

DYNAMISK INJEKTERING BASERAD PÅ ÅTERKOPPLAD RESONANSFREKVENNS – ETAPP I

Peter Ulriksen

DYNAMISK INJEKTERING BASERAD PÅ ÅTERKOPPLAD RESONANSFREKVENNS – ETAPP I

Dynamic grouting based on feedback resonance – Part I

Peter Ulriksen

Omslagsfigur:

Figur 23 i rapporten – Naturligt insvängningsförlopp med geofon som källa, ingen signal injicerad i systemet.

FÖRORD

I syfte att effektivisera injekteringsarbetet bedrivs utvecklingsarbete längs olika linjer. I detta projekt ligger fokus på att genom oscillerande rörelser i bruket hålla detta lättflytande och undvika att filtrering sker. Projektet avser att verifiera konceptet återkopplad resonans, som är ett sätt att tillföra mycket energi till ett resonant system på ett sådant sätt att energitillförseln anpassar sig efter systemets förändringar under inventeringsarbetets gång, t ex förändrat injekteringsmotstånd.

En flexibelt användbar försöksutrustning har byggts upp och med denna har visats att återkopplad resonans fungerar i hydraulisk miljö. Det har också påvisats att ingående komponenter, särskilt injekterings slang, har frekvensselektiva egenskaper.

Projektet har finansierats av BeFo och har stöttats av en referensgrupp som består av Per Tengborg Tommy Ellison Almir Draganovic och Ulf Håkansson.

Stockholm

Patrik Vidstrand

SAMMANFATTNING

Det har genomförts flera forskningsprojekt med huvudrubriken Dynamisk injektering. Pusch var tidigt ute med försök i mitten av 1980-talet i Stripa. Förbättrad inträngning kunde konstateras, men också att det stora problemet är att få vibrationerna att tränga ut i spricksystemet som injekteras. Det gäller alltså att skapa ett system med stora vibrationsamplituder.

I denna rapport redovisas en första etapp i ett projekt med inriktning mot dynamisk injektering baserad på återkopplad resonans. I mekaniska system har man kunnat visa att det går att mata in stora energimängder i ett svängande system, om det sker vid resonans, dessutom med förhållandevis små vibratorer.

Etappen omfattar uppbyggnad av testutrustning och genomförande av fundamentala försök för att visa att återkoppling fungerar även i hydrauliska sammanhang samt systemets eventuella frekvensselektivitet.

Således har det för tre helt olika vibratortyper visats att återkoppling skapar vågor med växande amplitud i de resonansrör som använts. Denna resonans uppstår helt utan påverkan, endast genom att vrida upp återkopplingsförstärkningen till tillräckligt hög nivå. Därmed är det visat att återkoppling fungerar också i hydrauliska system.

En kritisk del är den gummislang som används mellan brukspump och injekteringsrör, den del som fästs i det borrhål som skall injekteras. En 20 m lång sådan slang visade sig ha två passband, ett kring 11 Hz och ett kring 80 Hz.

Arbetet har också omfattat marknads- och litteraturstudier avseende ett lämpligt sätt att skapa höga tryckvariationer i injekteringsbruk.

Det finns vätskeventiler som kan slå om mycket snabbt genom att de är elektropneumatiskt styrda. En testad modell klarar 9 omslag per sekund. En sådan användes för att skapa negativa tryckslag nedströms ventilen. Ett undertryck av c:a 2 bar åstadkoms. Kan en sådan tryckpuls fås att propagera in i spricksystemet kan den hjälpa till att bryta upp filtreringseffekter.

Slutligen har den första etappen omfattat en marknads- och litteraturstudie avseende möjligheten att förbättra injekteringsbrukets egenskaper genom ultraljudbehandling. Den bärande iden är då att slå sönder hopklumpade cementpartiklar så att varje partikel blir helt omsluten av vatten.

Nyckelord: Injektering, återkoppling, resonans, tryckslag, ultraljudsdispersion

SUMMARY

Several research project labeled Dynamic grouting has been performed. Pusch was early with experiments in Stripa in the mid 80:ies. Improved penetration was verified and the main problem was to have the vibrations penetrate out into the fissure system of the bedrock. Consequently a main topic is to create large amplitude oscillations in the grout.

In this report results of a first part in a project aimed at using feedback resonance in dynamic grouting are presented. In mechanical systems it has been demonstrated that rather small vibrators can excite large structures if the excitation is made at the structural resonance.

This first part of the project covers establishment of test equipment and performance of fundamental tests to prove the concept of feedback resonance in a hydraulic environment. The transfer function of 20 m grouting hose is also established.

Thus spontaneous feedback resonance has been demonstrated for three different vibration sources in hydraulic resonance tubes. Spontaneous means that the oscillations start and grow without any external signal input to the system.

A critical part of the grouting system is the rubber hose used to transfer the grout from the pump to the drill hole. The transfer function of 20 m hose was measured and pass-bands were found around 11 and 80 Hz.

The work has also covered market- and literature studies concerning suitable ways to create high pressures in grout.

There are electropneumatic valves that can perform very fast closures in hydraulic conduits. One tested model is capable of nine cycles/s. With a valve like this it is possible to create negative pressure waves downstream of the valve, using the water-hammer effect. A sub-zero pressure of 2 bars was recorded. A propagating negative pressure pulse could help break down filter effects by moving the mixture backwards for a short time.

Finally this first part of the project covers a market survey regarding the possibility to improve the properties of the grout using ultrasonic homogenization. The idea is to de-agglomerate cement particles clustered, so that each particle is completely surrounded by water.

Keywords: Grouting, feedback, resonance, water-hammer, ultrasonic dispersion

INNEHÅLL

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Mål	2
2 Utvecklad och uppbyggd försöksutrustning	3
2.1 Vibrationskällor	3
2.1.1 Geofon	4
2.1.2 Motran	4
2.1.3 Piezoelektrisk källa	5
2.2 Tryckgivare PCB102B04	7
2.3 Hydrofoner	7
2.3.1 Reson TC4033 Kulhydrofon	8
2.3.2 Reson 4013 Miniaturhydrofon	8
2.4 Resonanskammare	9
2.5 Injekteringsslang	10
2.7 Impedanssimulator	12
2.8 Borrhålssimulator	13
3 Återkoppling i vattenfyllda rör	15
3.1 Återkoppling med Motran som vibrationskälla	17
3.2 Återkoppling med 118 kHz ekolod som källa	18
3.3 Återkoppling med geofon som källa	19
3.4 Slutsatser av återkopplingsförsök	20
4 Transferfunktion hos injekteringsslang	21
4.1 Försökets utförande	21
4.2 Slutsatser av försöket	24
5 Tryckslag	25
5.1 Försökuppställning	25
5.2 Resultat	27
5.3 Slutsatser av försöket	29
6 Elektriskt styrd hydraulcylinder	31
7 Homogenisering av bruk med ultraljud	39
8 Referenser	45

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Vid injekteringsarbeten i berg eftersträvar man att få in så mycket bruk som möjligt i spricksystemet så snabbt som möjligt. Den enklaste ansatsen är att höja injekteringsstrycket, men det är inte nödvändigtvis det effektivaste sättet att öka inträngningen. De två fenomen som mest påverkar inträngningen anses vara injekteringsbrukets viskositet och eventuell filtrering av bruket i trånga sektioner. Pluggflöde innebär att de centrala delarna av flödet inte har någon radiell hastighetsgradient och därmed ingen turbulens. Därigenom kan brukets tixotropa egenskaper utvecklas och bruket blir mer trögflytande.

Filtrering innebär att cementpartiklarna stannar kvar i trånga sektioner medan vattnet fortsätter genom filterkakan av cementpartiklar. Så småningom medför filtreringen att den trånga sektionen blockeras och att flödet upphör.

Injekteringsstopp kan också ses som att de ackumulerade tryckförlusterna i spricksystemet balanserar injekteringsstrycket. Detta har påvisats i (Jansson, 1999), som fann att vid experiment med injektering i ett nät av tunna, genomskinliga plaströr upphörde inträngningen samtidigt i alla delar av römnätet.

Höga statiska tryck kan ge upphov till s.k. jacking, d.v.s. att bergmassan häver sig (jack=domkraft). Detta vill man undvika.

Den grundläggande idén med dynamisk injektering är att med cykliska tryckvariationer fluidisera injekteringsbrukets partiklar genom att bryta upp statiska tryck, som kan skapa filtrering i bruket samt att eventuellt förbättra viskositeten genom de tillförda vibrationerna, som bryter ner eventuella tixotropa effekter. Dessa kan t ex uppstå genom att hydratiseringen av cementkornen börjar. De bindningar som då uppstår kan tänkas brytas sönder, eller aldrig uppstå, om bruket vibreras under injekteringen.

Försök med dynamisk injektering har tidigare utförts vid en fast frekvens om 40 Hz. Man erhöll en förbättrad penetration men observerade att det var svårt att få vibrationerna att tränga långt ut i bergvolymens spricksystem (Pusch, 2017).

Det är känt att man kan mata in mycket omfattande energimängder i ett mekaniskt system genom att tillföra energin vid systemets naturliga resonansfrekvens. Om denna frekvens inte är fast, utan varierar, kan energitillförseln enklast ske genom återkoppling, d.v.s. att energitillförseln ändrar frekvens om den naturliga resonansfrekvensen gör det. Återkopplingen kan antingen baseras på injekteringssystemets resonansfrekvenser eller på den dominerande frekvensen i den berggrund som skall injekteras. Återkoppling är det som uppstår då en mikrofon kommer för nära den högtalare den är kopplad till. Att gunga allt högre i en gunga genom väl synkroniserade kraftinsatser är ett annat exempel.

Ett annat problem vid injektering är att cementkorn kan klumpa ihop sig innan de blandas med vatten och på så sätt orsaka att flera korn omger sig med ett sammanhängande skikt av vatten i stället för att varje korn har ett omslutande vattenskikt. I denna rapport

görs en kort litteraturstudie av en metod baserad på ultraljud och kavitation. Den skulle kunna dispergera dessa korngrupperingar när blandningen med vatten redan har skett.

1.2 Syfte

Projektets syfte är att effektivisera injekteringsarbetet och förbättra kvaliteten på injekteringen genom att utsätta bruket för vibrationer inom olika frekvensområden.

1.3 Mål

Målet med den första etappen är att bygga försöksutrustning lämplig för att testa frekvensegenskaper i ett injekteringssystem uppbyggt i laboratoriet. Inledningsvis testas dessa med befintliga vibrationskällor. I den inledande etappen sker alla tester med vatten som vätska.

Dessutom studeras metoder för att alstra höga dynamiska tryck och metoder för att dispergera hopklumpade (agglomerade) cementpartiklar med högfrekventa vibrationer. Detta sker genom en litteratur- och marknadsundersökning.

2 Utvecklad och uppbyggd försöksutrustning

För de försök som redovisas i denna rapport har injekteringsbruk ersatts med vatten. Detta är möjligt eftersom alla försök i den inledande serien baseras på frekvenser och våglängder och ljudhastigheten i vatten och injekteringsbruk är densamma, nämligen 1500 m/s. Dämpningen är naturligtvis större i injekteringsbruk men det påverkar troligen inte resultaten på detta stadium. Att använda vatten som medium medför därför att man kan arbeta med lägre energinivåer hos de svängningsalstrare (aktuatorer) som undersöks. I projektets nästa etapp avses en elektrohydraulisk aktuatur användas. En sådan kan alstra mycket stora krafter/tryck styrt av en kontrollsignal, t ex en återkopplingsignal.

Försöksutrustningen omfattar i princip ett helt injekteringssystem utom blandare och injekteringspump. Eftersom vatten används som medium hämtas detta från vattenledningssystemet, som kan ge kontinuerligt flöde eller statiskt tryck. Följande komponenter ingår med hänvisning till underrubrik i kapitlet:

- Vibrationskällor (2.1)
- Tryckgivare (2.2)
- Hydrofoner (2.3)
- Resonanskammare (2.4)
- Injekteringsslang (2.5)
- Injekteringsrör (2.6)
- Spricksimulator (2.7)
- Borrhålssimulator (2.8)
- Elektropneumatiskt styrd ventil (2.9)

2.1 Vibrationskällor

Flera olika vibrationskällor inom olika frekvensområden har testats. Alla är av den typ som omvandlar en elektrisk signal till rörelse. De två principer som utnyttjats är elektrodynamik och piezoelektricitet.

De elektrodynamiska vibrationskällor som använts i dessa försök verkar på vattnet via en kolv och ett membran monterat mot vätskevolymen. Gummimembranet tätar mot vattnet och rörelsen överförs från vibrationskällan till vattnet via en kolv, genom små rörelser i membranet. Den piezoelektriska vibrationskällan monteras direkt mot vattnet.

2.1.1 Geofon

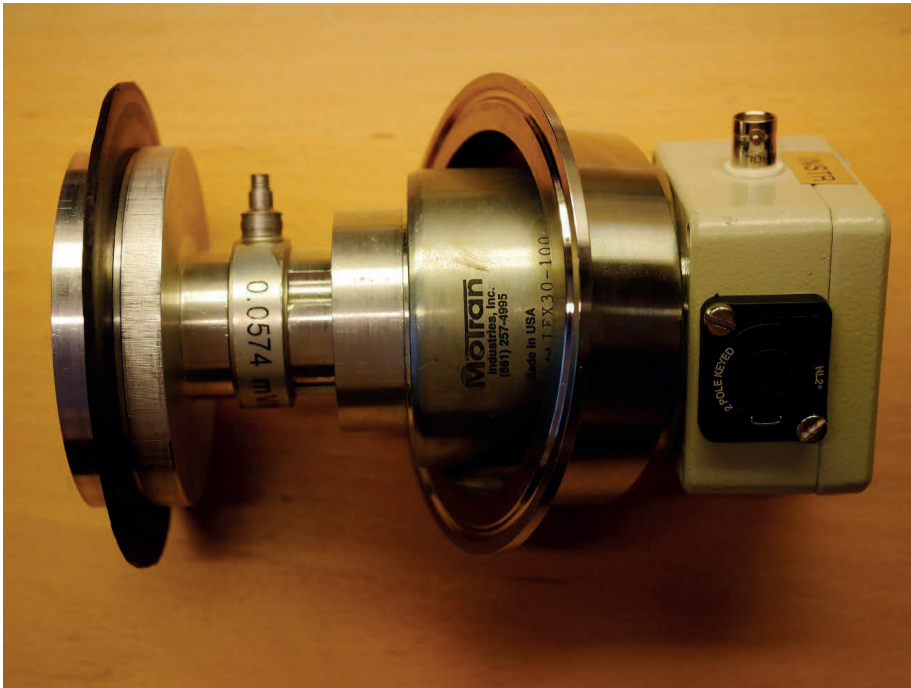
En geofon är en elektrodynamisk sensor, se Figur 1. Den används vanligen för att registrera vibrationer i samband med seismiska undersökningar, den registrerar då hastighet. Geofonen har inga synliga rörliga delar. Inuti är det en magnet som är fjäderupphängd inuti en mångvarvig spole. Geofoner kan användas som vibrationskällor om man leder en elektrisk ström genom dem. De är effektivare än piezoelektriska vibrationskällor i frekvensområde upp till c:a 3 kHz (Fröjd och Ulriksen, 2015). Geofonen kopplas till vätskevolymen på samma sätt som Motran, se Figur 2. Ett geofonelement väger endast 50 gram och innesluts i en plåt-cylinder med storleken 25 x 40 mm.



Figur 1. En geofon i entums standardkapsling försedd med en aluminiumfot som medger inkoppling av kabel samt montering på underlag med M5 skruv.

2.1.2 Motran

Motran är en elektrodynamisk vibrationskälla, se Figur 2. Den har inga synliga rörliga delar utan kraften alstras av en inre massa som rör sig i ett magnetfält alstrat av en spole *voice coil*. Motran betecknas därför som en *inertial force transducer*.



Figur 2 Motran vibrationskälla kopplad via en kraftgivare till kolv och membran. Membranet tätar mot hylsan t.h. som spänns fast mot röret med en klämma.

2.1.3 Piezoelektrisk källa

Den piezoelektriska vibrationskällan är av en typ som används i ekolod, se Figur 3. Dess resonansfrekvens är 118 kHz. Källan är inbyggd i en modifierad blindgavel som kan kopplas till det rörsystem som används för experimenten.



Figur 3. Piezoelektrisk ljudkälla 118 kHz avsedd för användning i ekolod. Anpassning till mejerirör-systemet.

2.2 Tryckgivare PCB102B04

De tryckgivare som inskaffats till projektet kan registrera tryck upp till 70 bar och har beteckningen PCB 102B04, se Figur 4 och 5. De är avsedda för att kunna mäta snabba förlopp, givarna specificeras upp till 500 kHz. Dessa tryckgivare är valda för att kunna mäta på verkliga injekteringstryck med injekteringsbruk som medium.



Figur 4. Tryckgivare använd i försöken, PCB 102B04, 70 bar.



Figur 5. Exempel på montering av en sådan tryckgivare.

2.3 Hydrofoner

Hydrofoner används för att registrera vibrationer (ljud) i vätskor. De kan inte registrera statiska tryck på det sätt en tryckgivare kan. Å andra sidan kan de registrera variationer vid högre frekvenser än de flesta tryckgivare. Två sorters hydrofoner har använts vid försöken. De har starkare utsignal än tryckgivare för höga tryck.

2.3.1 Reson TC4033 Kulhydrofon

En kulhydrofon är tillverkad för att ta upp ljud i alla riktningar. En befintlig sådan har monterats i en modifierad blindplugg som kan anslutas till det experimentella rörsystemet, se nedan Figur 6. Dessa hydrofoner har ett frekvensområde omfattande 5 Hz -70 kHz, men känsligheten sträcker sig utanför detta område, fast då vid lägre nivå. Hydrofonen används vid de inledande återkopplingsförsöken.



Figur 6. Kulhydrofon med modifierad blindplugg för anbringning mot rörsystemet.

2.3.2 Reson 4013 Miniaturhydrofon

Denna hydrofon används när utrymmet är begränsat, som t ex i klenare rördelar och kopplingar i systemet, se Figur 7. Den har ett frekvensområde från 1 Hz till 170 kHz. Fyra sådana hydrofoner finns i systemet, så att tryckvågors utbredning kan studeras i detalj.

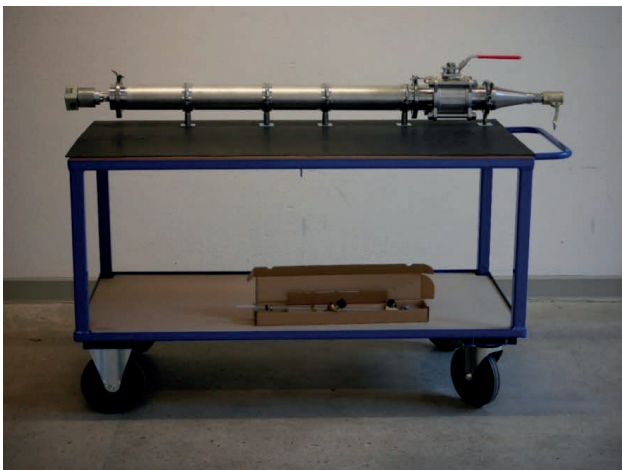


Figur 7. Reson 4013 Miniaturhydrofon, största diameter 10 mm.

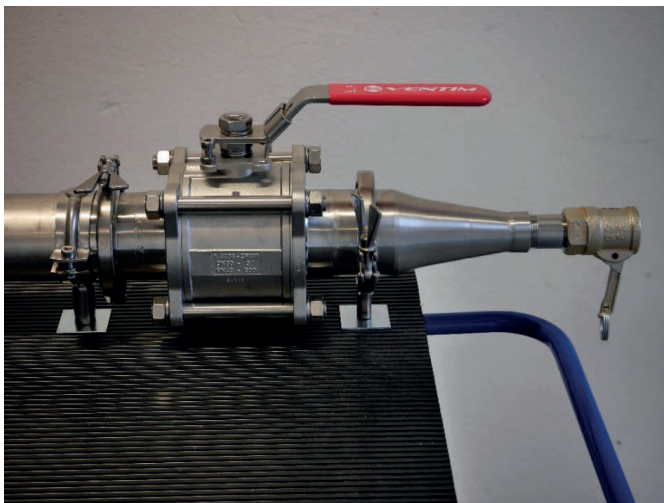
2.4 Resonanskammare

Dessa två resonanskammare är tillverkade av s.k. mejerirör i rostfritt stål, se Figur 8. De har påsvetsade flänsar som kan kopplas samman med packningar och omslutande klämmor. Rören har en diameter av 80 mm och är försedda med uttag för tryckgivare, hydrofoner och vatteninlopp. Det finns en kulventil i samma dimension, se Figur 9, U-böj och anpassning till injekterings slang. Resonanskammarna kan monteras horisontellt eller vertikalt på den vagn som tillhör försöksuppställningen.

Det finns två snarlika resonanskammare därför att man skall kunna koppla ihop dem och få en längre våglängd vid resonans.



Figur 8. Resonanskammare monterad på försöksvagn. Motran vibrationskälla monterad till vänster i bilden. Anpassning till injekterings slang till höger.



Figur 9. Kulventil för att kunna variera impedansen i slutet på resonanskammaren. Detta förmodas motsvara variationer i brukets mottryck.

2.5 Injekterings slang

Injekteringsslangen är en intressant komponent vid studier av resonanta fenomen, se Figur 10. Man kan anta att dess resonanta egenskaper är beroende av det tryck vätskan i slangen har.



Figur 10. 20 m injekterings slang upprullad på en cylinder.

2.6 Injekteringsrör

Det finns flera längder injekteringsrör om 1.0 m längd, se Figur 11. Det finns också T-rör som har till syfte att möjliggöra mätning på olika ställen längs dessa rör. Syftet är att

studera hur vågrörelser fortplantas i dessa rör. Det finns också passande kulventiler och anpassning till injekterings slang. För det specifika problemet att studera tryckslag finns det också två rör som har påsvetsade T och som är vardera 2 m långa.



Figur 11. Två ihopmonterade 1 m injekteringsrör försedda med T-kopplingar för mätändamål och kulventiler för reglering av flöde.

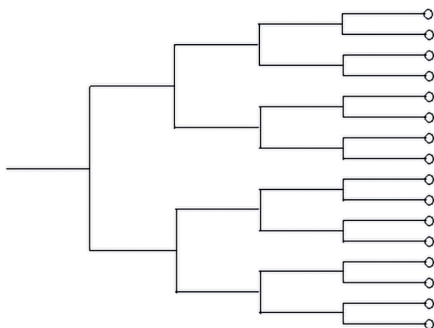
Det finns också en packer, se Figur 12, som är avsedd för mätningar i samband med borrhålssimulatorn, de 63.5 mm rostfria rör som beskrivs i avsnitt 2.8.



Figur 12. Packer. Genom att vrida på handtaget förorsakar man att gummicylindern nedtill expanderar och tätar mot borrhålets vägg.

2.7 Impedanssimulator

Utan anspråk på att fysiskt efterlikna spricksystemet i berg, men ändå ge upphov till en liknande impedanseffekt, alltså strömningsmotstånd, har en simulator tillverkats av plastslang i olika dimensioner från 12 mm till 4 mm ytterdiameter. Slangarna är hopfogade med snabbkopplingar. Det rör sig om ett binärt träd, där alltså varje slang delar sig i två mindre på det sätt som visas i Figur 13. De klenaste slangarna avslutas med strypventiler, så att man kan skapa ett mottryck i simulatoren om det skulle vara önskvärt. I varje förgrening finns uttag så att tryck kan mätas, se Figur 14.



Figur 13. Principskiss för impedanssimulator i form av ett binärt träd. Längst till vänster en plastslang med ytterdiameter 12 mm som sedan förgrenar sig enligt schemat 10, 8, 6 och 4 mm längst till höger, där de 16 klena slangarna avslutas med en strypventil.



Figur 14. Impedanssimulatorns utseende i hoprullad form. I varje förgreningspunkt kan trycket mätas.

2.8 Borrhålssimulator

Borrhålssimulatorn består av två stycken ihopkopplingsbara 12 meter långa rostfria rör med diametern 63.5 mm, vilket är nära vanligt förekommande injekteringshåls diameter, se Figur 15. Denna diameter överensstämmer också med den packer som injekteringsröret har, beskrivet under 2.6.

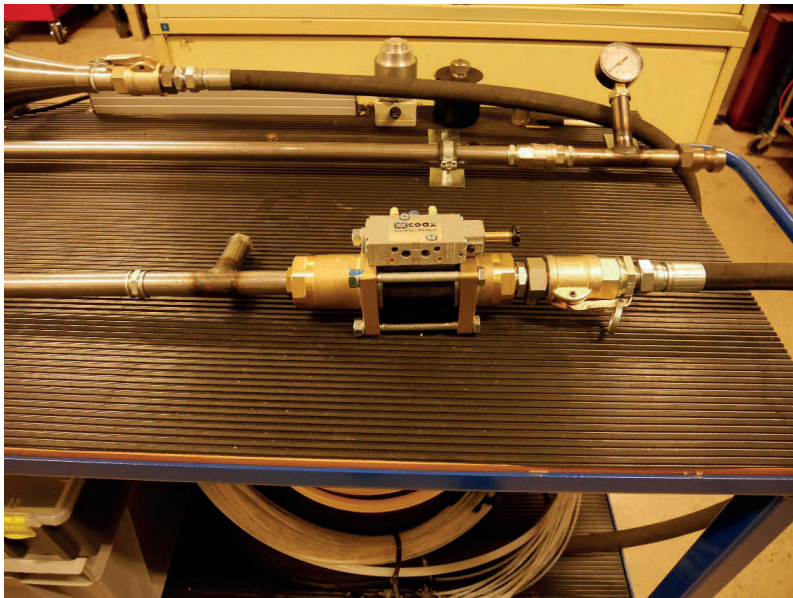
Tanken med dessa rör är att man skall kunna studera resonanta fenomen inuti rören, motsvarande de man får i ett injekteringshål. Det uppstår under resonans noder och bukar i tryckvariationerna och man kan därför misstänka att frekvenssvep kring resonans an flytta bukarne så att hela borrhålets längd utses för de dynamiska tryckvariationerna



Figur 15. Borrhålssimulator avseende resonansegenskaper. Två hopkopplingsbara rostfria rör med OD 63.5 mm, vardera med längden 6 m. I ena änden ansluts injekteringsröret med hjälp av en packer (hiterst i bild), se Figur 12.

2.9 Elektropneumatiskt styrd ventil

För att så snabbt som möjligt kunna stänga av ett vätskeflöde rekommenderar leverantörerna ventiler som är elektriskt styrda men assisterade av tryckluft, se Figur 16. Det innebär att tryckluften regleras av en elektriskt styrd ventil. Det är alltså tryckluften som står för den nödvändiga kraften. Den befintliga ventilen kan öppna och stänga, med vätskeflöde i form av vatten, nio gånger per sekund.



Figur 16. Elektropneumatiskt styrd koaxialventil med brytkapacitet nio växlingar per sekund.

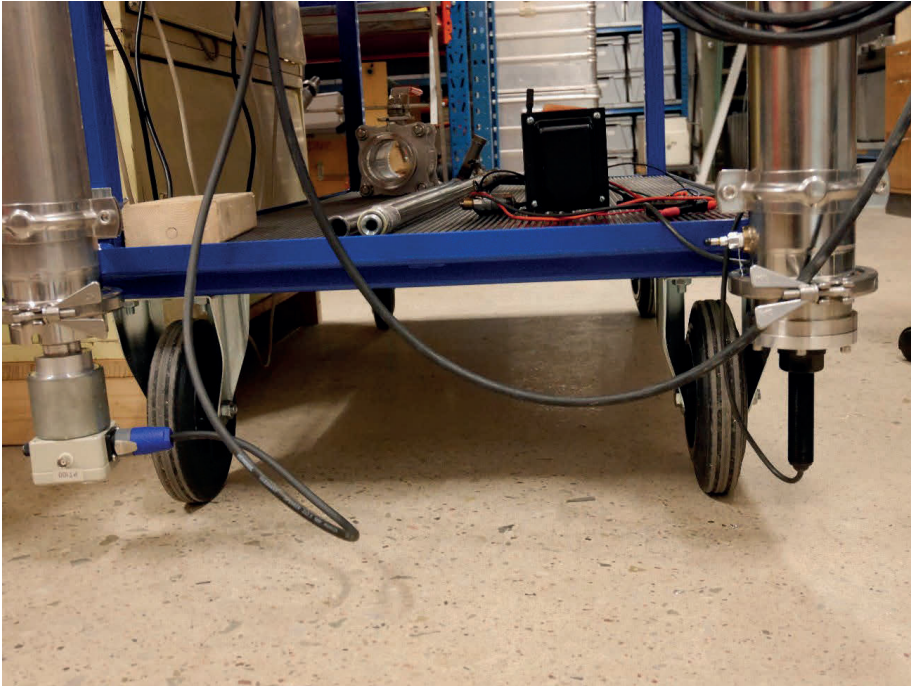
3 Återkoppling i vattenfyllda rör

Ett av projektets mål är att visa att återkopplingsprincipen fungerar också i hydrauliska system och att kunna göra mätningar på sådan återkoppling. För det syftet har de vibrationskällor som beskrivits i avsnitt 2 använts. För att uppfånga den signal som skall återkopplas har en kulhydrofon använts. Dessutom krävs diverse för- och effektförstärkare, de senare olika beroende på frekvensområde. Mätresultaten har registrerats på digitalt oscilloskop. En del testutrustning visas i Figur 17.



Figur 17. Resonanskammare monterade vertikalt på försöksvagnen. T.v. sitter Motran vibrationskälla nedtill och kulhydrofonen upptill och till höger 118 kHz ekolodkälla nedtill. Vid mätning med den senare flyttas kulhydrofonen.

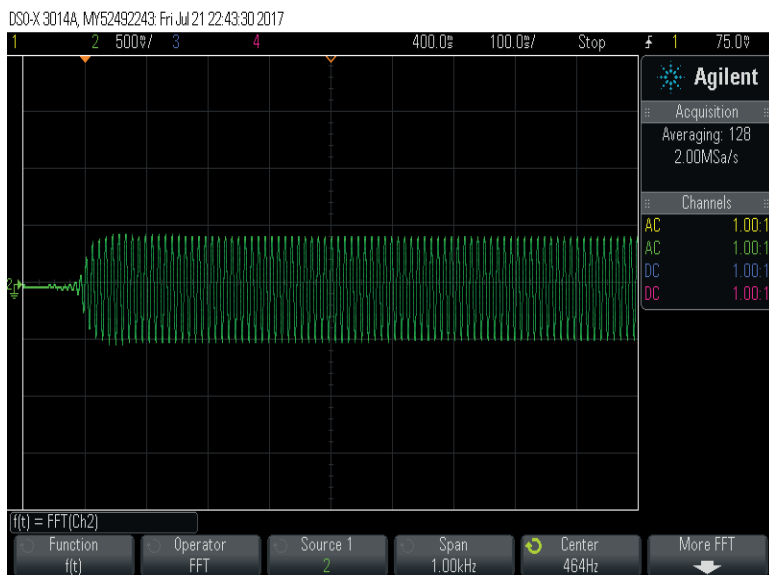
Vibrationskällornas montering i försöken visas mer i detalj i Figur 18.



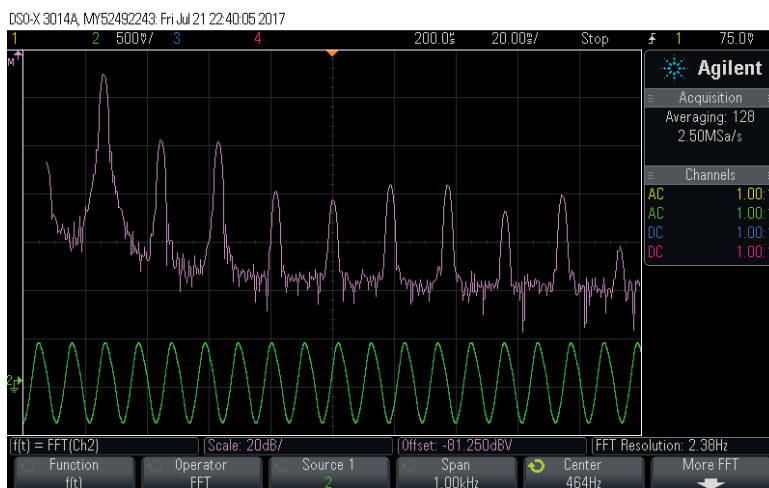
Figur 18. Närbild av vibrationskällornas placering. Dessa sitter nedtill för att i möjligaste mån undvika luftbubblor vid källan. Sådana kan minska källans effektivitet påtagligt.

Nedan följer redovisning av insvängningsförloppen för de tre olika vibrationskällorna, Figurena 19–24.

3.1 Återkoppling med Motran som vibrationskälla

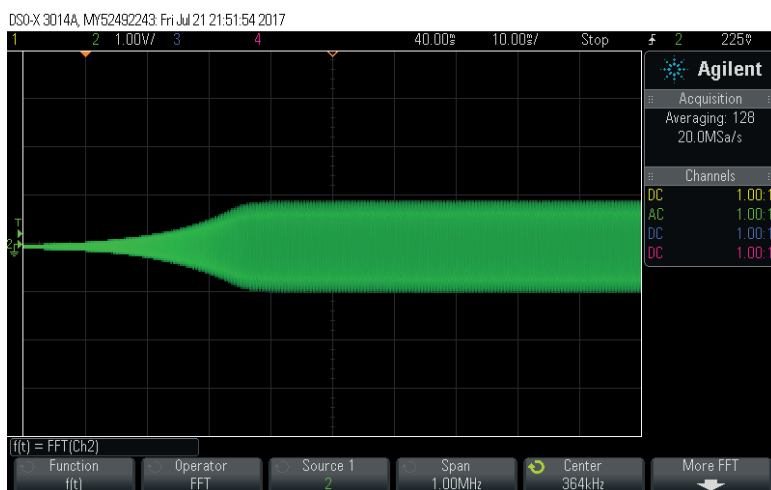


Figur 19. Naturligt insvängningsförlopp med Motran som källa, ingen signal injicerad i systemet.

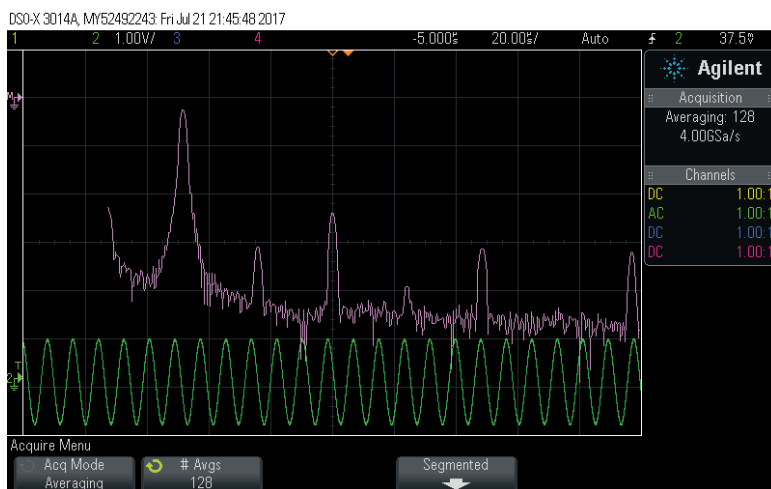


Figur 20. Spektrum vid steady-state. Den fjärde övertonen ligger vid 464 Hz och grundtonen ligger alltså vid 93 Hz.

3.2 Återkoppling med 118 kHz ekolod som källa

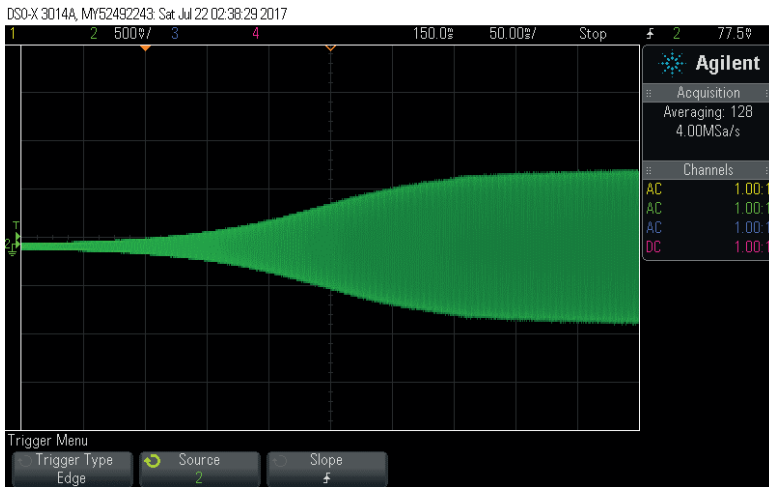


Figur 21. Naturligt insvängningsförlopp med 118 kHz som källa, ingen signal injicerad i systemet.

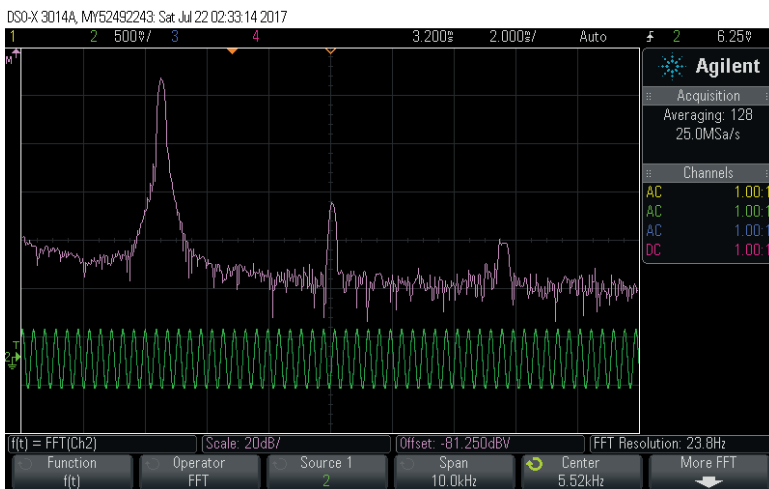


Figur 22. Spektrum vid steady-state för 118 kHz piezoelectrisk ekolodtransducer. Grundton vid 118 kHz och flera övertoner.

3.3 Återkoppling med geofon som källa



Figur 23. Naturligt insvängningsförlopp med geofon som källa, ingen signal injicerad i systemet.



Figur 24. Första övertonen vid 5520 Hz och grundtonen ligger alltså vid 2760 kHz.

3.4 Slutsatser av återkopplingsförsök

De tre sändartyperna täcker in följande frekvensområden:

-Motran 80 – 140 Hz , Figur 19-20

-Geofon 50 Hz – 6 kHz, Figur 23-24

-118 kHz transducer 80 -140 kHz, Figur 21-22

Återkopplad resonans fungerar för de tre testade vibratorerna och ger upphov till grundtoner vid 93 Hz, 2760 Hz och 118 kHz och dessutom flera övertoner.

Den återkopplade frekvensen verkar inte styras så mycket av resonanskammarens längd som av vibratorns frekvenskaraktäristik. Då frekvenserna varierar är det inte heller det rostfria rörets metalliska resonanser vi ser. Det är helt enkelt så att vibratorernas starkaste frekvenser slår igenom i återkopplingen.

Att resonansfenomenet startar av sig själv är emellertid bevis på att akustisk återkoppling fungerar också i hydraulisk miljö, vilket var syftet med försöket.

4 Transferfunktion hos injekterings slang

Injekteringsslangen är en väsentlig komponent i injekteringssystemet ur resonans-synvinkel. Därför är det av intresse att fastställa vilka frekvenser som lättast passerar genom slangens. I försöket har 20 m autentisk injekterings slang rullats ihop (Figur 25).



Figur 25. 20 m injekterings slang ihoprullad på av en upp och nedvänd brukbalja. Den gula slangens har inget med försöket att göra.

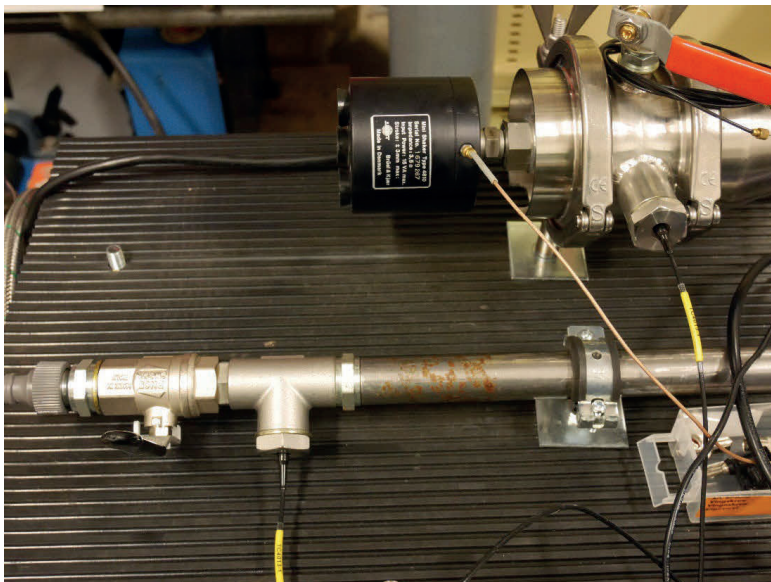
4.1 Försökets utförande

I detta försök har en annan typ av vibrationskälla använts, nämligen en vibrator från Bruel&Kjaer. Denna verkar på det tidigare beskrivna membranet/kolven och kopplas via ett koniskt mellanstycke till injekterings slangens. I slangens andra ände är ett injekteringsrör påkopplat. I systemets båda ändar är en hydrofon inkopplad, så att signalen före och efter passage av injekterings slangens kan mätas. Kvoten av dessa två signaler, frekvens för frekvens, kallas slangens transferfunktion.

Innan försöket börjar genomspolas slang och rör med vatten i syfte att avlägsna luftbubblor.

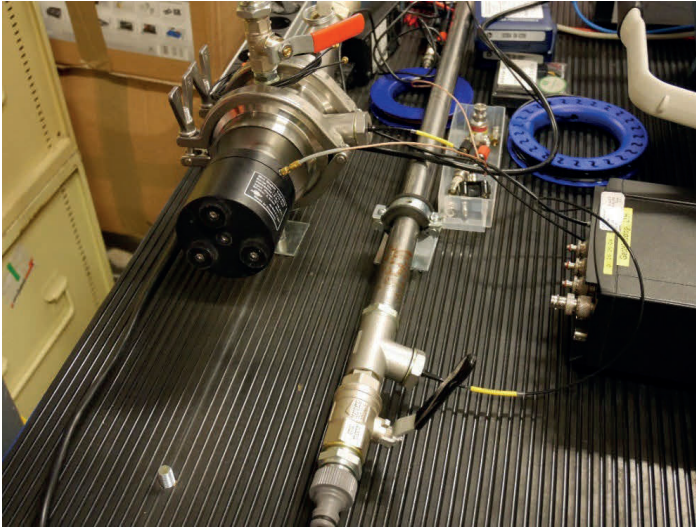
I nedanstående bilder, Figur 26 och 27, visas i pedagogiskt syfte instrumenteringen monterad på försöksvagnen. Under mätningen var emellertid injekteringsröret frikopplat från försöksvagnen i syfte att undvika överhörning från vibratorm till den mottagande hydrofongen i injekteringsröret via försöksvagnens skiva.

Transferfunktionsmätningen skedde i en sk Dynamic Signal Analyser DSA, se Figur 28. Den alstrar en frekvens som leds till en effektförstärkare och vibratorn, därefter mäter den signalstyrkan före och efter injekteringsslangen och bildar kvoten för varje utsänd frekvens.

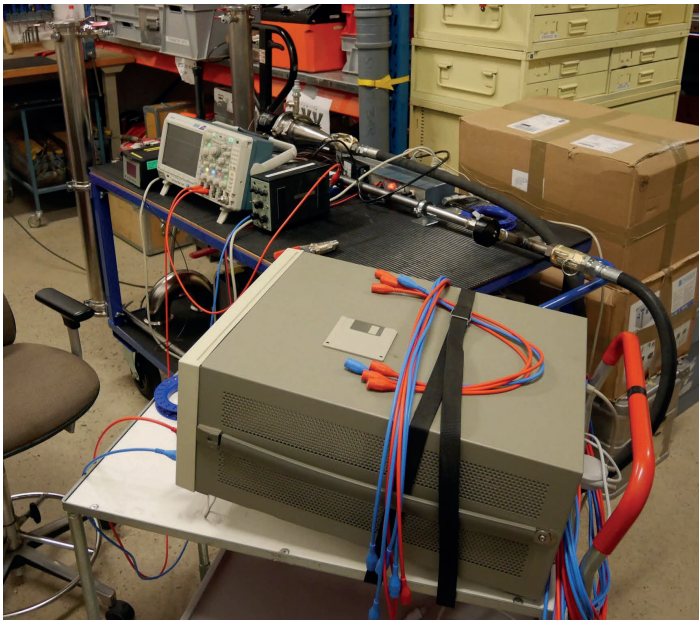


Figur 26. Bruel&Kjaer vibrator längst bort i bild. Kablarna med de gula markeringarna går till de två hydrofonerna. Närmast kameran ses det avslutande injekteringsröret.

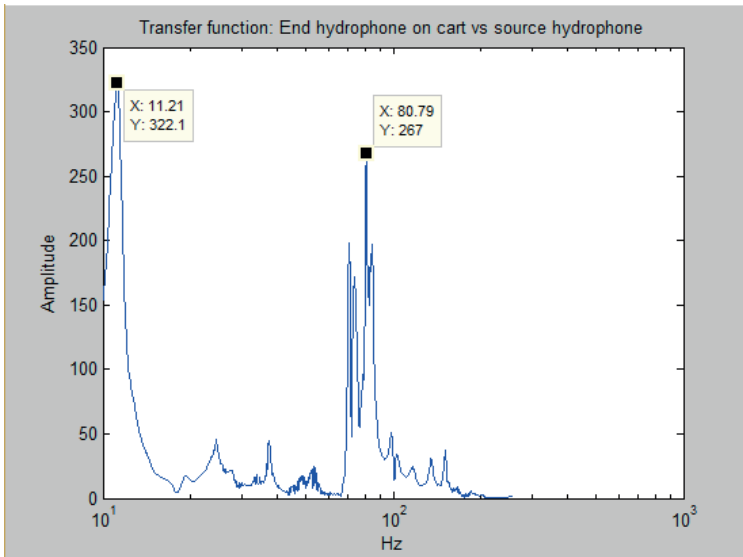
I Figur 29 visas resultatet av transferfunktionsmätningen i slangen. Det framgår att slangen släpper genom frekvenser kring 11 Hz samt i intervallet 70-90 Hz.



Figur 27. Samma uppställning som i föregående figur men med annat perspektiv.



Figur 28. Dynamic Signal Analyser, närmast i fotot, används för att bestämma transferfunktionen för injekteringsslangen.



Figur 29. Transferfunktion för injekteringsslangen. Två frekvensområden går igenom särskilt tydligt nämligen kring 11 och 80 Hz.

4.2 Slutsatser av försöket

Det är tydligt att en injekterings slang kan fungera som ett filter för frekvenser. Den aktuella slangen är särskilt genomsläpplig för frekvenser vid 11 Hz och 70-90 Hz. Däremellan finns några svagare toppar. Kring 60 Hz verkar slangen inte vilja släppa genom några vibrationer.

Slangens filterkaraktäristik påverkas sannolikt av trycket i vätskan. Dessa mätningar har utförts vid atmosfärstryck eller något däröver.

Resultatet indikerar att det kan vara en fördel att se till så att hela systemet är anpassat för samma frekvens. Detta blir naturligtvis inte möjligt i det fall man återkopplar de frekvenser som eventuellt redan finns i berggrunden.

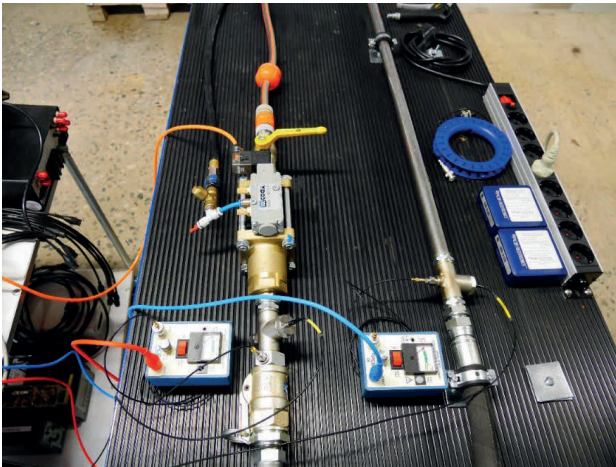
5 Tryckslag

Tryckslag är mest känt för den effekt som uppstår då ett vattenflöde hastigt stängs av och den smäll som därvid uppstår när uppströms strömmande vattenmängd tvärt bromsas. Därvid rör sig en positiv tryckstöt uppströms i vattenledningen. Men tryckslag uppstår också på den andra sidan av den ventil som stängt av vattenflödet, men där blir tryckpulsen negativ. Vattnet vill ju fortsätta flöda, men inget nytt vatten tillförs. Tryckpulsen är kort och intensiv och kan därför lätt mätas med tryckgivare eller hydrofon.

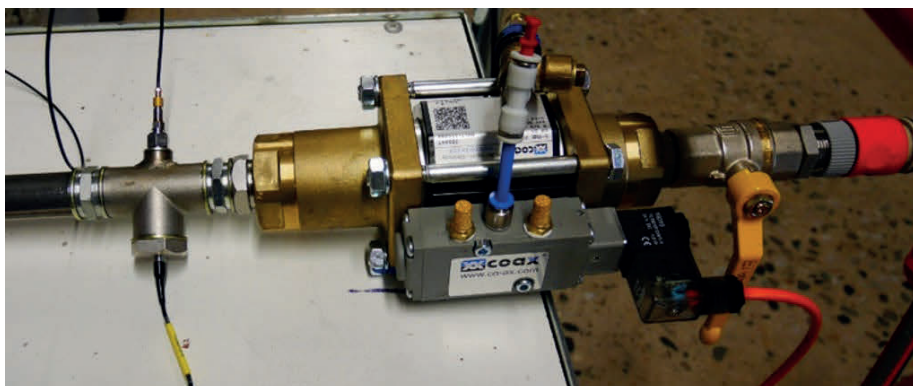
Tryckslag kan därför användas för att studera utbredningshastigheter i olika rör och ledningar. Men nedströms tryckslag skulle kanske också kunna användas för att bryta upp filterbildning vid injektering. Tanken är då att den negativa tryckpulsen skall lösa upp filtret. Den fungerar på samma sätt som omvänd gravitation skulle påverka en valvbro.

5.1 Försökuppställning

I försöken framkallas tryckslag med en elektropneumatiskt styrd koaxialventil, se Figur 30, 31 och 32. En sådan har en kolv som verkar i samma riktning som vätskeflödet. Ventilen utföra 9 cykler per sekund när vätskan är vatten. Eftersom kolven rör sig i vätskan kan man förmoda att det går något långsammare i mer trögflytande injekteringsbruk.



Figur 30. Elektropneumatiskt styrd ventil som används för att alstra tryckpulser i strömmande vatten. Den orange kabeln leder styrsignalen och den blå slangen leder tryckluft. Här sitter tryckgivare och hydrofon t.v. på olika platser, vilket försvårar exakta jämförelser.



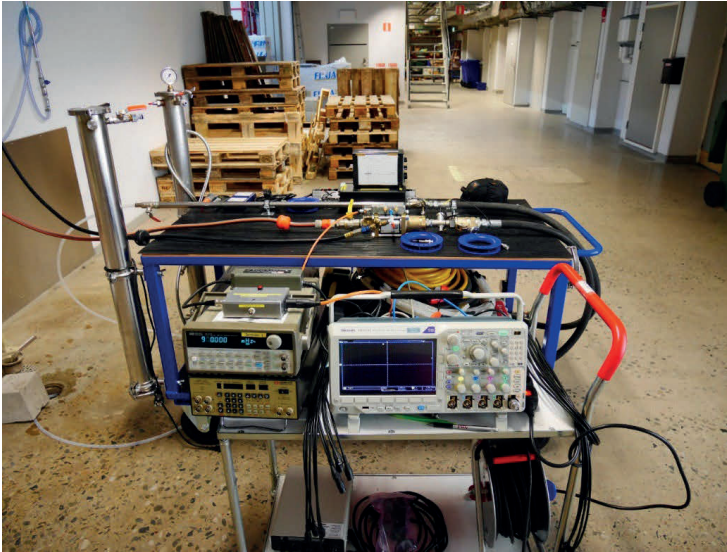
Figur 31. Närbild på elektropneumatisk ventil. Strax till vänster om ventilen sitter en mätsektion bestående av två motställda sensorer, en hydrofon och en tryckgivare. Med detta arrangemang mäter de samtidigt på tryckpulsen och man kan jämföra sensorernas signaler.

Vid försöket måste vattnet strömma genom systemet om det skall kunna uppstå tryckslag. Naturligtvis blir tryckslagseffekten starkare ju högre strömningshastigheten är.



Figur 32. 20 m injektoringsslang som tryckslaget utbreder sig i när man vill ta reda på utbredningshastigheten i denna typ av slang.

Den använda instrumenteringen i försöket presenteras i Figur 33.

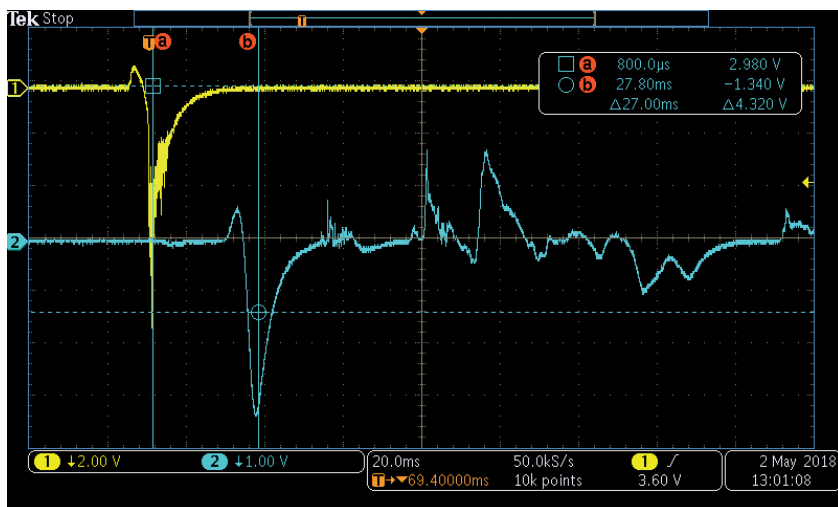


Figur 33. Uppställning för mätning. Närmast i bild t.v. vågformsgenerator inställd på 9 Hz fyrkantvåg, vilken via ett sk solid state relä styr strömmen till ventilen. T.h. det oscilloskop som används för registreringen av tryckslaget.

5.2 Resultat

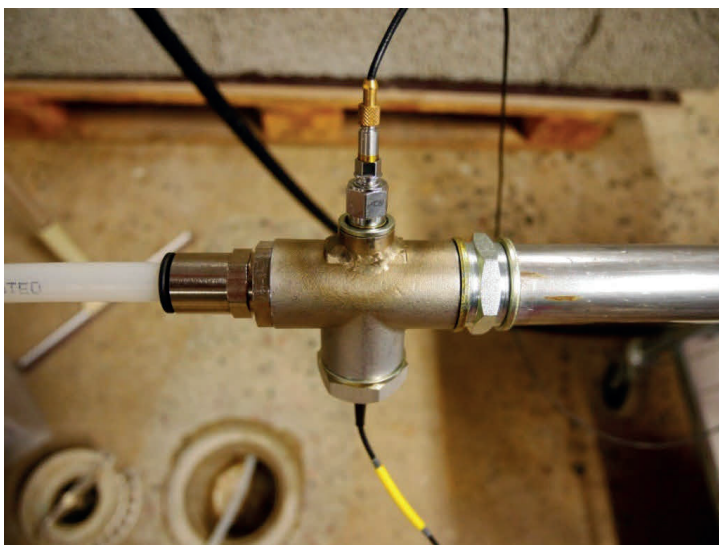
Som framgår av Figur 34 skapas ett betydande undertryck nedströms när ventilen stänger. Om den uppmätta spänningen multipliceras med tryckgivarens konstant erhålles undertrycket -2.66 bar. Det är inte tillräckligt för att skapa kavitation, vilket skulle kräva ett undertryck i storleksordningen $-20 \text{ MPa} = -200 \text{ bar}$ ($1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa}$).

Genom att bestämma tidsskillnaden mellan signalerna i de två hydrofonerna kan tryckvågens utbredning i slangen beräknas till 740 m/s .



Figur 34. Tryckgivarsignaler före (Ch1) och efter (Ch2) 20 m injekterings slang när ventilen stänger vid fullt flöde. Tidsskillnaden är 27 ms och hastigheten därmed 740 m/s. Undertrycket blir -2.66 bar.

Oscillationerna som syns i den uppåtgående delen av den gula kurvan i Figur 34 orsakas av vibrationer skapade i koaxialventilen när kolven slår till mot ventilsätet. Undertrycket varar i c:a 20 ms, dvs undertryckspulsen är $0.020 \times 740 = 14.8$ m lång.

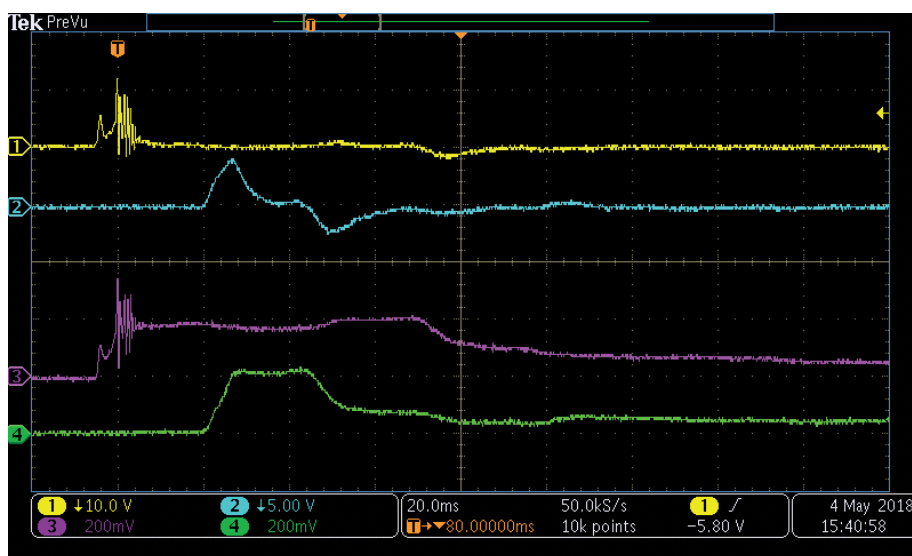


Figur 35. I denna konfiguration har injekterings slangen ersatts av ett injekteringsrör i syfte att mäta utbredningshastigheten i röret. Man erhåller hastigheten 1379 m/s.

I ovanstående figur, Figur 35, visas en mätsektion ansluten till ett stycke injekteringsrör som i andra änden är kopplat till koaxialventilen. Man kan på det viset bestämma utbredningshastigheten för tryckvågor i injekteringsröret och bestämma denna till 1379 m/s att jämföra med ljudhastigheten i en obegränsad vattenvolym, som är 1500 m/s.

Slutligen används tryckslag skapade med koaxialventilen för att jämföra karaktäristiken hos de använda tryckgivarna respektive hydrofonerna, Figur 36 nedan. Hydrofonerna indikerar inte ens kortvariga statiska tryck, medan tryckgivarna klarar det. Man kan säga att hydrofonsignalerna visar derivatan av tryckgivarsignalerna. Man kan också säga att hydrofonerna fungerar som högpasfilter.

Detta är kunskap som är av värde när man väljer vilken typ av givare som skall användas vid försök med återkoppling. Om man skall återkoppla trycksignalen i form av ett positionskommando till hydraulcylindern är det ju viktigt att cylinderns kolv inte driver mot något ändläge. Detta sker om signalen innehåller en DC-komponent (likström).



Figur 36. Hydrofonsignaler före (1) och efter (2) 20 m injekterings slang. Tryckgivarsignaler före (3) och efter (4) 20 m injekterings slang.

5.3 Slutsatser av försöket

En snabbt slutande ventil skapar betydande undertryck nedströms ventilen, undertryckets storlek beror naturligtvis av flödeshastigheten. I försöket uppmättes undertrycket till 2.66 bar. Notera att detta är ett lägre tryck än vacuum, vilket möjliggörs av att det inte är en gas mätningarna är gjorda i utan ett närmast inkompressibelt medium, vatten. Om vätskan innehåller luftbubblor reduceras sannolikt de undertryck som kan uppnås.

Tryckvågor utbreder sig med hastigheten 740 m/s i injekterings slang och med hastigheten 1380 m/s i injekteringsrör. Dessa hastigheter kan jämföras med utbredningshastigheten i en obegränsad vattenvolym, vilken är 1500 m/s.

Hydrofoner fungerar som högpasfilter och kan inte återge ens kortvariga statiska tryck. Vill man undvika DC-komponenter i en återkopplad signal skall man alltså använda hydrofonerna. Vill man veta något om statiska tryck skall man använda tryckgivarna.

6 Elektriskt styrd hydraulcylinder

Som inledningsvis nämnts finns det två skäl att vilja introducera vibrationer i injekteringsbruket, dels att påverka viskositeten, se Figur 37, dels att bryta upp de små valvbildningar som skapas av att bruket filtrerar i trånga sektioner. Dessutom kan betydligt mer högfrekventa vibrationer vara intressanta och det berörs i kapitel 7.

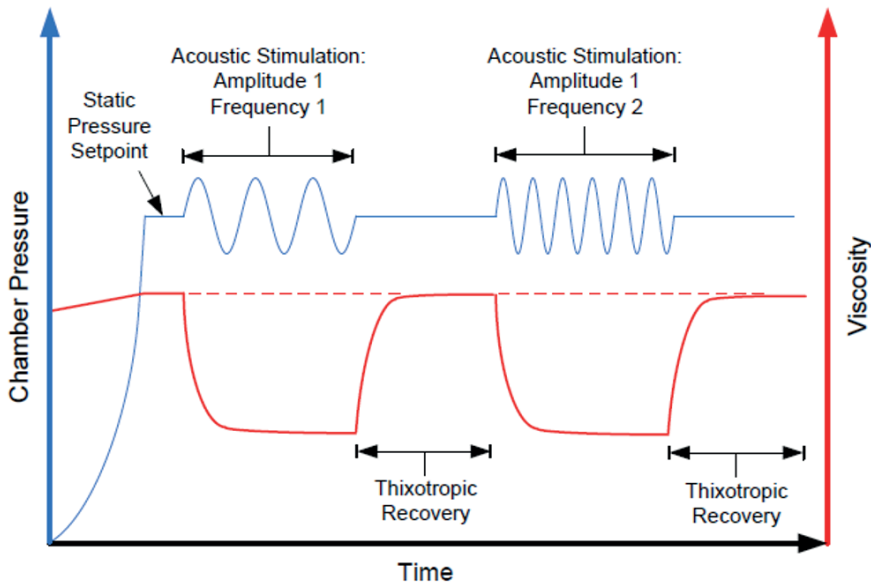


Figure 37. Illustration av hur vibrationer kan sänka viskositeten i en tixotrop vätska (Evans, 2012).

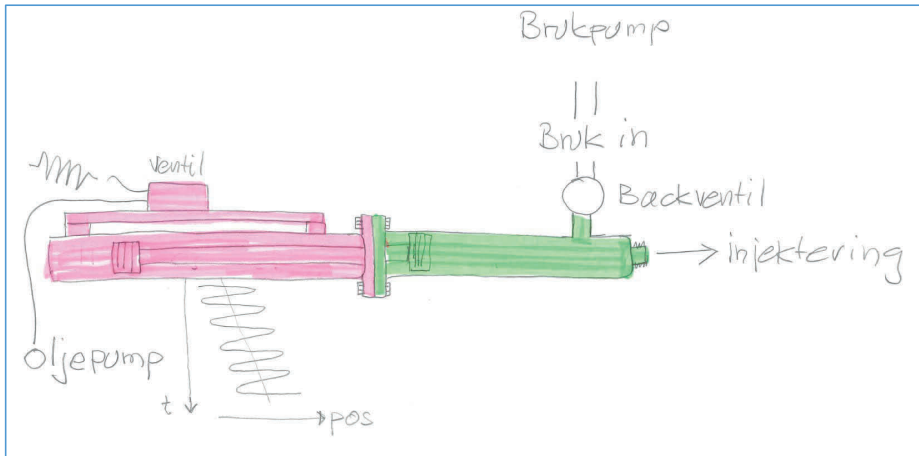
Ett sätt att i ett experimentellt system åstadkomma starka vibrationer i en vätska är att koppla en vibrationskälla till en kolv i en cylinder som innehåller vätskan. Det senare är en konstruktionsdetalj som återfinns i kolvpumpar för injekteringsbruk. Dessa skapar inte direkt vibrationer utan systemet är ofta baserat på två cylindrar som arbetar i motfas, så att ett kontinuerligt tryck skapas. I Epirocs kolvpump är cylindern dubbelverkande så att det skapas tryck i båda kolvriktningarna. Ett system av kulventiler reglerar flödena. I denna pump har hydraulcylindern endast en fram och återgående rörelse, den kan inte operera med högre frekvenser och den är inte externt styrbar elektroniskt. Man kan förutsätta att Atlas Copco/Epiroc lagt ner ett omfattande utvecklingsarbete på dessa komponenter, inte minst vad gäller materialval. Därför har cylinder, kolv och kolvstång från en sådan pump valts. I Tabell 1 redovisas kraft och frekvensområde för olika typer av vibrationskällor.

Tabell 1. Redovisning av kraft- och frekvensgenskaper för olika vibrationskällor.

Type	Force rating	Frequency range	Application	Nature of force signal	Maximum acceleration (g)
Electrodynamic shaker	2 kN	DC–5 kHz	Product testing/resonance search/fatigue testing/modal testing	Sine/random/sine sweep/shock	150

Type	Force rating	Frequency range	Application	Nature of force signal	Maximum acceleration (g)
Electrodynamic modal exciter	0.25 kN	DC–2 kHz	Modal testing	Sine/random/sweep burst	150
Mechanical direct drive exciter	0.2 kN	5–100 Hz	Fatigue testing/calibration of transducers	variable speed	70
Unbalance Mass exciters	20 kN	1–100 Hz	Modal testing of large structures/seismic testing	Sinusoidal, variable speed	10
Electrohydraulic shakers	250 kN	0.1–100 Hz	Automobile testing, human body response, seismic simulation	Sine/random	5
Piezoactuator	10s of N	0–5 kHz	Active vibration control	Sine/random/sine sweep	0.1

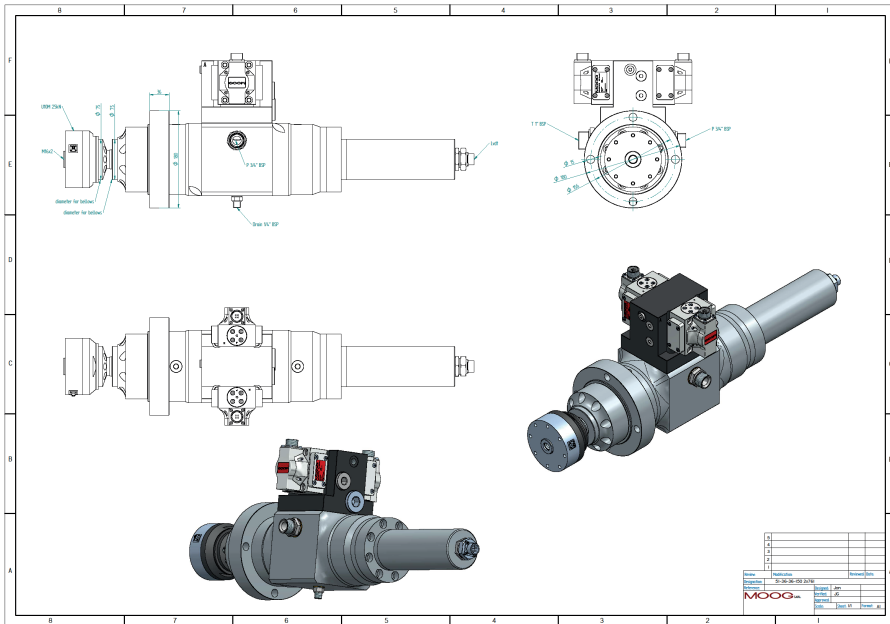
En elektrohydraulisk vibrationskälla har också den fördelen att den kan alstra ett flöde genom att kolven förflyttas, den är inte tvungen att vibrera kring ett jämviktsläge. Ett skissat system visas i Figur 38 nedan.



Figur 38. Tidig principskiss för en elektrohydraulstyrd kolvpump för injekteringsbruk. Rörelsemönster för samtidig vibration och matning visas nedtill.

Marknadsundersökningen gav vid handen att MOOG är det ledande fabrikket. Det är sådana system man hittar i laboratorierna för t ex utmattningsprov på landets tekniska högskolor. Dessa system sträcker sig emellertid inte så högt i frekvens som är önskvärt för experiment med dynamisk injektering. Efter omfattande mailväxling framstod nedan avbildad cylinder som den lämpligaste för syftet, Figur 39. Den har en slaglängd om

150 mm, som naturligtvis minskar när man går till högre frekvenser, och den kan utöva en kraft om 21 kN.



Figur 39. Elektroniskt styrd hydraulcylinder från MOOG. Den är försedd med dubbla servovalv i syfte att uppnå högre frekvens och den har inbyggda sensorer för läge (LVDT) och kraft, den senare sensorn den cylindrisk-koniska delen längst till vänster i de undre bilderna. Hydraulcylinderns slaglängd är 150 mm.

Till hydraulcylindern hör ett styrsystem, se Figur 40 nedan. Detta kan i sin tur styras digitalt från en dator eller analogt, t. ex. genom återkoppling från en hydrofon i injektionsröret. Styrsystemet loggar parametrar under försökets gång.



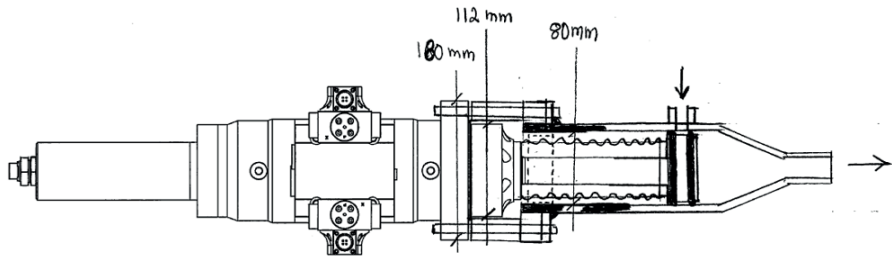
Figur 40. Kontrollenhet till hydraulcylindern. Kontrollenheten styrs av mjukvara i en dator.

Man kan tänka sig flera sätt för kolven att arbeta:

1 Batch. Då fyller man cylindern med injekteringsbruk, stänger ventilen och påbörjar rörelsen. Denna kan t.ex. vara en svängningsrörelse överlagrad en linjär rörelse. Svängningsrörelsen kan vara fyrkantvåg eller sinusformad eller någon annan matematisk kurvform man väljer.

2 Kontinuerligt flöde. Då tillförs injekteringsbruk under tryck genom en ingång till cylindern och strömmar genom den samtidigt som kolven vibrerar och överför denna vibration till injekteringsbruket.

3 Batch Tvåtakt. Då används kolven som ventil. När kolven dras tillbaka släpps en ny portion injekteringsbruk in. När kolven sedan förs framåt spärras inloppet och bruket kan utsättas för de programmerade vibrationerna. Utformningen av en möjlig sådan cylinder framgår av Figur 41 nedan.



Figur 41. Exempel på utformning av en cylinder för verkan i batch enligt tvåtaktsprincipen (3) där kolven fungerar som ventil mot inströmmande injekteringsbruk.

Hydraulcylindern som har identifierats har följande specifikation:

- Piston diameter: 51mm
- Front rod diameter: 36mm
- Rear rod diameter: 36mm
- Useful stroke: 150mm
- Operating pressure: 210 bar
- Stall load @normal pressure: 21 kN

Systemet kommer att ha en slaglängd på 150 mm och en diameter för injekteringsbruk-cylindern om 80 mm samt en maximal kraft om 21 kN. Det betyder att den volym som kan hanteras under ett fullängdsslag av hydraulcylindern är

$$V = 15.0 \times 4^2 \cdot \pi = 753 \text{ cm}^3$$

Det maximala trycket systemet kan skapa vid låga frekvenser kommer att vara

$$P = 21 \cdot 10^3 / 4^2 \cdot \pi \text{ N/cm}^2 = 418 \text{ N/cm}^2 = 4.18 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 = 4.18 \text{ MPa}$$

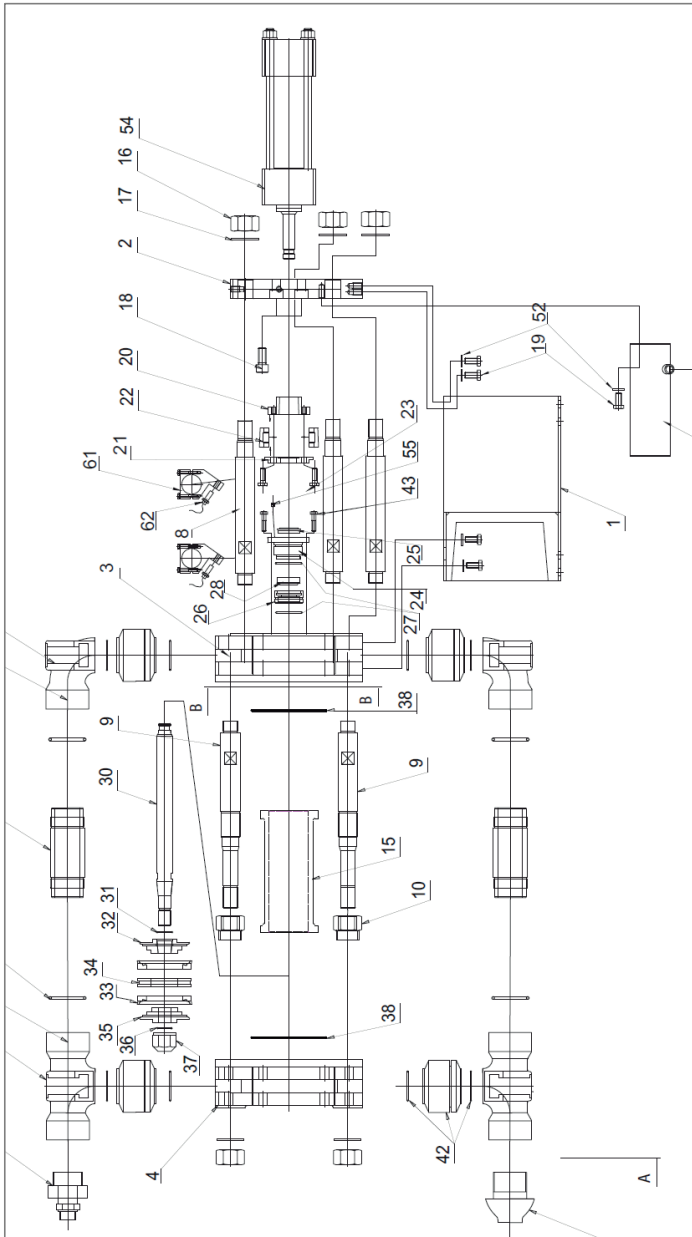
$$1 \text{ MPa} = 10 \text{ bar}$$

$$P = 41.8 \text{ bar}$$

Det maximala trycket ligger alltså i samma område som förekommande injekterings-tryck.

Det tillgängliga oljeflödet sätter gränser för produkten av slaglängd multiplicerat med hastighet. Ju snabbare cylindern skall oscillera desto kortare blir slaglängden. LTH:s hydraulpump kan leverera 90 l/min vid 210 bar.

De komponenter som ingår i Epirocs kolvpump för injekteringsbruk framgår av sprängskissen i Figur 42 och de delar som kommer att användas visas i Figur 43



Figur 42. Sprängskiss av Epiroc injektionspump PUMPAC 80. De delarna som används i projektet är cylindern (15) och kolven (30–38). Delen 42 är en backventil av kylvyp, som eventuellt också kommer att användas.



Figur 43. Kolv, kolvstång och cylinder från Epirocs injektionspump. Cylinderdiametern är 80 mm.



Figur 44. PUMPAC injektionspump. De i projektet använda delarna finns i det grova röret nere till vänster i bilden. Cylindern omges av ett batteri backventiler, vilkas uppgift är att kontrollera flödet under kolvens fram- och återgående rörelser.

För att en hydraulcylinder skall fungera måste det finnas en källa till oljetryck och flöde. LTH har ett sådant system till sina tryckpressar. Det är kapabelt att alstra ett flöde av 90 l/min vid ett tryck av 210 bar. Man kan koppla in sig till hydraulpumpen via särskilda hydraulstationer, se Figur 45. Dessa har anslutningar för ingående och utgående olja samt för olja som läckt ut ur hydraulcylindern under försökets gång. Det finns också två magnetventiler vars syfte är att möjliggöra drift vid högt eller lågt tryck, en säkerhetsåtgärd.



Figur 45. En av LTH:s hydraulstationer.

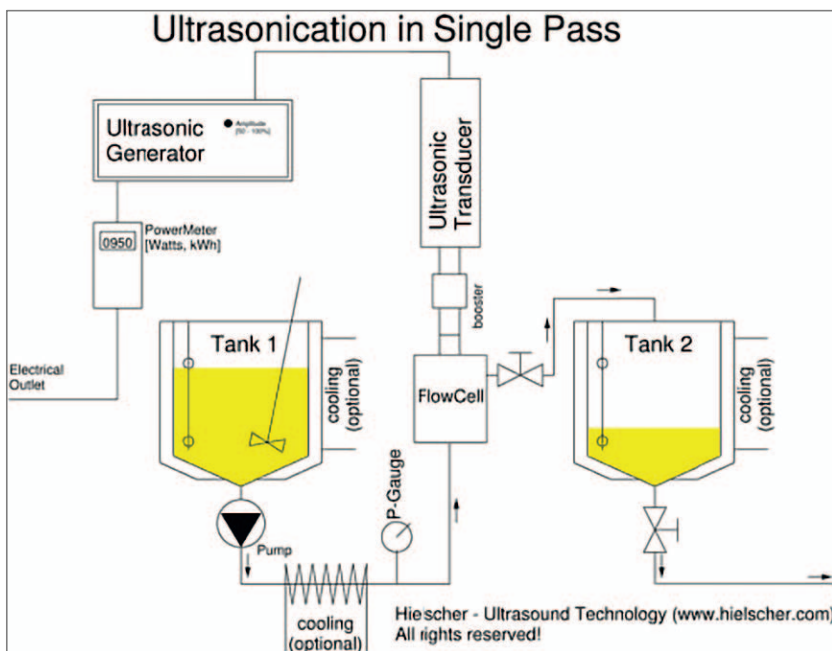
7 Homogenisering av bruk med ultraljud

Vid blandning av injekteringsbruk kan man föreställa sig att cementkorn klumpar ihop sig i samband med tillförseln av vatten och att de gemensamt omger sig med ett sammanhängande skikt av vatten. Detta leder till en sämre hydratisering av cementen och lägre hållfasthet än optimalt.

I många industrier finns det behov av att dispergera fast material i vätskor. En av de metoder som används är insonifiering med ultraljud i syfte att genom kavitation slå i sönder (dispergera) agglomerade partiklar. Figur 46 nedan visar en sådan installation.



Figur 46. Utrustning för ultraljudsdispergering. Överst till vänster ultraljuddelen, under denna själva dispergeringskammaren och nere till höger kontrollenheten till ultraljuddelen. Det aktuella systemet arbetar vid frekvensen 40 kHz.



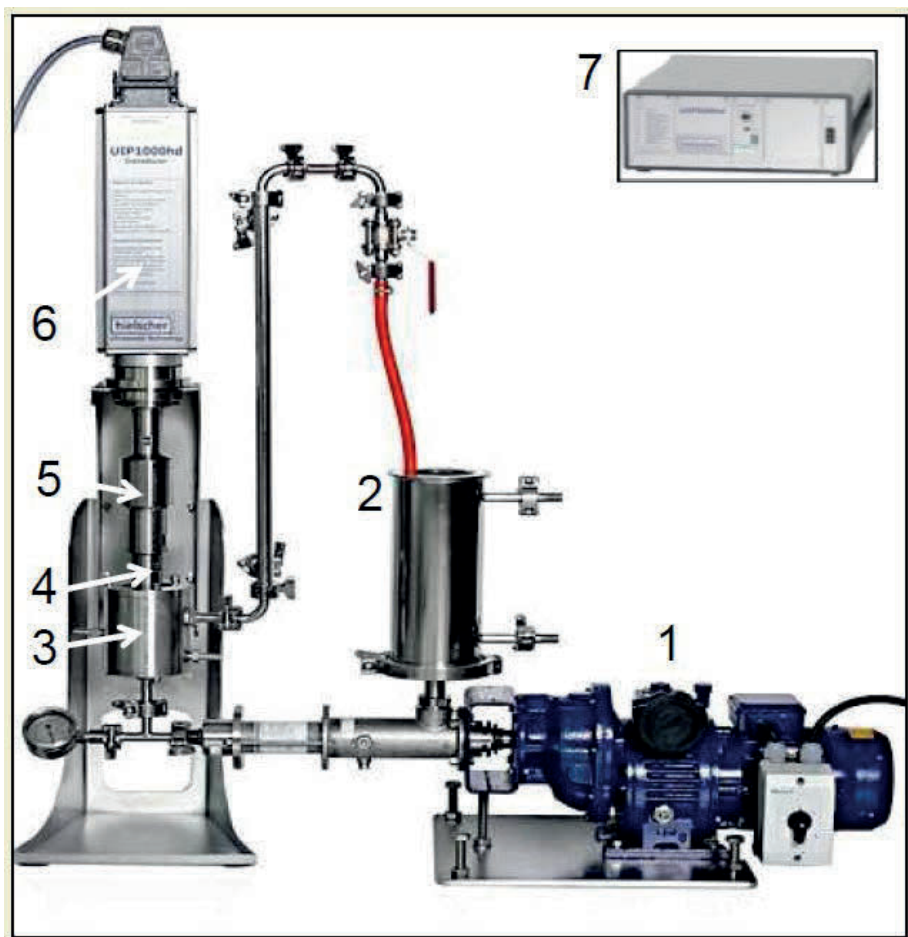
Figur 47. Principskiss av ett ultraljudsystem för dispergering baserat på genomströmningsprincipen. För stora flöden kan flera ultraljudsteg krävas.

Ovan, i Figur 47, visas ett system baserat på genomströmningsprincipen då bruket bara passerar behandlingskammaren en gång. Det går från blandningstanken via behandlingskammaren till förrådstanken. Vill man öka flödeshastigheten i ett sådant system med konstant behandlingstid lägger man till flera ultraljudsteg parallellt. Samma sak om man vill att bruket med samma flöde utsätts för ultraljud under längre tid, fast då seriellt.

Nedan i Figur 48 visas ett system baserat på recirkulationsprincipen. I ett sådant kan man välja hur många gånger man vill att bruket skall passera behandlingskammaren innan man tömmer reservoaren. Det förefaller lämpligast att basera en försöksutrustning på denna metod, främst av kostnadsskäl.

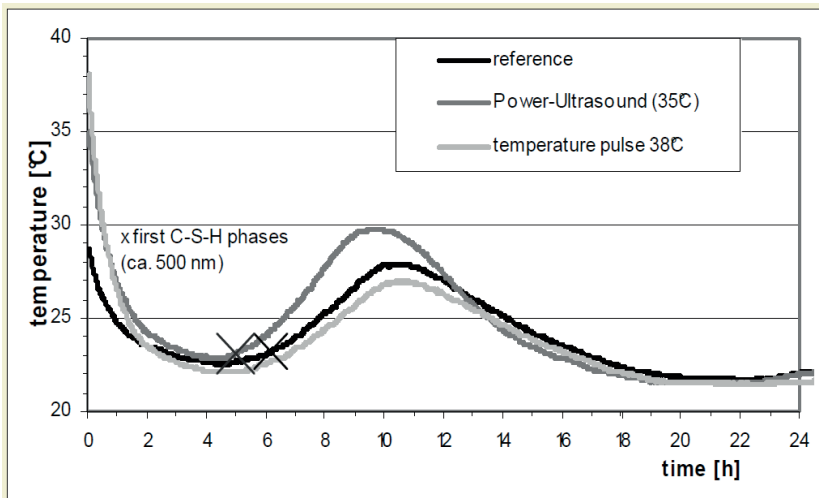
Det finns inga studier att tillgå som visar effekten av ultraljudbehandling på injektionsbruk, däremot studier av hur ultraljudbehandling påverkar betongs egenskaper.

Man får då föreställa sig att ultraljudbehandlingen sker innan ballasten blandas i bruket.

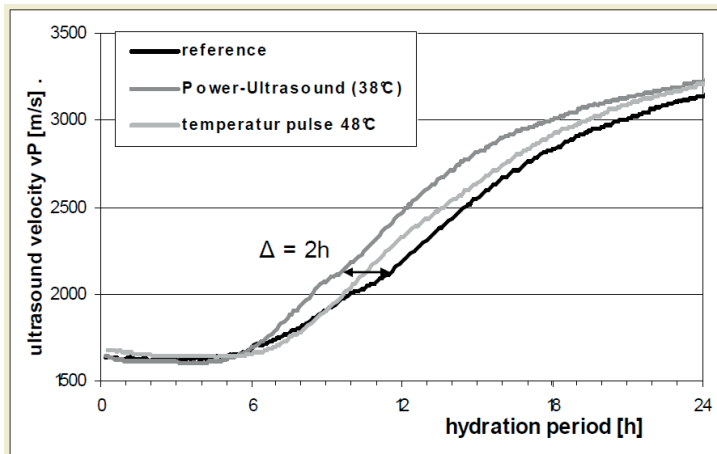


Figur 48. Fysiskt ultraljudsystem för dispergering baserat på recirkulationsprincipen.
 1) Skrupump, 2) Reservoar, 3) Behandlingskammare, 4) Sonotrode, den vibrerande delen, 5) Booster, 6) Ultraljudgenerator.

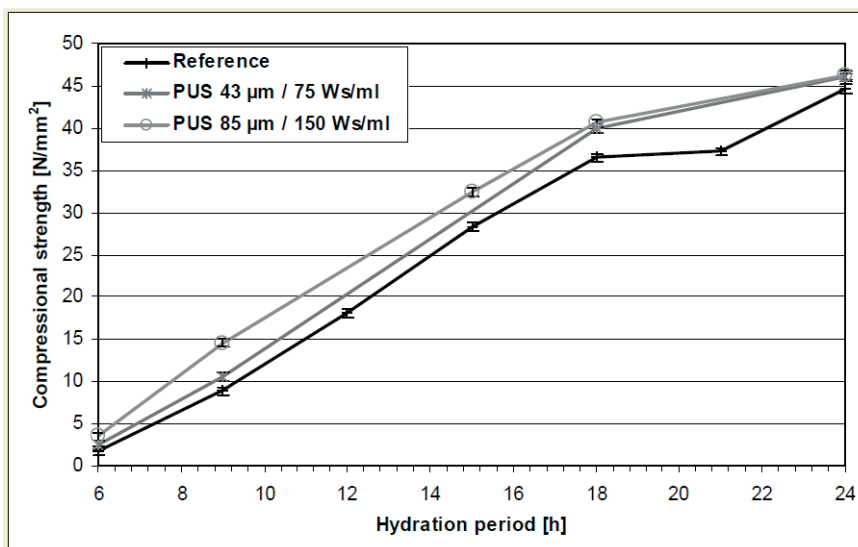
I figurerna 49–53 visas resultat från försök med ultraljudsdispergering av betong. I Figur 49 visas att temperaturutvecklingen går snabbare i ultraljudbehandlad betong. Sannolikt beror detta på att alla cementpartiklar har tillräcklig tillgång till vatten för att kunna hydratisera. I Figur 50 visas att tillväxten av ljudhastigheten är snabbare i ultraljudbehandlad betong, dvs den härdar fortare. Tryckhållfastheten ökar också något snabbare för ultraljudbehandlad betong, Figur 51. Effekten av ultraljudbehandling på konprov visas i Figur 52.



Figur 49. Temperaturutveckling som funktion av tiden för olika behandlingar (Rössler, 2009).



Figur 50. Utveckling av ljudhastigheten i betongblandningen (Rössler, 2009).



Figur 51. Jämförelse av tryckhållfasthetstillväxt för normal betong och sådan som utsatts för två olika nivåer av ultraljudbehandling (PUS Power Ultra Sound) (Hielscher).

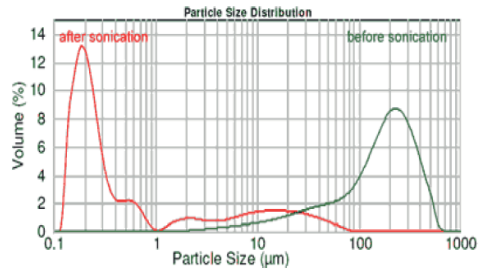
	Reference	PUS
Initial Set	5 h 15 min	3 h 45 min
Final Set	6 h 45 min	4 h 30 min
Slump	122 mm	158 mm

Figur 52. Konprovresultat för normalbetong och ultraljudbehandlad (PUS Power Ultra Sound) betong (Hielscher).

I Figur 53 nedan visas exempel på hur ultraljudbehandling kunnat reducera partikelstorleken i vätska innehållande pyrogen kisel, sk ”fumed silica”, se Figur 54 för hur man tillverkar ett sådant material.

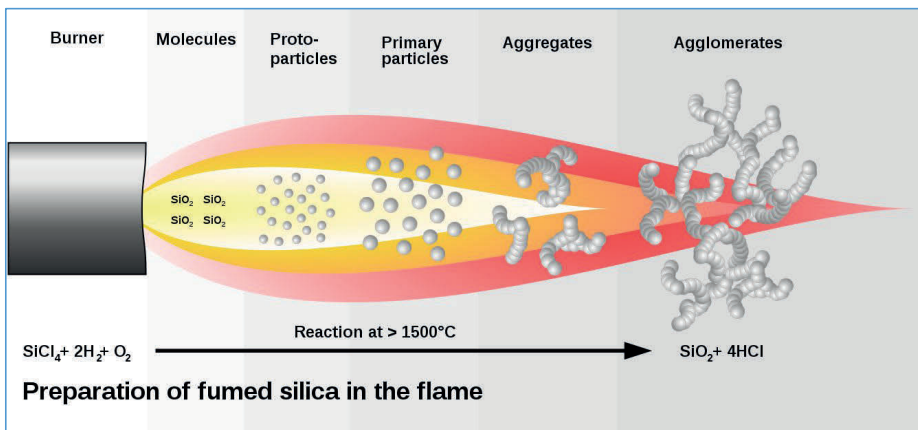
Ultrasonic Mixing Of Nanomaterials

Ultrasonication is a very effective means for the mixing, dispersing and deagglomeration. The picture below shows a typical result of ultrasonic dispersing of fumed silica in water.



Starting (green curve) at an agglomerate particle size of more than 200 micron (D50) most of the particles were reduced to less than 200 nanometers.

Figur 53. Effekt av partikeldispergering med hjälp av ultraljud (Hielscher).



Figur 54. Hur ”fumed silica” tillverkas. [https://en.wikipedia.org/wiki/Fumed_silica].
How fumed silica is created.

8 Referenser

Evans, M., D., "Development of an Experimental Apparatus for Studying the Effects of Acoustic Excitation on Viscosity", M.Sc. thesis, Univ. of Alberta, 2012.

Fröjd, P. and Ulriksen, P., "Efficiency of some voice coil transducers in lofrequency reciprocal operations", EL490 J. Acoust. Soc. Am. 137 (6), June 2015.

Hielscher, "Ultrasonic Mixing For High-Performance Concrete", Hielscher är en tillverkare av utrustning för ultraljudsdispergering. Odaterat marknadsföringsmaterial.

Figure 51: https://www.hielscher.com/cement_paste_ultrasonic_mixing.htm

Figure 53: https://www.hielscher.com/nano_cement_concrete_01.htm

Jansson, T., "Beräkningsmodeller för injektering testade i laboratorium, SveBeFo Rapport 40, 1999.

Pusch, R., Personlig kommunikation 2017.

Rössler, C., M., "Einfluss von Power-Ultraschall auf das Fliess- und Erstarrungsverhalten von Zementsuspensionen", Tagungsband der 17. Internationalen Baustofftagung ibausil, Hrsg. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, S.1-0259-1-0264, 2009.



Box 5501
SE-114 85 Stockholm

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

ISSN 1104-1773