



**Miljø- og
Fødevareministeriet**
Styrelsen for Vand- og
Naturforvaltning

Udvikling af ultra- lydsbaseret rense- værktøj til drikke- vandsboringer

Februar 2017

Tekst:

Thomas Abildgaard Jørgensen, Johan Linderberg,
Jan Preuthun, Lars Duggen og Robert Brehm

Ansvarsfraskrivelse:

Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning offentliggør rapporter inden for vandteknologi medfinansieret af Miljø- og Fødevareministeriet. Offentliggørelsen betyder, at Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning finder indholdet af væsentlig betydning for en bredere kreds. Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning deler dog ikke nødvendigvis de synspunkter, der kommer til udtryk i rapporterne.

Må citeres med kildeangivelse.

ISBN: 978-87-7120-866-5

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Summary	7
1. Indledning	8
2. Problemstilling og formål	9
2.1 Problemstilling	9
2.2 Formål	10
3. Udvikling af ny lyd giver	11
3.1 Proces fra ide til prototype	11
3.1.1 Stavblænder	12
3.1.2 Lille model, udgave 1	12
3.1.3 Lille sirene model, udgave 2	14
3.1.4 Stor sirene model	15
3.2 Virkning af ultralyds behandling af bentonit i boringer	18
3.3 Test 1: Sirene 3 og bentonit (visuel inspektion)	18
3.3.1 Fremgangsmetode	18
3.3.2 Testopstilling	19
3.3.3 Testresultat	19
3.4 Test 2: Stor sirene og bentonit, vejeforsøg	20
3.4.1 Fremgangsmåde	20
3.4.2 Blandingsforhold i test prøverne	20
3.4.3 Resultat	20
3.5 Test 3: Stor sirene og bentonit (vejning)	21
3.5.1 Fremgangsmåde.	21
3.5.2 Blandingsforhold i test prøverne	22
3.5.3 Resultat	22
3.6 Konklusion af ultralyds behandling af prøver med okker eller bentonit	22
4. Frysning som metode	23
4.1 Frysning som metode	23
4.1.1 Forsøg med okker og frys	23
4.1.2 Resultat	23
4.2 Matematisk model for frysning	23
4.2.1 Indledende beregninger til frysefront	23
4.2.2 Udvidet model for frysefront	24
4.3 Fryseinducerede spændinger	27
4.4 Laboratorieforsøg	30
4.4.1 Opstilling	30
4.4.2 Resultat	31
4.5 Sammenligning mellem teori og eksperimenter	32
4.5.1 Beregningsværktøj	32

4.5.2	Opsamling på Laboratorieforsøg og Simuleringer	34
4.6	Stor skala fryseudstyr	34
4.6.1	Praktiske fordele og ulemper ved frysemedier	36
4.6.2	Opsamling på laboratorieforsøg og simuleringer	36
4.7	Felt forsøg med frysning	36
4.8	Boring, DGU nr.: 146.437	37
4.9	Boring, DGU nr.: 206.1805	38
4.10	Konklusion af oprensning ved hjælp af frysning af boringer	38
5.	Kombination af frysning af ultralyd	40
5.1	Princip for kombineret løsning	40
5.2	Test forsøg med frysning og ultralyd i Odense	40
5.3	Resultater med frysning og ultralyd	41
6.	Ultralyd med variabel frekvens og intensitet	42
6.1	Undersøgelse af ultralydsondes kavitationseffekt som funktion af statisk trykpåvirkning	42
6.1.1	Tryktanktest	42
6.1.2	Resultat af tryktanktest	43
6.1.3	Konklusion af tanktest	44
6.2	Feltforsøg med variabel frekvens og intensitet	44
6.3	Resultater med variabel frekvens og intensitet	46
7.	Konklusion	47
8.	Litteratur	48

Forord

Denne rapport er udarbejdet på baggrund af projektet MUDP-projekt udvikling af ultralydsbaseret renserværktøj til drikkevandsboringer, der er gennemført med tilskud fra Miljø- og Fødevareministeriet , i perioden november 2014 til december 2016.

Projektgruppen har bestået af:

Thomas Abildgaard Jørgensen, VandCenter Syd A/S

Johan Linderberg, VandCenter Syd A/S

Jan Preuthun, Kjøl & Co Aps.

Lars Duggen, Syddansk Universitet

Robert Brehm, Syddansk Universitet

I følgegruppen har deltaget:

Tina Pedersen, SVANA

Thomas Abildgaard Jørgensen, VandCenter Syd A/S

Jan Preuthun, Kjøl & Co Aps.

Robert Brehm, Syddansk Universitet

Sammenfatning

Som opfølgning på et tidligere projekt omhandlende ultralyds rensning af drikkevandsboringer, er der i dette projekt arbejdet videre med at finde en metode, som er både mere miljøvenlig og økonomisk for rensning af boringer. Rapporten dokumenterer vores resultater, og hvordan der i projektforsøget er afprøvet flere strategier.

Den første strategi er en direkte forlængelse af tidligere arbejde, hvor ideen er at bruge ultralyd til at generere mikrokavitationer i boringens filtergrus. For at dette kan ske, er en meget høj ultralydintensitet i filtergruset påkrævet. Den første af de to fremgangsmåder, vi har undersøgt, er brugen af en Vandsirene, i stedet for en piezoelektrisk aktuator, som der almindeligvis anvendes ved andre anvendelser af ultralydsrensning. Sirenen er baseret på princippet om trykstød og det er velkendt, at der med en sirene kan genereres høje akustiske lydtrykniveauer. Vi har bygget flere sirene prototyper og testet dem under laboratorieforhold, hvor forhold i en virkelig boring er efterlignet, for at afklare deres virkning på de almindelige tilklogningerstyper, som okker og bentonit. Det viste sig, at sirenerne var i stand til at generere høje lydtryk, men ikke påvirkede okker eller bentonit prøver i en tilfredsstillende grad. Der blev udvasket mindre end 15% af bentonit tilklogninger fra prøverne, og endnu mindre for okker. Den anden ultralyds fremgangsmåde var, at anvende en piezoelektrisk transducer, men øge og forbedre koblingen til PVC-rør fysisk. I stedet for at anvende hydraulik eller andre mekaniske kraftkomponenter er det forsøgt at fryse vandet omkring aktuatoren, således at der dannes en fast forbindelse. Vi har testet dette princip under laboratorie forhold, og det viste, at lydtryksniveauet i filtergruset steg markant. På grund af tidspres, er der ikke foretaget fuld skala eksperimenter.

Den anden fremgangsmåde blev affødt af diskussionen om eventuelt at fryse dele af boringen i forbindelse med ultralyd. Det er fra andre sammenhænge ikke ukendt, at frysning kan have en rensende effekt. I den indledende fase, blev et simpelt forsøg gennemført, hvor okker blev frosset i en husholdnings fryser. Det viste sig, at frysningen havde en indflydelse på okker og at det smuldrede efter optøningen. Derfor blev det undersøgt at fryse en større radius omkring et filterør og efterfølgende og pumpe vand igennem efter optøning. Ved anvendelse af et fryseelement i en boring kan der skabes et hulrum, hvor en ultralydssonde kunne anvendes, så der også kan gøres brug af resonante fænomener. Et stort fryseelement er udviklet og bygget, og blev anvendt til at fryse en tilstoppet boring. Det viste sig, at indfrysningsprocessen tog lidt længere tid end forventet - 29 dage - og at indfrysningens effekt på boringens ydelse var temmelig ringe, svarende til en forbedring af produktiviteten med mindre end 10%. Denne metode kan resultatmæssigt anvendes i kombination med andre værktøjer, men er helt klart upraktisk på grund af den lange indfrysningstid. Alternativer kunne være tilsætningen af afkølede gas, som ville ændre varmeoverføringsmekanismen fra ledende til konvektiv. Dette kunne også bidrage til at skabe små vand hulrum, som ville øge spændingerne på grund af indfrysningsprocessen.

I de sidste faser af projektet er der etableret kontakt til en tredjepart udvikler af ultralyds rengøringsenheder. I samarbejde med dette firma er der benyttet deres regulerbare høj effekt aktuator til at danne kavitation i to virkelige boringer, og efterfølgende er renseeffekten vurderet. Det viste sig, at vi kunne få en stigning på 20% i produktivitet i de to testede boringer, hvilket er noget højere end de tidligere forsøg, men stadig ikke tilfredsstillende i forhold til den påkrævede indsats.

Baseret på eksperimenter og teoretiske overvejelser, kommer vi til den konklusion, at de traditionelle rensemetoder baseret på kemikalier og børstning er økonomisk mest fordelagtige.

Summary

Following up on the research of a previous project on ultrasonic well cleaning, this report documents our findings with respect to two major approaches for more environmental and economical well cleaning.

The first approach is a direct extension to previous work, where the idea is to use ultrasonics to generate microcavitations in the well's gravel filter. For these to occur, a very high ultrasonic intensity in the gravel filter is required. The first of the two approaches we have investigated is the use of an underwater siren instead of a common piezoelectric actuator. The siren is based on the water hammer principle and is well known to generate high acoustic power levels. We have built multiple siren prototypes and tested them in a laboratory setup emulating a real well in order to determine their effect on the common well clogging agents ochre and bentonite. It turned out that the sirens were able to generate high sound pressure levels, but not affecting the Ochre or Bentonite samples to a satisfying degree, removing less than 15% of the bentonite pollutant in the samples, and even less for ochre. The second ultrasonic approach was to use a piezoelectric transducer, but increasing the coupling to and through the PVC pipe mechanically. Instead of employing hydraulics or other mechanical force components, we have frozen the water around the actuator such that a solid connection is generated. We have tested this principle in a lab setup, and it showed that the sound pressure level in the gravel has increased significantly. Due to final time constraints, no full scale cleaning experiment has been made.

The second approach was spawned by the discussion about possibly freezing parts of the well. In the preliminary phase, a small scale experiment has been made, where ochre was frozen in a household freezer. It turned out that the ochre has been directly affected by the freezing, making it crumble after the thawing process. Hence, we have investigated the possibility of freezing the formation up to a certain radius and pump water through after thawing. In addition, this could create a cavity for possibly applying ultrasound as well, so one can make use of resonant phenomena. A large freezing probe has been developed and built, and was used to freeze a clogged well. It turned out that the freezing process took somewhat longer than expected – 29 days – and that the freezing effect on the well production was rather weak, being a 10% improvement in productivity; hence this method might work in combination with other tools, but is clearly impractical due to the time constraints. Alternatives here could be the addition of free cooling gas which would change the heat transfer mechanism from conductive to convective. This could also help generate small water cavities which would increase the stress due to the freezing process.

In the final stages of the project we have established contact to a third party developer of ultrasonic cleaning devices. We have in collaboration used their high power actuator to determine cavitation effect in two real wells, and subsequently evaluated their well cleaning effect. It turned out that we could get a 20% increase in well productivity in the two tested wells, which is somewhat higher than the previous versions, but still not satisfactory compared to the required effort.

Based on the research work – both experimental and theoretical we arrive at the conclusion that the traditional well cleaning methods based on chemicals are cost/benefit wise superior to the mechanical/thermal ones.

1. Indledning

I Danmark er der ca. 7.500 aktive vandværksboringer, som stort set alle på et tidspunkt skal regenereres. Nogle boringer skal renses måske hvert 5. -10. år, andre så ofte som hvert 2.-3. år. Ud over vandforsyningsboringer kan der være et stort behov for at rense boringer som foretager afværge eller grundvandssænkninger ved større byggeanlæg, som f.eks. metrobyggeriet. Der etableres også et stigende antal af termiske boringer, (jordvarmeboringer), med et tilsvarende regenereringsbehov.

I udlandet bruges store grundvandssænkninger omkring store råstofgrave, brunkulsminer (åbne grave) hvor der pumpes enorme mængder grundvand op med dertilhørende udfældningsproblemer som mindsker effektiviteten af boringerne med store forøgelse i energiforbruget til følge.

I dag anvendes hovedsageligt mekaniske og kemiske metoder til regenerering af boringer. Dels opnås der ikke altid en tilstrækkelig effekt, men det er også dyrt og tidskrævende og arbejdet med kemikalier har uheldige sideeffekter både i forhold til omgivende miljø og arbejdsmiljø. Der er derfor stor interesse for at finde alternativer til disse metoder, dette både i Danmark men også internationalt.

Nærværende projekt er baseret på de undersøgelser og erfaringer samt resultater fra et VTU finansieret projekt i (2011-2014) hvor VandcenterSyd afprøvede ultralydsrensning, både i laboratorieforsøg, modellforsøg samt i en rigtig boring. Dette arbejde blev støttet af VTU-Fonden i projekt nr. 7300, WCU, Water Well Cleaning Unit (2011-2014), Regenering af boringer med highpower ultralyd.

En af de vigtige konklusioner fra projektet 2011-14 var vigtigheden af at få mere effekt ud i formationen. Det betyder konkret at effekten skal øges i både udstyret, men også minimere effekttabet ved de mange faseovergange: fra lydgiver til vand, fra vand til PVC, fra PVC til jord og fra jord til belægninger.

Et af fokusområderne i nærværende projekt har været, at finde metoder til at overføre så meget effekt til jorden omkring boringer uden det store effekttab.

Forskellige ideer til at overvinde dette effekttab bliver gennemgået i projektet støttet af forskellige laboratorie forsøg samt feltforsøg. Kendetegnet for projektet har været en praktisk og iterativ proces, hvor ideer er afprøvet i laboratorium og i felten. Projektet har derfor også udviklet sig gennem forløbet og forfulgt nye muligheder.

Tilskyndelsen har været, at et anvendeligt alternativ til de nuværende regenereringsmetoder vil have et stort marked både i Danmark og i udlandet.

2. Problemstilling og formål

2.1 Problemstilling

Ved drift af borerer vil der ofte over tid udfældes okker og manganaflejringer i nærområdet uden om filteret og i boringens gruskastning samt indvendigt i boringen. Dette nedsætter boringens specifikke ydelse med store energitab til følge. For at rense en boring bruger man i dag ofte mekanisk rensning i form af børster og pumpning og/eller kemikalier.



Figur 2.1.1. Okker tilklogget pumpe

Figur 2.1.2. Okkerudfældning i filtersat boring

Den mekaniske rensning foregår med børster, som desværre ikke har adgang til gruskastningen og selve formationen. Kemikalierne kan derimod trænge ud i formationen gennem boringens filterkonstruktion og derved opnå kontakt til de belægninger som sidder ude i gruskastningen og i det vandførende lag i formationen. En kemisk rensning kan fjerne en del af disse belægninger, men håndteringen af det slam som dannes, samt de brugte kemikalier er en udfordring både miljømæssigt og arbejdsmiljømæssigt.

Ultralyd anvendes i dag i industrien til forskellige rensformål i en bred vifte af virksomhedstyper, men det er hidtil ikke rigtigt blevet brugt i forbindelse med regenerering af borerer.

VandcenterSyd har i et tidligere projekt i (2011-2014) afprøvet ultralydsrensning, både i laboratorieforsøg, modelforsøg samt i en rigtig boring. Dette arbejde blev støttet af VTU-Fonden i projekt nr. 7300, WCU, Water Well Cleaning Unit (2011-2014), Regenering af borerer med highpower ultralyd.

Ideen bag og metoderne i anvendelsen er på det teoretiske plan rigtigt fornuftige og en yderligere udvikling af værktøjet har store perspektiver, både som nyhedsværdi samt nytteværdi. Vi betragtede det stadig som et vigtigt potentiale i både effektivisering af rensprocesserne samt som et eksportpotentiale /markedspotentiale i vandbranchen og i andre brancher hvor der indvindes vand f.eks. råstofbranchen/termisk energi samt køleformål.

Afrapportering for projekt nr. 7300, støttet af VTU-Fonden blev publiceret 19-11-2014.

I løbet af WCU-projektet kom følgende resultater frem.

- Udenlandske, primært tyske forsøg med ultralydsrensning af borerer, har ikke været overbevisende. Ref.: (Water Well Rehabilitation and reconstruction, Georg Houben and Christoph Treskatis, 2007 on McGraw Hill). Konklusi-

onen på manglende renseseffekt skyldtes utilstrækkelig effektafgivelse eller utilstrækkelig teknisk konstruktion med store effekttab til følge.

- VCS foretog en teoretisk og praktisk, proof-of-concept undersøgelse i ovennævnte projekt. Forsøgssopstillingen omfattede en overjordisk modelboring og ultralydsregenereringen her viste positive resultater. Udstyret som blev anvendt til disse forsøg var ikke specifikt beregnet til anvendelse i borer, men til brug i rensekar i industriprocesser.
- Matematiske modelberegninger viste at effekten af ultralydsrensning afhænger meget af materialevalg og fysiske forhold. Det viste sig, at der var en væsentlig effekttab (en faktor 8) om lydgiveren var frit ophængt i boreren eller om den havde solid fysisk kontakt til boreringsvæggen.

Konklusionen fra dette tidlige projekt viste at der skulle udvikles en meget kraftig ultralydssonde som samtidig kunne have en god fysisk kontakt til boreringsvæggen og som kan afgive en høj effekt ($> 2000 \text{ W}$)

En afsøgning af markedet viste at der ikke findes nogen konstruktioner som opfylder disse krav.

Der findes flere kraftige generatorer og ultralydsgivere på markedet, men disse er alle udviklet til stationære rensekar i større industrifaciliteter. De kræver alle sammen meget store effektgeneratorer som ikke lader sig gøre at nedsænke under vand i borer. Der var således behov for at starte helt fra bunden og målrette konstruktionen af ultralydstransducere til borer, og lave dem målrettet til de forhold og materialer som borer og deres nære omgivelser består af.

Projektets formål var at udvikle et nyt værktøj baseret på High Power Ultralyd vil kunne løse problemet med tilklogning både effektivt og miljømæssigt forsvarligt.

Nærværende projekt omfatter udvikling og afprøvning af et nyt high power ultralyd udstyr som rensemetode til borer og med test af nogle nye principper omfattede i sær koblingen mellem transducere og borerens væg.

2.2 Formål

Formålet med nærværende projekt har følgende hovedpunkter:

- Kravspecifikationen til værktøjet omfattede at værktøjet skal kunne anvendes i borerdimensioner fra $\varnothing 150 \text{ mm}$ og op til $\varnothing 400 \text{ mm}$ indvendig diameter samt kunne operere under et tryk på op til 120 mVs og i diverse former for materialer som, PVC-forerør og filter samt stålfore- og filterrør.
- Værktøjet skal kunne drives af en normal energikilde uden meget store forsyningskabler.
- Anvendelsen skal være enkel og omkostningseffektiv

3. Udvikling af ny lyd giver

For at oprense en boring er det nødvendigt at få virkningen fra behandlingen langt ud i grusfilteret. Højfrekvent ultralyd når ikke særligt langt ud i filteret men afsætter det meste af energien i filter røret og materialet i nærmeste omegn omkring filter røret.

For at kunne skabe kavitations bobler længere ude i filteret faldt tanken derfor på en sirene for at lave lyd ved lavere frekvens, men med en højere amplitude som derved skulle kunne trænge længere ud i grusfilteret.

Der er flere muligheder for at mest effektivt at danne lavfrekvente vibrationer. En række løsninger blev vurderet: Akustiske løsninger (højtaler-principper), fysisk initierede chok-bølger (banke-principper), pyrotekniske løsninger (højtrykspneumatiske principper), korrugerede rør og endelig turbine med interval flow (sirene princippet).

Det blev valgt at arbejde videre med sirene princippet, da dette princip blev vurderet at være det mest effektive af ovenstående principper.

Princippet i en sirene er at man har en roterende glideventil samt et turbinepumpeelement. I det specialtilfælde at glideventil og turbinepumpeelement er sammenbygget, så kaldes dette en sirene.

Sirenen frembringer et flow i det aktuelle medie. Flowet afbrydes abrupt i faste intervaller (frekvens).

Dette frembringer et meget højt lydtryk.

Den tænkte funktion er derfor at det høje lydtryk som fremføres via røret er i stand til at danne kavitationsbobler. Det er kavitationsboblernes kollaps som giver den mekaniske effekt der skulle virke rengørende.

3.1 Proces fra ide til prototype

I det efterfølgende gennemgås processen fra ide til færdig prototype til brug for Proof of Concept (i det følgende benævnt POC). Selve processen foregik iterativt: Ide – konstruktion – test – evaluering – forbedringsforslag – konstruktion osv.

I alt var der 4 modeltyper frem mod POC:

1. Stavblænder

Den første model som blev konstrueret. Denne model blev konstrueret for at undersøge om det kunne lade sig gøre at bruge sireneprincippet til at frembringe lyd under vand og til at eksperimentere med forskellige udformninger, som for eksempel turbinehjulenes udformning. Det blev fundet, at et højere lydtryk kunne opnås hvis der blev tilført en lille smule luft til vandet i sirenehovedet.

2. Lille model, udgave 1

Denne model blev udført for at undersøge hvilken type turbinehjul som gav det højeste lydtryk, samt at undersøge effekten af sirenen på okkerklumperne. Det blev fundet at der ikke var tilstrækkeligt rensende effekt på okkerklumperne. Okkerklumperne var pakket i

bandage og det var undersøgt at en opløsning af okkeren muliggjorde transport af okker gennem bandagen.

3. Lille model, udgave 2

Denne model blev udført for at forøge lydtrykket i forhold til *lille model, udgave 1* ved at montere et ekstra sirenehoved på sirenen, og derved få en større rensende effekt på okkerklumperne. Det blev fundet, at heller ikke denne udgave var tilstrækkelig kraftig til at kunne nedbryde okkeren.

4. Stor model til brug for POC

For at få en større trykændring når sirenehovedet åbnede og lukkede blev en ny model udviklet. Denne model fungerede ved at en pumpe leverede vandet til sirenen gennem et rør. Når sirenen henholdsvis åbnede og lukkede var der på grund af røret og pumpen en større mængde vand som skulle bremses og accelereres, hvilket gav en større trykændring i vandet (også kaldet vand hammer). Dette skulle gøre sirenen kraftigere og dermed gøre at okkerklumperne bedre kunne nedbrydes. Det blev fundet at okkerklumperne ikke kunne nedbrydes med denne model.

Herunder en kort gennemgang af de 4 modeller:

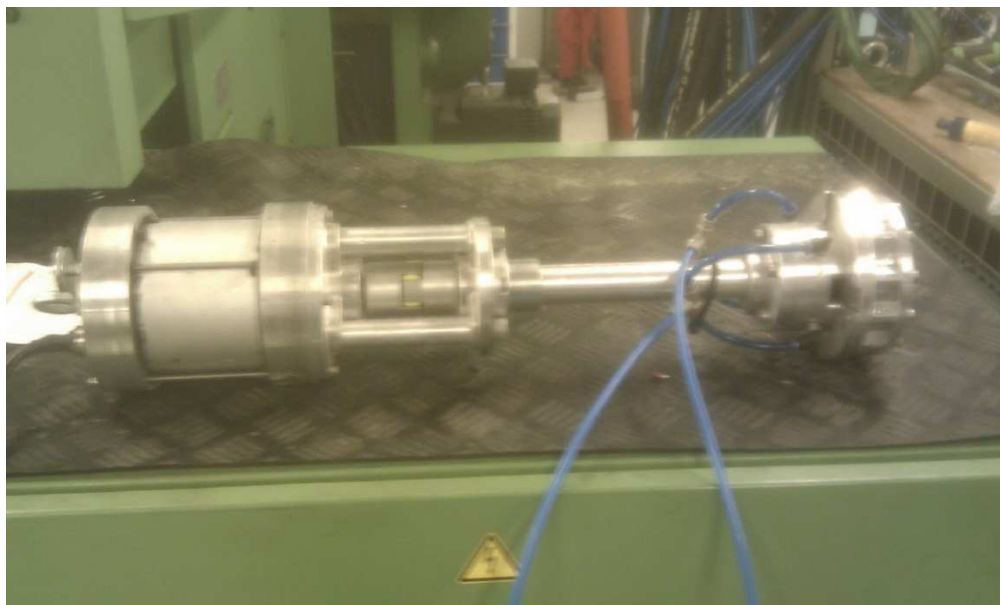
3.1.1 Stavblænder

Formålet med at benytte en husholdnings stavblænder var at forsøge afklare hvilken geometri på turbinehjul der ville virke mest effektivt under vand. Den geometri hvor turbinehjulets kanaler hovedsageligt ligger i radial retning blev fundet at give det højeste lydtryk.

Ved et af forsøgene kom der falsk luft ind i flow-vejen hvilket medførte en dramatisk øgning af effekten. Derefter kørte vi samtlige turbinehjulsforsøg med samme mængde luft.

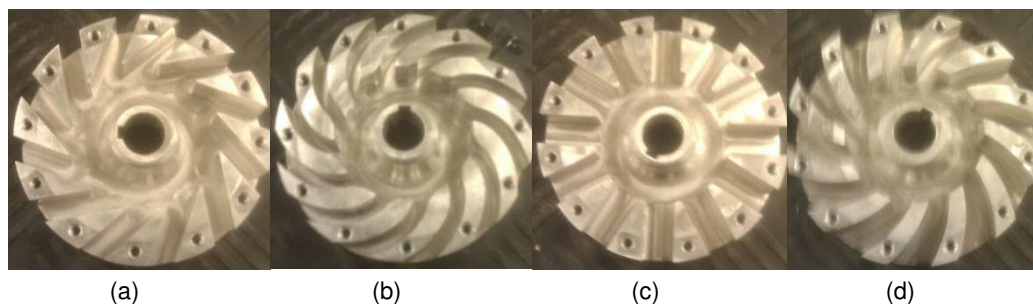
3.1.2 Lille model, udgave 1

Udviklingen af den første udgave af den lille model havde som mål at afklare hvor stort lydtryk en sirene af denne størrelse og udformning kunne give, samt at undersøge effekten af sirene behandlingen på okker. Til brug for udgave 1 fremstilledes nedenfor afbildede sirene Figur 3.1.1.



Figur 3.1.1. Første udgave af sirene, lille model

I testforløbet med den lille model anvendtes følgende turbinehjul for at afgøre hvilken kombination af luft og omdrejninger der gav det optimale lydtryk for det enkelte turbinehjul, se Figur 3.1.2.



Figur 3.1.2. De fire fremstillede skovlhjul model A, B, C og D

Det viste sig at være Model C som frembragte det højeste lydtryk. Nedenfor ses målingsresultaterne for netop dette skovlhjul. Se Tabel 3.1.1.

Hjul, Model C						
Omdrejninger per minut, RPM	400	600	680	800	900	1000
Lydtryk, dB	95	105	105	110	105-110	105

Tabel 3.1.1. Opnåede lydtryk med hjul model C

Dette turbinehjul blev derfor anvendt i det næste forsøg.

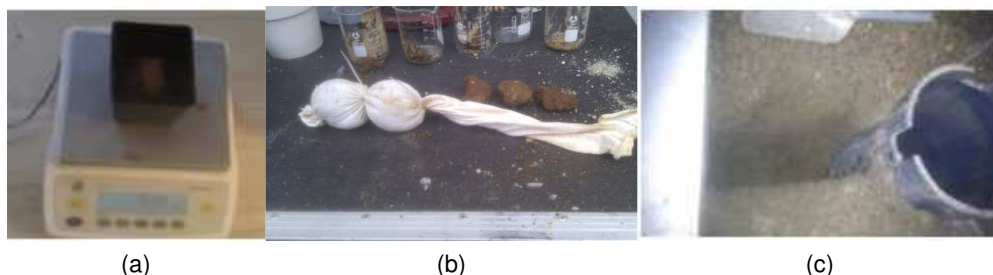
Dette forsøg blev foretaget i en specialfremstillet "sand beholder", se Figur 3.1.3, med et filter rør i midten (Ø315mm) med filtergrus omkring(Ø485mm) og derefter almindelig grus i resten af beholderen (1000 x 1000 x 1000 mm) for at efterligne omgivelserne omkring boringsfilteret mest muligt.



Figur 3.1.3. Sandbeholder

Der blev udført forsøg for at undersøge virkningen af sirene behandlingen på okker klumper. Forsøgets fremgangsmåde var følgende – se også Figur 3.1.4:

- Forberedelse
- Fire klumper okker bliver mættet med vand og vejjet
- Klumperne placeres i tubebandage sammen med en håndfuld filtergrus
- Klumperne graves ned i sirenehovedets højde. De fire klumper har forskellig afstand til filterrøret, med klump 1 tættest på og klump 4 længst væk
- Sirenen monteres i midten af filterrøret og vand fyldes på
- Opstillingen bliver udsat for 2 timers ultralyd fra sirenen
- Efterbehandling Klumperne graves op og tages ud fra indpakningen
- Klumperne bliver skyllet svarende til en ren pumpning af en boring efter en sirenebehandling
- De skyllede klumper bliver vejjet for at finde ud af hvor meget okker der blev løsnet



Figur 3.1.4. Testopstillingen med okker klumperne, med (a) afvejning af okker klumper, (b) indpakning i tubebandage og (c) nedgravning i sandbeholder

Det var ikke muligt at måle en betydende ændring af vægten på okker klumperne. Det blev derfor konkluderet at en kraftigere sirene med et højere lydtryk måtte konstrueres for at få effekten fra sirenen ud til okkerklumperne.

3.1.3 Lille sirene model, udgave 2

Denne sirene blev konstrueret med 2 sirenehoveder og en kraftigere motor for at gøre det muligt at skabe et højere lydtryk, og dermed få en større rensende effekt på okkerklumperne. Forsøget fra første type blev gentaget med udgave 2 (dobbelt skovlhjul) med samme fremgangsmåde men med en behandlingstid på 4 timer i stedet for 2 timer. Opstillingen kan ses på Figur 3.1.5.



Figur 3.1.5. Sirene med 2 lydhoveder monteret i sandbeholder

	Klump1	Klump 2	Klump 3	Klump 4
Før, g	69,0	67,0	93,3	92,0
Efter 4 t, g	66,9	62,1	90,6	89,0

Tabel 3.1.2. Måleresultater med dobbelthjulet sirene. Klump 1 ligger op ad filterrøret mens klump 4 ligger længst væk

Forsøget viste at der ingen signifikant effekt var på okker klumperne – se Tabel 3.1.2. De skyllede okkerklumper havde samme struktur som før behandlingen. Efter 4 timers drift var sirenen slidt op af sand og småsten, der blev hvirvlet fra bunden op i vandet og suget med ind igennem sirenen. Slidtagen ses tydeligt på Figur 3.1.6.



Figur 3.1.6. Sirene med 2 sirenehoveder efter 4 timers drift

Sirenen havde problemer med at få suget vand nok ned til det nederste sirenehoved og der blev derfor i opstillingen tilføjet et rør ned til bunden af filteret således at der kunne føres vand ned til sirenehovedet.

Det var ikke muligt at måle en ændring af vægten på okkerklumperne. Det blev derfor konkluderet at en kraftigere sirene med et højere lydtryk måtte konstrueres for at få effekten fra sirenen ud til okkerklumperne.

Erfaringen ved forsøg med den lille sirene viser, at en kraftigere sirene må konstrueres for at kunne danne en større trykændring i vandet og dermed en øget renseseffekt. Desuden er det nødvendigt at suge vand ind længere oppe i røret for at undgå at der kommer sten og sand med ind i sirenen og ødelægger sirenehovedet.

3.1.4 Stor sirene model

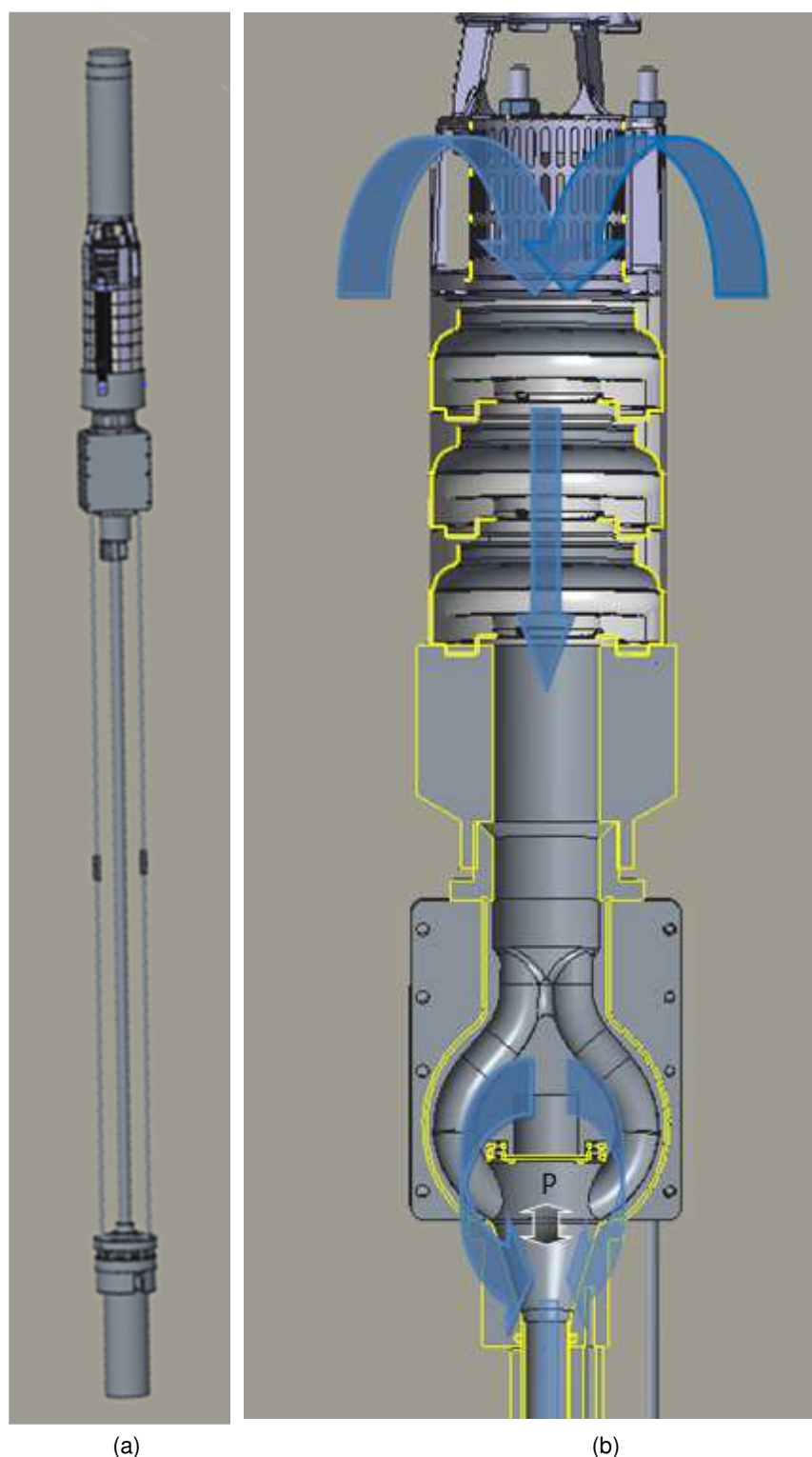
Sirenen virker ved at have en fødevandspumpe i toppen, som gennem en manifold, hvor der bliver blandet luft ind i vandet, presser blandingen gennem et rør ned til et roterende sirenehoved. Sirenehovedet åbner og lukker skiftevis for den hurtigt strømmende blanding hvilket danner et højt tryk når væsken bremses.

Fødevandspumpen giver et stort vand flow.

Luften der blandes ind i vandet gør det muligt for vand/luft blandingen at fjedre en lille smule, hvilket hjælper med til at massen kan give et trykstød.

Det lange rør gør at det er en relativ stor masse der skiftevis skal bremses op og accelereres, hvilket giver et højt tryk i sirenen.

Da det roterende sirenehoved åbner og lukker skiftevis således at vandet pulserer ud gennem åbningerne, vil der frembringes lyd. Se Figur 3.1.7.

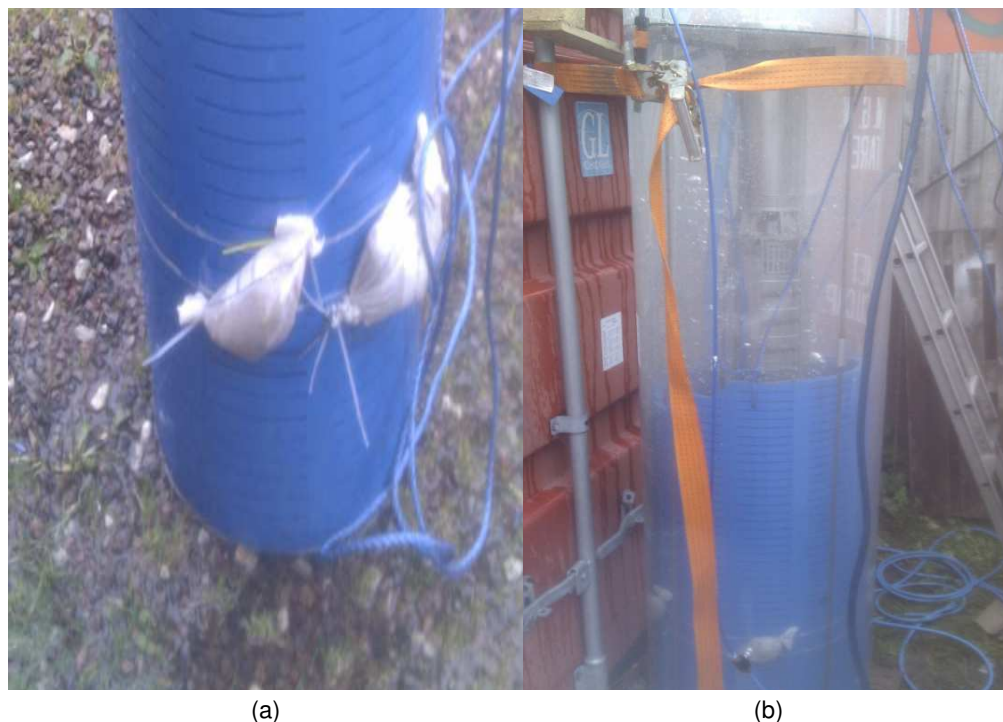


Figur 3.1.7. Stor sirene model (a) samlet og (b) detaljeret snit på indsugningsdelen

Da den nye sirene *ikke* kunne være i den tidligere testopstilling blev en ny opstilling konstrueret. Denne opstilling bestod af et PMMA (plexiglas) rør (Ø 500 mm) med en bund hvorpå der kunne monteres et styr til at holde sirenen og et stykke filter rør til at montere test prøver på. Filter røret kunne hejses op og ned så prøverne kunne udskiftes og måles.

Denne opsætning blev brugt til at udføre samme forsøg som beskrevet i sektion 3.1.2 (mætning-vejning-tube bandage-ultralyd-vejning), med den forskel at opsætningen ikke blev fyldt med filtergrus, men med vand. Et billede for opsætningen med de frit hængende bandager er vist på Figur 3.1.8(a).

Sirenen blev derefter monteret inde i filter røret og prøverne blev udsat for en lyd behandling over en kontrolleret tidsperiode, se Figur 3.1.8(b). Efterfølgende blev prøverne taget ud af tubebandagen og skyllet for at fjerne det løsnede okker, og til sidst blev prøven vejlet for at bestemme, hvor meget af okkeren der var blevet løsnat.



Figur 3.1.8. Testopsætning for den store sirenemodel med (a) to prøver monteret på filter røret og (b) det samlede system med filterrør og prøverne under vand

Samme forsøg er lavet i et industrielt ultralydskar som bruges til rensning af f.eks. laboratorieudstyr. Det er ikke sikkert at denne form for kar har nok ydeevne til at kunne bruges som sammenligning, da disse kar ofte designs til overfladerensning og der gerne bruges kemiske hjælpemidler til at fremme dannelsen af kaviteter (nedsættelse af overfladespænding). Derfor kan forsøget både ses som alternativ metode (dog ikke praktikabelt for boringen) og som reference for sammenligning af de forskellige behandlings resultater.

Forsøgene med sirenen og ultralydskaret gav det samme resultat. Det var ikke muligt, i forsøgene, at måle en signifikant ændring i vægten af prøverne, selv efter flere timers behandling. Det kunne konstateres at okker klumperne var nærmest helt upåvirkede både vægt og strukturmæssigt af de forskellige ultralyds behandlinger.

Da ingen af vores ultralydsforsøg gav signifikante resultater for okkerklumperne må konklusionen være, at ultralyd til behandling af okker tilstoppede boringer ikke er et godt valg som alternativ behandling sammenlignet med gængse metoder, da effekten af behandlingen vil være negligerbar.

3.2 Virkning af ultralyds behandling af bentonit i boringer

Bentonit er en særlig ler-art som har nogle gode egenskaber til at kvælde rigtigt meget samt at være meget lavpermeabel (meget dårlig til at afgive vand= meget tæt).

Bentonitpulver opslemmes i vand når der skal bruges boremudder i selve boreprocessen. Bore-mudderet bruges når der bores boringer med direkte skylle-metoden eller lufthæve-metoden. Der er metoder hvor der ikke anvendes nogen casing-rør i hullet. Boreprocessen foregår ved anvendelse af en tykflydende boremudder som stabiliserer hullet under nedboringen. Bore-mudderet består af en opslemmet bentonitblanding som kitter de geologiske lag sammen og forhindrer sammenstyrtning.

Denne tilkittning foregår også i de sand og gruslag som ønskes udnyttet til vandindvindingen efterfølgende.

Når boringen udbygges, anvendes der ligeledes bentonit til at tætnes mellemrummet mellem boringsvæggen og PVC-forerøret. Denne bentonit er ofte en type formet som pellets som drysses ned og som kvælder ved kontakt med vand. Derved blokeres adgangen mellem overfladenært vand og det grundvandsmagasin som ønskes udnyttet.

Når boringen færdig udbygges med et PVC-rør og filter foregår det i det åbne borehul hvor der står en mudderblanding. Denne mudderblanding skal oppumpes og fjernes. Dette sker ved renpumpning af boringen. Det er ofte tilfældet at både filterslidser og gruslag stadig indeholder store mængder bentonit som ikke er nemt at fjerne bare ved hjælp af pumpning.

Traditionelt har man anvendt hexametafosfat til at "afspænde" bentonitten, således at den bliver pumpbar igen. Hexametafosfat-behandling og der efter en renpumpning tager ofte en hel del tid og tanken var at ultralydsbehandling af filterstrækningen ville kunne reducere renpumpningstiden betydeligt.

For at undersøge om det er muligt at udskifte renpumpningen med ultralydsbehandling, blev der udført forsøg med sirenen.

3.3 Test 1: Sirene 3 og bentonit (visuel inspektion)

Forsøget er udført for at undersøge om forskellige bentonit-blandingsforhold har en indflydelse på sirenens renseeffekt på bentonit under forskellige forhold, f.eks. om grus måske endda kan støtte renseeffekten.

3.3.1 Fremgangsmetode

De fire forhold vi vil undersøge er repræsenteret med 4 forskellige prøver i vandtætte poser:

- *Prøve 1.* (rød strips) filter grus, almindeligt grus og bentonit uden vand i posen.
- *Prøve 2.* (gul strips) filter grus, almindeligt grus og bentonit med vand i posen.
- *Prøve 3.* (Sort strips) ren bentonit uden vand i posen.
- *Prøve 4.* (hvid strips) ren bentonit med vand i posen

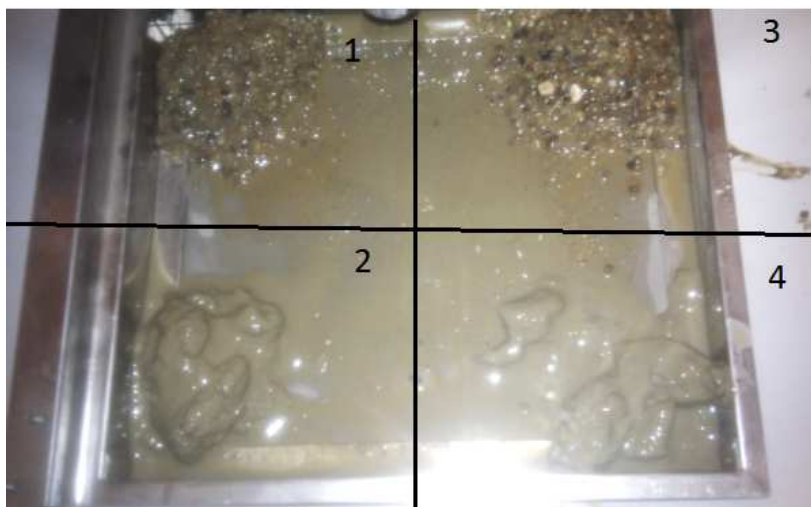
For at kunne se forskellen fra før og efter forsøget blev der lavet 2 af hver prøve, én der blev behandlet med sirenen og én som ikke blev behandlet (kontrol prøve). Se Figur 3.3.1.



Figur 3.3.1. Prøve poserne 1 til 4. Ubehandlede prøver og kontrol prøver

3.3.2 Testopstilling

Svarende til okkertestene, blev de 4 testprøver indpakket i tube bandage og monteret udvendigt på et filter rør og derefter udsat for 4 timers ultralydsbehandling – det er samme opsætning som er vist på Figur 3.1.8(b). I og med vi kun ønsker optisk inspektion blev prøverne ikke vejjet.



Figur 3.3.2. Indhold for prøve-poserne med vand i. venstre side, sektion 1 og 2, viser kontrolprøvernes indhold mens sektion 3 og 4 viser indhold for de prøver der blev udsat for ultralyd

3.3.3 Testresultat

Figur 3.3.2 viser testprøverne hvor der tilsat vand. Sektion 3 og 4 viser prøverne udsat for ultralyd, mens sektion 1 og 2 viser de tilsvarende kontrolprøver. Sektion 1 og 3 viser blandingen af filtergrus, grus og bentonit (prøve 2) mens sektion 2 og 4 viser ren bentonit. Man kan se at bentonitten var blevet en anelse fortyndet af vandet og når posen blev hældt ud på en finmasket si løb noget af bentonitten væk fra testprøven.

Man kan på billedet se at noget af bentonitten er vasket ud af den behandlede prøve med grus (3) i forhold til prøven som ikke er behandlet (1). I øvrigt kunne der ikke konstateres ændringer af de testprøver der *ikke* havde vand med i posen (prøve 1 og 3).

3.4 Test 2: Stor sirene og bentonit, vejeforsøg

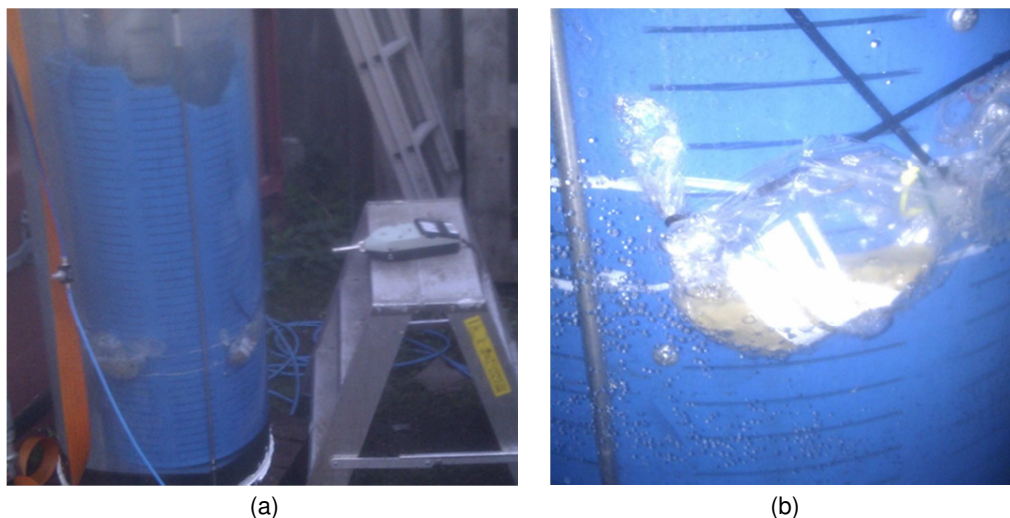
Forsøget blev udført for at lave en kvantitativ undersøgelse af bentonit mængden, der vaskes ud af grus/bentonit blandingen.

3.4.1 Fremgangsmåde

Fremgangsmåden er meget lignende de tidligere eksperimenter og bestod af fire poser med en grus/bentonitblanding (svarende til prøve 2 fra det visuelle forsøg). Mere detaljeret blev forsøget ført ud i følgende step:

- Hver enkelt prøve blev lagt i en pose og vejede før og efter at der blev hældt vand ved prøven. Efterfølgende blev prøverne lagt i tubebandage og monteret på filter røret.
- Filter røret blev monteret i testopstillingen og prøverne blev udsat for 1 times sirene behandling.
- Efterfølgende blev filter røret taget op, og prøverne blev taget ud af tubebandagen.
- Derefter klippedes 2 hjørner af hver pose, sådan at et hul svarende til revnerne i filteret fremkom. Vandet sivede ud i en afvejet skål sådan at vægten af vandet kunne bestemmes.
- Derefter skulle det kunne lade sig gøre at bestemme vægten af det forsvundne bentonit.

Under forsøget blev det akustiske tryk også målt – se Figur 3.4.1 som viser både den akustiske måling og et close up af en prøve.



Figur 3.4.1. Opsætning af bentonitprøver under behandling med (a) lydtryksmåling og (b) selve prøven under behandling

3.4.2 Blandingsforhold i test prøverne

Volumen forholdet for at give en tæt masse bestemtes til 1/4 bentonit, 3/8 grus, 3/8 filtergrus
Vægtforhold: 110g grus, 110 g filter grus, 50g bentonit. Se Tabel 3.4.1.

Prøve nr.	"Tør" vægt	Heraf bentonit, (18,5 %)	Pose vægt	Tilført vand vægt	Total vægt
1 (rød strips), g	100,6	18,5	1,2	96,0	195,0
2 (Gul strips), g	103,0	19,1	1,2	97,0 g	202,0
3(Sort strips), g	97,5	18,1	1,2	106,8	205,3
4(hvid strips), g	99,2	18,4	1,2	99,9	200,6

Tabel 3.4.1 Oversigt over de forskellige prøveposer

3.4.3 Resultat

Resultaterne efter 1 times sirene behandling med et lydtryk på 105 dB (målt ude fra) ses i Tabel 3.4.2.

Prøve nr.	Drænet vægt	Vandets vægt	Pose vægt	Opløst bentonit
1 (rød strips), g	103,2	70,0	1,2	
2 (Gul strips), g	102,9	91,8	1,2	
3(Sort strips), g	101,1	94,0	1,2	
4(hvid strips), g	99,4	87,0	1,2	

Tabel 3.4.2. Måleresultater efter 1 times sirenebehandling med 105dB lydtryk

Det kunne *ikke* lade sig gøre at skille vandet fra prøverne sådan at et ordentligt resultat kunne måles – derfor er den sidste kolonne i Tabel 3.4.2 tom.

En ny fremgangsmåde skulle findes for at kunne bestemme hvor meget bentonit der forsvinder fra test prøverne. Det så umiddelbart ud som om at der blev blandet mere vand ind i bentonitten.

3.5 Test 3: Stor sirene og bentonit (vejning)

Forsøget blev udført for at undersøge hvor meget bentonit der vaskes ud af en grus/bentonit blanding.

3.5.1 Fremgangsmåde.

En afvejnet grus/bentonit blanding blev lagt direkte i en tubebandage som vist på Figur 3.5.1.

- Bandagen med indhold blev placeret i vand 1/2 time sådan at prøven blev vandmættet.
- Bandagen med indhold afdryppede i 5 min.
- Bandage + indhold blev vejlet.
- Bandage med indhold blev derefter monteret på filter røret og blev udsat for 1 times sirene behandling.
- Bandagen med indhold afdryppede i 5 min.
- Bandage og indhold blev vejlet og den forsvundne vægt antoges at være lig med det udvaskede bentonit.



(a)



(b)

Figur 3.5.1. Prøverne direkte i tubebandager ved (a) vejning og (b) ultralydsbehandling

3.5.2 Blandingsforhold i test prøverne

Volumen forhold for at give en tæt masse bestemtes til 1/4 bentonit, 3/8grus, 3/8 filtergrus.
Vægtforhold: 110g grus, 110 g filter grus, 50g bentonit.

3.5.3 Resultat

Resultaterne efter 1 times sirenebehandling er vist i Figur 3.5.2 og Tabel 3.5.1.

Prøve nr.	Vægt grus/ bentonit	Vægt bentonit	Vægt efter 5 min dryp <u>før</u> sirene	Vægt efter 5 min dryp <u>efter</u> sirene	Bentonit fjer- net
1 (rød strips), g	211	39	228	222	6 g = 15%
2 (Gul strips), g	202	37	220	214	6 g = 16%

Tabel 3.5.1 Resultater efter 1 times sirenebehandling



Figur 3.5.2. Prøverne efter behandling

Det er en relativ lille del af bentonitten som vaskes ud af prøverne, det må derfor konkluderes at en sirene- behandling af en boring der er tilstoppet med bentonit *ikke* vil give en signifikant forbedring af boringen.

3.6 Konklusion af ultralyds behandling af prøver med okker eller bentonit

Efter mange forsøg med både mindre og større sirener, samt verifikationstests af den samme type prøver i et ultralydskar, må det derfor konkluderes, at en sirene- behandling af en boring der er tilstoppet med enten okker eller bentonit *ikke* vil give en signifikant forbedring af boringens ydelse. For okkeren kunne vi faktisk ikke konstatere nogen renseeffekt, mens effekten for bentonit ikke oversteg en udvaskning af ca. 15% bentonit. I forhold til omkostningerne denne metode vil medføre, så vurderer vi, at en så lav effekt ikke kan retfærdiggøre ultralyd som alternativ rensemethode til okker eller betonit tilkloggede vandboringer.

4. Frysning som metode

Efter mange diskussioner om det videre arbejde blev sireneforsøgene opgivet. Der blev derfor lanceret en idé om nedfrysning af udfældninger in situ. Der er to ting der ville kunne opnås med nedfrysningen: for det ene kunne man skabe en akustisk vej for ultralyden, dvs. mindske refleksionerne fra PVC røret og gruselementer (nærmere beskrevet i kapitel 5), og for det andet kunne man skabe en akustisk kavitet ved at smelte isen indefra og dermed skabe en "skal" af is, således at betingelserne for akustisk resonans ville være givet. Derfor blev det besluttet at undersøge hvilken effekt det ville have på okkeren at fryse og ultralydsbehandle den.

4.1 Frysning som metode

Denne idé blev affødt af et eksperiment foretaget hos Kjul & Co hvor man frøs et antal okkerklumper ned ved hjælp af en kommerciel husholdningsfryser.

4.1.1 Forsøg med okker og frys

For at undersøge om en kombination af frys og ultralyd kunne have en effekt på okkerklumperne blev 4 okkerklumper nedsænket i vand og derefter placeret i en skabsfryser ind til prøverne var frosset. Herefter blev 2 af prøverne optøet ved stuetemperatur og 2 af prøverne blev optøet i et ultralydskar.

4.1.2 Resultat

Der var ikke nogen forskel på om klumperne blev optøet ved stuetemperatur eller om de blev optøet i ultralydskar. Alle okkerklumperne gik i opløsning og smuldrede. Forsøget blev gentaget flere gange med samme resultat.

Det blev fundet at okker klumperne som blev frosset ned smuldrede og faldt fra hinanden når de blev optøet. Der var efterfølgende ingen hårde okker klumper tilbage i prøverne. Dette gav en indikation på at frysning kunne være en alternativ metode til oprensning af borerer uden ultralyd.

På grund af dette første resultat blev det besluttet at konstruere et fryselegeme som kunne monteres i en boring og samtidig lave beregninger omkring hvor lang tid det ville tage at fryse en typisk boring ned. I sidste ende vil denne metode kunne kombineres med dannelsen af en skal af is med en ultralydskilde.

4.2 Matematisk model for frysning

For at kunne beskrive frysningemetoden for boringsrensning har vi undersøgt to problemstillinger. Først er det vigtigt at vide, hvor lang tid en nedfrysning vil tage, da tidsfaktoren er en meget vigtig komponent for at bestemme om løsningen er praktikabel. Det andet er en undersøgelse om de kræfter der virker under frysning og kan findes som afsnit 4.3. I den forbindelse meldte der sig en række kritiske spørgsmål.

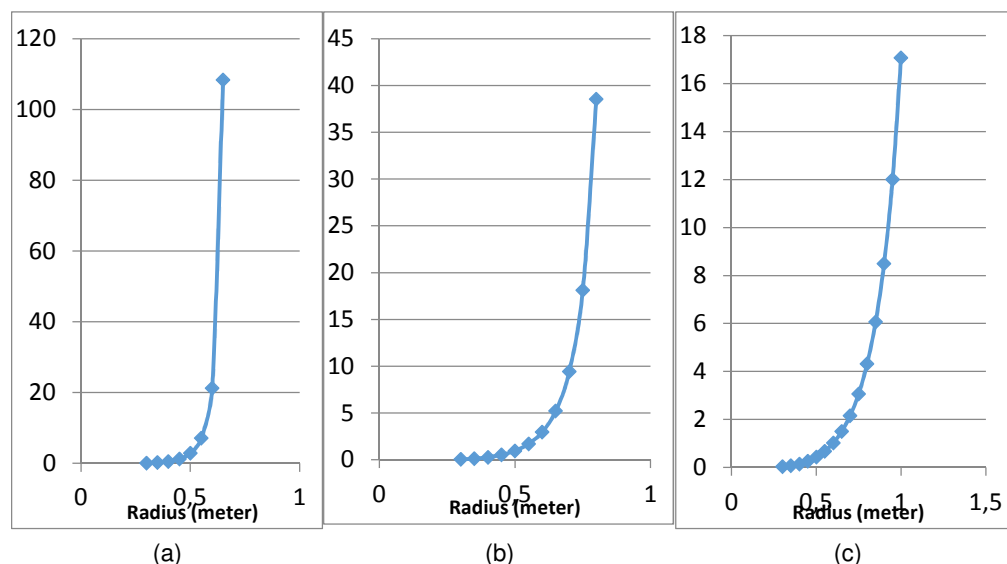
- Hvilken effekt har frysningen på boringsrøret (PVC)?
- Hvor meget udvider det frosne vand sig i boringen og vil den tage skade?
- Hvor lang tid og hvilket volumen fryser til is?

4.2.1 Indledende beregninger til frysefront

For at få et bedre overblik over tiden der skal til at fryse en boring i forhold til temperaturen blev der fortaget overslagsberegninger med velkendte formler som f.eks.

$$\frac{T(r, t) - T_{\infty}}{T_R - T_{\infty}} = \frac{R}{r} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{r - R}{\sqrt{4\alpha t}}\right),$$

Som er løsningen for varmeligningen med en varmekilde af radius R i et uendeligt medie, hvor α er den termiske diffusionskonstant (diffusivity). For at bestemme nedfrysningstiden for en boring er den mest anskuelige metode, at bestemme frysefrontens position som funktion af tid. Frysefronten er løst sagt det sted, hvor temperaturen er 0°C . Resultatet for $T(r, t) = 0$, altså frysefronten, kan ses i Figur 4.2.1.



Figur 4.2.1. Tid vs. radius for tre frysetemperaturer: (a) -20°C , (b) -30°C , (c) -50°C . Y-aksen viser frysetid i døgn

Selv om beregningen på en kugle ikke kan bruges til at fastlægge frysetider på en cylinder, kan beregningerne bruges til at få en indikation på hvilken temperaturer der vil være optimale at fryse med når boring filteret skal fryses. På graferne over hastigheden på frysefronten for en kugle ses det tydeligt hvordan hastigheden på frysefronten bliver langsommere jo længere væk den kommer fra kuglen. Beregningerne giver også en ide om hvor frysefronten vil gå i stå ved de forskellige temperaturer (nå sit ligevægtspunkt, altså energien der bliver trukket ud af jorden = energien tilført fra jorden omkring kuglen)

4.2.2 Udvidet model for frysefront

Da modellen nævnt før kun er en model som kan give første indtryk, har vi udviklet en lidt mere avanceret model, som ikke antager et uendeligt medie og tager hensyn til at vand og is har forskellige varmeledningsevner. Det kunne ses på modellen før at forskellen mellem frysetid og temperatur kan være voldsomt – derfor har vi besluttet os for at undersøge dette nærmere. I vores model har vi også inkluderet en latent varmeenergi, som skal bruges for at aktivere krySTALLISERINGEN af vandmolekylerne.

Den generelle varmeligning er givet ved

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q_{in},$$

Hvor parametrene k er varmeledningsevne, ρ er massetæthed, og C_p er den specifikke varmekapacitet (ved konstant tryk), mens T er temperaturen, Q_{in} er en energikilde og $\mathbf{u}$ er mediets flowhastighed. Det burde nævnes at effekter som infrarød opvarmning, termisk ekspansion hhv. opvarmning pga. kompression og friktionsopvarmning ikke er medtaget i ligningen.

I princippet er ligningen intet andet end en energibalance for et infinitesimalt volumen-element, hvor den første del beskriver netto-energiflux fra varmeledning ($\nabla \cdot \mathbf{q}$, hvor $\mathbf{q} = -k\nabla T$ – Fouriers varmeledningslov), andet element er energiflux fra fluidbevægelse, tredje del beskriver opvarmningen af elementet og den højre side beskriver en energikilde i elementet.

I vores tilfælde vil der ikke være eksterne varmekilder og vi antager at vandet ikke bevæger sig i løbet af nedkølingen. I dette tilfælde kan energibalancen ses nemmere, da ligningen bliver til

$$\nabla \cdot (k\nabla T) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}.$$

Som allerede nævnt, bliver man nødt til at udvide varmeligningen med fænomenet som omhandler latent varme. En mulighed ville være at indføre et specielt Q_{in} som er afhængig af varmen selv. En anden mulighed er at beskrive faseovergangen mellem flydende og fast i et bestemt temperaturinterval ΔT . Dette kunne f.eks. være fra -0.5°C til 0.5°C for overgangen fra vand til is. I dette interval tilnærmer man parametrene (som ændrer sig ret drastisk for faseovergange) som lineær interpolation:

$$\begin{aligned}\rho &= \theta \rho_{fase1} + (1 - \theta) \rho_{fase2}, \\ k &= \theta k_{fase1} + (1 - \theta) k_{fase2}, \\ H &= \frac{1}{\rho} (\theta \rho_{fase1} H_{fase1} + (1 - \theta) \rho_{fase2} H_{fase2}),\end{aligned}$$

Hvor H står for entalpi og bruges til at bestemme den specifikke varmekapacitet. Variablen θ beskriver andelen af massen per fase og går fra 0 ved $T=0.5^\circ\text{C}$ til 1 ved $T=-0.5^\circ\text{C}$. Den specifikke varmekapacitet er defineret termodynamisk som

$$C_p = \frac{\partial H}{\partial T} = \frac{1}{\rho} (\theta \rho_{fase1} C_{p,fase1} + (1 - \theta) \rho_{fase2} C_{p,fase2}) + (H_{fase2} - H_{fase1}) \frac{d\alpha_m}{dt},$$

Hvor α_m er massefraktionen

$$\alpha_m = 0.5 \frac{(1 - \theta) \rho_{fase2} - \theta \rho_{fase1}}{\rho}.$$

Udtrykket for C_p kan splittes op i to dele: engang $C_{p,eq}$ som bare er den lineære interpolation mellem de to C_p – værdier for faserne og på den anden side den latente varmekapacitet C_L (den ekstra ændring i varmekapacitet ud fra faseforskellen):

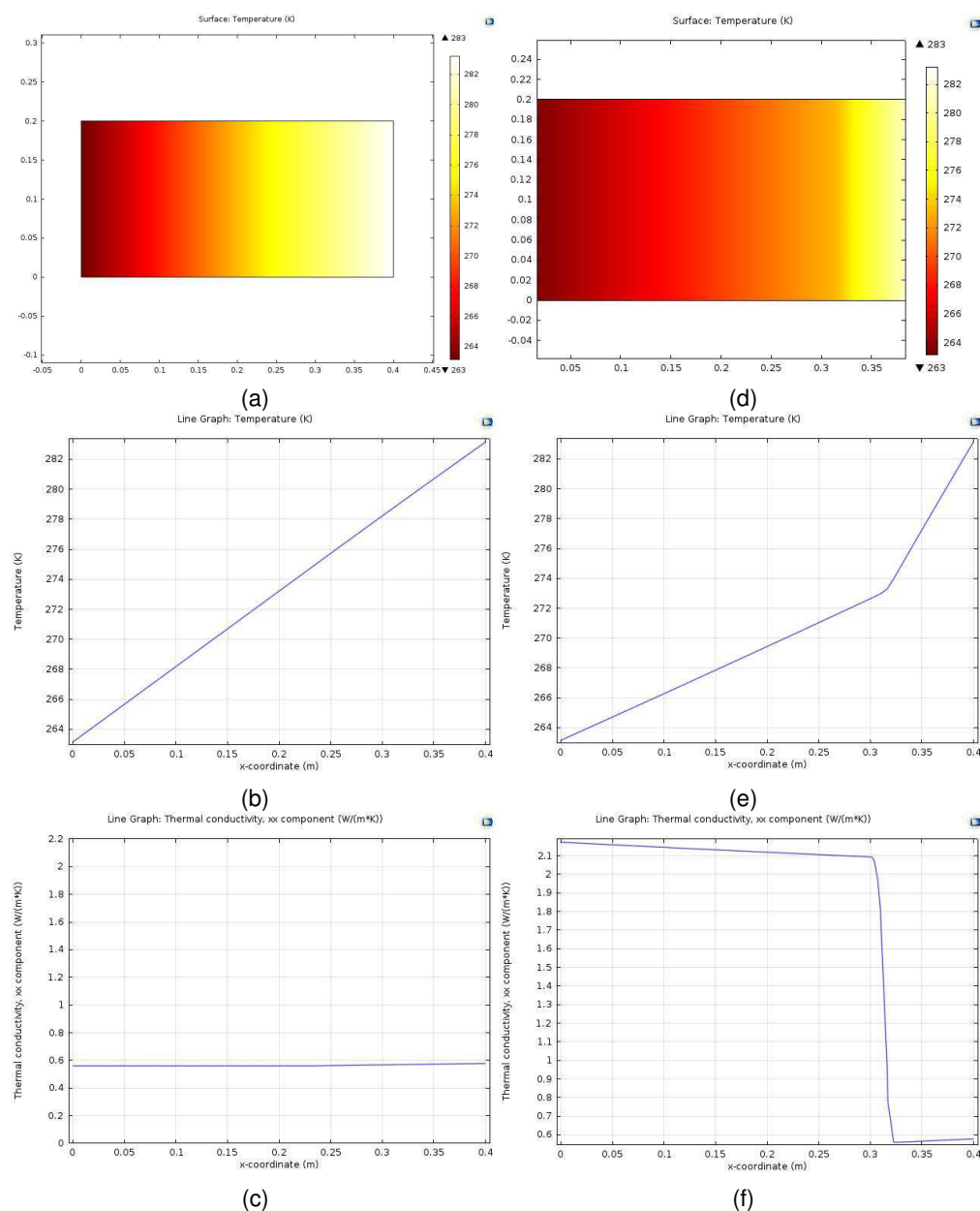
$$C_L = (H_{fase2} - H_{fase1}) \frac{d\alpha_m}{dt} = L \frac{d\alpha_m}{dt},$$

Hvor L beskriver den samlede latente varmeenergi per masseenhed brugt til at fryse/tø vand til is og omvendt.

Disse ligninger er ikke lineære. Derfor vælger vi en ren numerisk løsningsmetode. Løsningsmetoden vi har valgt er Finite Element Metoden (FEM). Her bruges lokale polynomier til at tilnærme sig den korrekte løsning for problemet. For et 1D-problem (kun x-afhængighed) kunne det f.eks. være at man splitter en domæne længde $x \in [0, L]$ op i 10 elementer af længde $L/10$, hvor hvert element er koblet til f.eks. et anden ordens polynomie $T_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i$. I sidste ende bruger man så en teknik kaldt Galerkin projektion for at finde koefficienterne a_i, b_i, c_i som giver det resultat som tilnærmer det korrekte resultat bedst muligt.

Tidsafhængigheden bliver løst med hjælp af en simpel Finite Difference metode, således at løsningen bliver opdateret tidsstep for tidsstep ved hjælp af en simpel forward Euler diskretisering. Metoden og ligningen er implementeret i den kommercielle softwarepakke COMSOL Multiphysics, som vi i det følgende bruger til at løse problemet.

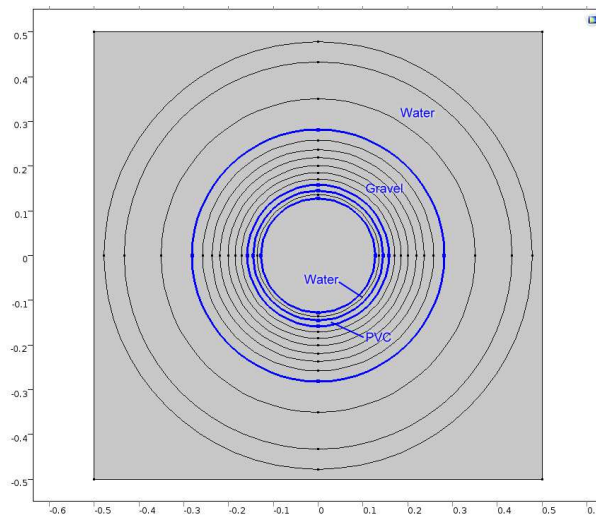
Et simpelt eksempel på virkemåden og visualisering af faseovergangseffekten er vist på Figur 4.2.2. Her har vi løst et 2D problem uden tidsafhængighed (steady-state) hvor vi sætter randbetingelserne til 10°C på højre kant og -10°C på venstre (skalaen på Figuren er i Kelvin). Her kan man klar se ”knækket” i temperaturen som er skyldt isens højere varmeledningsevne i sammenligning med vand. Selve varmeledningkoefficienten er altså også temperaturafhængig – Figur 4.2.2(f) viser den brugte varmeledningsevne som funktion af position x – altså indirekte som funktion af temperatur og fase.



Figur 4.2.2. Varmefordeling på en rektangulær struktur. (a),(b),(c) viser temperaturen på hele overfladen, temperaturen som funktion af position x og varmeledningkoefficienten som funktion af position x , uden faseovergang. (d),(e),(f) viser de samme størrelser med faseovergang taget i betragtning

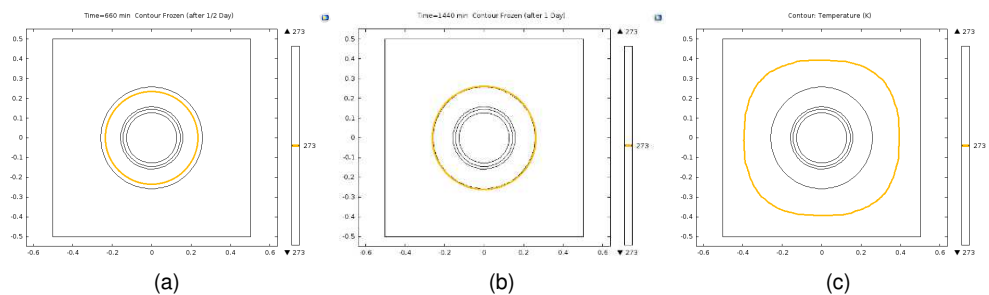
For borningscenariet løser vi de samme ligninger, bare for en anden geometri. For at reducere beregningstiden (det kan tage flere timer eller døgn at løse problemet) har vi valgt at bruge en 2D-version af boringen. Det betyder at vi antager at vi fryser en tilstrækkelig lang portion af borningscylinderen, så fryseprofilen ikke ændrer sig som funktion af dybden. Den modellerede

geometri kan ses i Figur 4.2.3. Randbetingelserne er givet ved en frysetemperatur på inderste cirkel (f.eks. -30°C) og en ambient temperatur på de ydre (kvadratiske) kanter, f.eks. 10°C.



Figur 4.2.3. Boringsprofil bestående af køleelement i midten, vand, pvc rør, grus og vand. Aksedimensionerne er i meter. De umarkerede cirkler bliver kun brugt til resultatudlæsning (temperatur ved afstand til center)

På denne måde med materialeparametrene fra Tabel 4.2. 1 kan vi simulere fryseprocessen som f.eks. vist i Figur 4.2.4.



Figur 4.2.4. Tidsforløb for frysefronten (her bare indikeret som 0°C): (a) Efter 11 timer, (b) 24 timer og (c) steady-state. Kølerens temperatur er givet ved -30°C

4.3 Fryseinducerede spændinger

For at undersøge, hvilke mekaniske spændinger der opstår under nedfrysningen, og hvor de opstår, har vi undersøgt spændinger under nedfrysningen af nogle idealiserede gruselementer. Grunden til undersøgelsen er både den akademiske interesse og den forskel vi ser mellem laboratorieforsøg og feltforsøg (se efterfølgende afsnit). Selve ligningerne for temperaturen er de samme som for kølefronten, med additionen af en termisk ekspansionsterm, som dog ikke udgør den store forskel, så den ses bort fra i det følgende. De mekaniske ligninger er lineære elastodynamiske ligninger

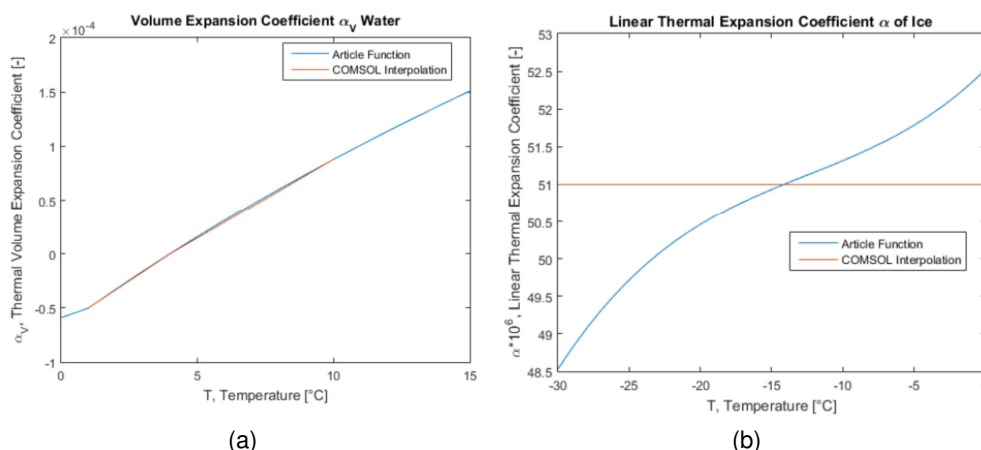
$$\nabla \cdot \sigma = \rho \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2},$$

Hvor σ er mekaniske spændinger og $\mathbf{u}$ er partikel-forskydning. De mekaniske spændinger er så givet ved udvidelsen af Hookes lov:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}(\epsilon_{kl} + \alpha_i(T - T_{ref}) \cdot \delta_{ij}),$$

Hvor ϵ_{kl} er strain (procentvis deformation), δ_{ij} er Kronecker Delta (1 hvis $i=j$, ellers 0) og Einstein summation er implicit for $i, j, k, l \in \{1, 2, 3\}$. Det er simpelthen et udtryk for at spændingen er proportional med strain ϵ og at der for simpel kompression kommer et termisk ekspansionsudtryk proportional med temperaturændring oveni. For isotropiske materialer kan alle elementer c_{ijkl} beskrives ved elasticitetsmodul E (Young's modulus) og Poisson ratio ν .

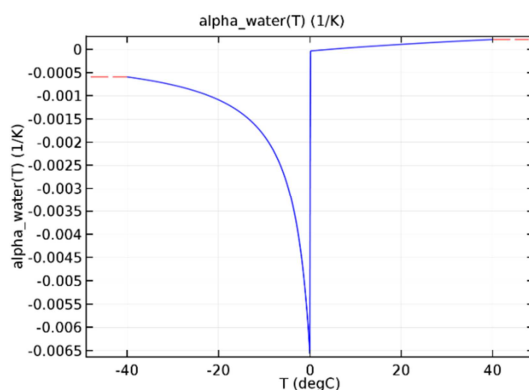
Ekspansionskoefficienten α er ens i alle retninger (dvs. $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$) og er en funktion af temperatur og fase. Ekspansionsværdier for vand og is er vist i Figur 4.3.1.



Figur 4.3.1. Ekspansionskoefficient for (a) vand og (b) is som funktion af temperatur

Det kan ses på figuren at vores COMSOL tilnærmelse svarer til værdierne taget direkte fra artiklerne T. R. Butkovich: "Thermal expansion of ice", Journal of Applied Physics **30**, 350 (1959) og M. Takenaka and R Masui: "Measurement of the thermal expansion of pure water in the temperature range 0-85°C", Metrologia, **27**, 165 (1990).

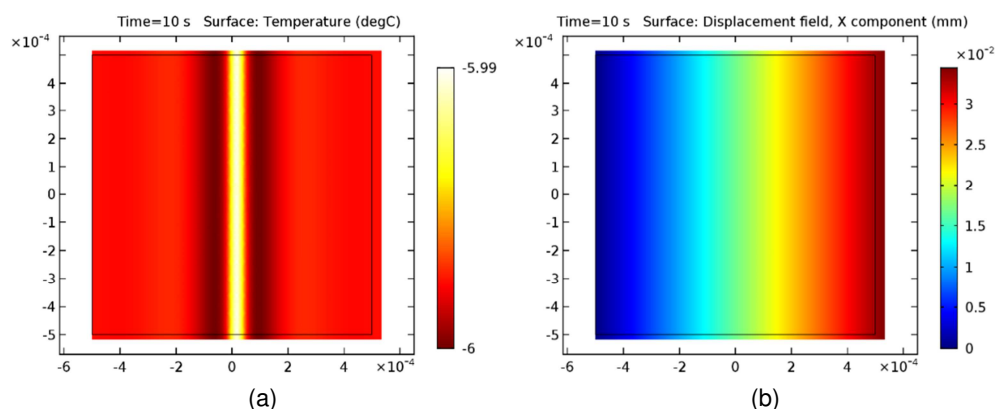
Det kan desuden ses at koefficienten for vand skifter fortegn omkring 4°C, det velkendte fænomen at vand er tungest ved netop denne temperatur. Efter vandet er frosset, er der en positiv ekspansionskoefficient, som velkendt fra faste stoffer. Det er dog vigtigt, at tage hensyn til at disse grafer er med hensyn til forskellige referencer ($T=0K$ hhv. $T=4^\circ C$) og viser den lokale ændring (gradienten af ændringen). For at tage hensyn til ca. 8% volumenændring ved faseovergangen, er disse kurver blevet brugt til at lave en samlet referencegraf for ekspansionskoefficienten. Den er vist i Figur 4.3.2.



Figur 4.3.2. Samlet α_i med reference til 4°C

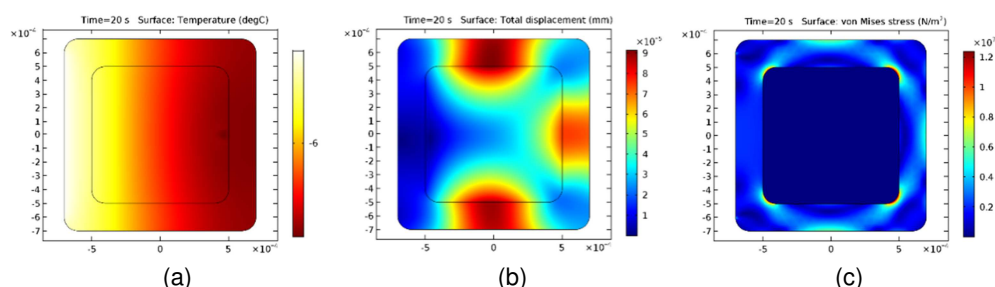
For at teste dette setup, har vi løst et simpelt afkølingsproblem på en kvadratisk overflade, som kan ses i Figur 4.3.3. I denne opsætning har vi valgt at lade kvadratet være fri af mekanisk

stress udefra, så det kan udvide sig i alle retninger. Efter nedkølingen til -6°C efter 10 sekunder, er sidelængden groet fra 1mm til 1.035mm. Der er ikke nogen udviselse i z-retningen ("ind i papiret"). Dermed er det nye volumen $1.035\text{mm} \times 1.035\text{mm} = 1.07\text{mm}^2$, altså en forøgelse på 7%, passende til antagelsen omkring fryseudvidelsen.

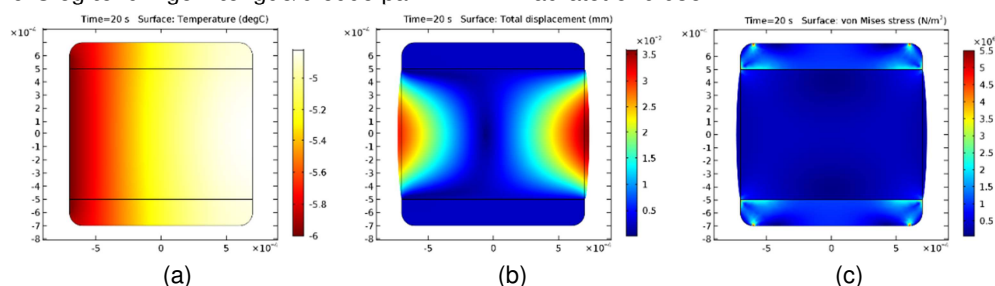


Figur 4.3.3. Deformation på grund af nedfrysning, (a) temperatur efter 10 sekunder og (b) deformationen i x-retningen. Starttemperaturen er 4°C . Efter 10 sekunder er temperaturen på -6°C og ændringen længde/bredde på $1 \times 1\text{mm}^2$ kvadratet er 0.035mm

Som stressindikator bruger vi von Mises's stress, som er et standardværktøj for at estimere materialers belastningsevne (sammenligning von Mises og Tensile/Yield stress, som er en materialeparameter). Vi tester først for to tilfælde: engang frosset vand som er indkapslet i en granit-terning med resultater i Figur 4.3.4 og herefter samme opstilling, men med to af siderne åbne – se Figur 4.3.5.



Figur 4.3.3. Deformation på grund af nedfrysning, (a) temperatur efter 10 sekunder og (b) deformationen i x-retningen. Starttemperaturen er 4°C . Efter 10 sekunder er temperaturen på -6°C og ændringen længde/bredde på $1 \times 1\text{mm}^2$ kvadratet er 0.035mm

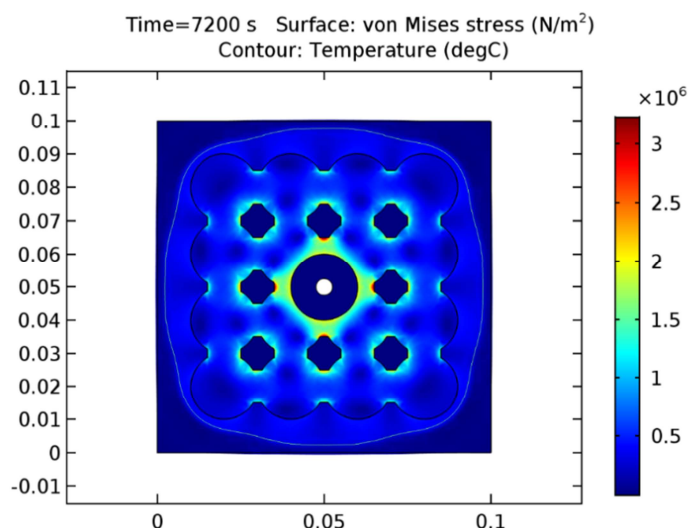


Figur 4.3.5. Deformation og stress konturer efter 20 sekunders nedfrysning med -6°C fra venstre side. (a) temperaturfordeling, (b) deformation og (c) von Mises Stress. Alle andre sider er antaget termisk isoleret. Efter 20 sekunder er alt vandet frosset. Det kan ses at deformationen her er noget større, fordi isen er i stand til at udvide sig ud mod højre og venstre. Det betyder samtidig at de inducerede spændinger er noget mindre nu, Det absolutte maximum er omkring 5.5MPa, men det virker meget som en numerisk afvigelse. Det er mere realistisk at gå ud fra en spænding på ca. 2.5MPa, som er fordelt over et større område

For begge tilfælde løses varmeledningsproblemet med 2 faser (vand og is), samt deformationsproblemet hvor temperaturen fra varmeproblemet bliver oversat til en tilsvarende strain. Det ydre materiale blev valgt til at være granit.

Det kan ses i figurerne at det lukkede system genererer den højeste spænding og derfor er mere velegnet til at "knække" mekaniske bindinger. Det hænger sammen med at vandet/isen ikke kan undslippe og dermed udøver et højere tryk på dets beholder. I de åbne tilfælde er det tilsvarende tryk noget lavere. Det burde nævnes specifikt, at vandet er blevet modelleret som solid (mekanisk set), således at vandet ikke engang løber ud af siderne. I et mere reelt scenarie bør man forvente endnu større forskel.

Når man kigger nærmere på lukkede systemer, som i Figur 4.3.6 kan man se, at stressen er størst tæt på overgangen mellem vand og grus, på grund af de forskellige ekspansionskoefficienter. Figuren viser et varmelegeme i center (-26°C) omringet af vand, gruslag og diverse vandkaviteter (systemet består faktisk af vand og overlappende grus-kugler). De helt ydre kanter er holdt spændingsfrie. Den samlet set største stress findes tæt på den større kavitet omkring midten af figuren. Gruset blev simuleret som "concrete" (beton) i dette tilfælde.



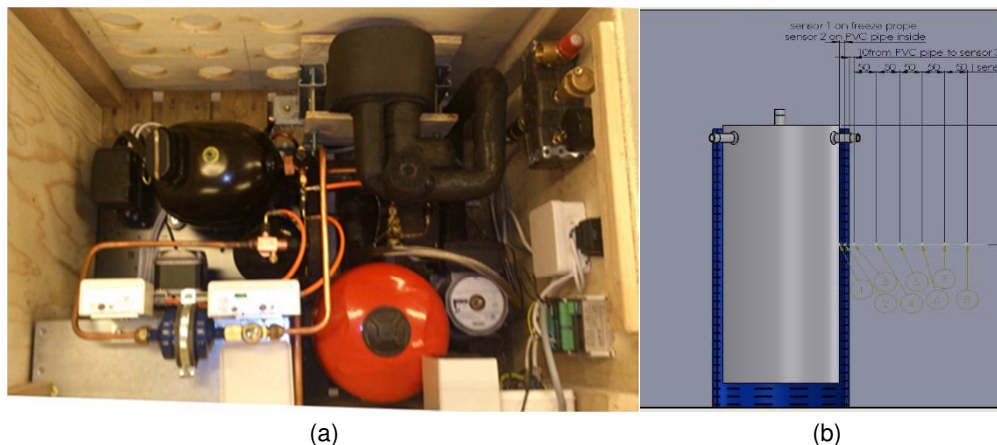
Figur 4.3.6. Stress i en lukket kavitet. Det ses at der er den indre kavitet som genererer størst stress – frysefronten er indikeret med den tynde, hvide linje. Ellers ligger der stress koncentreret omkring de mindre kaviteter

4.4 Laboratorieforsøg

Dette forsøg er udført for at undersøge hvor lang tid det vil tage at fryse en boring og eventuelt kunne validere den matematiske model.

4.4.1 Opstilling

Forsøget forgik i sandbeholderen som også blev brugt i sirene forsøgene. Beholderen blev isoleret i bunden. En frysesonde på Ø270 blev placeret i midten af filterrøret og tilsluttet et spritkøleanlæg som kølede spritten ned til -25 °C. 8 temperatur følere blev placeret i opstillingen 1 på selve sonden, 1 på indersiden af pvc filteret, en 10 mm fra filteret udvendigt og de sidste 5 med 50 mm mellemrum væk fra filteret således at den sidste sensor var placeret længst væk fra filteret (417 mm fra center). Et overblik kan ses i Figur 4.4.1

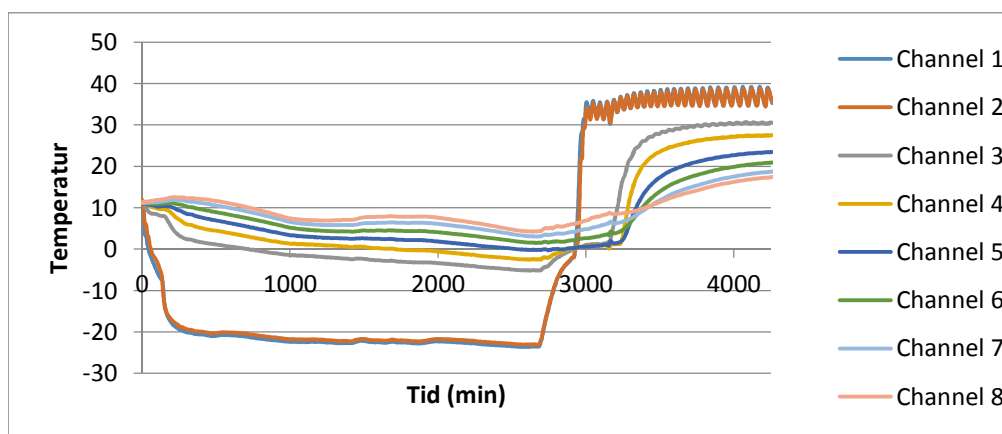


Figur 4.4.1. (a)Fryseanlægget og (b) sensoropstillingen

4.4.2 Resultat

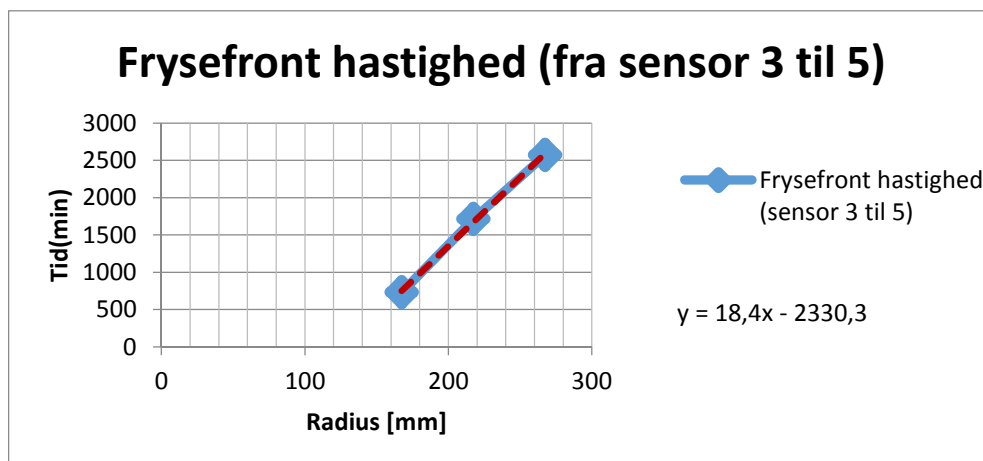
Der blev frosset i 1,8 døgn hvorefter hele opstillingen blev tøet op igen. Frysesonden kølede med -21 grader i gennemsnit.

Målingerne givet i Figur 4.4.2 viste at frysefrontens hastighed mellem sensorerne 3 og 4 var 19.7 minutter/mm. Frysefrontens hastighed mellem sensorerne 4 og 5 var 17.1 minutter/mm. Forskellen i hastigheden skyldes sandsynligvis at frysesonden havde nået en lavere temperatur da frysefronten



Figur 4.4.2. Generelle måleresultater for forskellige afstande til køleelementet

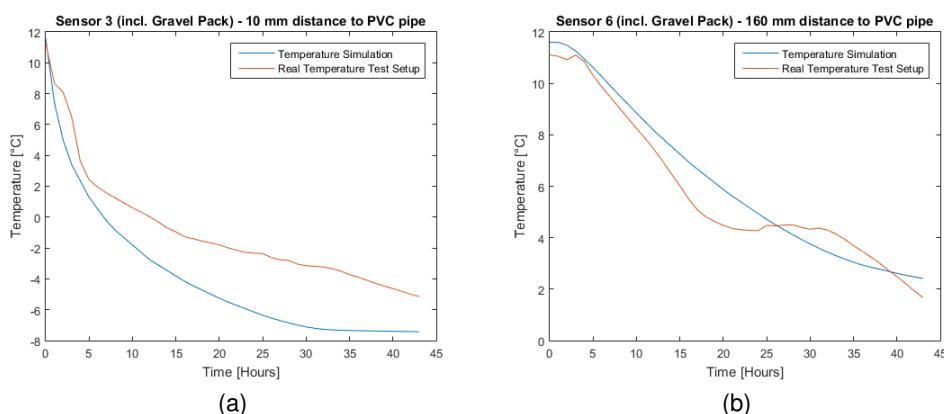
bevægede sig mellem sensorerne 4 og 5 end da den skulle bevæge sig mellem sensorerne 3 og 4. Det kunne ikke lade sig gøre at finde ud af om frysefrontens hastighed var lineær. Går man ud fra at hastigheden er lineær (hvilket den sandsynligvis ikke er), så vil det ud fra de målte resultater tage cirka 12 dage at fryse ud til 1 meter i diameter, men da der er mange ubekendte faktorer der kan spille ind ude i en virkelig boring, kunne dette resultat ikke stå alene. Se Figur 4.4.3



Figur 4.4.3. Måleresultater for frysefrontens hastighed mellem sensor 3 og 5 (nedre)

4.5 Sammenligning mellem teori og eksperimenter

Simulationsopsætningen blev sammenlignet med det reelt udførte fryseforsøg i en boring. Et overblik over resultaterne og sammenligning med eksperimenter kan ses i Figur 4.5.1. Her har vi valgt sensorer 3 og 6 som repræsentative sensorer. Det kan ses på figuren, at frysetidspunktet kan estimeres fornuftigt ud fra simulationerne. Dog giver ændringen i omgivelsestemperaturen et mindre problem, da den ændrer sig signifikant i løbet af fryseperioden.



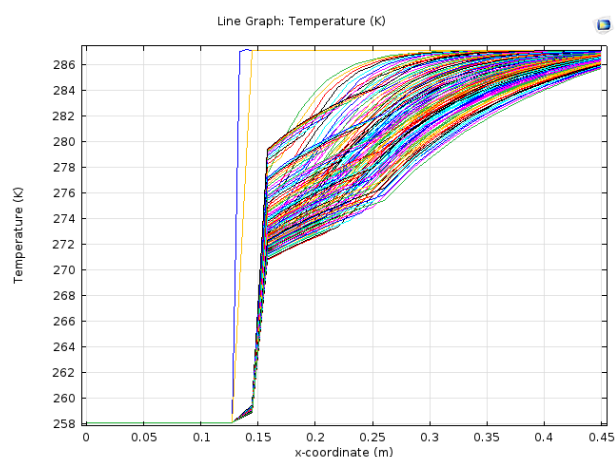
Figur 4.5.1. Sammenligning mellem eksperiment og simulation for (a) sensor 3 og (b) sensor 6. Det kan ses at simulationen kan give en fornuftig estimering af temperaturforløbet, dog helt klart ikke tager hensyn til svingninger i omgivelsestemperaturen, som klart kan ses på de eksperimentelle data

4.5.1 Beregningsværktøj

Da Finite-Element modellen har brug for større beregningskraft og op til flere døgn at beregne, har vi brugt et større sæt af simulationsresultater til at udvikle et simpelt beregningsværktøj, som kan bruges til at estimere tidforbruget ved nedfrysningsprocesser – i og med de præcise simuleringer afviger fra realiteten og kun kan bruges som estimat, bør denne tilnærmelse ikke udgøre en signifikant forskel. Dette værktøj kan estimere nedfrysningstiden i løbet af få sekunder og er implementeret som Matlab script, men også kan køre på alternative open source platforme som f.eks. Octave eller SciLab.

COMSOL resultater som f.eks. vist i Figur 4.5.2 danner grundlaget for dette værktøj. Ved brug af disse data kan man bestemme positionen for frysefronten til enhver tid. Disse data bliver så brugt til at finde koefficienterne på en eksponentialfunktionstilnærmelse for hvert lag (vand, pvc,

grus). Det kan i øvrigt observeres, at det er et stort temperaturskifte hen over PVC røret, som er en god termisk isolator.

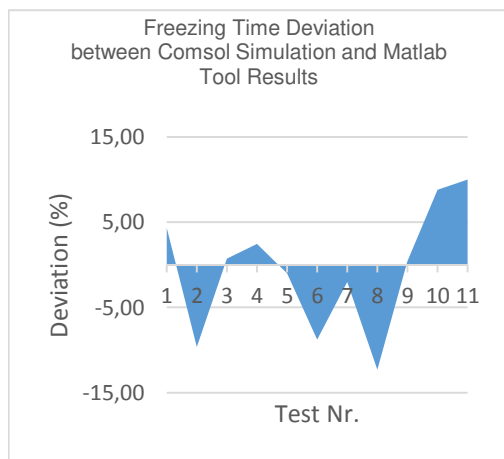


Figur 4.5.2. Temperatur som funktion af afstand til mange tidspunkter – hver linje viser temperaturfordelingen til et bestemt tidspunkt. Resultater fra COMSOL

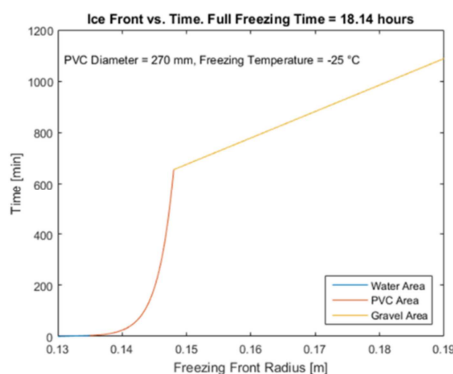
Beregningsværktøjet blev så testet i sammenligning med COMSOL-resultater og op til 12% afvigelse blev fundet for systemparametre liggende inden for de brugte, realistiske mål. Test-resultaterne er givet i Tabel 4.5.1 med en grafisk oversigt på Figur 4.5.3, som også viser et eksempel på hvordan et resultat fra beregningsværktøjet ser ud.

Test Nr.	PVC Ø[mm]	Køletemperatur [°C]	Målepunkt [m]	Frysetid [min.]	Relativ afvigelse [%]
1	280	-35	0.2	555	4.31
2	280	-25	0.16	603	-9.64
3	280	-30	0.18	566	0.70
4	290	-35	0.18	400	2.44
5	290	-30	0.18	606	-1.00
6	290	-25	0.16	571	-8.76
7	270	-35	0.19	551	-2.04
8	270	-30	0.17	584	-12.31
9	270	-35	End of PVC	249	0.40
10	280	-35	End of PVC	228	8.80
11	290	-35	End of PVC	252	10.00

Tabel 4.5.1. Resultater fra tilnærmelsesværktøjet og sammenligning med COMSOL resultater



(a)



(b)

Figur 4.5.3: (a) Afvigelsen mellem beregningsværktøj og COMSOL simulationer og (b) eksempel på resultat fra beregningsværktøj

4.5.2 Opsamling på Laboratorieforsøg og Simuleringer

Samlet set viser forsøg og simuleringer, at det tager mindst 2 døgn for at fryse en boring, når køletemperaturen er omkring -30°C . Det viser sig faktisk også, at grunden til den lange tid er afstanden til køleelementet. Energitransporten sker igennem et PVC-rør, som har en lav termisk ledningsevne, og det betyder at man i sidste ende ikke transporterer så meget energi fra boringen, som køleren kan klare, se Figur 4.5.3 for PVC-effekten. Så konklusionen må være, at den eneste måde at fryse boringen mere effektivt må være indførelsen af flydende gas (f.eks. CO_2) i selve gruslaget, så varmetransporten sker ved hjælp af fluid transport i stedet for varmeledning.

4.6 Stor skala fryseudstyr

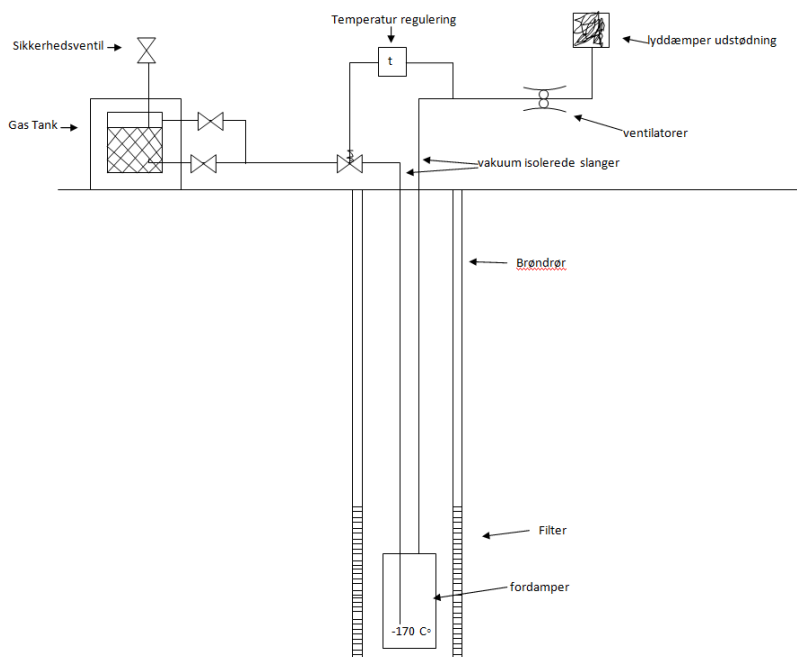
For at kunne få frysefronten længst muligt ud i boringsfilteret uden at skulle fryse i flere måneder blev det fundet at der skulle køres med en lavere temperatur end der blev i fryseforsøget i sandbeholderen. Der blev primært overvejet 3 forskellige slags udstyr med hver sine fordele og ulemper:

- Kompressor frys med sprit, som sandbeholder forsøg.
- Kompressor frys med CO_2 .
- Nitrogen frys.

Stort set er der ikke den store forskel på om man anvender CO_2 eller sprit. Den største forskel er at sprit ikke er velegnet til brug under -50 grader da det vil begynde at danne grødis ved så lave temperaturer, hvilket vil kunne ødelægge anlægget.

Et nitrogen fryseanlæg vil virke på en radikal anderledes måde. Her skal man have kørt en tank med flydende nitrogen ud til boringen. Når den flydende nitrogen lukkes ud vil den fordampe (kogepunkt $-195,8^{\circ}\text{C}$) og dermed trække energi ud af omgivelserne. Dette kan udnyttes til at fryse en boring hvis man lader nitrogenet fordampe i en fordamper der er placeret i boringsfilteret.

Den generelle skitse, som kan anvendes for hver af de tre processer ses i Figur 4.6.1 mens flere processpecifikke detaljer er beskrevet i Tabel 4.3.



Figur 4.6.1. Skitse af opstilling i feltet

Nitrogen frys	Kompressor frys med sprit	Kompressor frys med CO ₂
Gasbeholder og udstyr køres ud til boringen og rigges til	Udstyret køres ud til boringen og rigges til	Udstyret køres ud til boringen og rigges til. Udstyret skal trykprøves efter opstilling
En gasfordamper hejses ned i boringen. evt. med en prop til at isolere filteret fra resten af røret så der kun fryses i filteret	Frysesonden hejses ned i boringen. evt. med en prop til at isolere filteret fra resten af røret så der kun fryses i filteret	Frysesonden hejses ned i boringen. evt. med en prop til at isolere filteret fra resten af røret så der kun fryses i filteret
Der sættes afspærring op omkring boringen således at forbipasserende ikke kan komme til skade på udstyret og det afdampede nitrogen	Der sættes afspærring op omkring boringen således at forbipasserende ikke kan komme til skade eller skader udstyret (kun nødvendigt i befærdede områder)	Der sættes afspærring op omkring boringen således at forbipasserende ikke kan komme til skade eller skader udstyret (kun nødvendigt i befærdede områder)
Der hældes flydende nitrogen ned i fordampers (styret af temperaturen på udstødningsgassen)	Generatoren startes og der fryses, anlægget passer sig selv til der er færdigt med at fryse.	Generatoren startes og der fryses, anlægget passer sig selv til der er færdigt med at fryse.
Anlægget passer sig selv til der er frosset ud til den ønskede diameter. (1200-2000 kg nitrogen/m ³ frossen jord)	For at tø boringen vendes processen og spritten varmes op i stedet for at køles.	Boringen tøs op med varmt vand eller varmelegeme ind til frysesonden kan trækkes op eller boringen er tørt
Boringen tøs op med varmt vand ind til gasfordampers kan trækkes op.	Frysesonden kan trækkes op når boringen er tørt	Resten af boringen kan tøs op mens der ultralydsbehandles, hvis det ønskes
Resten af boringen tør op mens der ultralydsbehandles, hvis det ønskes	Resten af boringen kan tøs op mens der ultralydsbehandles, hvis det ønskes	Boringen renpumpes, og evt. oppumpet slam kan opsamles i sandfang eller lignende
Boringen renpumpes, og evt. oppumpet slam kan opsamles i sandfang eller lignende	Boringen renpumpes, og evt. oppumpet slam kan opsamles i sandfang eller lignende	CO ₂ 'en lukkes ud af anlægget

Tabel 4.3 Procesdetaljer for nedfrysning

4.6.1 Praktiske fordele og ulemper ved frysemedier

Der er fordele og ulemper ved de forskellige metoder. Både nitrogen og CO₂ anlægget vil kræve efteruddannelse af personalet som skal betjene anlægget da der er høje sikkerhedskrav til disse typer anlæg.

CO₂ anlægget må ikke transporteres med CO₂ i, hvilket vil kræve at man skal have en separat beholder til CO₂ med ud til boringen, som først må fyldes på når systemet er samlet og trykprøvet da systemet skal køre med højt tryk (120 bar) kræves der specialudstyr som er dyrt.

Nitrogen anlægget skal bruge et sted mellem 1500-2500 liter nitrogen/m³ jord der skal fryses. Går man ud fra at et 4 meter langt filter skal fryses 1 meter ude i radius, skal der altså bruges omkring 10 m³ nitrogen som skal transporteres ud til boringen.

Det blev besluttet at et fryseanlæg med sprit skulle konstrueres til feltforsøgene da det i forhold til de andre metoder ikke krævede efteruddannelse, sikkerhedskravene var minimale i forhold til de andre typer og anlægget ville blive mere simpelt at opsætte og betjene.

4.6.2 Opsamling på laboratorieforsøg og simuleringer

Samlet set viser forsøg simuleringer, at det tager mindst 2 døgn for at fryse en boring, når køletemperaturen er omkring -30°C. Det viser sig faktisk også, at grunden til den lange tid er afstanden til køleelementet. Energitransporten sker igennem et PVC-rør, som har en lav termisk ledningsevne, og det betyder at man i sidste ende ikke transporterer så meget energi fra boringen, som køleren kan klare, se Figur 4.5.3 for PVC-effekten.

Så konklusionen må være, at den eneste måde at fryse boringen mere effektivt må være indførelsen af flydende gas (f.eks. CO₂) i selve gruslaget, så varmetransporten sker ved hjælp af fluid transport i stedet for varmeledning.

4.7 Felt forsøg med frysning

Det nye fryseudstyr med en større kapacitet blev konstrueret og leveret af Kalundborg køleservice. Der blev derudover konstrueret en frysesonde til feltforsøget frysesonden var 4 m lang og havde en diameter på Ø206 mm. Planen var at frysesonden ville nå ned på en driftstemperatur på -40 °C. Se Figur 4.7.1.



Figur 4.7.1. Frysekompressor

4.8 Boring, DGU nr.: 146.437

Det første fryseforsøg blev foretaget på en kildeplads tilhørende VandcenterSyd (VCS). Der var omkring boringen udført guide-rør i forskellige afstande som kunne bruges til at måle hastigheden på frysefronten.

Der blev i forsøget tilføjet 8 temperatursensorer: Én på frysesonden, én udvendigt på sprit-fremløbet og 6 stk. i guide-rørene. Se Figur 4.8.1. Derefter blev frysesonden sænket ned i boringsfilteret og køleanlægget blev startet. Se Figur 4.8.2.



Figur 4.8.1. Boring DGU nr. 146.437 med monitoringsboringer rundt omkring



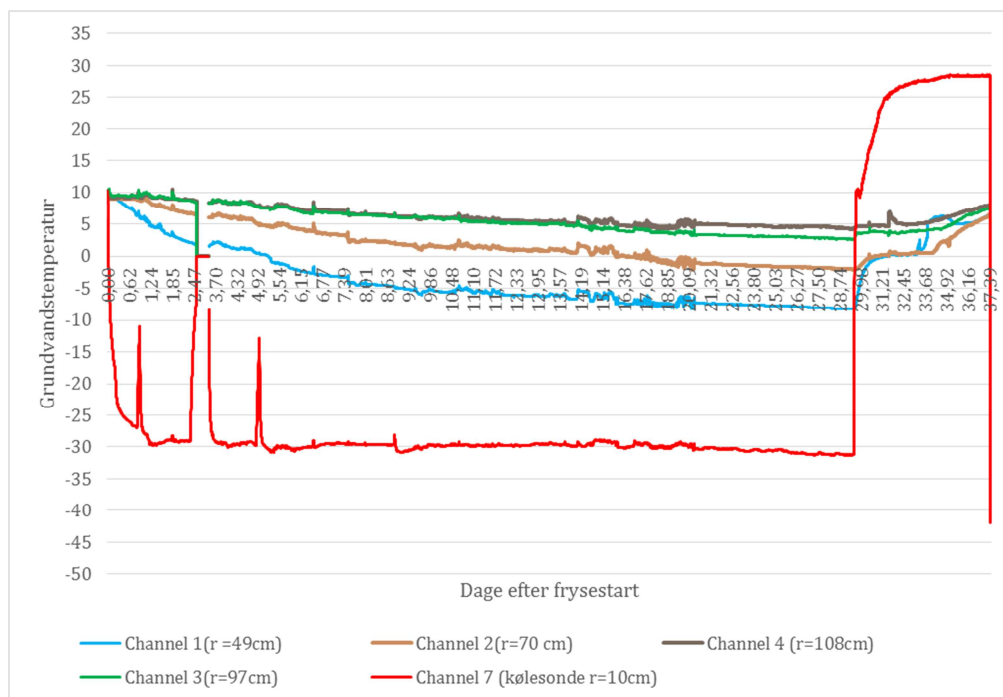
Figur 4.8.2. Fryseelement bliver nedsænket i boring

Optøning blev påbegyndt efter 29 dages indfrysning. Det tog 1.8 døgn at tø boringen igen. Se Figur 4.8.3.

Der blev iværksat en oppumpning af vand umiddelbart efter optøningen. Vandet ledtes igennem en turbiditetsmåler for at se om noget af tilklogningen kunne pumpes løs og ud af boringen.

Selvom målingerne blev foretaget fra begyndelsen af pumpens start kunne vi ikke måle nogen variation i turbiditeten hverken lige i starten eller over tid (>1 times pumpning).

Der blev derfor ikke gennemført en verificerende pumpetest da det skønnedes at resultatet ikke ville vise nogen markant ændring i specifik ydelse.



Figur 4.8.3. Temperatur udbredelsen fra fryseboringen. Bemærk at frysepunkt passeret eftermere end 5 døgn i ca. 0,5 meters afstand. Optøning blev påbegyndt efter 29 døgnns indfrysning

4.9 Boring, DGU nr.: 206.1805

Der er foretaget endnu et fryseforsøg på en kildeplads tilhørende HOFOR as, ved Assermølle. Boringen er DGU nr.: 206.1805. Efter frysningen blev boringen pumpetestet. Som vist på Tabel 4.9.1 har man kunnet registrere en mindre ændring til det bedre efter at boringen var blevet nedfrossen. Denne forbedring var på ca. 10%.

Specifik kapacitet, m ³ /t/m			Forbedring, %	I forhold til etablering, %	
Ved etablering	Før frysning	Efter frysning	Før-Efter	Før frysning	Efter frysning
3,05	2,53	2,82	10,0	83,0	92,5

Tabel 4.9.1. Resultater af fryseforsøg på specifik ydelse ved DGU nr.: 206.1805

En ændring af specifik ydelse på ca. 10% må derfor anses som mindre tilfredsstillende taget tiden i betragtning. Forbedringen er for lille set på kommerciel basis. Metoden giver således ikke valuta for den investerede tid og omkostning.

4.10 Konklusion af oprensning ved hjælp af frysning af borer

At anvende frysning som metode til oprensning af tilkloggede borer er både tidskrævende (lang indfrysningsperiode) og meget energikrævende (kompressorkøling). Resultater i både Odense og på Assermølle viste meget beskedne resultater. Det må derfor konkluderes at frysemetoden alene ikke giver således et brugbart resultat hverken set som tidsforbrug eller energioptimalt.

Den matematiske model viser at frysningmetoden i princippet har stort potentiale til at løsne gruspakningen og dermed assistere med at fjerne urenheder. Det er dog vigtigt, at der formes lukkede kaviteter, da udvidelsen kun finder sted før vandet er fuldstændig frossen. Det betyder, at de spændinger der bliver genereret er ret lille så længe det flydende vand kan undslippe.

Det kunne tænkes at dette er grunden til forskellen mellem startforsøget i laboratoriet og feltforsøgene. Ved det mindre eksperiment blev der frosset fra alle sider og dermed dannes en lukket kavitet af is, mens det ikke nødvendigvis er tilfældet i boringen. For at kunne opnå lukkede kaviteter med sikkerhed ville man dog skulle bruge endnu mere energi og tid end ved det normale forsøg.

Derfor er dette ikke praktikabelt. Desuden kunne det måske være at kombinationen mellem en skal af is og ultralyd kunne virke, men formningen af en sådan skal, ville tage længere tid end den rene frysning, og er dermed heller ikke praktisk anvendeligt.

5. Kombination af frykning af ultralyd

5.1 Princip for kombineret løsning

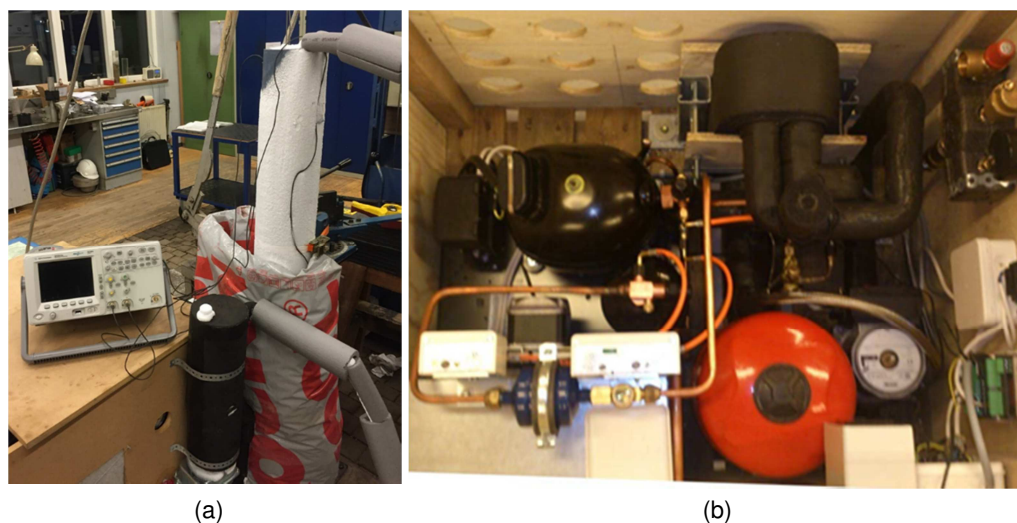
For at undersøge hvilken forbedret transmission af ultralyd og overvinde de mange fase-overgange som blev identificeret i det VTU finansierede projekt blev flere muligheder drøftet. Man kunne forsøge en mekanisk løsning og forbedre kontakten mellem ultralydssonden og boringsvæggen ved at spænde den op mod væggen ved hjælp af mekaniske arme eller hårde fjedre eller hydrauliske stempler.

Disse løsninger blev dog fravalgt da konstruktionerne ville være meget omkostningstunge. Derfor opstod ideen til at man kunne prøve at fryse sonden fast i boringen og dermed bruge isen som medie til at overføre kræfterne til boringsvæggen. I den forbindelse meldte der sig en række kritiske spørgsmål. Se også afsnit 4.1 - 4.3.

- Kan ultralydssonden fungere hvis den er frosset inde i en klump vand?
- Overførelsen af ultralyd til PVC-rør sker bedre gennem is end gennem vand?

5.2 Test forsøg med frykning og ultralyd i Odense

Et mindre fryseaggregat blev konstrueret. Et PVC-rør blev monteret med tæt bund og den indkøbte Push/Pull sonde fra WCU (projektet i 2011-14) blev sat ned i røret og der blev fyldt vand på, se Figur 5.2.1



Figur 5.2.1. Fryseforsøg på værkstedet (a) overblik og (b) fryseren indefra

Udvendigt på røret blev der fastgjort hydrofoner som kan registrere lydintensiteten fra ultralydssonden som hænger indvendigt i røret.

Det første forsøg bestod i at måle intensiteten på ydersiden af PVC-røret ved hjælp af hydrofonerne med Ultralydssonde hængende frit i røret fyldt med vand.

Vi målte ved hjælp af et oscilloskop en intensitet på 2 udvendigt på PVC-røret.

Næste forsøg blev foretaget med samme opstilling, men nu blev ultralydssonden frosset fast i vandet indvendigt i røret. Ved hjælp af et køleelement blev vandet kølet ned ind til hele røret var

stivfrossent. Ultralydssonden havde nu via isen direkte kontakt til PVC-rørets væg. Indfrysningen tog 4,5 time

Intensiteten blev derefter målt og der var en synlig større intensitet (intensitet 4) når der var kontakt mellem PVC-rør og sonde ved hjælp af is frem for flydende vand. Se Figur 5.2.2.



Figur 5.2.2. Intensitetsmåling for (a) flydende vand og (b) fastfrosset sonde

Dette forsøg viste at det var muligt at forbedre lydudbredelsen ved hjælp af det fysiske kontakt mellem sonde og borehulsvæggen ved hjælp af is.

5.3 Resultater med frysning og ultralyd

Pga. af projektets fremskredne tidsplan samt budgetmæssige begrænsninger er der ikke været gennemført tests i hverken i laboratorie eller på stor skala i en boring med kombinationen af ultralyd og frys. Vi har således ingen prøveresultater fra denne type forsøg.

6. Ultralyd med variabel frekvens og intensitet

I løbet af projektet er der indkommet en henvendelse fra et andet firma som pga. det tidligere VTU finansierede projekt, har begyndt at interessere sig for ultralydsrensning af borer.

Hydrofoss ApS bygger og udvikler udstyr til drikkevandsanlæg til skibe baseret på rensning af havvand. Disse anlæg renses og regenereres ved hjælp af ultralyd.

Dette firma har vi indledt et samarbejde med og de har konstrueret en forstærker og en ultralydssonde til rensning af borer.

Dette udstyr er blevet testet i to forskellige borer. En ved Trefor forsynings kildeplads i Kongsted, Jylland og en boring på Hofor's kildeplads ved Lejre, Assermølle Kildeplads.

6.1 **Undersøgelse af ultralydsondes kavitationseffekt som funktion af statisk trykpåvirkning**

Hydrofoss testede den specialudviklede ultralydsonde under stigende tryk og med det formål at få eftervist sammenhængen mellem kavitation og statisk tryk:

- Er kavitationen trykafhængig eller aftager den ved stigende statiske tryk.

6.1.1 **Tryktanktest**

Sonden blev placeret i centeret af filtersektionen og filter + sonde sænkes derefter samlet ned i tryktank.

Der testedes med forskellige effekter i området fra 1250 Watt op til 2000 Watt og med konstant amplitudeindstilling på generatoren.

Der gennemførtes en serie tryktest startende med 6 bar, derefter 10 bar og afsluttes med 20 bar og sonden aktiveres i 10 til 30 minutter.

Trykvalget skal tolkes som et tilsvarende statisk væskesøjletryk til en vandboring med 60 m dybde ned til filtersektion, 10 bar svarende til statisk væskesøjletryk til en vandboring med 100 m dybde ned til filtersektion og endeligt 20 bar svarende til et statisk væskesøjletryk i en vandboring med 200 m dybde ned til filtersektion.

Alle disse dybder svarer til et repræsentativt udvalg af dybder på vandboringer i Danmark. Aktiveringsperioden for sonden øgedes når trykket tilsvarende øgedes med korteste periode på 10 minutter og længste periode på 30 minutter. Inden nedsænkning af filtersektionen + sonde blev opstillingen omviklet med metalfolie omkring filterets yderside, metalfolie med en tykkelse på 15 μm , se Figur 6.1.1.

Hvis ultralydssonden har en kavitationseffekt vil denne effekt mere eller mindre perforere metalfolien og dermed vise at implosionerne også foregår på ydersiden af filtersektionen.



Figur 6.1.1. Filter og sonde hæves op af tryktank. Bemærk at folie viklet om filterrør nu er perforeret

6.1.2 Resultat af tryktanktest

Testforløbet startede med konstant tryk på 6 bar og generatoreffekt på 750 Watt, se Tabel 6.1.1. Resultatet for dette forløb var at folien delvist blev perforeret, ca. 8 – 12 % af arealet blev perforeret på grund af kavitationseffekt. Efterfølgende blev effekten øget til 1000 Watt og det var tydeligt at kavitationseffekten blev forbedret, nu var ca. 18 – 25% af folien perforeret.

Test Nr.	Effekt, W	Aktiveringsperiode, min	Ref. Amplitude, %	Kavitationseffekt, %
Test 1	750	10	80	8-12
Test 2	1000	10	80	18-25
Test 3	1500	10	80	28-30
Test 4	2000	10	80	35-40

Tabel 6.1.1. Test forsøg med variabel effekt og 6 bar statisk tryk

Ved en effektindstilling på 2000 Watt ved 6 bar var det også her meget tydeligt at kavitations-effekten blev forbedret og nu var ca. 30 – 40% af folien perforeret. For alle 4 testforløb ved 6 bar var aktiveringsperioden 10 minutter.

Efterfølgende testforløb var med konstant tryk på 10 bar og generatoreffekt på 1000 Watt.

Resultatet for dette forløb var at perforering af folien var mindre, ca. 4 – 5% af arealet blev perforeret på grund af kavitationseffekt. Efterfølgende blev effekten øget til 1500 Watt og der var en ubetydelig forbedring af kavitationseffekten, nu var ca. 6 – 8% af folien perforeret. Ved en effektindstilling på 2000 Watt ved 10 bar kunne vi observere den bedste kavitationseffekten og nu var ca. 9 – 11% af folien perforeret.

Sidste testforløb var med konstant tryk på 20 bar (svarende til filtersektion 200 meter nede i boring) og generatoreffekt startede på 1500 Watt. Resultatet for dette forløb var at perforering af folien var minimal i det ca. 0,5 – 1% af arealet blev perforeret på grund af kavitationseffekt. Efterfølgende blev effekten øget til 2000 Watt og der var en ubetydelig forbedring af kavitationseffekten, nu var ca. 1 – 2% af folien perforeret.

6.1.3 Konklusion af tanktest

Tryktestforsøg viste en sammenhæng mellem stigende tryk og kavitationseffekt:

- Kavitationseffekten aftager når trykket øges.
- Aftagende kavitationseffekt gjaldt også trods øget aktiveringstid
- En øgning fra 10 minutter til 30 minutter i aktiveringstid skabte ikke bedre kavitationseffekter ved 20 bar.
- Et øget statisk tryk dæmper kavitationseffekten.

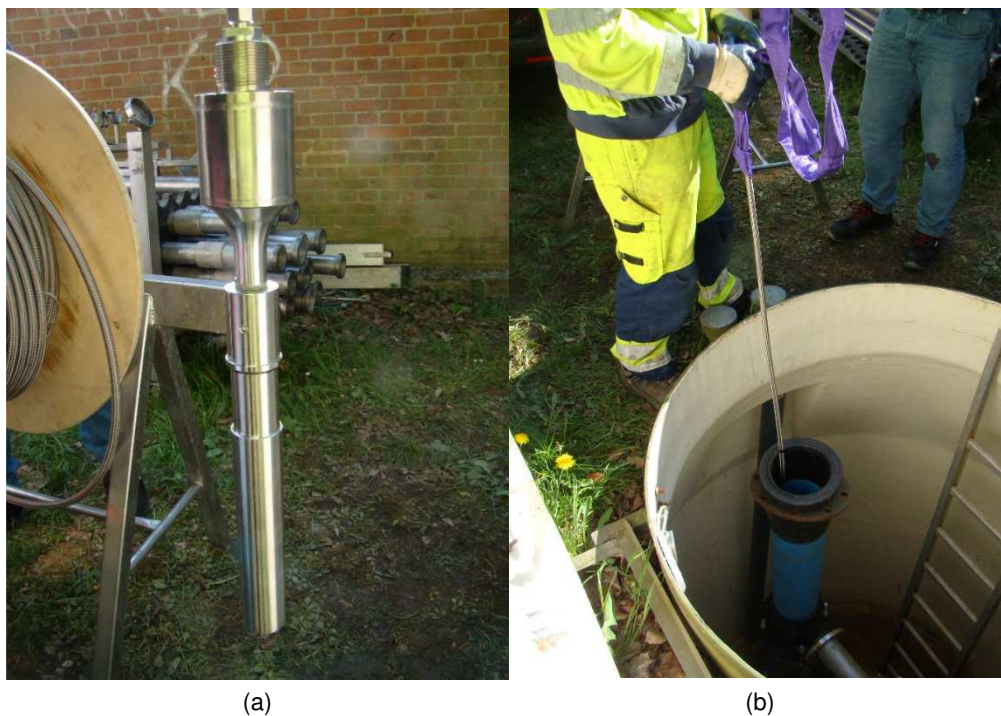
En væsentlig og afgørende konklusion som kan drages af disse tryktanktests er at det statiske tryk dæmper kavitationseffekten. Hydrofoss egne interne test samt senest disse tryktest med statiske tryk op til 20 bar indikerer klart at et sondedesign hvor ultralyd transducerne kan være i direkte kontakt med filtersektionen vil være den mest optimale løsning i forbindelse med regenerering af vandboringer med dybder til filtersektionen større end 60 meter. En standard ultralydsonde som via vandet overfører kavitationseffekten til filtersektionen og videre ud i formationen har ikke en signifikant regenererende effekt ved tryk større end 6 bar.

6.2 Feltforsøg med variabel frekvens og intensitet

Første ultralydsforsøg med Hydrofoss sonden blev gennemført i Trefors boring på Kongsted Kildeplads, DGU nr. 125.1805. Valget af denne boring skyldtes primært, at den var faldet ekstremt meget i ydelse siden den blev udført 1992. I dag yder den kun ca. 4 % af den oprindelige specifikke kapacitet. Denne boring blev velvilligt stillet til rådighed af Trefor, da den ellers skulle opgives.

Boringen blev filmet og pumpetestet før ultralydsforsøget, således at der var en god dokumentation før oparbejdningsforsøget med ultralyd. Den specifikke ydelse inden forsøget blev målt til meget beskedne 0.41 m³/t/meter sænkning og det står jo i skærende kontrast til de 11.32 m³/t/meter sænkning, som boringen oprindeligt ydede.

Sonden blev nedsænket i boringen og blev derefter aktiveret 10 min. og indstillet på ca. 80% af max. kapacitet. Sonden blev derefter hævet en 0,5 meter og genaktiveret. Således blev hele filterstrækningen på 6 meter behandlet. Derefter blev boringen prøvepumpet og filmet igen. På filmene var der små forbedringer at se i nogen af slidserne. Men prøvepumpning gav en indikation af en lille forbedring som dog ikke overbevisende.



Figur 6.2.1. Feltforsøg med Hydrofoss sonde med (a) selve sonden og (b) sonden som nedsænkes i boringen

Næste forsøg blev derfor udført med maksimal effekt og 30 minutters behandling per niveau.

Efter behandling blev boringen pumpetestet og dens specifikke ydelse blev målt. Resultatet af den efterfølgende pumpetest var langt fra overbevisende. I forhold til den oprindelige specifikke ydelse er den efter ultralydsbehandling gået fra 3,6% af den oprindelige specifikke ydelse til 4,6%. Se i øvrigt Tabel 6.3.1.

Der er udført en ultralydstest af en boring tilhørende Hofo på Assermølle Kildeplads, DGU nr. 206.1804, hvor Hofo bistod med feltarbejdet. Her blev testen udført ved maksimal effekt og behandlingstiden blev øget til 30 minutter for hver sektion på 84 cm af filter. Sonden var i konstant bevægelse inden for hver sektion i de 30 minutter. Se Figur 6.2.2.



Figur 6.2.2 Assermølle Kildeplads, ultralydssonden monteret i boringen

Det blev også ved denne test igen forsøgt at centrere sonden i boringen, men da der ikke er 'center guide' monteret på sonden er det tvivlsomt om den under hele forløbet har været placeret eksakt i boringens centerlinje. At sonden muligvis kan have været u-centreret altså være tættere på en af filtersiderne kan også være en årsag til effektreduktionen.



Figur 6.2.3. Kavitationsskader på sonden efter brug



Figur 6.2.4. Hofor boringsservice hjælp med forsøget

6.3 Resultater med variabel frekvens og intensitet

Konklusionen på de gennemførte ultralydsforsøg må være at det hjælper en lille smule. Men virkningen er meget lille. I vores første projekt var konklusionen bl.a. andet virkningen af ultralyd er afhængig af flere faktorer. Dels det vandtryk som det foregår under og forerørets beskaffenhed.

Virkningen kan forbedres ved at skabe en kontakt mellem ultralydssonden og boringsvæggen. Dette har der dog ikke været afprøvet andet end i den lille testopstilling i værkstedet hvor sonden blev fastfrosset til PVC-røret ved hjælp af is. Dette type forsøg er ikke gennemført på en rigtig boring.

Efter at være blevet benyttet i to borer var der tydelig kavitations skader på selve sonden, se figur 6.2.3. Den hurtige slitage på sonden vil være en økonomisk udfordring i forhold til praktisk brug af metoden. Dette kan muligvis udbedres gennem designforbedringer og andet materialevalg.

Samlede resultater fra de to ultralydsforsøg henholdsvis i Kongsted og i Assermølle.

Boring	Specifik kapacitet, m ³ /t/m			Forbedring %	I forhold til etablering, %	
	Ved etablering	Før fryssning	Efter fryssning	Før-Efter	Før fryssning	Efter fryssning
121.805	11,32	0,41	0,53	23	3,6	4,7
206.1804	9,4	20,8	26,4	21	221,3	279,8

Tabel 6.3.1. Samlede resultater fra de to ultralydsforsøg henholdsvis i Kongsted (121.805) og i Assermølle, (206.1804)

7. Konklusion

Der er i projektet blevet gennemført forsøg med udvikling af nyt udstyr med høj ultralydsintensitet for at generere mikrokavitationer i boringens grusfilter. Skal dette ske med nogle af de kendte ultralydsgivere krævedes en relativ høj elektrisk effekt, hvilket kan være vanskeligt at tilvejebringe på nogle lokaliteter ved praktisk feltarbejde.

Der blev derfor gennemført forsøg med udvikling af en "undervands" sirene, hvor princippet om vandslag, (water hammer), som er kendt for at udvikle høje lydtrykniveauer. Der er bygget flere prototyper af sirener, men ingen af de udviklede modeller var, på trods af høje lydtryk, i stand til udvaske hverken okker eller bentonit.

Det blev herefter forsøgt at anvende en piezoelektrisk transducer, som er et kendt værktøj, men her med en tættere forbindelse til PVC- filterrøret. I stedet for en elektro-mekanisk forbindelse blev det forsøgt at fryse vandet omkring transduceren og dermed generere en "fast" forbindelse til filterrøret. Laboratorie forsøg viste et markant højere målbart lydtryksniveau i grus filteret, når sonden var indfrosset. Det var dog ikke inden for projektets rammer tidsmæssigt muligt at eftervise dette ved praktiske forsøg i en rigtig boring.

Affødt af anvendelse af frysning som kontaktskabende metode mellem ultralydsgiver og filterrør blev det vurderet interessant og relevant at undersøge effekterne alene ved frysning. Imidlertid tog indfrysningen under de praktiske feltforsøg væsentligt længere tid end estimeret og samtidig var effekten af indfrysningen mærkbart mindre end ventet, idet der kun blev opnået en forbedring af boringens ydelse med ca. 10 %. Den langsomme indfrysning under feltforhold gør imidlertid metoden mindre egnet (tidsforbruget tælles i mange dage) også i kombination med f.eks. ultralyd.

I en sidste fase af projektet, blev der inddraget en tredje part udenfor projektgruppen, som havde deltaget i udviklingen af en høj intensiv ultralydsenhed, hvor frekvens og intensitet kunne reguleres. Også her viste det sig at være uden større effektivitet og der blev kun opnået beskedne forbedringer af ydelsen i boringen. Der blev opnået forbedringer på mindre end 20% i testboringerne.

Beregninger har vist at intensitet er dybdeafhængig og at også påvirket af grusformationens kornstørrelse og sammensætning. Udstyret skal således både kunne variere i intensitet og frekvensvalg for at påvirke de enkelte dele af en boringskonstruktion, filtervæg, filterslidser, gruskastning og i de omgivende materialer.

Det vil derfor være yderst vanskeligt at anvende udstyret i praksis og igen være ganske tidskrævende. Det er muligt, at der vil kunne opnås en bedre effekt, såfremt at der var tættere kontakt mellem ultralydsgiver og filtervæg, men det er meget omkostningstungt at udvikle et meget variabelt udstyr og forsøgene har vist at behandlingstiden ikke står mål med de opnåelige forbedringer i boringens ydelse.

Sammenfattende må det derfor konstateres, at ultralydsrensning af boringer vanskeligt vil kunne konkurrere med de mere traditionelle metoder til boringsregenerering.

8. Litteratur

1. G. Houben and C. Treskatis: "Water Well Rehabilitation and Reconstruction", McGraw Hill, 2007, ISBN-13: 978-0-07-148651-4
2. T. R. Butkovich: "Thermal expansion of ice", Journal of Applied Physics **30**, 350 (1959)
3. M. Takenaka and R Masui: "Measurement of the thermal expansion of pure water in the temperature range 0-85°C", Metrologia **27**, 165 (1990)
4. T.G. Leighton: "The Acoustic Bubble", Academic Press, 1997, ISBN: 0-12-441921-6
5. C.E. Brennen: "Cavitation and Bubble Dynamics", Cambridge University Press, 2014, ISBN-13: 978-1-107-64476-2
6. L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens, J.V. Sanders: "Fundamentals of Acoustics", Wiley, 2000, ISBN-13: 978-0-471-84789-2
7. M. Akyurt, G. Zaki, and B. Habeebullah: "Freezing phenomena in ice-water systems.", Energy Conversion and Management **43**, 1773-1789 (2002)
8. SONIC Information No.E3, Sonic Umwelttechnik GmbH,: Well regeneration with powerful ultrasound, Results from practical application. E3-09
9. SONIC Information No.E1, Sonic Umwelttechnik GmbH,: Well Rehabilitation with high-energetic Ultrasound. E1-09
10. SONIC Information No. D2-09,:Kurzdarstellung der Forschungsarbeiten am ESWE Institut an der Universität Mainz
11. Brehm, Robert: Investigations on the performance of a mechatronic system for water well rehabilitation using high power ultrasonics, ESDA 2014-20138, Proceedings of the ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis IDETC/CIE 2009 22./23. June 2014, 2014, Copenhagen, Denmark
12. Dircks, Stefan : Ultrasonic Water Well Cleaning, Bachelor Thesis, June, 2014,University of Southern Denmark, Sønderborg



Styrelsen for vand- og
Naturforvaltning
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.svana.dk