan kavitationsbubblor även observeras i polykarbonatröret när T justerats ned till 188.8 ms, motsvarande 5.3 Hz pulsfrekvens. Man får då anta att det rör sig om kvarstående bubblor i injekteringsröret, som "pumpas upp"

av efterföljande ventilstängnings undertryck. Det kan då röra sig om bubblor av vattenånga som inte hunnit implodera samt om luftbubblor.

Kavitationsbubblornas utsträckning i polykarbonatrören, alltså efter injekteringsröret, är c:a 30 -100 cm för  $T=163.2$  ms och  $t=21$  ms. Det innebär att bubblorna måste finnas från koaxialventilen, genom det meterlånga injekteringsröret och minst 30 cm därefter. Under hela denna sträcka kan de teoretiskt samverka med bruksblandningen för att bryta ned cementpartikelaggregat.

Vid T-värdet 163.2 ms är duty-cycle reducerad till knappt 0.8 enligt Tabell 1 ovan.

Men man kan också observera att det första synglasets visar kavitationsbubblor kontinuerligt för ett värde på T mindre än 240 ms, c:a 4 Hz. Det innebär att allt passerande vatten har innehållit kavitationsbubblor vid någon tid.

Man kan dra slutsatsen att omfattande kavitationseffekter kräver anseilig reduktion av det genomsnittliga flödet, dvs injekterings duty-cycle, om man vill använda hela injekteringsröret som reaktor. Det får nog därför anses vara rimligast att tryckslagsmetoden används för att bryta ner filterbildningar och motverka tixotropi och inte för att primärt utnyttja kavitationens positiva effekter på aggregatstorleken. Varje tryckslag medför alltid en stunds kavitation.

Man kan också spekulera i att filterbildningen är starkast när flödes hastigheten är hög. Detta talar för att tryckslagsmetoden gör störst nytta i injekterings initialskede, när flödet är högt och starka tryckslag kan utvecklas.

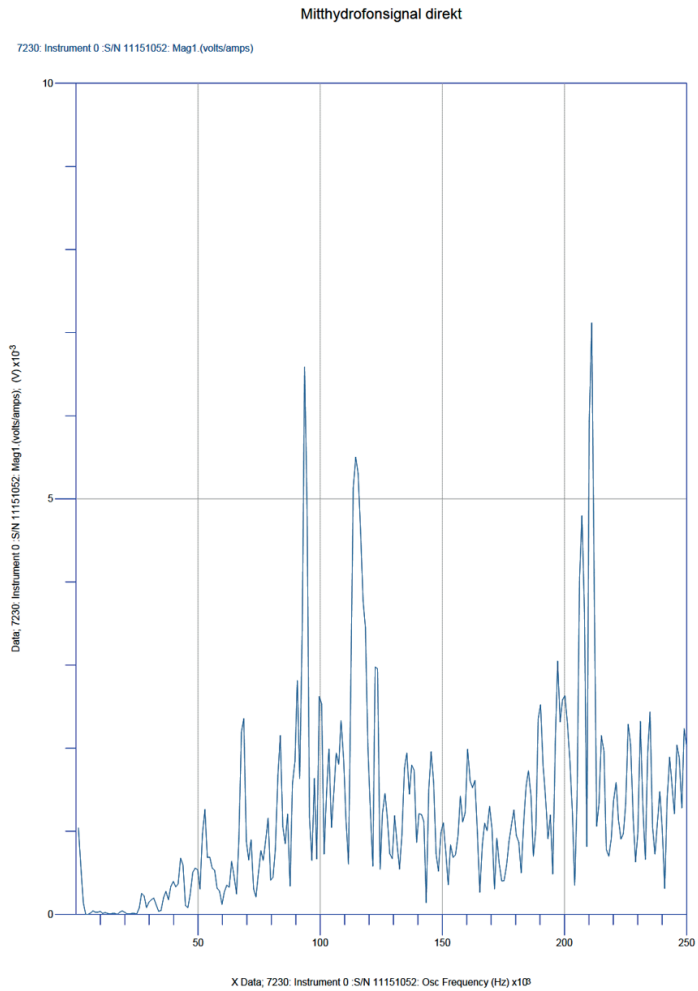
## 4. TRYCKVÅGSHASTIGHET I SIMULATORN

### 4.1 Bestämning av optimal frekvens för transmission

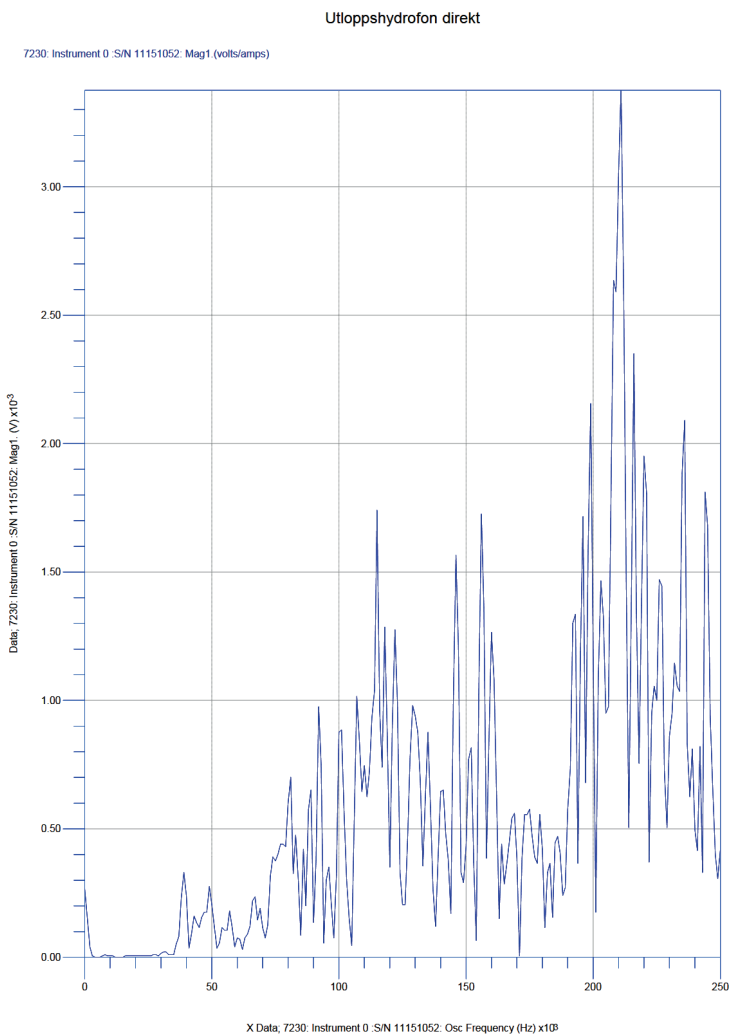
Inledningsvis undersöks vilken frekvens som starkast fortplantar sig genom rören i borrhålssimulatorn. Syftet är att använda denna frekvens i en puls som utbreder sig i röret. En puls definieras som en signal som innehåller flera cykler av en frekvens.

Mätningen utförs med en lock-in förstärkares utsignal kopplad till ekolodsändaren i röret och med signalen från hydrofonen vid rörslut kopplad till förstärkarens ingång. Lock-införstärkaren sänder sinus kontinuerligt för varje analyserad frekvens. Det innebär att det teoretiskt kan uppstå interferens i röret och då uppstår det noder och bukar.

Dessa mätningar är mycket smalbandiga i det att sändningen sker en frekvens i taget och lock-in-processen innebär att endast den utsända frekvensen analyseras, se Figur 5 och 6.



Figur 5. Mottaget spektrum vid hydrofonen i rörmitt. Frekvenstopparna ligger vid 210, 92 och 112 kHz. *Spectrum received in the hydrophone at the center of the tubing. Peaks are at 210, 92 and 112 kHz.*



Figur 6. Mottaget spektrum vid hydrofonden i rörslut. Frekvenstopparna ligger vid 210, 200 och 236 kHz. *Spectrum received in the hydrophone at the end of the tubing. The peaks are at 210, 200 and 236 kHz.*

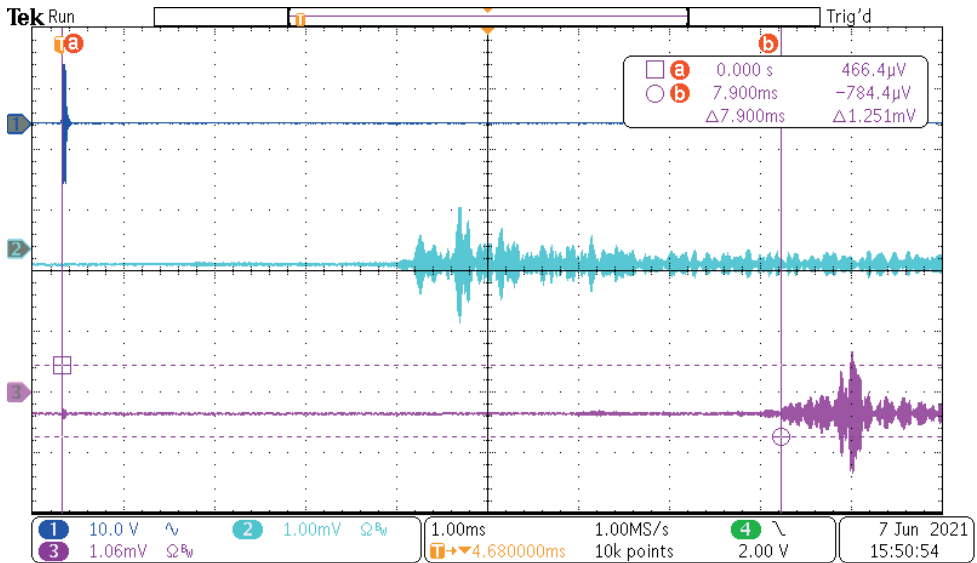
Med ledning av dessa resultat valdes frekvensen 210 kHz för testerna med pulser.

## 4.2 Bestämning av ankomsttider i rörmitt och vid utlopp

Hydrofonerna i rörmitt och vid utlopp kopplas direkt till oscilloskopet. Då blir amplituderna fel, men endast ankomsttiderna söks, så det är inte ett problem.

Dessa mätningar är också relativt smalbandiga därför att 10 cykler av 210 kHz sänds vid varje registrering.

Transmissionsförsök med 210 kHz frekvens och "200 kHz" ekolodtransducer presenteras nedan, Figur 7.



Figur 7. Sändpuls i Ch1 mottagen i rörmitt Ch2 och vid rörslut Ch3. *Transmitted pulse in Ch1, received in center of tube in Ch2 and at the end in Ch3. TEK685*

Avstånd sändare till rörmitt 6.3 m, sändare till rörslut 12.5 m.

Rörmitt Ch2: Tx - mitt 3.87 ms svarar mot 1627.9 m/s

Rörslut Ch3: Tx - utlopp 7.90 ms svarar mot 1582.3 m/s

Medelvärdet av de två bestämningarna är 1605.1 m/s, vilket är förvånansvärt högt jämfört med teoretiska värden på utbredningshastigheten i rör.

Man brukar ange ljudhastigheten i fritt vatten till 1500 m/s.



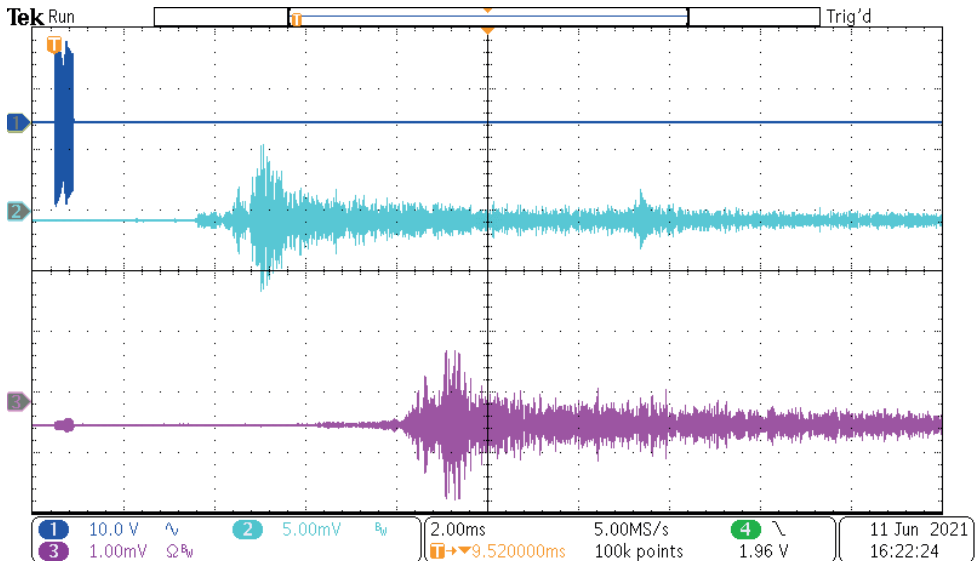
### 4.3 Mätning med chirpsignal

I syfte att framöver kunna göra mer noggranna bestämningar av ljudhastigheten i röret har sändning av chirpsignal utförts. En sådan innehåller ett snabbt frekvenssvop och om man förskjuter den sända signalen längs den mottagna uppstår tydlig matchning på precisa ställen vid korskorrelation. Den utsända signalen är alltså bredbandig.

Försök utfördes med chirpsignal RC0612CP som är lagrad i en av de befintliga signalgeneratorernas minne. Generatorfrekvens ställdes in på 2.33 kHz för att få rätt frekvensområde 180-240 kHz i den sända chirpen. 2.33 kHz är då den frekvens med vilken den lagrade signalen upprepas.

Lagrade data är medelvärde av 128 signaler och digitaliserade med 100 kSamples för varje kanal. Följande är signalernas filnamn: Ch1 i TEK0041Ch1.csv Ch2 i TEK0042Ch2.csv Ch3 i TEK0043Ch3.csv

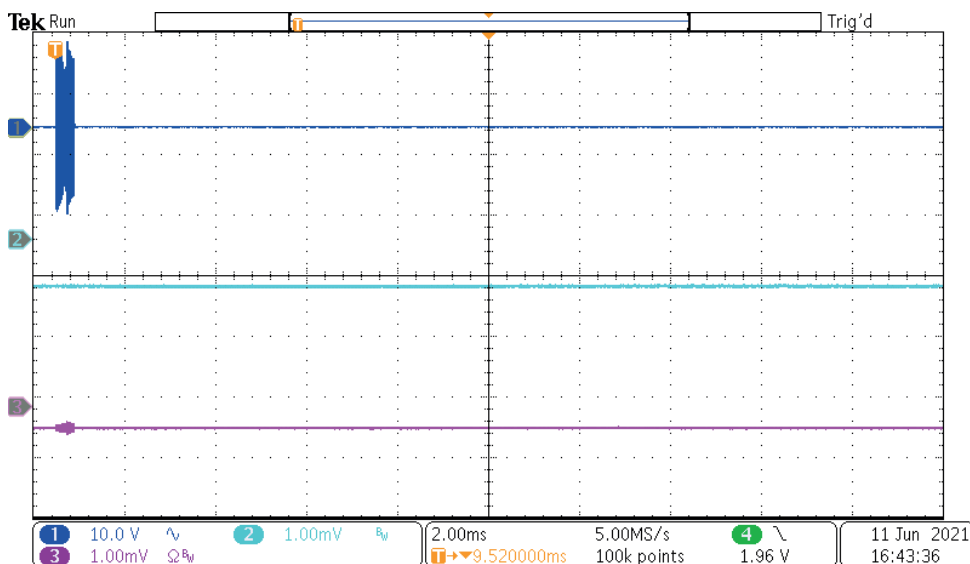
De lagrade signalernas utseende visas nedan, Figur 8.



Figur 8. Grafisk representation av de lagrade chirpsignalerna. *Graphical presentation of stored chirp signals. TEK709*

#### 4.4 Mätning med simulatorröret tömt på vatten

För att säkerställa att inga signaler gått ut i rörväggen direkt från transducern gjordes också en mätning med röret tömt på vatten, Figur 9.



Figur 9. Mätning då röret är tömt på vatten. Ch1 sändpuls, ch2 och 3 mottagna signaler. *Data take when the tubing is empty of water. Ch1 transmitted pulse, Ch2 and 3 are received signals.* TEK710

Av denna mätning framgår att inga signaler fortplantar sig i rörets gods, annat än möjligen de som gått över från vatten till rörets metall. Överhörningen i början av Ch3 finns i alla registreringar och är av rent elektrisk natur eftersom den registreras momentant. Från transducern till röret sker ingen mätbar överföring.

## 5. FÖRBÄTTRING AV EXPERIMENTANLÄGGNINGEN

### 5.1 Längre mätsträcka

I syfte att få längre mätsträckor vid bestämning av kompressionsvågshastigheten i borrhålssimulatorens beställdes två nya längder rostfria rör i dimensionen 63.5 mm. Rören försågs med påsvetsade TC-hylsor. Det innebär att det nu finns fyra sådana rör och att sammanlagda längden är 24 m, vilket är ungefär längden för vanliga injekteringshål.

I denna etapp har de emellertid inte använts, då metoden med en ekolodsändare fungerade tillfredställande (se 4.2-3).



Figur 10. Tre 6 m långa rostfria rör som medger att simulatorens byggs ut till 24 m. *Three 6m long stainless steel pipes allowing a total simulator length of 24 m.*

## 5.2 Rör av polykarbonat

I syfte att kunna studera kavitationsmolnets utsträckning bortom injekteringsrörets slut beställdes 2 längder polykarbonatrör med 60 mm ytterdiameter, se Figur 11. Denna diameter passar nämligen precis inuti TC-hylsor med ytterdiametern 63.5 mm. Polykarbonat ser ut som plexiglas men är betydligt segare. De två meter långa polykarbonatrören försågs med pålimmade TC-hylsor, den typ av koppling som används i simulatorsystemet. Det visade sig nödvändigt att först behandla kontaktytan på polykarbonatröret med en särskild primer. När primern torkat beströks kontaktytan med epoxilim och TC-hylsan trädde över, Figur 12.



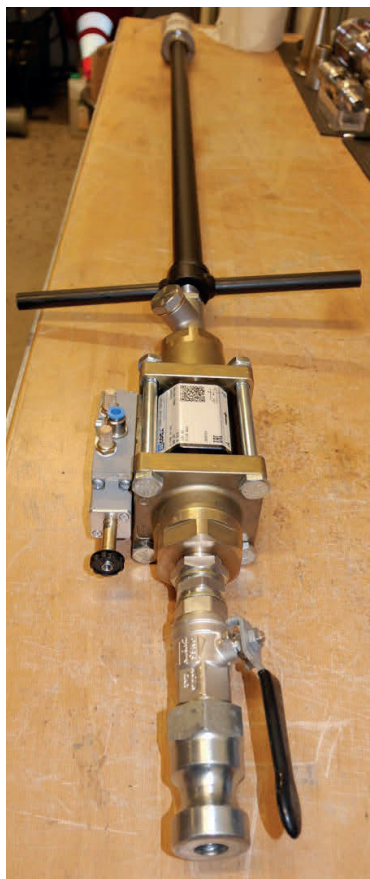
Figur 11. 4 m genomskinligt polykarbonatrör inkopplat i systemet följt av 6 m rostfritt rör. *4 m transparent simulator tubing made from polycarbonate tubing connected to the system and followed by 6 m stainless steel tube.*



Figur 12. Polykarbonatrör med pålimmad TC-hylsa kopplat till simulatören.  
*Polycarbonate tube with a glued TC flange connected to the simulator.*

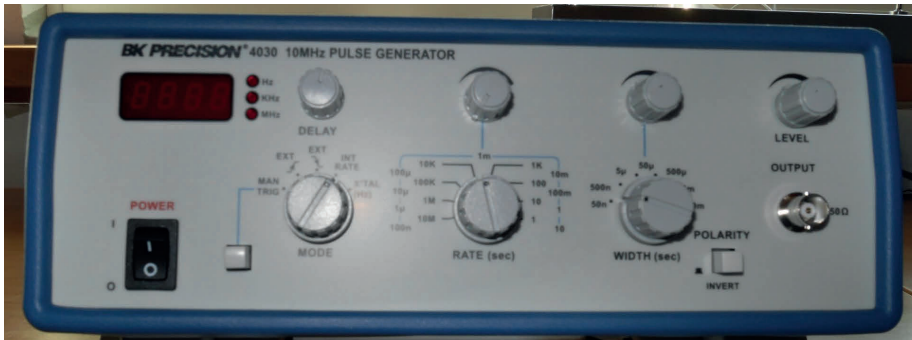
### 5.3 En andra koaxialventil med styrelektronik

I syfte att kunna göra fältförsök med tryckslagsmetoden och cementbaserat injekteringsbruk anskaffades en andra koaxialventil och ett standard injekteringsrör, Figur 13. Koaxialventilen är kopplad direkt till injekteringsröret och försedd med en standardkoppling för injekterings slang.



Figur 13. Injekteringsrör med påmonterad koaxialventil. *Injection tube with attached coaxial valve.*

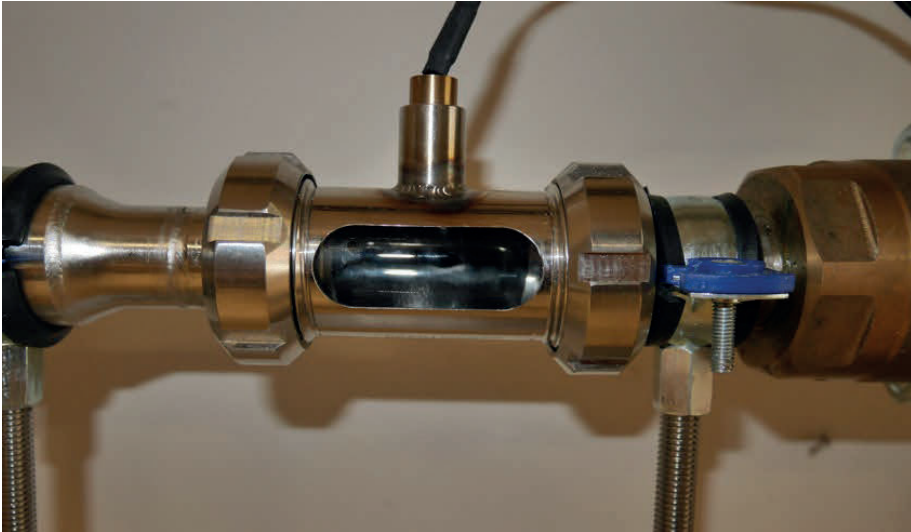
The coaxial valve is controlled by a pulse generator, Figure 14, and apart from that only needs pressurized air (8Bar) for the pneumatic valve assistance.



Figur 14. Styrelektronik som bestämmer parametrarna  $T$  (pulsavstånd) och  $t$  (pulslängd) för koaxialventilen. *Pulse Generator which controls the parameters  $T$  (pulse spacing/rate) and  $t$  (pulse length/width) for the coaxial valve.*

#### 5.4 Synglas nedströms koaxialventilen

Så länge försök genomförs med genomskinliga vätskor kan man få mycket intressant information via s.k. synglas. T. ex. kan man studera mängden kavitationsbubblor nedströms koaxialventilen (mässingsdelen t.h.) i nedan avbildat synglas, Figur 15. Se också Figur 4.

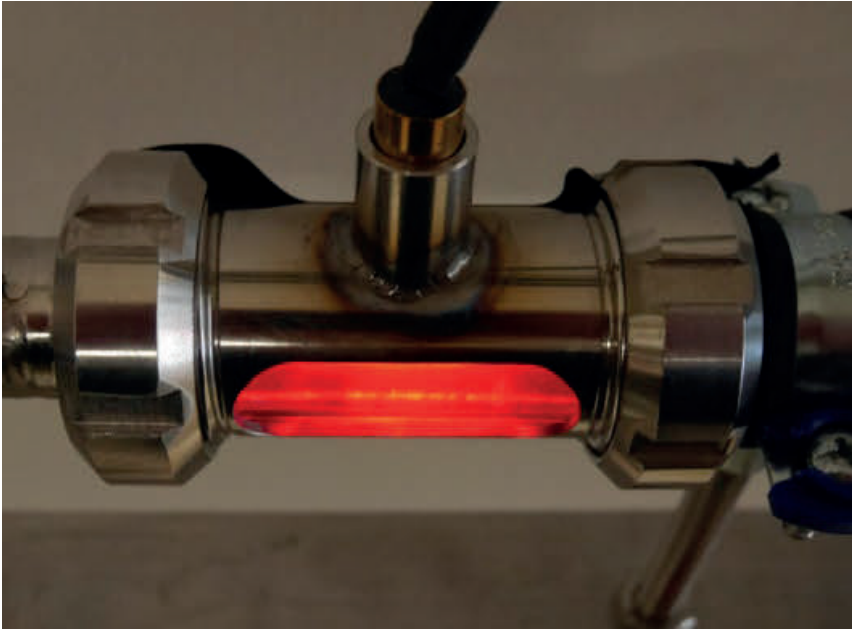


Figur 15. Synglas monterat omedelbart nedströms koaxialventilen (t.h.). *Sight-glass installed immediately after the coaxial valve, right in the picture.*

### 5.5 Laserridå

För att få tydliga bilder av kavitationsmolnet i det lilla synglas som sitter omedelbart efter koaxialventilen i försöksanläggningen, tillverkades diverse adaptrar för att kunna belysa en skiva genom vätskeflödet med laser. Lasern har en lens som skapar en linje och denna justeras så att den är parallell med flödesriktningen och ligger mitt i flödet. På detta sätt får man en belyst skiva genom kavitationsmolnets centrala del, Figur 16.





Figur 16. Laserridå skapad av en linjelaser i synnglasets ovankant. Linjen syns som ett ljusare parti i glasöppningen. *Laser-curtain created by a line-laser in the top of the sight-glass. The line is seen as a lighter part in the opening.*







Box 55545  
SE-102 04 Stockholm

info@befoonline.org • www.befoonline.org  
Besöksadress: Sturegatan 11, Stockholm

ISSN 1104-1773