

## Danish University Colleges

### **Vandværket i et akustisk perspektiv** **Fyrtårnsprojektet Fremtidens Drikkevandsforsyning**

Ramsay, Loren Mark; Holst-Jensen, Ole

*Publication date:*  
2016

*Document Version*  
Artiklen som den fremstår med udgiverens layout. Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*  
Ramsay, L. M., & Holst-Jensen, O. (2016). *Vandværket i et akustisk perspektiv: Fyrtårnsprojektet Fremtidens Drikkevandsforsyning*. Naturstyrelsen.

#### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

#### **Download policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Vandværket i et akustisk perspektiv

Fyrtårnsprojektet Fremtidens Drikkevandsforsyning:  
Arbejdspakke 7A

April 2016



Miljø- og Fødevarerministeriet  
Naturstyrelsen

**Vandsektorens**  
Teknologudviklingsfond



**Titel:**

Vandværket i et akustisk perspektiv

**Forfattere:**

Loren Ramsay/ Ole Holst-Jensen

**Udgiver:**

Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K  
www.mst.dk

**Foto:**

Forfatterne, Eva Mandrup Kristensen

**Illustration:**

Forfatterne

**År:**

2016

**Kort:**

Ingen

**ISBN nr.**

[xxxxxx]

**Ansvarsfraskrivelse:**

Miljøministeriet offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøministeriet. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøministeriets synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøministeriet finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik. Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

<b>Indhold .....</b>	<b>3</b>
<b>Forord.....</b>	<b>5</b>
<b>Resumé .....</b>	<b>7</b>
<b>Summary.....</b>	<b>8</b>
<b>1. Indledning .....</b>	<b>9</b>
1.1    Formål .....	9
1.2    Udført arbejde.....	9
<b>2. Konceptuelle betragtninger .....</b>	<b>10</b>
2.1    Erfaringer i litteraturen .....	10
2.2    Krav til akustisk monitorering .....	10
2.3    Typer af vedligehold.....	10
2.4    Teoretisk baggrund .....	11
2.4.1    Måling og dataopsamling .....	12
2.4.2    Lydtryk .....	12
2.4.3    Bølgelængde .....	13
2.4.4    Frekvens og sampling frekvens .....	13
<b>3. Materialer og metoder .....</b>	<b>15</b>
3.1    Proof-of-concept målinger.....	15
3.1.1    Vandværker og komponenter .....	15
3.1.2    Anvendt udstyr.....	15
3.2    Udvikling af et praktisk monitoringsystem .....	16
3.3    Demonstration af akustisk monitoringsystem .....	16
3.3.1    Demonstrationsvandværk .....	16
3.3.2    Anvendt udstyr.....	17
<b>4. Resultater .....</b>	<b>18</b>
4.1    Interviews.....	18
4.2    Proof-of-concept målinger.....	20
4.2.1    Vibrationsmålinger .....	20
4.2.2    Lydprofil fra kompressor .....	20
4.2.3    Lydprofil fra en distributionspumpe.....	21
4.2.4    Lydprofil fra luftlæk .....	22
4.3    Strategi for monitorering .....	23
4.3.2    Strategi .....	24

4.4	Praktisk system til akustisk monitoring i fuldskala.....	24
4.4.1	Tid valg .....	25
4.4.2	Signal valg .....	25
4.4.3	Analyse .....	26
4.5	Demonstration på Aquatarium .....	26
4.5.1	Kompressorrummet.....	26
4.5.2	Filtersal Øst .....	27
4.5.3	Udpumpningssal.....	30
<b>5.</b>	<b>Konklusioner og perspektiver.....</b>	<b>31</b>
5.1	Konklusioner .....	31
5.2	Videreudvikling.....	31
5.3	Perspektiver .....	32
5.3.1	Forretningsplan .....	32
5.3.2	Forretningsmuligheder .....	32
5.3.3	Formidling.....	32
<b>6.</b>	<b>Referencer .....</b>	<b>33</b>

# Forord

Denne rapport er en del af fyrtårnsprojektet ”Fremtidens Drikkevandsforsyning”, der blev finansieret af Vandsektorens Teknologiuudviklingsfond og Miljøministeriets Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram – MUDP (tidligere Pulje for Grøn Teknologi).

Vandsektorens Teknologiuudviklingsfond og Miljøministeriets Program for Grøn Teknologi tildelte d.16. september 2013 en støtte på i alt 13. mio. kr. til to parallelle udviklingsprojekter samlet i fyrtårnsprojektet ”Fremtidens Drikkevandsforsyning”. Fremtidens Drikkevandsforsyning er Danmarks hidtil største udviklingsprojekt på drikkevandsområdet og er tænkt som et samlet bud på at håndtere de udfordringer, som forsyninger og virksomheder i branchen står overfor. Det ene projekt, ROSAvand, blev gennemført af VandCenter Syd (VCS), Aarhus Vand og HOFOR i samarbejde med partnere og bestod af seks arbejdsplaner (1-6). Det andet projekt, Aquatarium, blev gennemført af Ringkøbing-Skjern Forsyning i samarbejde med partnere og bestod af to arbejdsplaner (7 og 8), se tabellen nedenfor. Resultater fra de otte arbejdsplaner er branchens bud på, hvordan flere af fremtidens udfordringer i drikkevandsforsyning løses.

Arbejdsplaner	Emne	VCS	Aarhus Vand	HOFOR	Ringkøbing Skjern
1	Intelligent samstyring af indvindingsboringer				
2	Realtidsfortolkning af vandkvalitetsmålinger				
3	Intelligent renoveringsstrategi for vandledninger				
4	Intelligent samstyring af energiproduktion og energiforbrug				
5	Demonstrationsanlæg til blødgøring af drikkevand				
6	Reduktion af forureningsrisiko fra atmosfærisk luft				
7A	Vandværket i et akustisk perspektiv				
7B	Mikroseismik				
8	Biosensor				

Fællesnævneren for Arbejdsplaner 7 og 8 har været demonstration af udstyr på Ringkøbing-Skjern Forsyningens nye vandværk Aquatarium øst for Ringkøbing, se foto nedenfor.



I Arbejdspakke 7, der afrapporteres her, blev der arbejdet på udvikling af to forskellige ideer: 7A: Vandværket i et akustisk perspektiv og 7B: Mikroseismik. Denne rapport handler udelukkende om 7A. Arbejdspakken 7A er udført i et samarbejde mellem VIA University College (Center for Forskning og Udvikling i Byggeri, Energi & Miljø), Ringkøbing-Skjern Forsyning A/S, og Minus10dB i perioden juli 2014 til april 2016. Alectia A/S og NIRAS A/S har bistået med kvalitetssikring.

Projektgruppen for denne arbejdspakke har bestået af:

**VIA University College**

Loren Ramsay (projektleder)

Henrik Bjørn

Victor Marcos Meson

**Minus 10dB**

Ole Holst-Jensen

**Ringkøbing-Skjern Forsyning A/S**

Lars Skou

Søren Jakobsen

Mads Nyeland Aaes

**Alectia**

John Brian Kristensen

Niels Nørregaard

En særlig tak rettes til Vand og Teknik A/S, Silhorko-Eurowater A/S og Kemic Vandrens A/S for at lade sig interviewe om identifikation af de mest almindelige tekniske fejl, der opstår på et vandværk.

# Resumé

Denne rapport er en del af fyrtårsprojektet ”Fremtidens Drikkevandsforsyning”. Rapporten dokumenterer Arbejdspakke 7A ”Vandbehandling i et akustisk perspektiv og omhandler udvikling af et akustisk monitoringsystem til brug ved vandbehandlingsanlæg. Arbejdspakken blev udført af Minus10dB i Beder og VIA University College i Horsens på Ringkøbing-Skjern Forsyningens nye vandværk Aquatarium ved Ringkøbing i perioden juli 2014 til april 2016.

Formålet med denne arbejdspakke er:

- *at udvikle* et praktisk akustisk monitoringsystem
- *at afprøve* monitoringsystemet i fuldskala.

Aktiviteterne udført i forbindelse med Arbejdspakken 7A har omfattet følgende:

1. Litteratursøgning vedrørende akustik monitorering på vandværker
2. Interviews af erfarne vandværks serviceteknikere
3. Proof-of-concept målinger på udvalgte vandværker
4. Udarbejdelse af en strategi for akustisk monitorering
5. Udvikling af et praktisk system til akustisk monitorering i fuldskala
6. Opstilling og demonstration af akustisk monitorering på Aquatarium.

I løbet af arbejdspakken er det lykket at udvikle et akustisk monitoringsystem. Udviklingen er gået fra idefasen til realisering af en praktisk prototype, der blev afprøvet i fuldskala på Aquatarium. Monitoringsystemet består af elementerne 1) lydoptagelse, 2) analyse af de opsamlede lyddata og 3) datapræsentation ved hjælp af en interaktiv brugerflade.

Det overordnede konklusion er, at akustisk monitorering kan anvendes i almindelig drift af et vandværk som supplement til et traditionelt SRO-system. Herudover blev det konkluderet, at kun driftsfejl, der opfylder visse krav, er egnet til akustisk monitorering, at læk af trykluft er den mest relevante fejltypen for akustisk monitorering, at brug af vibrationsmålinger ved hjælp af accelerometre er for dyrt i forhold til udbyttet, at der er behov for både korttids og langtids lydanalyser, samt at man kan skelne lydspektra for forskellige komponenter på et vandværk ved anvendelse af en enkelt mikrofon.

Der er behov for videre arbejde med den udviklede prototype. Videreudviklingsemner inkluderer fastlæggelse af det normale lydbillede, fastlæggelse af alarmgrænser og integration i SRO-systemet. Der vurderes imidlertid *ikke* at være behov for videreudvikling af diagnosticering, da dette med fordel kan foregå manuelt ved hjælp af lydclip.

Det udviklede monitoringsystem har et direkte kommercielt sigte. Et centralt punkt i en forretningsplan er spørgsmålet om hvilken værdi, systemet skaber for kunden. Dette spørgsmål kræver flere erfaringer med prototypen for at kunne besvares. På nuværende tidspunkt er der ikke fundet konkurrerende produkter på markedet. Alle ca. 2500 vandværker i Danmark er ubemandede, hvorfor der er mange potentielle kunder til et automatiseret monitoringsystem. Hertil kommer potentielle kunder i form af vandforsyninger i andre lande samt i beslægtede brancher indenfor visse industrier.



# Summary

This report is part of the lighthouse project "Future Water". The report documents the Work Package 7A, "Water treatment in an acoustic perspective" and provides for the development of an acoustic monitoring system for use in drinking water treatment plants. This work package was carried out from July 2014 to April 2016 by Minus10dB in Beder and VIA University College in Horsens at Ringkøbing-Skjern Forsyning's new waterworks, Aquatarium, located near Ringkøbing.

The purposes of this work package are:

- to develop a practical acoustic monitoring system
- to test the monitoring system in full-scale.

The activities carried out in connection with Work Package 7A comprised:

1. Literature search on acoustic monitoring in waterworks
2. Interviews of experienced waterworks service technicians
3. Proof-of-concept measurements on selected waterworks
4. Development of a strategy for acoustic monitoring
5. Development of a practical system for acoustic monitoring in full-scale
6. Installation and demonstration of acoustic monitoring at Aquatarium.

During this work package, the successful development of an acoustic monitoring system was achieved. The development progressed from the idea phase to realization of a practical prototype, which was tested in full scale at Aquatarium. The monitoring system consists of the elements automatic sound recording, analysis of the collected sound data and data presentation using an interactive user interface.

The overall conclusion of this work package is that acoustic monitoring can be used for in the operation of a waterworks as a supplement for the existing SCADA system. Other conclusions included that malfunctions in the operation of a waterworks must meet certain requirements in order to be suitable for acoustic monitoring, that leakage of compressed air is the most relevant fault type for acoustic monitoring, that the use of vibration measurements using accelerometers is too expensive relative to the advantages, that there is a need for both short-term and long-term sound analyses, and that it is possible to distinguish sound spectra from various components of a waterworks using a single microphone.

There is a need for further work on the prototype. Subjects for future work include determination of the normal sound pattern at a waterworks, the determination of alarm limits and the integration of the acoustic monitoring system into the existing SCADA system. However, it was determined unnecessary to further development fault diagnosis, as this can often be done manually by means of audio clips.

The developed monitoring system has a direct commercial aim. A key point of a business plan is the question of precisely what value the system creates for the customer. This issue requires more experience with the prototype to answer. At present, there is no competing product on the market. As all of Denmark's approximately 2500 waterworks are unmanned, there are many potential customers for an automated acoustic monitoring system. In addition, there are potential customers in water utilities in other countries as well as in related branches such as certain industries.

# 1. Indledning

Dette kapitel omhandler arbejdsprogrammets formål og det udførte arbejde.

## 1.1 Formål

Hvis man står på et vandbehandlingsanlæg og lytter koncentreret over en periode, vil man høre en bred vifte af lyde. Disse lyde indeholder oplysninger, der kan have værdi for monitorering af værket. I mange tilfælde vil lydene blive udnyttet bevidst eller ubevidst af den erfarne vandværksoperatør som input til vurderingen af, om anlægget fungerer, som det skal. Arbejdsplan 7A omhandler automatisk monitorering af vandbehandling ved hjælp af akustik. Ideen er, at denne monitorering skal være til gavn for det ubemandede vandværk, fx i forbindelse med sikring af vandkvalitet, fejlfinding, energioptimering eller vedligeholdelse.

Formålene med Arbejdsplan 7A er:

- *at udvikle* et praktisk akustisk monitoreringssystem
- *at afprøve* monitoreringssystemet i fuldskala.

Udviklingsarbejdet er foregået hos Minus10dB i Beder, indledende tests er udført på en række vandværker i Østjylland og afprøvning i fuldskala er foregået på Ringkøbing-Skjern Forsynings nye vandværk Aquatarium ved Ringkøbing.

## 1.2 Udført arbejde

Aktiviteterne udført i forbindelse med Arbejdsplan 7A har omfattet følgende:

1. Litteratursøgning vedrørende akustisk monitorering på vandværker
2. Interviews af erfarne vandværksentreprenører
3. Proof-of-concept målinger på udvalgte vandværker
4. Udarbejdelse af en strategi for akustisk monitorering
5. Udvikling af et praktisk system til akustisk monitorering i fuldskala
6. Opstilling og demonstration af akustisk monitorering på Aquatarium.

# 2. Konceptuelle betragtninger

Dette kapitel omhandler arbejdsprogrammets baggrund og angiver en række konceptuelle betragtninger.

## 2.1 Erfaringer i litteraturen

Anvendelse af akustik og vibrationer i monitoringsøjemed er kendt fra hverdagen, fx monitoring af et sovende barn ved hjælp af en babyalarm eller monitoring af rystelser i en vaskemaskine under centrifugering. Akustiske målinger er også tidligere anvendt eller undersøgt i vandbranchen. Eksempler inkluderer lækagesøgning i distributionssystemet (Holley, 2010), måling af vandkvaliteten (Chouhan *et al*, 2012), vurdering af flowregime ved bundbeluftning (Ajbar *et al*, 2009), desinfektion ved brug af akustisk kavitation (Jyoti *et al*, 2001), detektering af terrorist indbrud i et distributionssystem (Quesson *et al*, 2009) samt monitoring af kavitation (Cudina, 2003). Desuden er der erfaring med brug af vibrationer til vurdering af en pumpe kavitation (McKee *et al*, 2015) og tilstand (Carden *et al*, 2004).

Der blev ikke fundet referencer i litteraturen, hvor akustisk monitoring ved hjælp af mikrofoner er anvendt på et vandbehandlingsanlæg.

## 2.2 Krav til akustisk monitoring

For at være en kandidat til akustisk monitoring, skal et potentielt problem være målbart, dvs. det skal afgive lyd for at være en kandidat for akustisk monitoring. Desuden må der ikke være en alternativ måde at monitorere problemet på, der fx er mere følsom eller billigere. Endelige skal man prioritere potentielle problemer på basis af sandsynlighed for at fejlen forekommer og konsekvensen af fejlen. Her kan man låne den simple vurderingsmodel, der også anvendes til prioritering af risici i forbindelse med dokumenteret drikkevandssikkerhed (DANVA, 2004), se Figur 1. De røde områder har størst interesse for en akustisk monitoring.

Konsekvens	Stor	Grøn	Rød	Rød	Rød
	Mellem	Grøn	Gul	Gul	Rød
	Lille	Grøn	Gul	Gul	Gul
		Meget lille	Lille	Mellem	Stor
		Sandsynlighed			

Figur 1 Simple vurderingsmodel for risikoniveau (prioritet: rød = høj, gul = mellem, grøn = lav).

## 2.3 Typer af vedligehold

Vandværker har mulighed for at benytte sig af forskellige vedligeholdelsesteknikker. Ofte anvender vandværker en teknik, der kaldes afhjælpende vedligehold. Her udføres vedligeholdelse kun efter, at en fejl er opstået. Siden 1950'erne har industrien i stigende grad benyttet sig af teknikken forebyggende vedligehold for bl.a. at undgå driftstab (Davies, 1990). Her udføres vedligeholdelse før der opstår en fejl. Forebyggende vedligehold kan inddeles i 1) tidsbaseret vedligehold, hvor vedligeholdelse udføres efter et fast tidsinterval, uanset om der er et aktuelt behov og 2) tilstandsbaseret vedligeholdelse, hvor vedligeholdelse baseres på maskinernes faktiske tilstand.

I andre brancher, udnyttes vibrationssensorer på fx roterende maskiner til at understøtte tilstandsbaseret vedligehold (Henriquez *et al*, 2014).

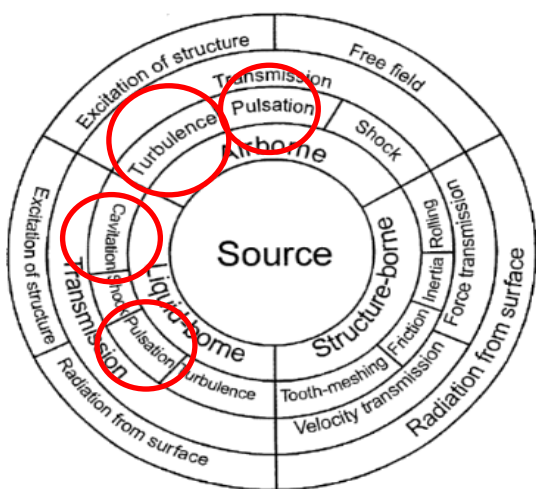
**Tabel 1** Oversigt over forskellige vedligeholdelsesteknikker.

Afhjælpende vedligehold	Forebyggende vedligehold
Efter en fejl er opstået	tidsbaseret
	tilstandsbaseret

Akustisk monitoring på et vandværk kan tænkes at indgå både som afhjælpende vedligehold og som tilstandsbaseret vedligehold.

## 2.4 Teoretisk baggrund

Lyd fra og i maskiner dannes i de tre medier: Luft, væske og struktur. I strukturer kaldes lyden strukturlyd eller vibrationer. Disse vibrationer omsættes til trykbølger i de flader, der grænser op til luft eller væske, og trykbølgerne udbreder sig i de rum, der omgrænser mediet. En oversigt over kilder til maskinstøj og dens udbredelse ses i figuren med den såkaldte Holst disk:



**Figur 2** Holst disk. Oversigt over kilder til maskinstøj og dens udbredelse.

I figuren ses kildernes og udbredelsesvejens inddeling i de tre medier. Støjkilderne er kategoriseret efter hvordan de er opstået og hvilken særlig natur de udviser. Af speciel interesse for denne arbejdsopgave er kilderne: 1) Pulsation i kompressorer og 2) pumper, turbulens i trykluftsystemet ved eventuelle utætheder samt 3) kavitation i vandstrømningen (ISO/TR 11688, 1992).

Lydbølger i luft er trykbølger, der udbreder sig fra kilden i alle retninger i det rum, som kilden befinder sig i (Jacobsen, 2011). Trykket dannes ved en vibrerende overflade, som for eksempel en højtalermembran, en tromme eller en overflade på en maskine.

Lydbølger kræver et medie for at forplante sig væk fra lydkilden. I denne arbejde er luft det relevante medium.

#### 2.4.1 Måling og dataopsamling

Transducere kan måle lyd (mikrofoner/hydrofoner) eller vibrationer (accelerometre) og omsætte disse til et elektrisk signal. Accelerometre kan måle vibrationer i en, to eller tre retninger. Denne arbejdsopgave fokuserer mest på måling ved hjælp af mikrofoner.

For at opsamle lyddata kan lyd optages med en dataopsamlingsenhed, der kan omsætte trykbølgerne til et digitalt signal ved hjælp af en mikrofon. Digitale signaler er serier af tal, som kan bearbejdes i signalanalyserutiner. Med disse kan tidsforløb, frekvensanalyser, niveauer, audio (medhør) mm. analyseres.

Såfremt der ønskes optagelse af flere signaler samtidig (fx fra flere mikrofoner i samme eller forskellige rum), kræves multi-kanalsmåleudstyr. Hver retning på et accelerometer kræver sin egen målekanal.

#### 2.4.2 Lydtryk

Lydtryk er den lokale trykforskel mellem det øjeblikkelige tryk, der forårsages af en lydbølge og det omgivende tryk. Lydtryk er en kraftpåvirkning per arealenhed og måles med SI-enheden Pascal [Pa], som svarer til Newton pr. kvadratmeter. Amplituden af en lydbølge er ofte karakteriseret af dens lydtryk.

Decibel [dB] er en logaritmisk enhed, som udtrykker forholdet mellem lydtrykket ved et niveau (i anden potens) og lydtrykket ved en referenceværdi (i anden potens). dB-skalaen bruger en referenceværdi for lydtryk på 20 µPa ved 1 kHz. En decibel [dB] er en tiendedel bel [B]. På grund af den store forskel i lydtryk i Pa, fra 20 µPa til 60 Pa anvendes dB skalaen, idet den giver en mere overskuelig talværdi.

Omdannelse af lydtryk "p" målt i Pascal til lydtrykniveau "L<sub>p</sub>" målt i dB gøres som følger:

$$L_p(dB) = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2}, \text{ hvor } p_0 = 20 \mu Pa$$

Udvalgte lydtrykniveauer målt i Pascal i dB angives nedenfor:

- |                             |         |                   |
|-----------------------------|---------|-------------------|
| • Høretærsklen ved 1000 Hz: | 20 µPa  | svarer til 0 dB   |
| • Almindelig tale:          | 0,02 Pa | svarer til 60 dB  |
| • Smertegrænsen:            | 60 Pa   | svarer til 130 dB |

På grund af ørets forskellige følsomhed ved forskellige frekvenser vægtes støj ofte med en frekvens korrektion kaldet "A" vægtning. Med denne vægtning af støj optaget med ideelt optageudstyr fås en samlet værdi, kaldet det A vægtede lydtryk, som modsvarer i styrke den subjektive opfattelse af lyden.

Lyd, der udstråles i et frit rum til alle sider, falder i lydtrykniveau med 6 dB per fordobling af afstanden fra lydkilden. To ens lydkilder i samme rum resulterer i et lydtryk, der er 3 dB højere (70dB + 70dB = 73 dB).

### 2.4.3 Bølgelængde

Bølgelængde er afstanden mellem fx to bølgetoppe på en sinuskurve og beregnes som:

$$\text{bølgelængde } \{\lambda\} = \frac{\text{lydhastighed } \{v\}}{\text{frekvens } \{f\}}$$

Lydhastigheden i luft ved stuetemperatur er  $v=340$  m/s. Udvalgte bølgelængderne ved forskellige frekvenser angives nedenfor:

- 10 m ved 34 Hz
- 1 m ved 340 Hz
- 0,1 m ved 3400 Hz

De lange bølgelængder udbreder sig mere uhindret end de korte. Derfor må der måles/lyttes tættere på en lydkilde, for at de korte bølgelængder ved de højeste frekvenser opfattes.

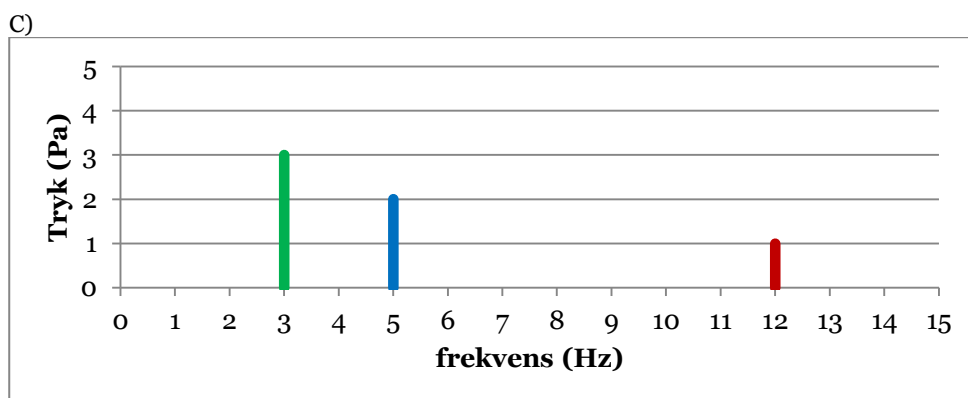
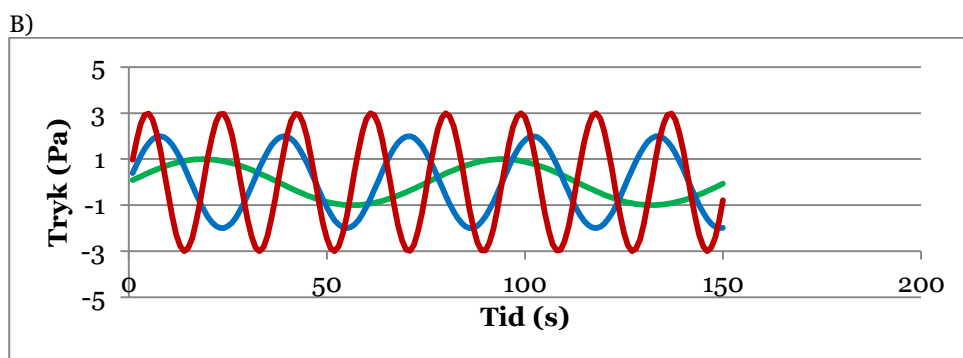
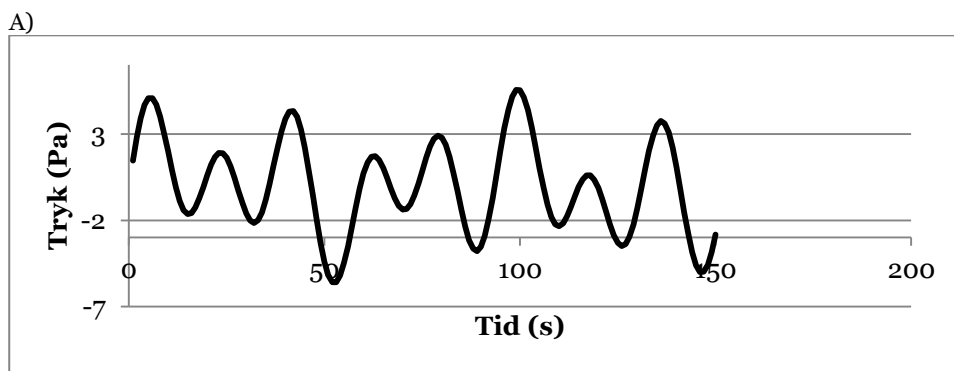
### 2.4.4 Frekvens og sampling frekvens

Frekvens er antal bølger per sekund. Frekvens måles i hertz [Hz], som svarer til enheden  $s^{-1}$ . I luft kan mennesker høre fra ca. 20 Hz op til ca. 20.000 Hz. Det typiske stemmeleje for mænd og kvinder er hhv. 85 - 180 og 165 - 255 Hz. Mange maskiner (som fx pumper) afgiver en grundfrekvens mellem 20 og 60 Hz svarende til det omdrejningstal, som maskinen kører med.

En overtone er en bølge med en frekvens, der er et positivt heltal ganget med frekvensen af grundtonen. Hvis grundtonen er 50 Hz, er de første tre overtoner på hhv. 100 Hz, 150 Hz, og 200 Hz.

Når en lyd optages, skal der fastlægges en sampling frekvens. Sampling frekvensen skal være mindst dobbelt så stor som den frekvens, der ønskes målt. Dette skyldes, at det er nødvendigt at have oplysninger om, hvad der sker mellem gentagne enheder i bølgemønstret (dvs. kurvens form mellem to toppe). I dette projekt er der typisk anvendt en sampling frekvens på 12.000 Hz (måling 12.000 gange i sekundet) for at kunne få oplysninger om lyd med en frekvens på ca. 0 - 6.000 Hz. I praksis kan alle frekvenser over 6.000 Hz filtreres væk for ikke at forstyrre signalet.

**Fourier transformation.** En optagelse af et lydsignal kan vises grafisk som en funktion af lydtryk mod tid (se den sorte kurve i Figur 3A nedenfor). For at analysere optagelsen benyttes den observation, at funktionen i tidsdomænet kan nedbrydes til en række sinus og cosinus funktioner med hver deres frekvens og amplitude (se Figur 3B), hvor summen af disse er lige med den oprindelige funktion. Disse bestanddele kan vises i et spektrum i frekvensdomænet (se Figur 3C).



**Figur 3** A) Det optagne lydssignal som funktion af tid. B) Frekvenskomponenterne af funktionen. C) Det transformerede lydssignal. Optagelsen viser et frekvensindhold bestående af tre frekvenser på 3, 5 og 12 Hz.

Denne omdannelse kaldes for Fourier transformation og kan beregnes ved at benytte nedenstående ligning ( $\omega$  er vinkelfrekvensen,  $e$  er grundtallet for den naturlige logaritme og  $i$  er den imaginære enhed). Fast Fourier Transform (FFT) (Bigham, 1974) er en algoritme, der ofte anvendes til digital signalbehandling, fordi den hurtigt kan beregnes på en computer. FFT beregner Fourier transformationen ud fra en serie af diskrete værdier i stedet for at bruge integralet nedenfor:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(t)e^{-i\omega t} dt$$

# 3. Materialer og metoder

I dette kapitel angives de materialer og metoder, der blev anvendt ved de udførte undersøgelser.

## 3.1 Proof-of-concept målinger

### 3.1.1 Vandværker og komponenter

For at belyse om diverse lyde og vibrationer på vandværker kan give værdifulde målinger i monitoringsøjemed, blev der udført målinger på en række vandværker i Østjylland. Det drejer sig om følgende vandværker:

- Rugballegaardværket (ved Horsens)
- Skovby Vandværk
- Gl. Hørning Vandværk
- Hørning Stationsby Vandværk.

Med undtagelse af Hørning Stationsby Vandværk, var der tale om ældre værker, hvilket blev valgt for at undersøge lyd fra komponenter i forskellige vedligeholdelsesstande.

Der blev udført målinger af vibrationer på pumperne og lyd flere steder på værkerne. For at opnå en erfaring over variationen i lyd karakteristiken for samme type komponent fra værk til værk, blev der fokuseret på følgende komponenter:

- Kompressorer (kan anvendes både til trykstyrede ventiler, beluftning og returskylning)
- Distributionspumper (ofte frekvensstyret)
- Magnetventiler og ventiler med pneumatisk akkuator

### 3.1.2 Anvendt udstyr

Proof-of-concept målingerne blev gennemført med følgende udstyr:

Transducere (mikrofoner/vibrationsmålere):

- Accelerometre: Brüel & Kjør type 4524 triaxialt
- Mikrofoner: Brüel & Kjør type 4189

Dataopsamling:

- Frontend: Datatranslation usb type DT9837A, 4 kanaler; tilsluttet PC
- Sampling rate mikrofoner (22.000 Hz)

Lydoptagelserne fra proof-of-concept målingerne blev optaget og gemt med programmet "QuickDAQ" fra firmaet Datatranslations. Analyser af signalerne blev lavet med en Minus10dB Toolbox i MATLAB.



### 3.2 Udvikling af et praktisk monitoringsystem

Erfaringerne fra proof-of-concept målingerne blev anvendt til at udvikle en brugerflade til anvendelse på vandværket til grafiske og auditive analyser. Der blev lagt vægt på:

- at opsamle de rigtige data
- at analysere de opsamlede data
- at præsentere data på en entydig måde som danner et fornuftigt beslutningsgrundlag for indgreb.

Brugerfladen til håndtering af indsamlede lyddata, kaldet AquAcoustic, er udviklet under arbejds pakken af Minus10dB. Formålet med dataopsamlingen og analyserne er at kunne indsamle lyddata i relevante positioner i et vandværk. Derved kan regelmæssige og uregelmæssige hændelser registreres i form af lyd.

Da lyddata skal have en god opløsning for at have tilstrækkelig kvalitet til den efterfølgende analyse, bliver datamængderne meget store, hvis alle data skal opbevares. Derfor blev det valgt at bevare lyddata i fuld opløsning i en uge samt at gemme komprimerede data for altid. Operatøren kan dermed analysere i detaljen, hvad der er hændt inden for en uge, og gemme relevante data til senere brug.

Ved udvikling af brugerfladen er det tilstræbt, at den fungerer enkelt og intuitivt.

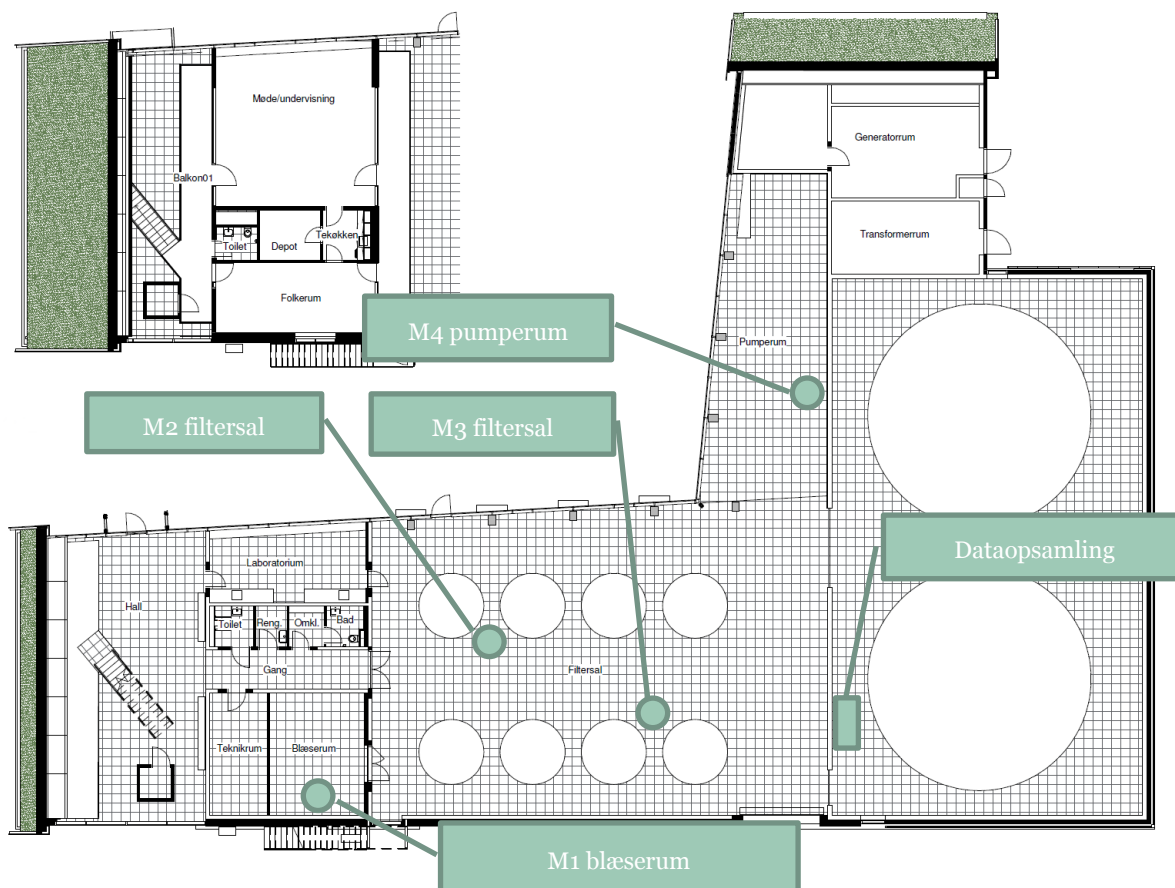
### 3.3 Demonstration af akustisk monitoringsystem

#### 3.3.1 Demonstrationstvåndværk

Ringkøbing-Skjern Forsyningens nye vandværk Aquatarium blev anvendt til demonstration af det udviklede system. På Aquatarium blev der opstillet fire mikrofoner, se Figur 4.

Hovedformålet med de valgte placeringer var for at:

- monitere kompressorerne (M1)
- monitere trykløftstyrede ventiler i filtersalen (M2, M3)
- monitere distributionspumper (M4).



**Figur 4** Oversigt over placering af mikrofoner ved demonstration på Aquatarium.

### 3.3.2 Anvendt udstyr

Målingerne på Aquatarium blev gennemført med følgende udstyr:

Transducere (mikrofoner/vibrationsmålere):

- Accelerometre: Brüel & Kjær type 4524 triaxialt
- Mikrofoner: Brüel & Kjær type 4189

Dataopsamling:

- Frontend: Datatranslation usb type DT9837A, 4 kanaler; tilsluttet PC
- Sampling rate mikrofoner (12.000 Hz)

Data blev analyseret ved det udviklede softwareprogram AquAcoustic.

# 4. Resultater

I dette kapitel angives resultater fra de gennemførte aktiviteter.

## 4.1 Interviews

Som en del af arbejds pakken blev der gennemført interviews hos otte tekniske vandværksekspertes i fire virksomheder for at identificere de mest almindelige tekniske fejl, der opstår på et vandværk. Eksperteserne havde til sammen 199 års erfaring med vandbehandlingsanlæg. I interviews blev hver af de identificerede fejl forsøgt karakteriseret i forhold til relevansen for projektet bl.a. ved dens hyppighed, konsekvens og potentiale for at kunne høres, og alternative monitoringsmuligheder, se krav i afsnit 2.2. Desuden blev det vurderet om fejlen omhandler vand, luft eller andet.

Inden interviews blev gennemført, forventede projektgruppen, at vibrationsmålinger med accelerometre på distributionspumper kunne have interesse for projektet, bl.a. fordi andre brancher i forvejen anvender vibrationsmålinger til roterende maskiner. Herudover var det projektgruppens forventning, at lydmålinger med mikrofoner muligvis kunne anvendes til at registrere lyde fra mange forskellige komponenter samtidigt, på trods af at der ikke fandtes tidligere erfaringer med denne type monitoring, og at der var større risiko for, at forskellige lyde kunne forstyrre hinanden. Blandt de lyde, der forud for interviews var identificeret var:

- Forhøjede niveauer for enkelte komponenter, som tyder på operationsfejl eller slitage
- Kavitation i pumpe eller ventil
- Følsomt omdrejningstal i forhold til strukturen
- Slitage i lejer giver forhøjede lydniveauer
- Vandslag ved ventillukninger
- Lækage i trykluftslanger
- Kompressorer starter hyppigere på grund af utæthed i systemet
- Kompressorer kører længere tid på grund af slid eller utætheder
- Ventilens lukkefunktion ændres på grund af slid

De gennemførte interviews tegnede et overraskende, men tydeligt billede af, at det er trykluft (frem for vand), der er den hyppigste årsag til fejl, der giver afvigende lyd på et vandværk. Luftfejl kan resultere i flere forskellige typer af problemer, fx mangelfuld iltning af vandet, ventilfejl, mangelfuldt returskyl, termisk fejl på maskiner og forøget energiforbrug.

Tabel 1 viser en liste over komponenter, som kan svigte og kan medføre en lyd, der kan monitoreres.

Komponent	Fejl	Årsag
Kompressor	Forøget energiforbrug, hyppig start, risiko for at kompressoren kører varm og kilerem springer	Slidt kilerem som giver pivlyd ved start af kompressoren
	Forøget energiforbrug, motoren støjer mere	Tilklogget luftfilter
	Kan ikke komme af med luften	Sikkerhedsventil sidder fast
	Trykket mellem stempler fjernes, kompressoren har svært ved at starte og kommer langsomt op i omdrejninger	Aflastningsventil svigter – den styres typisk af SRO eller en timer fx 1 gang om døgnet
	Forøget energiforbrug, kompressoren kører oftere	Utæt kontraventil, der giver en konstant hvislende lyd
	Forøget energiforbrug	Kondensvandsaftap sidder fast
	Kompressoren starter ikke	Slidte ventiler
Luftventiler	Pneumatisk 5/2 ventil (skifter strømning mellem to porte) giver forringet vandkvalitet, forhøjet energiforbrug	Utætheder
	Udluftningsventil på trykfilter svigter og presser vandet ud af filtret – medfører dårligt vandkvalitet og kan medføre fravær af støj fx fra luftudladeren i skyllevandstanken	Ventil sidder fast i lukket stilling
	Udluftningsventil/vakuumafbryder ved rentvandstank svigter og vakuum medfører kollaps af rentvandstanken	Tilstoppet luftfilter
Blæser, beluftning	Forøget energiforbrug og temperatur stiger på blæser	Tilklogget luftfilter, der trænger til udskiftning
	Luftlommer i sandfiltre og dårlig vandkvalitet da opholdstiden er for kort	For kraftig indblæsning som medfører rislen og klukken ved filtret
Blæser, returskyl	Sikkerhedsventil på skylleluft lukker ikke – larmer meget	Slidte blæserlejer
Trykluftslange	Manglende beluftning, returskylning eller styring af ventiler	Trykluftslange hopper af
Pumper, distribution og skyllevand	Forøget energiforbrug, pumpen kører varm	Kavitation forårsaget af lang sugeledning eller utæt bundventil
	Forøget energiforbrug, der kommer stigende	Slidte kuglelejer – kan opstå indenfor første halvår
Affugter	Kondensvand i værket, gradvis mere støj og forøget energiforbrug	Tilstopning af filter
Vakuumafbryder	Afbryderen i svanehalen efter sandfiltre svigter og filtre tømmes for vand ved stilstand	Tilstopning af vakuumafbryder
Vandventil	Forøget energiforbrug	Knækket spindel (sjælden) eller ventil, der hænger
	Magnetventiler står og 'klikker' og dermed slides	For højt tryk for styrluften
Eltavlen	Varmeudvikling og 'brummelyd', der varsler kommende nedbrud	Spole ved kontakter er dårlig

**Tabel 1** Liste over komponenter, der kan svigte og monitoreres ved hjælp af lyd.

I løbet af de gennemførte interviews fremkom en række kommentarer vedrørende erfaringer, der ikke passer ind i ovenstående skema. Et udvalgt af disse kommentarer angives nedenfor:

- Hovedparten af fejldiagnoser sker med hjælp af lydbilledet. Ved vandværksbesøg lytter man først, hvorefter man ser og til sidst måler.
- Frekvensregulering af pumper ændrer på lydbilledet. Der er visse frekvenser/omdrejningstal, hvor vibrationsniveauet stiger, fordi strukturen har en egenfrekvens sammenfaldende med omdrejningstallet.
- Langsomme ændringer i lydbilledet (snigende fejl) risikeres at overses af passeren, som tilvænnes til lyden. Et objektive monitoringsystem vil ikke have denne svaghed.
- Der er også lyde ude ved kildepladsen, fx 1) utæt stigerør, der høres via pejlestudsene, og 2) guiderør, der er svejset på stigerøret i boringen løsnes og klapper efter mange års vibration forårsaget af pumpens bevægelser.
- Kavitation kommer typisk ikke snigende, men på grund af fejldimensionering.
- Utætte ventiler kan være svære at spore, da de ikke giver meget lyd.
- Der kan være mange uregelmæssigheder under indkøring af et nyt vandværk. Der kan også introduceres nye fejl ved et servicebesøg.
- Der findes i forvejen vibrationsmålesystemer, der kan afsløre, om lejerne er slidte.
- Luftindtag til blæser kan give så meget larm, at der kommer klager vedrørende ekstern støj.

## 4.2 Proof-of-concept målinger

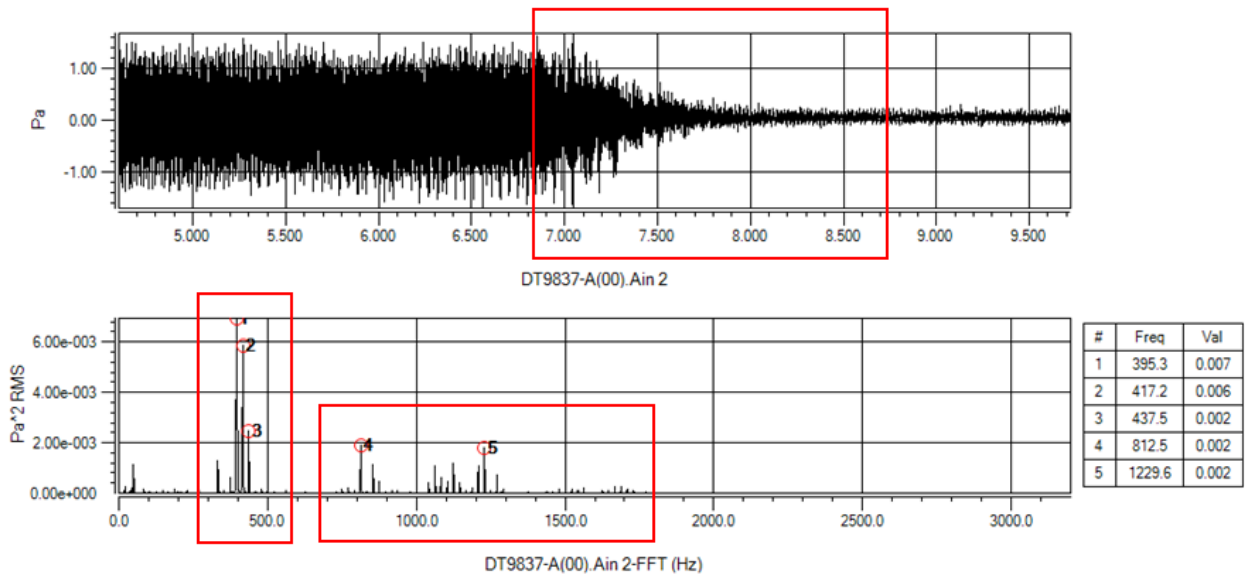
For at karakterisere lydbilledet på et vandværk, er der foretaget vibrations- og akustiske målinger på en række østjyske vandværker, se afsnit 3.1, hvor der blev optaget øjeblikk-billeder af lydprofiler for udvalgte komponenter.

### 4.2.1 Vibrationsmålinger

Måling af vibrationer på distributionspumper tjener det formål at bestemme lejernes tilstand med henblik på vedligeholdelse. Det blev vurderet ved ovennævnte interviewundersøgelse af erfarne vandværksekspertter, at pumpemålinger ikke er interessante for denne arbejdsopgave, fordi pumperne har lange udslidningsforløb (ca. 10 – 15 år), og at vandværker ofte har reservepumper, der automatisk indkobles ved fejl, hvormed konsekvensen ved fejl er meget begrænset. For at kunne registrere lejetilstanden med vibrationsmåling, vil det endvidere være nødvendigt at måle på lejer i hver pumpe, dvs. anvende mange målekanaler, hvilket vil fordyre monitoringen betydeligt. Derfor blev det besluttet ikke at arbejde videre med vibrationsmålinger.

### 4.2.2 Lydprofil fra kompressor

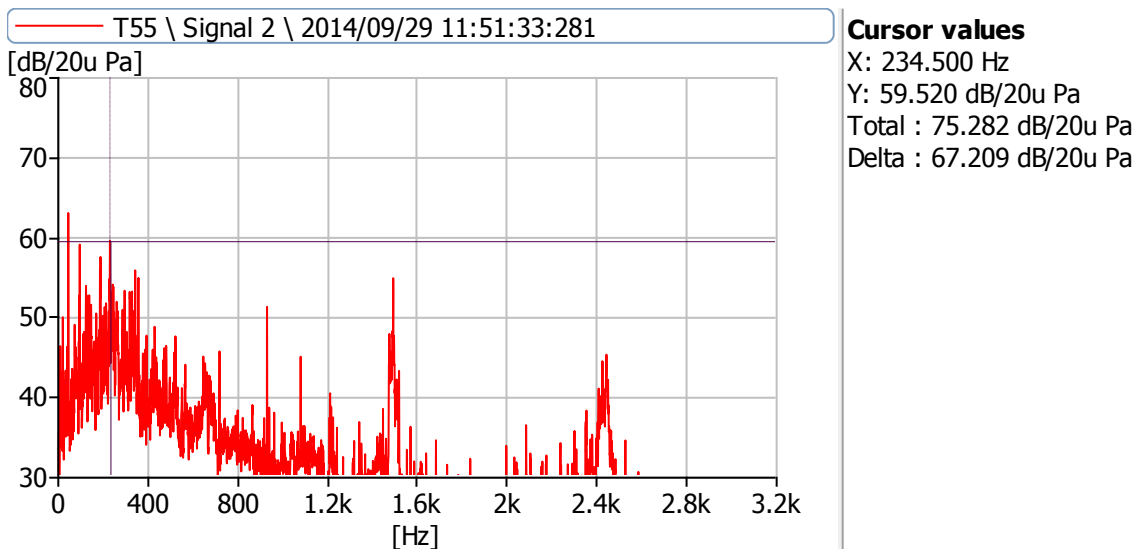
Kompressorer har deres karakteristiske frekvensanalyse, som gør at de kan identificeres i forhold til for eksempel ventilstøj og utætte trykluftventiler. Figur 5 viser et lydprofil fra en mikrofon placeret ca. 30 cm fra kompressoren på Gl. Hørning Vandværk. Kompressoren var fra Stenhøj A/S og blev installeret i 1977. Den øverste graf viser en tidsserie af lydtryk over få sekunder. Her kan det ses, at det høje lydtryk (> 1 Pa på y-aksen) stopper efter ca. 7 sekunder, svarende til at kompressoren blev slukket. Den nederste graf viser at frekvenser for de transformererede data. Her kan det ses, at den dominerende frekvens var omkring 395 Hz.



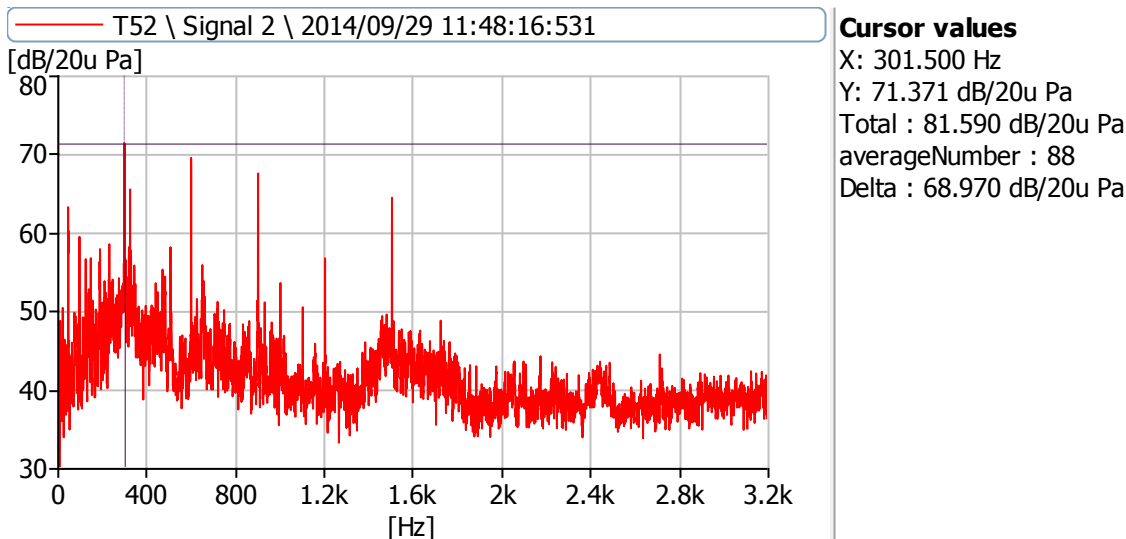
**Figur 5** Lydprofil fra mikrofon placeret i nærheden af en kompressor, Gl. Hørning Vandværk.

#### 4.2.3 Lydprofil fra en distributionspumpe

Målinger af en pumpe på Rugballegaard vandværk ses i Figur 6 og Figur 7. Målingerne er lydtrykmålinger med en mikrofon placeret 1 meter foran pumpen. Pumpen er kørt med to omdrejningstal: 36 Hz og 50 Hz.



**Figur 6** Frekvensanalyse af lydsignal for en pumpe med omdrejningstal på 36 Hz.



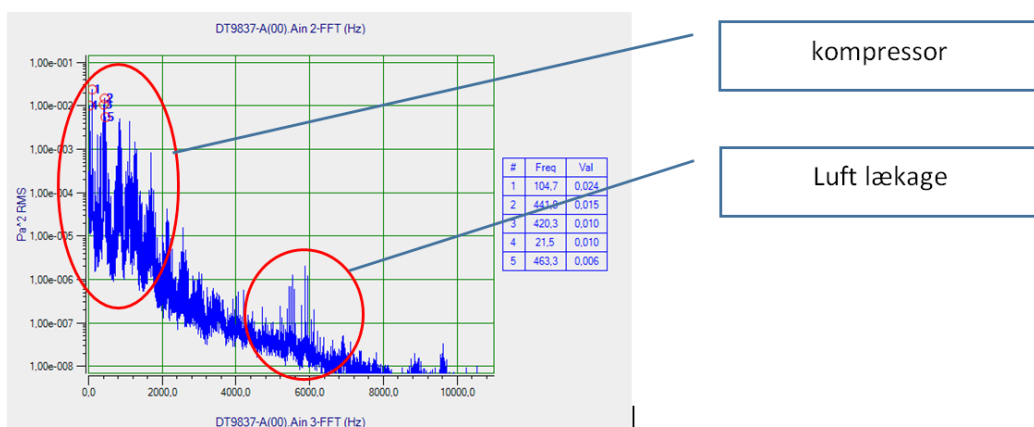
**Figur 7** Frekvensanalyse af lydssignal for pumpe med omdrejningstal på 50 Hz.

Det ses af figuren at:

- Totalniveauet stiger fra 75 dB til 82 dB ved skift fra 36 Hz til 50 Hz omdrejningstal
- Frekvensanalyserne viser meget tydeligere toner
- Baggrunds niveauet stiger typisk 10 dB over 1000 Hz, som indikerer flow støj, måske kavitation
- Ændring i omdrejningstal viser sig tydeligt i totalniveau og frekvensanalyse

#### 4.2.4 Lydprofil fra luftlæk

Lyden ved trykløftslækage blev observeret ved test- vandværkerne. Det giver en højfrekvens støj i området 1000 – 6000 Hz afhængig af lækagetypen. De lækager, der er relevante for monitoring, er store lækager, der betyder funktionsfejl på ventiler styret af trykløften, eller mindre lækager, der primært har betydning for energitab. Store lækager i trykløften giver oftest meget høje støjniveauer, der er tydeligt at detektere ved hjælp af en mikrofon. Figur 8 viser en frekvensanalyse af en optagelse fra Gammel Hørning Vandværk, hvor man tydeligt kan se en luftlækage, selv om en støjende kompressor kører samtidigt.



**Figur 8** Frekvensanalyse af en luftlækage sammen med en kompressor.

### 4.3 Strategi for monitorering

Forskellige strategier for gennemførelse af akustisk monitorering er blevet overvejet i løbet af denne arbejdsopgave. I dette afsnit beskrives den strategi, der er vurderet at være mest hensigtsmæssigt på det nuværende udviklingsstadium.

Overordnet kan akustisk monitorering inddeles i følgende fem aktiviteter:

1. Dataopsamling
2. Signalbehandling
3. Datapræsentation
4. Alarmering
5. Fejl diagnostik

Krav og beslutninger vedrørende hver af disse aktiviteter beskrives efterfølgende.

#### 4.3.1.1 Dataopsamling

Dataopsamling ønskes at ske kontinuerlig og automatisk, gerne fra flere positioner omkring vandværket samtidigt. De rå lydfiler gemmes på harddisken på en PC placeret på Aquatarium. I de første målinger på test-vandværkerne blev der anvendt dataopsamlingsprogrammet QuickDAQ fra firmaet Datatranslation. Programmet kunne dog ikke gentage optagelser automatisk, hvorfor programmet blev fravalgt.

For at begrænse datamængden er det overvejet at anvende en sleep funktion, således at logging kun gennemføres efter, at en bestemt lyd udløser en start "trigger". Dette er dog også fravalgt, da datareduktion i forbindelse med signalbehandling (afsnit 4.3.1.2) vurderes at være påkrævet og vil give en mere enkel løsning.

For at opnå filer af en passende størrelse er det valgt, at der gemmes 5 minutters optagelser ad gangen. Hermed bliver der dannet 12 filer pr. time, 288 filer pr. døgn og 2016 filer pr. uge. Filerne navngives med dato og klokkeslæt, således at de kan sorteres kronologisk. Disse filer overskrives efter 1 uge for at spare plads. Såfremt der er ønske om at gemme en specifik fil, kan dette gøres manuelt. Hermed kan en mængde lydfile gemmes fra udvalgte kilder, når vandværket eller komponenten er ny med henblik på senere sammenligning.

#### 4.3.1.2 Signalbehandling

For at transformere data i lydfile fra tidsdomænet til frekvensdomænet anvendes FFT. Dette gøres ved hjælp af MATLAB i forbindelse med, at de enkelte 5 minutters filer gemmes på harddisken. Logging af akustiske data kan være problematisk, da filerne kan være meget store, især hvis der samples kontinuerlig med en høj frekvens (fx 22 kHz). En løsning er at gennemføre datakomprimering. Dette gennemføres for hver 5 minutters fil, og de komprimerede filer sættes sammen en uge ad gangen. Disse ugefile gemmes permanent. Komprimering sker automatisk.

#### 4.3.1.3 Datapræsentation

Præsentation af lydfile sker ved hjælp af grafer på en brugerflade. Det er valgt at anvende følgende hovedgrafer for hver mikrofonplacering:

1. Lydtryk i [dB], komprimeret, mod tid [s] for en dag med valgt dato
2. Lydtryk [dB], komprimeret, mod tid [s] for en time i valgt dag. Timens start vælges i graf 1.
3. Lydtryk [dB] mod tid [s] for 5 minutter. Forløbet er ukomprimeret for datoer i den seneste uge. For datoer før seneste uge er forløbet komprimeret. Starttid vælges i graf 2.
4. Valgmuligheder:
  - a. Lydtryk [P] mod frekvens [Hz] for en mikrofon og på ét bestemt tidspunkt
  - b. Frekvens [Hz] mod tid [s] med farveangivelse af effekt/frekvens-forholdet [dB/Hz]
  - c. Histogram med fordeling af niveauer/varigheder/startintervaller etc.



Herudover gemmes rå lydfiler af 5 minutters varighed i en uge. Efter en uge overskrives disse filer.

#### **4.3.1.4 Alarmering**

For at være i overensstemmelse med anden monitoring på vandværker skal akustisk monitoring indebære en automatisk alarmering af driftspersonale. Dette kan ske ved at der sendes en SMS eller ved at der hejses et flag i brugerfladen. For at fastlægge alarmgrænser, er der behov for først at kende til baggrundslyd under normale forhold. Dette lydmønster er vekslende fra minut til minut, da komponenter ofte kører i perioder.

Der findes flere potentielle måleparametre, herunder lydtryk (fx i et bestemt frekvensvindue) eller tidsinterval mellem start og stop af en komponent. Typisk fastlægges en enkelt værdi, der inddeler målinger i alarm og ikke-alarm tilstand eller to værdier, således at målinger inddeles i fx rød, gul og grøn tilstand. I første fase af dataopsamlingen etableres et grundlag for at fastlægge alarmniveauer for forskellige målepositioner. Der er i denne fase ikke fastlagt alarmniveauer, hvorfor automatisk alarmering er valgt fra i den første udgave af systemet.

#### **4.3.1.5 Fejldiagnostik**

Når lydmønsteret ændres, og der gives alarm, er næste skridt at diagnosticere hvilken fejl, der er tale om. Muligheden for at udvikle et kunstig intelligens system, der kunne give et bud på fejlen, er blevet overvejet. Dette vil imidlertid være ret kompliceret, og vil kræve en mere specifik dataopsamling. For eksempel vil retningsbestemte mikrofoner kunne give mere specifikke oplysninger til diagnosticering, dog er rumakustikken på vandværkerne præget af meget refleksion på grund af mange hårde overflader, hvormed brug af retningsbestemte mikrofoner vanskeliggøres. Projektgruppen vurderer, at et monitoringssystem med automatisk alarmering og manuel fejldiagnosticering er mere passende, både til den aktuelle arbejdsopgave og til evt. fremtidige forbedringer. Som tidligere nævnt gemmes WAV (Waveform Audio File Format) filer i en uge – og disse kan aflyttes ved en manuel diagnostik på afstand.

#### **4.3.2 Strategi**

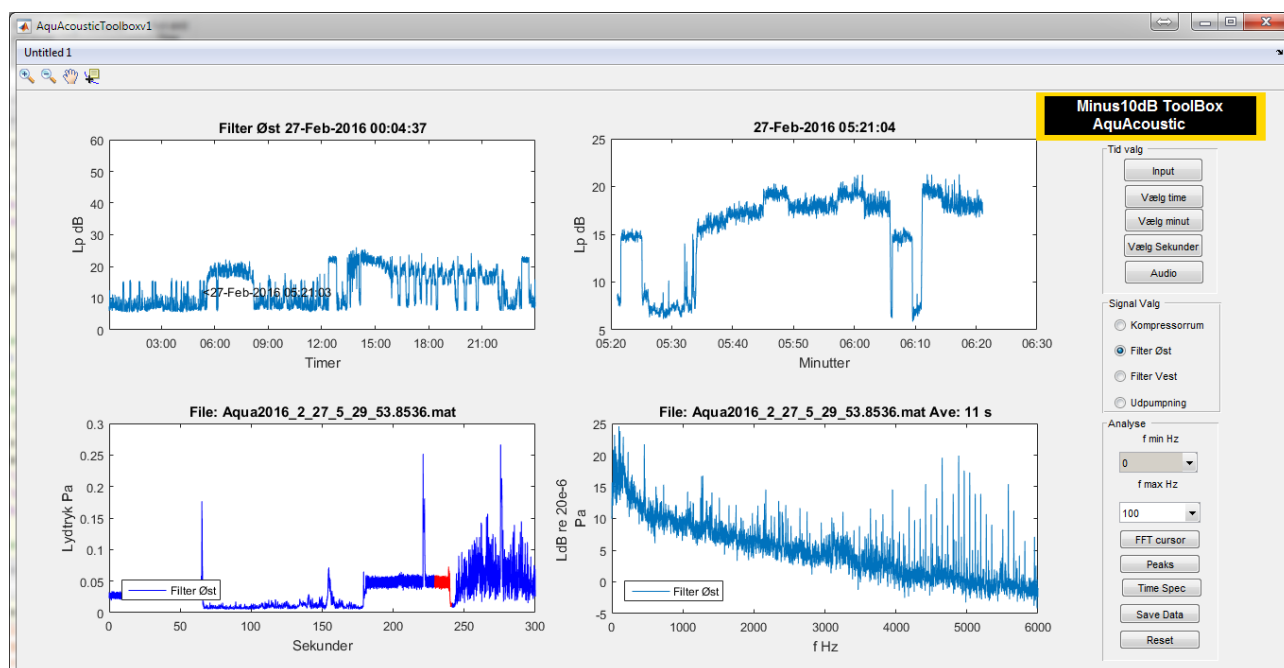
Den valgte strategi til monitoring og diagnosticering fungerer således:

- Korttidsanalyse
  - Lyddata i fuld opløsning gemmes i en uge, så detaljerede analyser kan foretages i dette tidsrum.
  - Der kan lyttes til udvalgte sekvenser i filer med fuld opløsning
- Langtidsanalyse
  - Der kan gemmes udvalgte lydfiler til senere sammenligning
  - Komprimerede data vil vise niveauer fra dag 1 af monitoring
  - De komprimerede data kan anvendes til sammenligning med tidligere optagelser
  - Analyser af komprimerede data kan vise, om der er en trend i udvikling af lyd-niveauer for bestemte komponenter som kompressor-, ventil- eller pumpemålinger
  - Komprimerede data vil kunne anvendes til at synkronisere begivenheder med SCADA systemet for analyse af særlig begivenheder, for eksempel filterrensning.

### **4.4 Praktisk system til akustisk monitoring i fuldskala**

Det akustiske monitoringssystem er bygget op således, at et program foretager dataopsamlingen. Programmet skal i princippet køre døgnet rundt og lagre lydfiletne, både de højopløste og de komprimerede. Programmet vil automatisk og løbende slette højopløste lydfiletne, der er ældre end en uge, med henblik på at optimere systemets lagerplads.

Analysen af lyddata behandles af AquAcoustic programmet. Programmets brugerflade ses i Figur 9. Som det ses af figuren er der tale om tre tidsserier med aftagende tidsintervaller (hhv. 1 døgn, 1 time og 5 minutter), mens grafen nederst til højre viser frekvenser. Det bemærkes, at de øverste to grafer har y-akse med enheder i dB, mens de nederste to grafer har y-akser med enheder i Pascal.



**Figur 9** AquAcoustic brugerflade.

Funktionen af brugerfladen styres af funktionsknapper, der findes på højre side af brugerfladen.

#### 4.4.1 Tid valg

De fem knapper øverst til højre vælger det tidsinterval, som ønskes analyseret. De fem knapper er:

1. Input-knappen: Denne knap åbner en stifinder, så den fil, der indeholder komprimerede data for den ønskede dato kan vælges.
2. Vælg time-knappen: Denne knap fremkalder en markør, der bruges til at markere på grafen øverst til venstre hvilket tidspunkt, der skal analyseres. En time fra det valgte tidspunkt vises nu øverst til højre.
3. Vælg minut-knappen: Denne knap anvendes til at vælge den Aqua-fil, der ønskes analyseret detaljeret. Grafen øverst til højre bruges til at finde det 5 minutters tidsrum, der skal analyseres. Tidspunkt for start af lydoptagelse ses i filens navn. Den højopløste lydfil ses nu på nederste graf til venstre.
4. Vælg sekunder-knappen: Denne knap fremkalder en markør, der bruges til at markere det tidsinterval, der skal analyseres på nederste venstre graf. Det valgte tidsrum markeres med rødt, og frekvensanalysen (FFT) ses til højre fornedet.
5. Audio-knappen: Afspiller lyden i de valgte tidsrum markeret med rødt.

#### 4.4.2 Signal valg

De fire knapper i midten til højre bruges til at vælge den ønskede mikrofonplacering (dvs. hvilket af de fire signaler, der skal vises) på brugerfladen. Det markerede tidsinterval (se ovenfor) bevares ved skift mellem signalerne. De fire knapper er:

1. Kompressorrum
2. Filter Øst
3. Filter Vest
4. Udpumpning

### 4.4.3 Analyse

Yderligere optioner findes nederst til højre på brugerfladen. Disse analysefunktioner er:

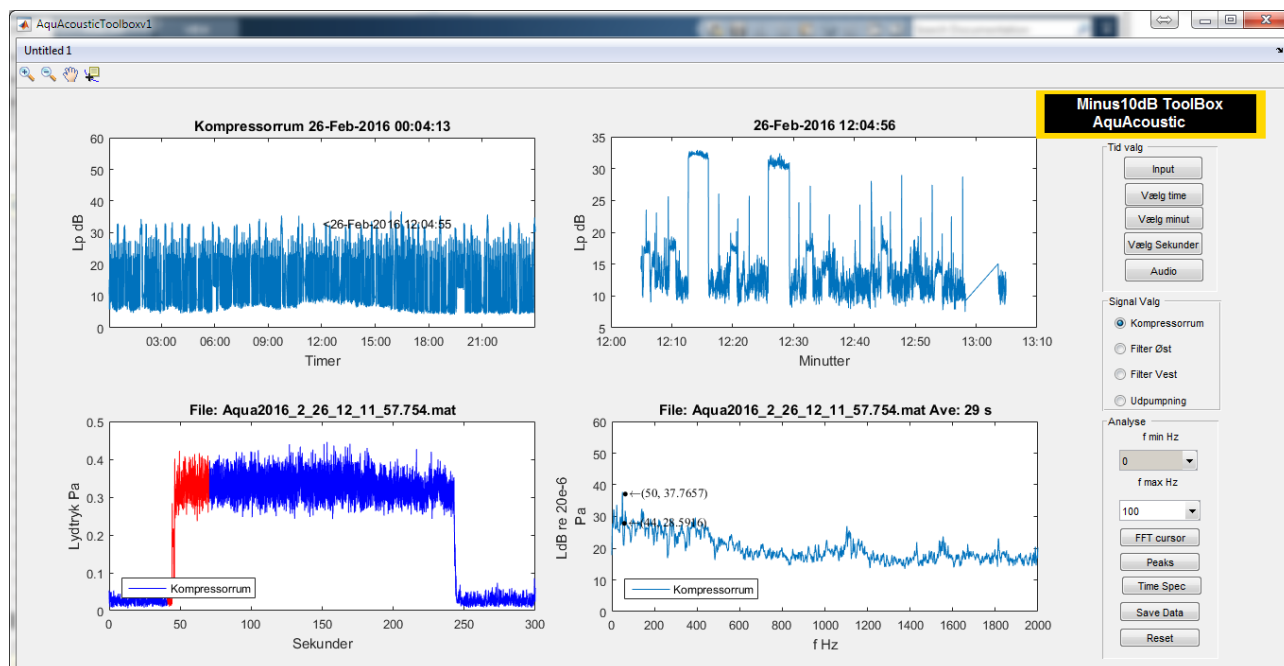
1. FFT cursor: Denne knap fremkalder en markør, der kan anvendes (i brugerfladens graf nederste til højre) til at bestemme særlige frekvenser.
2. Peaks: Denne knap fremkalder et histogram med data for den valgte dag med antal hændelser vs. lydniveau i dB.
3. Time Spec: Denne knap fremkalder et spektrogram: frekvensanalyse vs. tid for den valgte højopløste tidsfil.
4. Save data: Denne knap er beregnet til at gemme data for særlige optagelser, der skal anvendes til sammenligning.
5. Reset: Denne knap nulstiller beregnede data.
6. Til yderligere analyse kan ikonerne i menulinjen foroven i brugerfladen anvendes til at zoome ind og ud, scrolle zoomede data og placere en markør i en vilkårlig graf.

## 4.5 Demonstration på Aquatarium

Udvalgte resultater fra to måledage på fuldskalaopstillingen ved Aquatarium ses i de nedenstående figurer.

### 4.5.1 Kompressorrummet

Figur 10 afsnit omhandler signalet fra mikrofonen placeret i kompressorrummet.



**Figur 10** Skærmdump af brugerflade ved analyse af kompressorrummet 26. feb. 2016.

På figuren ses:

- Øverst til venstre: en tidsserie for lydtryk over et døgn (26. februar 2016). Her ses et mønster uden tidsmæssige tendenser men med et forholdsvis højt lydniveau, der generelt ligger lige under 30 dB.
- Øverst til højre: her ses en tidsserie på 1 time (fra kl. 12 til 13). Mønstret har flere detaljer end der kunne ses ved 1-døgns grafen og viser, at der er meget aktivitet i kompressorrummet. Der ses særligt to typer af hændelser: Begrænset kortvarige hændelser med lavere lydtryk samt to særlige hændelser med højt lydtryk af ca. 4 minutters varighed.

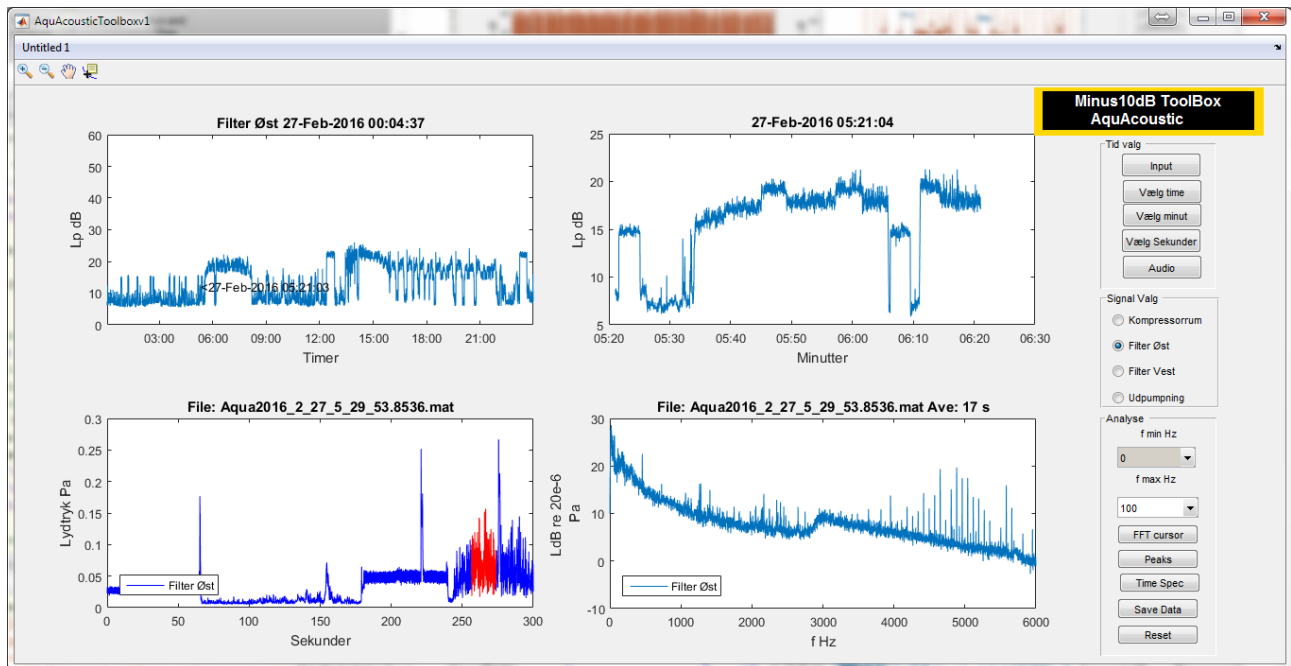
- Nederst til venstre: Denne tidsserie gælder for intervallet fra kl. 12:11 og 5 minutter frem. I tidsfilen er markeret et tidsrum på 29 sekunder hen over start af en aktivitet (rødt område).
- Nederst til højre: frekvensanalyser for det markerede område.

FFT cursoren er brugt til at markere det højeste top, der ligger ved 50 Hz.

Ved at bruge audio knappen, kan man identificere, at det valgte (røde) forløb er start af en kompressor.

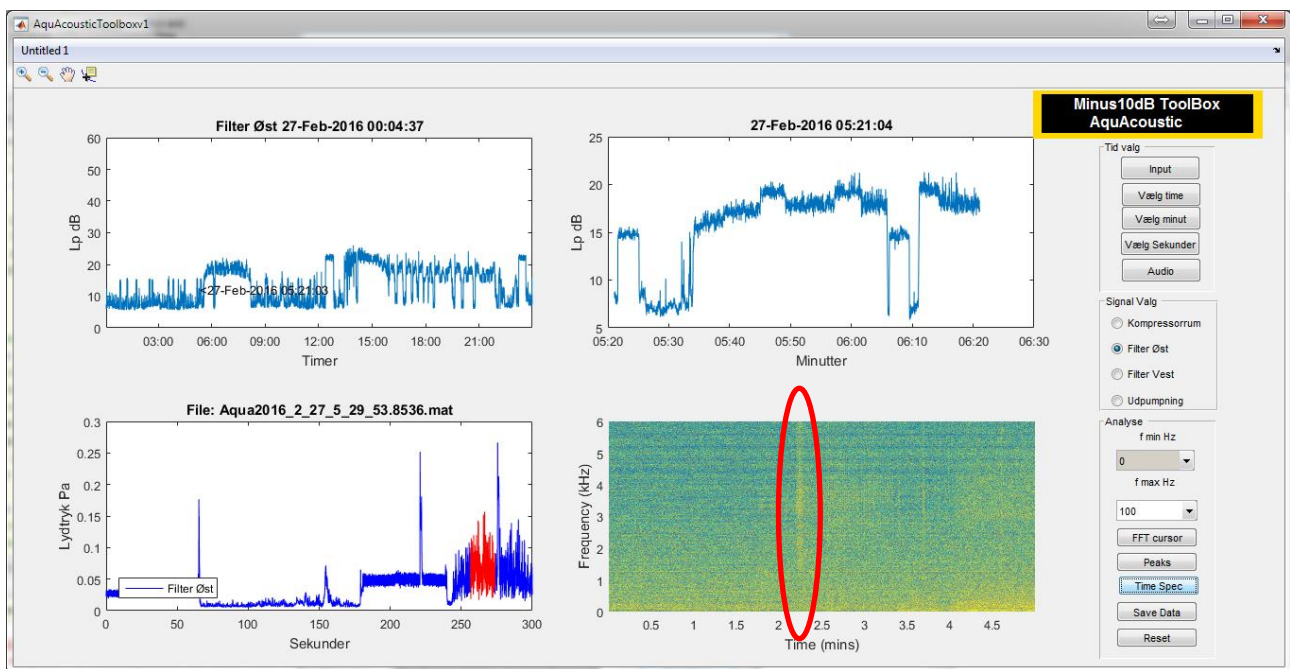
#### 4.5.2 Filtersal Øst

Dette afsnit omhandler signalet fra mikrofonen placeret i filtersal øst.



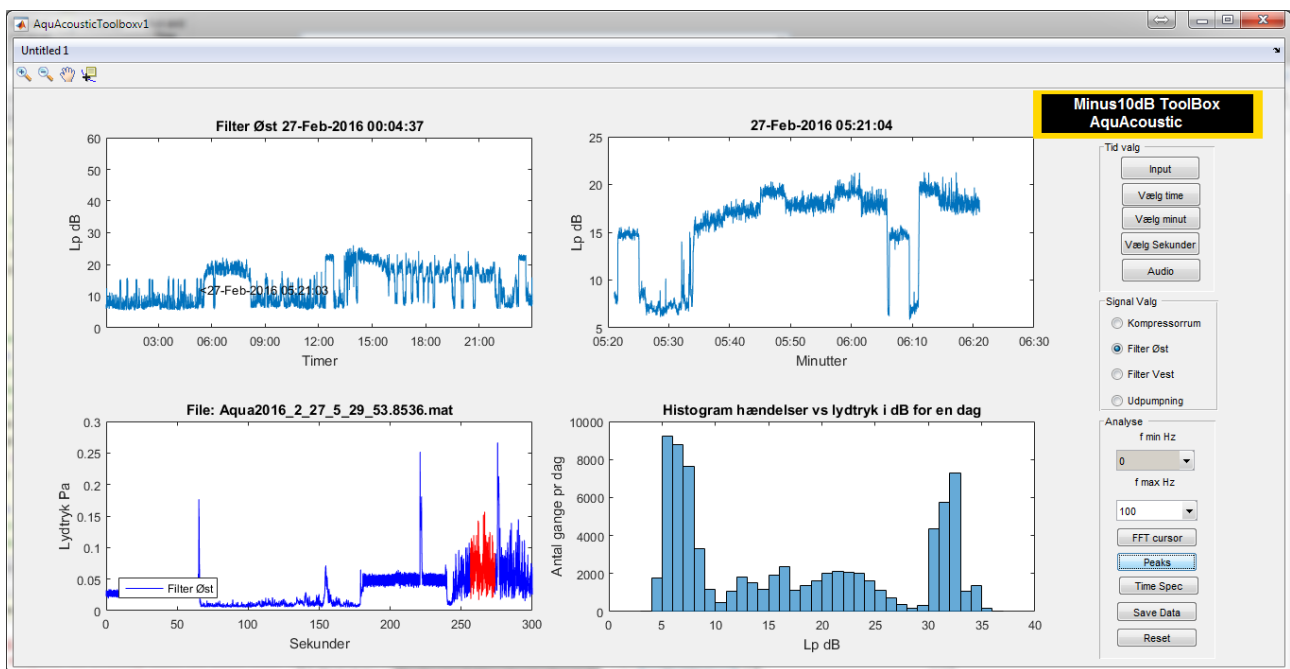
**Figur 11** Skærmdump af brugerfladen ved analyse af Filter Øst 27. feb. 2016.

I grafen øverst til venstre ses, at lydtrykket er lavere i filtersal øst end i kompressorrummet. Det valgte tidsrum for FFT analysen viser et andet billede med bidrag i det høje frekvensområde omkring 4000 til 6000 Hz.



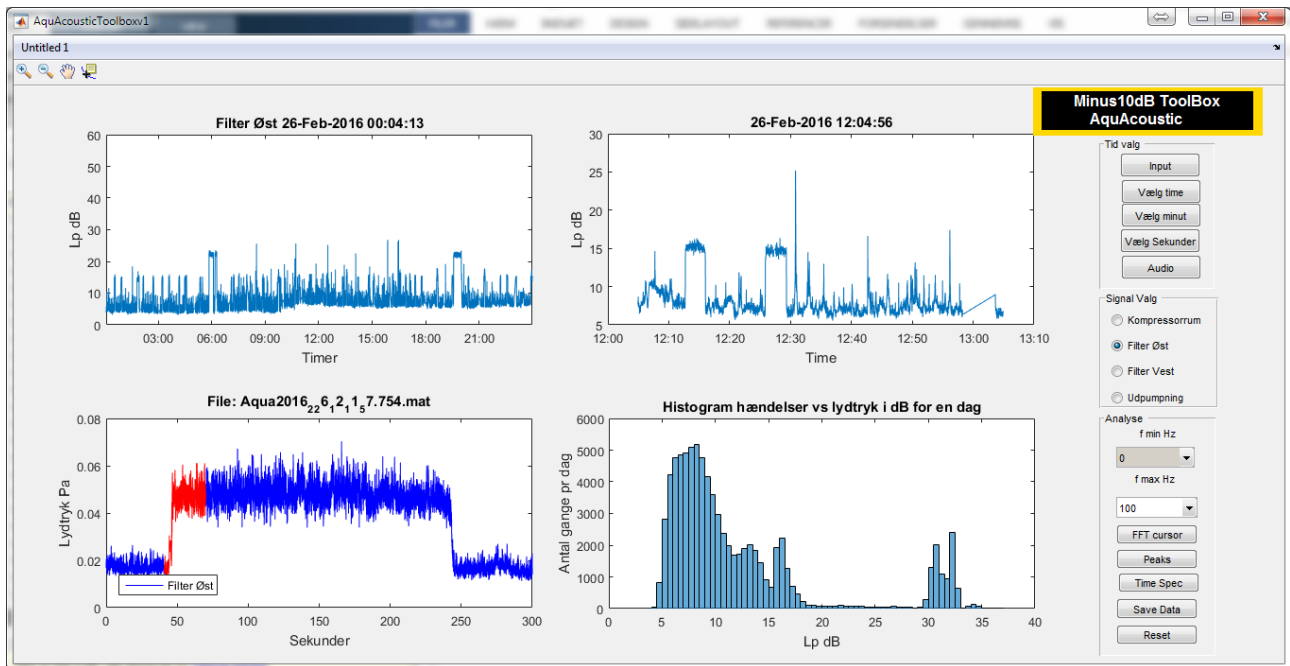
**Figur 12** Skærmdump af brugerfladen ved spektrogramanalyse.

Figur 12 omhandler samme interval som Figur 11 men viser en analyse af spektrogrammet nederst til højre for 5 minutters forløbet. Der ses en gul markering ca. 2,2 minutter henne i tidsforløbet (femhævet af den røde ellipse), som også ses med en vis bredde ved 150 sekunder til venstre. Den gule markering viser et frekvensindhold omkring 2-4 kHz.



**Figur 13** Skærmdump af brugerfladen ved analyse af Filter Øst 27. feb. 2016.

Figur 13 omhandler samme interval som Figur 11 men viser hyppigheden af lyd niveauer inddelt i 1 dB step som et histogram nederst til højre. Aktiviteter der afgiver lyd optræder ved 30 – 33 dB.



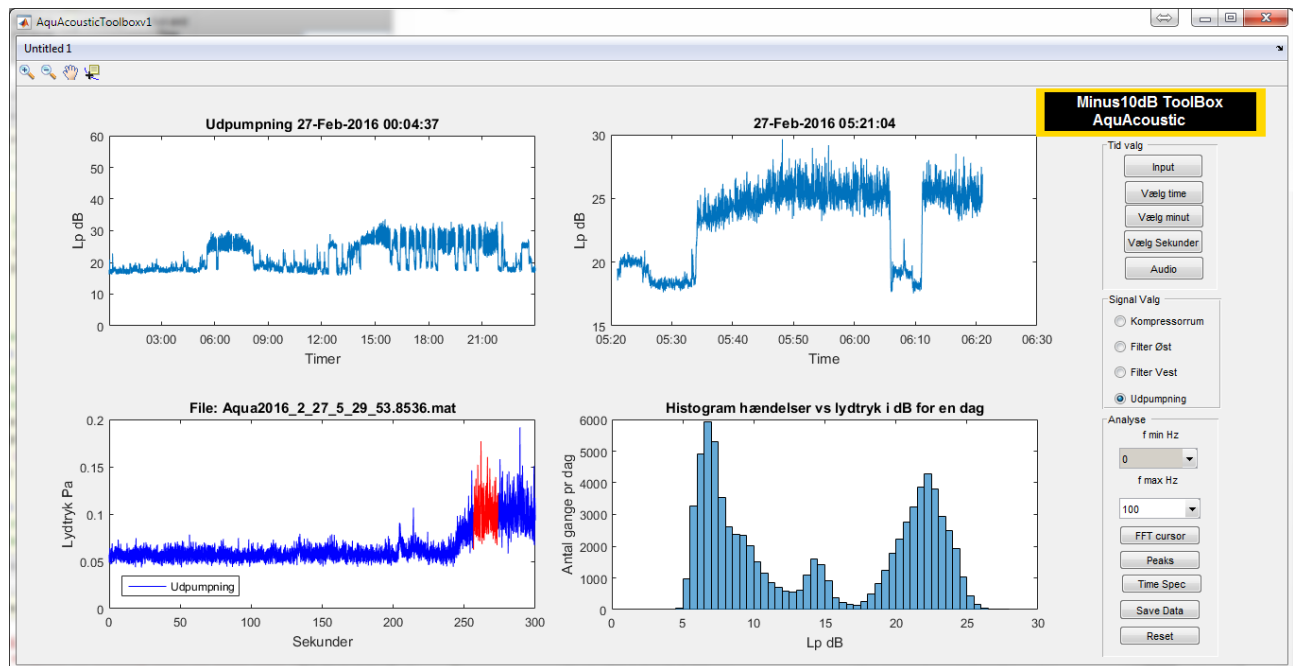
**Figur 14** Skærmdump af brugerfladen ved analyse af Filter Øst 26. feb. 2016.

Figur 14 viser en analyse af histogrammet for dagen før, nemlig den 26. februar 2016 ved Filter Øst. Her angives hyppigheden af lyd niveauer inddelt i 1 dB step. Aktiviteter der afgiver lyd optræder ved 30 – 33 dB.

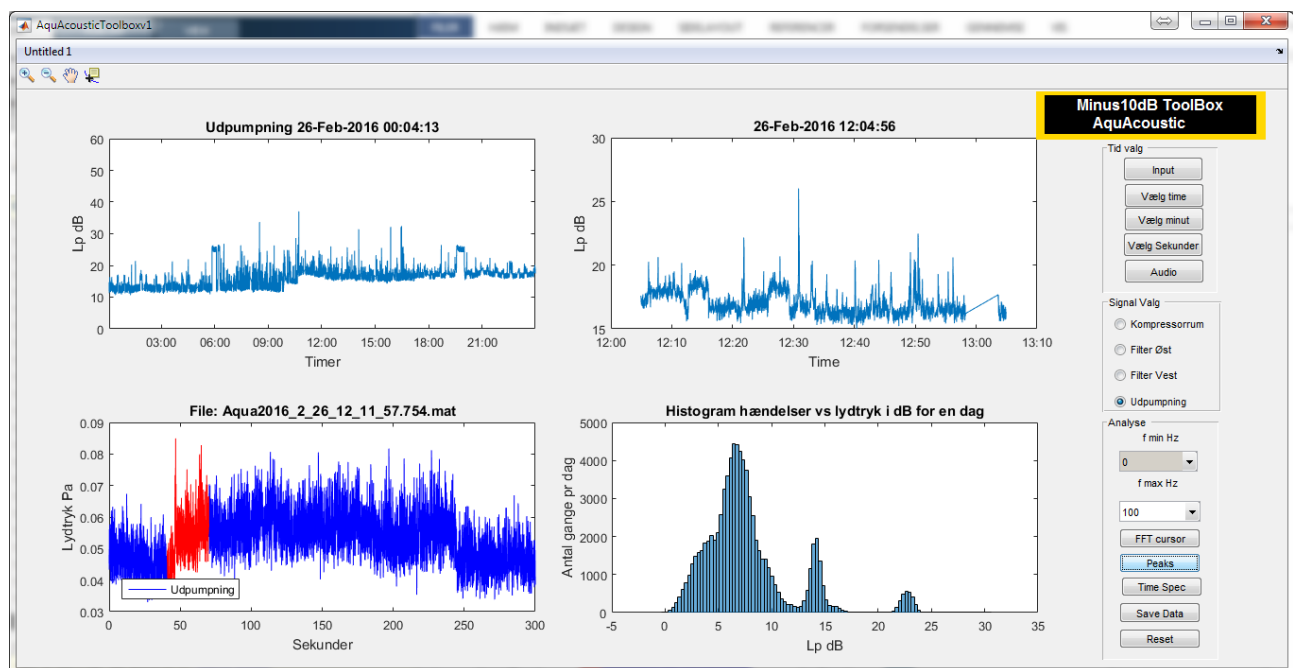
Sammenlignes histogrammerne for den 26. og den 27. februar ses en tydelig forskel i aktivitetsniveau. Typiske aktiviteter ved 33 dB er foregået 7500 gange i løbet af dagen den 27. og 2000 gange i løbet af dagen den 26. AquAcoustic kan hurtigt give et overblik over aktivitetsniveauet ved brug af komprimerede data.

### 4.5.3 Udpumpningssal

Dette afsnit omhandler signalet fra mikrofonen placeret i udpumpningssalen.



Figur 15 Skærmdump af brugerfladen ved analyse af udpumpningssalen 27. feb. 2016.



Figur 16 Skærmdump af brugerfladen ved analyse af udpumpningsrummet 26. feb. 2016.

Sammenlignes aktiviteterne i udpumpningsrummet mellem den 26. og 27. viser der sig en stor forskel i histogrammerne; igen ses en mindre aktivitet den 26. februar. Det næste skridt i analysen (ikke medtaget her) er at koble de observerede forskelle i lydbilledet til driftsaktiviteterne på vandværket.

# 5. Konklusioner og perspektiver

Dette kapitel omhandler konklusioner, videreudvikling og perspektiver.

## 5.1 Konklusioner

Arbejdsplan 7A har omhandlet udvikling af et akustisk monitorings system til brug på vandværker. Systemet består af elementerne 1) optagelse, 2) analyse af det opsamlede data og 3) datapræsentation. Overordnet kunne det konkluderes, at akustisk monitoring kan anvendes i almindelig drift af et vandværk som supplement til et traditionelt SRO-system.

Nedenfor angives de vigtigste delkonklusioner:

- For at en driftsfejl er relevant for akustisk monitoring, skal fejlen opfylde fire krav. Disse er 1) at fejlen skal kunne høres, 2) at den ikke kan monitoreres bedre ved en anden og mere enkelt metode, 3) at der er en vis forventet hyppighed af fejlen og 4) at fejlen har en vis konsekvens, hvis den ikke opdages.
- Ved hjælp af interviews blev læk af trykluft i forskellige sammenhæng identificeret som den mest relevante fejltypen for akustisk monitoring.
- Vibrationsmålinger ved hjælp af accelerometre har vist sig at have en række fordele og ulemper. På baggrund af en afvejning af disse, blev accelerometre fravalgt til fordel for mikrofoner.
- Der blev fundet behov for en strategi bestående af korttidsanalyse til identifikation af pludselige hændelser og en langtidsanalyse til identifikation af snigende driftsproblemer.
- Proof-of-concept målinger viste, at man kan skelne lydspektra for forskellige komponenter. Fx kan utætheder erkendes, da de har en højere frekvens end fx kompressorer.
- Ved hjælp af afprøvning af akustisk monitoring i fuldskala på Aquatarium blev det vist, at elementerne optagelse, analyse af data og datapræsentation fungerer i praksis.

## 5.2 Videreudvikling

Prototypen for akustisk monitoring kan videreudvikles. Videreudviklings emner inkluderer 1) fastlæggelse af det normale lydbillede, 2) fastlæggelse af alarmgrænser og 3) integration i SRO-systemet. Disse emner beskrives i de følgende afsnit. Der vurderes imidlertid *ikke* at være behov for videreudvikling af diagnosticering, da dette med fordel kan foregå manuelt ved hjælp af lydclip.

Fastlæggelse af det normale lydbillede er en forudsætning for at kunne identificere driftsfejl ved hjælp af akustisk monitoring. Der er behov for at udvikle og afprøve en procedure til dette. Det forventes at fastlæggelse vil:

- være forskelligt for hvert vandværk
- kræve indsamling af 1-2 ugers akustiske data
- kræve sammenligning af akustiske data med driftsdata
- baseres på akustiske målinger af alle de komponenter på værket, der er synlige i analysen.



Der ligger en del udviklingsarbejde i at fastlægge alarmgrænser. Dette bunder i, at emnet kan gribes an på flere måder. Fx kan der være tale om at lægge en alarmgrænse for det generelle lydtrykniveau, for lydtrykket ved en bestemt frekvens, eller lydtrykket ved et bestemt tidspunkt. Hertil kan der lægges en grænse for varigheden af en bestemt lyd. På nuværende tidspunkt vides ikke om dette arbejde kan begrænses til at omfatte enkelte algoritmer, eller om der er behov for kunstig intelligens for at opnå alle fordelene ved akustisk monitorering.

For at opnå fuld automatik er der behov for, at det akustik monitoringsystem kobles med driftsaktiviteter (start/stop af pumper, returskyl, m.m.), der styres af SRO-systemet. Derfor vil det optimale system være fuldintegreret i det aktuelle vandværks SRO-system, hvor også alarmgrænser og -prioritering kan defineres

### **5.3 Perspektiver**

I denne arbejdsplan er det lykket at opnå formålene med at udvikle et praktisk anvendeligt akustisk monitoringsystem. Udviklingen er gået fra idefasen til realisering af en praktisk prototype, der blev afprøvet i fuldskala.

#### **5.3.1 Forretningsplan**

Det udviklede monitoringsystem har et direkte kommercielt sigte. Før iværksættelse af en forretningsplan er der behov for yderligere fuldskalaerfaringer fra Aquatarium samt fuldskalaerfaringer fra flere vandværker med et væsentlig anderledes behandlingsanlæg. Disse erfaringer vil kunne danne grundlag for den videre optimering af brugerfladen.

Et centralt punkt i en forretningsplan er spørgsmålet om hvilken værdi, systemet skaber for kunden. Dette spørgsmål kræver flere erfaringer med prototypen for at kunne besvares.

Det vurderes at marketing af et akustisk monitoringsystem bør følge det typiske mønster ved først at sikre en markedsmodning af produktet ved at danne en kundekreds i Danmark, før der markedsføres i udlandet. I Danmark markedsføres via indlæg på konferencer, artikler i fagtidsskrifter samt personlig kontakt. Da lydoptagelserne tilgås via internettet og da udstyret i felten er robust, er servicering af kunder i udlandet ingen større hindring.

Omkostninger i forbindelse med hardware og opstilling vurderes at ligge på et acceptabelt niveau. Der er ikke identificeret konkurrerende produkter til akustisk monitorering på vandværker. Der ligger en opgave i fastlæggelse af det normale lydbillede for et bestemt vandværk. Denne opgave vurderes at være væsentlig, men ikke af en sådan størrelse, at den vil være begrænsende for vandværkernes interesse for kommerciel anvendelse af teknologien.

#### **5.3.2 Forretningsmuligheder**

Der er ca. 2500 vandværker i Danmark. Alle er ubemandede, hvormed de alle er potentielle kunder til det automatiserede monitoringsystem. Vandværker i andre lande er også potentielle kunder.

Hertil kommer, at et lignende system kan let udvikles til andre brancher. Her tænkes især på industrien og særligt brancher, hvor der anvendes trykluft og er væsker under bevægelse/tryk.

#### **5.3.3 Formidling**

Indlæg om arbejdsplanen "Vandværker i et akustisk perspektiv" har været afholdt på Dansk Vandkonference i 2014 og i 2015. Hertil kommer udarbejdelse af denne rapport. Endelig er udstyret blevet fremvist ved indvielsen af Aquatarium i maj 2016.

# 6. Referencer

**Ajbar**, A, Al-Masry, W, Ali, E, 2009. Prediction of flow regimes transitions in bubble columns using passive acoustic measurements. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 48, 101-110.

**Brigham**, EO, 1974. Fast Fourier Transform. Prentice Hall, Inc.

**Carden**, EP & Fanning, P, 2004. Vibration based condition monitoring: A review. *Structural Health Monitoring* 3, Sage Publications, 355-377.

**Chouhan**, RS, Kiranmayee, AH, Panchariya PC, & Bhanu Prasad, P, 2012. Acoustic signature based discrimination of drinking water. 2012 *Sixth International Conference on Sensing Technology* (ICST).

**Cudina**, M, 2003. Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol 17(6), 1335-1347.

**DANVA**, 2004. Vejledning i sikring af drikkevandskvalitet (Dokumenteret DrikkevandsSikkerhed – DDS). DANVA Vejledning nr. 72.

**Davies**, A, 1990. Management guide to condition monitoring in manufacture. The Institution of Production Engineers, London.

**Henriquez**, P, Alonso, JB, Ferrer, MA, 2014. Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: systems*, Vol 44(5), 642-652.

**Holley**, M, 2010. Development of a successful untethered leak detection technology for large diameter water pipelines. *28<sup>th</sup> International No-Dig Conference and Exhibition*, Singapore, paper # 12. International Society for Trenchless Technology.

**ISO/TR 11688**, 1992. Anbefalet praksis for design af støjsvagt maskineri og udstyr. Medforfatter Holst-Jensen, O.

**Jacobsen**, F, 2011. An elementary introduction to acoustics. Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark.

**Jyoti**, KK, Pandit, AB, 2001. Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation. *Biochemical Engineering Journal* 7, 201-202.

**McKee**, KK, Forbes, GL, Mazhar, I, Entwistle, R, Hodkiewicz, M & Howard, I, 2015. A vibration cavitation sensitivity parameter based on spectral and statistical methods. *Expert Systems with Applications*, Vol 42, 67-78.

**Quesson, BAJ, Sheldon-Robert, MK, Vloerberg IN & Vreeburg, JHG, 2009.** Acoustic monitoring of terrorist intrusion in a drinking water network. *10<sup>th</sup> Annual Water Distribution System Analysis Conference*, South Africa, 1117-1128.

## Vandværket i et akustisk perspektiv

Arbejdsmappe 7A under Fyrtårnsprojekt: "Fremtidens Drikkevandsforsyning"



Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K

[www.mst.dk](http://www.mst.dk)