



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Real-time vandkvalitetsmålinger i industrien og hospitalssektoren

MUDP-rapport

December 2017

Redaktion:

Gustav Skands, SBT Aqua,
Christian Bertelsen, SBT Aqua

Tekst:

Gustav Skands, SBT Aqua
Christian Bertelsen, SBT Aqua

Grafiker:

Frederik Aalund, SBT Aqua

ISBN: 978-87-7120-902-0

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Indledning	4
1.1	Indledning	4
1.2	Formål	4
1.3	Det nyskabende aspekt	4
1.4	Måleteknologien	5
1.5	Arbejdspakker	6
1.5.1	Arbejdspakke 1: Kortlægning af behov for online målinger	6
1.5.2	Arbejdspakke 2: Teknologiuudvikling af produktløsningen	7
1.5.3	Arbejdspakke 3: Forberedelse af test og demonstration	7
1.5.4	Arbejdspakke 4: Test af demonstration af produktløsningen	7
2.	Behov i industrien	8
2.1	Forholdene i dag	8
2.1.1	Kort beskrivelse af de deltagende virksomheder	8
2.1.1.1	Glostrup Hospital	8
2.1.1.2	Royal Unibrew	9
2.1.1.3	ALK-Abelló	9
2.2	Barrierer for vandeffektivisering	9
2.3	Identificerede optimeringsområder	10
2.3.1	Hospitalssektoren – Glostrup Hospital	10
2.3.2	Bryggeribranchen – Royal Unibrew	11
2.3.3	Farmaceutisk industri – ALK Abelló	11
2.4	Behov for online målinger af den mikrobielle vandkvalitet	11
3.	Tilvejebringelse af løsningen	12
3.1	Projektets udgangspunkt	12
3.2	Endegyldigt system	13
3.2.1	Vandtilslutning og afløb	14
3.2.2	Strøm og internet	14
4.	Laboratorieforsøg	15
4.1	Responstid ved koncentrationsændringer	15
4.2	Målinger af bakterier og partikler i væsker med varierende ledningsevne	16
5.	Feltstudier	19
5.1	Testplan	19
5.1.1	Forsøgsopstilling hos Royal Unibrew	19
5.1.2	Forsøgsopstilling hos ALK-Abelló	19
5.1.3	Forsøgsopstilling hos Glostrup Hospital	19
5.2	Testresultater	19
5.2.1	Udvalgte resultater fra test hos Royal Unibrew	20
5.2.2	Udvalgte testresultater hos ALK-Abelló	22
6.	Afledt applikation	25
6.1	Ikke-online måling af vandprøve hos Royal Unibrew	25
7.	Konklusion	27

1. Indledning

Projektet havde til formål at udvikle og teste et system til online og real-time vandkvalitetsmålinger med henblik på at øge effektiviteten gennem en bæredygtig udnyttelse af vandressourcen i industrien. Projektet udnyttede en ny elektrisk måleteknologi til bestemmelse af bakterieantallet i vandet, og var struktureret i fire arbejdsopgaver, som dækkede alt fra behovsafklaring til brugertests.

1.1 Indledning

For danske virksomheder inden for fødevarer-, drikkevare- og farmaindustrien, såvel som i hospitalssektoren, er der et stigende pres på at øge effektiviteten, herunder en bl.a. bæredygtig udnyttelse af vandressourcen. En øget effektivitet skal sikre konkurrenceevnen og i sidste ende danske arbejdspladser i industrien. Bæredygtig vandudnyttelse kan i virksomhedernes eget produktionsled optimeres gennem reduktion af vandforbruget i forsynings- og produktionsprocesser, såvel som gennem rensning og recirkulering af procesvandsstrømme.

Der er et stort behov for, i denne sammenhæng, at kunne måle og dokumentere den mikrobiologiske vandkvalitet i real-time, hvilket i dag ikke er muligt. Store virksomheder har tidligere udvist markant interesse i implementeringen af et genanvendelses- og recirkuleringssystem til deres procesvand, eller anden form for udnyttelse af sekundavand, grundet de økonomiske og miljømæssige fordele der opnås herved.¹ Disse genanvendelsessystemer bliver ofte henkastet grundet manglende muligheder for at løbende kvalitetssikre procesvandets mikrobiologiske kvalitet.²

1.2 Formål

Formålet med projektet var at udvikle, teste og verificere en demonstrationsmodel til online og real-time mikrobiel kvalitetssikring af procesvand i industrien og hospitalssektoren. Sensoren, der blev testet i projektet, er baseret på en patent-pending teknologi og der findes kun få lignende kommercialiserede løsninger på markedet i dag. Teknologisk var udfordringen – gennem en demonstrationsmodel – ”at komme ud af laboratoriet” for herved at påvise sensorens effektivitet i forskellige industrielle sammenhænge. Real-time målinger skal sikre, at produktkvaliteten ikke påvirkes ved optimering af vandforbruget, og skal anvendes til at opnå tilladelser fra myndighederne til optimering af genanvendelse af procesvandsstrømme.

1.3 Det nyskabende aspekt

Ingen løsninger til real-time målinger af bakterier har haft betydelig kommerciel succes endnu. Alle kommercialiserede løsninger er baseret på en fælles tilgangsvinkel funderet i optisk detek-

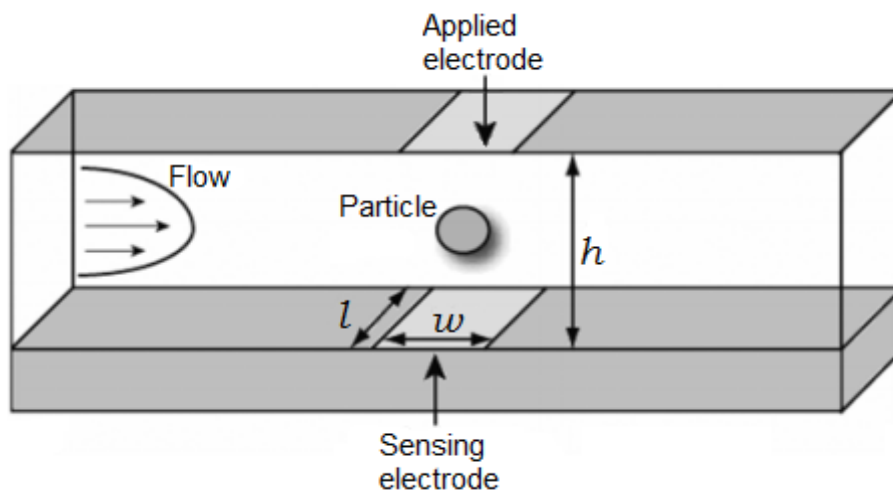
¹ ”Vandeffektive hospitaler. Potentialer for vandbesparende teknologi og brug af sekundavand”, Ulf Nielsen, MUDP-rapport, Miljøstyrelsen, 2016

² ”Udredning om brug af sekundavand i Danmark”, Marianne Marcher Juhl, Naturstyrelsen, 2014

tering af bakterier. Den optiske detektering kan foretages på tre måder; enten vha. konventionel optik og avanceret billedbehandlingssoftware³, via tilføjelsen af en lysende biomarkør til bakterierne⁴, eller ved at anvende nogle af bakteriernes egne fluorescerende egenskaber⁵. SBT Aquas demonstrationsmodel består af et enkelt system med en pumpe, manifold og elektrisk måleenhed. Den teknologiske nyhedsværdi i dette projekt ligger i måden hvorpå bakterier, og andre uorganiske partikler, detekteres. Detekteringsmetoden er elektrisk og benytter sig af principperne fra impedans-spektroskopi, hvor vekselspænding i MHz-området bruges til at detektere og differentiere mellem bakterier og ikke-biologiske partikler. Dvs. at der ingen optiske komponenter er i den anvendte teknologi, og der anvendes ingen kemikalier til at manipulere eller gro bakterierne inden de måles. Ydermere, så er teknologien meget økonomisk fordelagtigt sammenlignet med andre løsninger, da den udelukkende er baseret på elektrisk detektion. I produktionsindustrien vil det være en markant innovation at kunne teste procesvand i real-time til en fordelagtig pris, hvilket er den teknologiske løsning projektet bidrager med.

1.4 Måleteknologien

Impedans flow cytometri er et teknologiområde, der er forholdsvist nyt, da det første impedans flow cytometri system blev foreslået i den videnskabelige litteratur i år 2000.⁶ Impedans er vekselstrømmens ækvivalens til modstand i et jævnstrømskredsløb. Konceptet bag impedans flow cytometri er, at partikler i en væske giver forskellige udslag i amplitude og fasen i en lille væskekanal, hvorved man kan bruge denne respons til at analysere partiklerne baseret på deres elektriske egenskaber. I den simpleste model af systemet har man en flow-kanal med to elektroder. Der påtrykkes et elektrisk felt mellem de to elektroder, og når der kommer en partikel igennem systemet ses et udslag i impedansen. Når der anvendes en lille flow-kanal bliver det muligt at analysere partiklerne enkeltvis som vist i Figur 1.



Figur 1: Måleprincippet i impedans flow cytometri indbefatter at have en lille flow-kanal, hvori der er en række elektroder. Der påtrykkes en elektrisk spænding mellem elektroderne. Denne spænding ændres, når en partikel passerer henover elektroderne. Der er et kontinuerligt flow

³ B. Højris et. al., "A novel, optical, on-line bacteria sensor for monitoring drinking water quality", *Scientific Reports*, vol. 6, article number 23935, April 2016

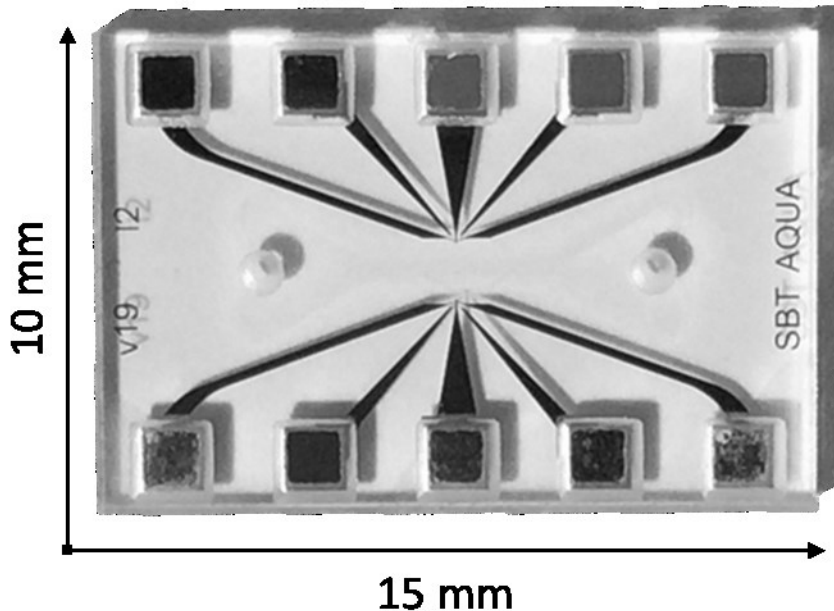
⁴ T. Broger et. al., "Real-time on-line flow cytometry for bioprocess monitoring", *Journal of Biotechnology*, vol. 154, p. 240-247, July 2011

⁵ A. P. Kilungo et al., "Continuous Real-time Detection of Microbial Contamination in Water using Intrinsic Fluorescence", *Biosensors & Bioelectronics*, S12, 2013

⁶ S. Gawad et al., "Fabrication of a microfluidic cell analyzer in a microchannel using impedance spectroscopy", *Microtechnologies in Medicine & Biology*, vol. 0, pp. 297-301, 2000.

af vand i systemet, så antallet af partikler tælles over tid, og partiklerne bliver karakteriseret som bakterier/ikke-bakterier baseret på deres elektriske egenskaber.

En af de store udfordringer ved anvendelsen af impedans flow cytometri er at finde den korrekte udformning til flow-cellen, således man reducerer risikoen for tilstopning af de små flow-kanaler, der anvendes til at måle på bakterierne. Flow-cellen produceres i renrum med teknologier der kendes fra mikrochipfremstilling. Den anvendte flow-celle i projektet er patenteret af SBT Aqua og gengivet i Figur 2.



Figur 2: En af de anvendte flow-celler i projektet. Flow-cellen er udviklet af SBT Aqua, og består af flow-kanaler med en række elektroder, der muliggør måling af bakterier i real-time.

1.5 Arbejdspakker

Projektet var struktureret i fire arbejdspakker. De fire arbejdspakker i projektet var opdelt som vidensindsamling, udvikling af løsning, laboratorietest og felttest.

1.5.1 Arbejdspakke 1: Kortlægning af behov for online målinger

Denne arbejdspakke havde til hovedformål at foretage en teknisk gennemførlighedsundersøgelse. Arbejdspakken bestod af kortlægning over behovet for real-time målinger og undersøgte specifikke behov som de forskellige industrier havde til real-time sensorer.

Der blev foretaget opstartsmøder med de deltagende partnere, for at afklare hvor i virksomhedernes produktionskæde sensorsystemet har interesse, og udvalgt ét af disse steder til afprøvning af systemet i arbejdspakke 4. Aktiviteterne bestod desuden af at udarbejde en interviewguide som bruges til at interviewe en slutbruger, kvalitetssansvarlig, miljøansvarlig m.m. i de tre forskellige brancher. Dette er nødvendigt for at kunne lave et produkt der er eftertragtet i hele kundens organisation, og dermed sikre at produktet bliver godt modtaget på markedet samt at den udviklede sensor vil øge genanvendelsen af procesvand eller anvendelse af sekundavand.

Målet med arbejdspakken var at kortlægge både tekniske samt økonomiske forhold for de forskellige brancher.

1.5.2 Arbejdspakke 2: Teknologiuudvikling af produktløsningen

Denne arbejdspakke indeholdte den generelle udvikling af sensoren hvor de individuelle komponenter blev udviklet og testet. Herefter blev de integreret ind i en samlet demonstrationsmodel. Ved påbegyndelsen af arbejdspakken var det forventet, at løsningen ville bestå af en detekteringschip, opkoncentreringsenhed, filtreringsenhed, fluidsistem, elektronik og software. Forinden projektets begyndelse var detekteringschippen udviklet og testet af SBT Aqua, men udformingen af detekteringschippen blev optimeret i denne arbejdspakke.

Målet med arbejdspakken var at tilvejebringe en demonstrationsmodel, som kunne testes senere i projektet.

1.5.3 Arbejdspakke 3: Forberedelse af test og demonstration

Sideløbende med færdigudviklingen af produktet skulle SBT Aqua afprøve produktløsningen i laboratoriet, således at de væsentligste parametre i sensoren kunne blive testet under kontrollerede forhold. I denne arbejdspakke skulle teknologipotentialt også afdækkes nærmere, særligt i forhold til at måle i væsker med varierende ledningsevne, da man ofte vil støde ind i vand med forskelligt ion-indhold i industrien. Udover laboratorieforsøgene skulle der udarbejdes dokumentation for hvilken værdi løsningen kunne skabe i industrien, samt hvordan den kunne implementeres til slut.

Målet med arbejdspakken var at udarbejde forsøgsopstillingsplaner til arbejdspakke 4, teste teknologipotentialt, og udarbejde materiale med forslag til implementering af den endelige produktløsning.

1.5.4 Arbejdspakke 4: Test of demonstration af produktløsningen

Efter udviklingen af demonstrationsmodellen skulle den afprøves hos projektets samarbejdspartnere. Produktløsningen opsættes i produktionslinjen, hvorefter resultaterne af demonstrationsopstillingerne skulle bruges til at dokumentere sensorens og teknologiens potentiale.

Målet med arbejdspakken var at få data hjem fra felten, og påvise at systemet virker ude i produktionsanlæg over længere tid.

2. Behov i industrien

Repræsentanter fra industrien i projektet var Glostrup Hospital, Royal Unibrew og ALK-Abelló. I de tre forskellige brancher blev det klarlagt, at der fandtes forskellige behov inden for online målinger af bakterier i diverse processer. Det blev ligeledes klarlagt, at der var forskellige tekniske behov ift. tilslutning m.m. hos partnerne.

2.1 Forholdene i dag

Inden for en bred vifte af brancher, herunder fødevarer-, drikkevarer- og farmaindustrien, såvel som i hospitalssektoren, er der et stigende pres på at øge effektiviteten, herunder bl.a. en bæredygtig og sikker udnyttelse af vandressourcen. Det er en nødvendighed at øge effektiviteten i dansk industri og produktion, hvis danske arbejdspladser skal forblive og ikke udliciteres til udlandet. Bæredygtig vandudnyttelse kan optimeres i virksomhedernes egne produktionsled ved f.eks. indførelse af procedurer der reducerer vandspildet, recirkulering af vand mellem processer og genbrug af rensede proces- eller spildevand inklusiv en forbedret kontrol af vandets mikrobiologiske kvalitet.

Den forberede kontrol findes i at kunne måle og dokumentere vandets mikrobielle kvalitet i real-time. De nuværende metoder for analyse af vandprøver indebærer manuelt prøveudtag, samt laboratorieanalysetider på alt mellem 3 og 20 dage. Dette skaber markante barrierer for vandefektivisering gennem reduktion af vandforbruget i rense- og recirkuleringsprocesser, i kraft af at vandet ikke kan anvendes før dets mikrobielle kvalitet er fastlagt. Ydermere findes der også signifikante problemstillinger inden for andre brancher, f.eks. farma, hvori man er afhængig af en meget høj vandkvalitet til forskellige produktionsprocesser. Her kan en forurening, der ikke bliver opdaget i tide, resultere i en større kassering af produkter, hvilket indebærer en økonomisk og miljømæssig belastning for virksomheden.⁷

2.1.1 Kort beskrivelse af de deltagende virksomheder

Projektet har fået tilslutning fra tre danske virksomheder, der støtter op omkring potentialet for den kommende demonstrationsmodel. De tre deltagende virksomheder, Glostrup Hospital, Royal Unibrew og ALK-Abelló antages at være gode repræsentanter for deres brancher i kraft af virksomhedernes størrelser.

2.1.1.1 Glostrup Hospital

Hospitalssektoren er en central del af ethvert samfund, og har, ud over patienternes helbred, også stor fokus på at driftsoptimere. En optimal udnyttelse af vandressourcen via opsamling af regnvand, og rensning af spildevand til genbrug, vil kunne nedbringe driftsbudgettet samt forbedre miljøprofilen for hospitalerne. Glostrup Hospital er et af de større hospitaler i Danmark, og er bl.a. et specialhospital inden for bl.a. neurologi, ryg sygdomme, øjens sygdomme og rehabilitering. Hospitalet har 2.500 medarbejdere og et årligt budget på 1,7 milliarder kr.

⁷ Vibe L. E. Simonsen, Ph.d., Chemist, ALK-Abelló

2.1.1.2 Royal Unibrew

Bryggeribranchen er en vandintensiv branche. Uden tilstrækkeligt vand i den rette kvalitet kan der ikke produceres et kvalitetsmæssigt tilfredsstillende produkt. Royal Unibrew deltager i projektet med udgangspunkt i forholdene på deres bryggeri i Faxe, der er et vandeffektivt bryggeri hvor mange vandoptimeringstiltag allerede er gennemført. Som en stor international virksomhed, med produktgrupper inden for både øl og læskedrikke, har Royal Unibrew en årlig omsætning på 4,5 milliarder kr. og ca. 2.600 ansatte på verdensplan.

2.1.1.3 ALK-Abelló

Den farmaceutiske industri er underlagt nogle af de skrappeste regelsæt ift. kvaliteten af procesvand. ALK-Abelló er en forskningsintens farmaceutisk virksomhed, der fokuserer på forebyggelse, diagnose og behandling af allergier. ALK-Abelló er verdensførende inden for allergimedicin, og havde en omsætning på mere end 2,2 milliarder kr. i 2013. Desuden har ALK-Abelló omkring 1.800 ansatte, hvoraf ca. 700 befinder sig i Danmark.

2.2 Barrierer for vandeffektivisering

En barriere ved vandeffektivisering er processen forbundet med at sikre kvaliteten af det pågældende vand. Opbevaring af processpildevand, eller rensat spildevand, er kun muligt i en kort periode, idet en opbevaring af rensat vand på kort tid forringer vandkvaliteten. Derfor er det ikke hensigtsmæssigt, at bruge laboratorieprøvemethoder, idet ulempen ved brug af en laboratorieanalyse findes i inkubationstiden, hvor en prøve skal inkuberes i flere dage, før der foreligger svar på vandets mikrobielle tilstand. Der findes en række hurtiganalysemetoder, der markant kan nedbringe analysetiden, men oftest vil disse metoder ikke måle direkte på bakterier, og de har ofte manuelle prøvetagning, hvilke fordyrer processen. Hertil kan det blive økonomisk u hensigtsmæssigt at genanvende proces- og spildevand, hvis personaleudgifter til sikring af vandets mikrobielle kvalitet bliver for høje.

Ifølge drikkevandsbekendtgørelsen kan vand mikrobiologisk dokumenteres som værende af drikkevandskvalitet, hvis grænseværdier i en begrænset kontrol for de følgende parametre overholdes; kim 22 grader, kim 37 grader, coliforme bakterier og *E. coli* bakterier.⁸ Herudover findes der også krav til måling af *Clostridium perfringens* samt spore, hvis vandet påvirkes af overfladevand, hvilket ikke er tilfælde for produktionsanlæg. Dyrkning er standardmetoden til at identificere mikroorganismer i dag, hvilket er tidskrævende. Ved normale bakteriologiske

Parameter	Dag(e) efter prøveudtagning	analyser foreligger alle svar på en mikrobiologisk kvalitetskontrolprøve først efter 3 dage –
Coliforme bakterier	Dag 1	
<i>E. coli</i>	Dag 2	
Kimtal 37	Dag 2	
Kimtal 22	Dag 3	

se Tabel 1.

Tabel 1: Svartid på forskellige mikrobielle kvalitetsparametre i proces- og drikkevand . Til måling af vandets generelle mikrobielle niveau ved kimtal 22 og 37, har man en svartid på typisk 2 til 3 dage. Hvis nøjagtigheden af prøven skal forøges, kan analysetiden forlænges op til 5 dage.

⁸ <https://www.retsinformation.dk/Forms/R0710.aspx?id=180348> – hentet April 2017

Coliforme og E. coli anvendes som indikatorbakterier for om der er en fækal forurening i systemet. Kimtal 37 og 22 angiver vandets indhold af mikroorganismer, der gror ved hhv. høje og lave temperaturer. Målinger på kimtal repræsenterer kun et lille udsnit af de bakterier, som findes i vand, typisk mellem 0,01% og 1%,⁹ hvilket betyder, at kimtal er en grov betegnelse for antallet af bakterier i vandet. I drikkevandssektoren giver et udslag på E. coli typisk anledning til større bekymringer, da det indikerer en ekstern forurening, dvs. noget som ikke burde være at finde i ledningsnettet.

Sensorsystemet, som er under udvikling af SBT Aqua, kan ikke måle specifikke bakterier som f.eks. Coliforme eller E. coli. Derimod kan systemet detektere alle bakterier, og ikke kun et mindre udsnit af den totale bakteriekoncentration som f.eks. kimtalsmålinger. I systemets nuværende udformning er det ikke i stand til at differentiere mellem forskellige bakterier, men systemet kan differentiere tydeligt mellem bakterier og ikke-bakterier grundet bakteriernes unikke fysiske opbygning. I størstedelen af den private industri vil man dog typisk ikke være bekymret for fækale forureninger i procesvandet, med mindre der er en risiko for at den introduceres gennem produktkontakt, f.eks. ved salatskyl. Hertil kan der foretages en risikovurdering for hver enkelt industri, som kortlægger muligheden for udelukkende at anvende kimtalsmålinger til at bestemme om vandet er af god kvalitet, og i nogle tilfælde endda drikkevandskvalitet. Hvis det kan konkluderes at en kimtalsmåling er tilstrækkelig, idet der er ikke er risiko for tilføjelsen af fækale bakterier under produktionen, vil SBT Aquas sensorsystem kunne stå alene ift. at dokumentere den mikrobielle vandkvalitet af procesvand.

2.3 Identificerede optimeringsområder

Der findes følgende besparelser i relation til optimering af drift og vandforbruget gennem følgende produktionsforbedrende tiltag:

- Optimering af vandforbrugende processer for at reducere vandbehovet
- Direkte genbrug af procesvand fra en proces til en anden
- Rensning og genbrug af proces- og/eller spildevand
- Løbende mikrobiel kvalitetssikring i følsomme processer

2.3.1 Hospitalssektoren – Glostrup Hospital

Ultimo december 2014 blev der sendt et projekt i udbud vedrørende etablering af et spildevandsrensningsanlæg. Projektet eksekveres som et OPP (Offentligt Privat Partnerskab) projekt hvor der er fokus på realisering af driftsbesparelser herunder omkostninger til vandforbrug og spildevandsudledning. Et nyt spildevandsanlæg skulle dels sikre at spildevandet overholder krav til udledning af spildevand til det offentlige system, herunder indhold af lægemiddelstoffer, resistente bakterier mv., og desuden er det planen at anlægget skal kunne rense spildevandet til en kvalitet så det kan genanvendes i hospitalets tekniske anlæg. Spildevandsrensaneanlægget vil være et avanceret rensaneanlæg bestående af en række enhedsoperationer, som sikrer en kvalitet af det rensede spildevand, der kan sammenlignes med drikkevandskvalitet. Ydermere arbejdes der på idéplan med at kunne infiltrere den del af det rensede spildevand, der ikke kan genbruges.

Forudsat af at der bliver givet godkendelse til at anvende det rensede spildevand som vand til tekniske anlæg, estimerer Glostrup Hospital genbrugspotentialet til at være 30%, og yderligere 10%, hvis vandet kan anvendes i toiletskyl.

En samlet genanvendelsesgrad på 40% af vandet modsvarer en total vandbesparelse på 28,6%. Dette ville resultere i besparelser på 196.000 kr./år for indtaget vand, og 294.000 kr./år for den mindre mængde afledte spildevand. Ved etableringen af et spildevandsrensningsanlæg

⁹ "Undersøgelse af bakterieantal og eftervækstpotentiale i vandværksvand", Claus Jørgen, DHI – Institut for Vand og Miljø, 2002

og genanvendelse af rensed spildevand, vil Glostrup Hospital dermed kunne opnå en årlig besparelse på 490.000 kr. Den økonomiske besparelse har tilmed også en miljøgavnlig effekt, idet der samtidig spares ca. 13.000 m³ vand per år.

2.3.2 Bryggeribranchen – Royal Unibrew

I dag er optimering af vandforbruget på bryggeriet primært implementeret ift. anvendt teknologi, f.eks. anvender skyllemaskinerne det sidste skyllevand til forskyld, tog clean-in-place (CIP) processer genanvender det sidste skyllevand som første skyllevand i næste proces. Det er ikke kendt, hvor meget vand der spares ved disse tiltag.

En potential ekstra besparelse kunne findes i målingen af den mikrobiologiske vandkvalitet på skyllevandet i CIP processen, og evt. stoppe rensningsprocessen tidligere i forløbet. Dette forudsætter dog, at den mikrobiologiske vandkvalitet er den begrænsende faktor i rensningsprocessen, og ikke f.eks. pH-værdi eller temperatur. Ydermere vil installation af en real-time mikrobiologisk vandkvalitetsmåling kunne nedsætte rensningsintervallet ved CIP anlæggene ved at hjælpe til at optimere, hvor ofte det er nødvendigt at CIP'pe en rørstrækning.

Til sidst vil en real-time måling kunne hjælpe til hurtigere at finde eventuelle kilder til mikrobiologiske problemer og derved minimere evt. mikrobiologiske problemer i produktionen.

2.3.3 Farmaceutisk industri – ALK Abelló

I forhold til optimal udnyttelse af vandressourcen via optimering af procesvandforbruget eller genbrug af procesvand-, er mikrobiologi ikke den eneste parameter, som der er nødvendig at overvåge i real-time. Krav fra relevante myndigheder betyder, at der er andre kvalitets- og oprensingsproblemer, som også ville skulle løses. I kraft af at ALK-Abelló driver farmaceutisk produktion, er der strenge krav til den mikrobiologiske vandkvalitet i aseptisk og "drug substance" produktion. På et procesanlæg i Hørsholm tages der ugentligt op til 30 prøver, på procesvandets mikrobielle kvalitet, som alle analyseres internt i eget laboratorium.

En miljø- og ressourcebesparende effekt kan derfor findes gennem automatisk og real-time overvågning af det indkomne vand, der er behandlet til såkaldt "Purified Water" (typisk procesvandskvalitet i farmaindustrien). Hvis en forurening i procesvandet ikke opdages skal produkter i værste fald kasseres, og der er skal laves papirarbejde svarende til mindst 1 mandeår. Denne problemstilling kan let perspektiveres til farmaceutisk produktion i hele verden, da eksport af medikamenter til f.eks. USA har samme krav til produktionsforholdene, uanset hvor i verden medikamenterne er produceret. Det vurderes derfor, at der er et enormt uforløst potentiale på flere milliarder i at automatisere og forøge prøvetagningen i procesvandet i den farmaceutiske industri.

2.4 Behov for online målinger af den mikrobielle vandkvalitet

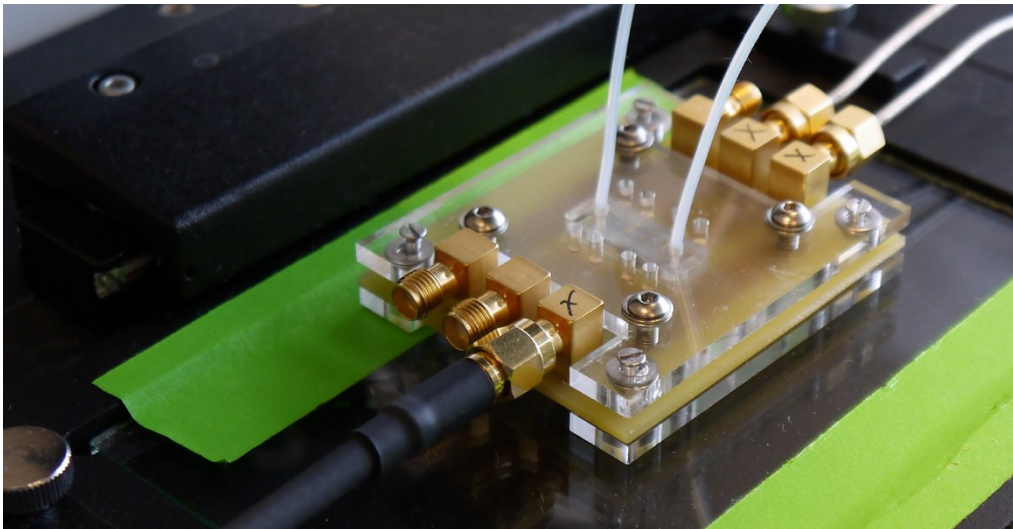
De deltagende testpartnere har tydelige forskellige behov til måling af vandets mikrobielle kvalitet. Gennem behovsanalysen blev det fastslået, at der skal måles på tre forskellige vandkilder i projektet; rensed spildevand, vandindtag og ultra-rent procesvand hos hhv. Glostrup Hospital, Royal Unibrew og ALK-Abelló. De tekniske krav hos de tre testpartnere er forskellige, specielt iht. grænseværdier, som skulle fastslås eksperimentelt gennem projektet.

3. Tilvejebringelse af løsningen

Over halvdelen af projektets budget var dedikeret til udvikling og tilvejebringelse af løsningen. I projektet lykkedes det at flytte en teknologi, der var velfungerende i laboratoriet, ud i en prototype, der kunne måle bakterieniveauet i vand i real-time.

3.1 Projektets udgangspunkt

Ved projektets påbegyndelse eksisterede en detekteringschip, som var afprøvet i laboratoriet. Denne løsning havde en udformning, som er gengivet i Figur 3. Det var blevet eftervist, at SBT Aqua kunne måle bakterier, og adskille dem fra plastikkugler, med høj nøjagtighed.



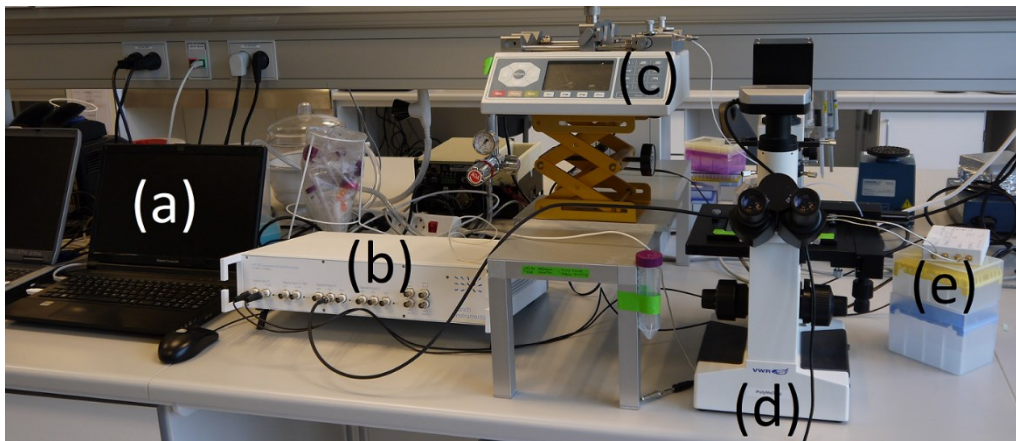
Figur 3: Detekteringsenheden i laboratoriesetup. Bemærk der er tre elektriske udgange samt to slanger med væske som kommer ind i samlingen fra toppen.

Kerneelementerne i SBT Aquas bakteriesensor består af tre hovedkomponenter:

- Et impedans-spektroskop (med indbygget lock-in amplifier)
- En analog strømforstærker
- En eksperimentel detekteringschip fra SBT Aqua

Udgangspunktet for SBT Aquas bakteriesensor var en eksperimentel laboratorie-opstilling udviklet forud for projektet, se Figur 4. Målemetodikken var baseret på de to laboratorieinstrumenter fra Zurich Instruments, der både var for store og dyre til at inkorporere direkte i sensoren. Måleelektronikken havde dog en række fordele idet de var alsidige – de forskellige målefrequenser kan bl.a. let indstilles, således der kunne kompenseres for vandets ledningsevne. Under udviklingsdelen af projektet blev TekPartner anvendt som konsulent til at få specialfremstillet den nødvendige hardware. Udviklingen af elektronikken kørte fra juli 2015 til marts 2016 og udmundede i to low-cost hardware-komponenter, der fuldkommen erstattede laboratorieinstrumenterne.

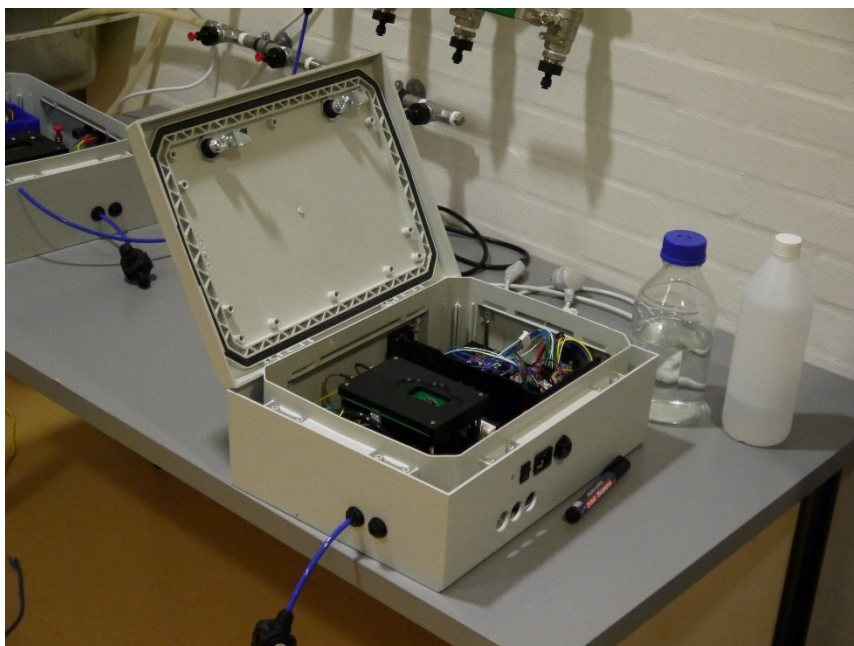
Selve holderen til detekteringschippen var en del af et større setup, som er vist i Figur 4. Således var systemet gennemprøvet i laboratoriet ved projektets start, men stadig langt fra en egentlig demonstrationsmodel, som kunne anvendes i felten. Systemet var meget besværligt at anvende, og alt prøvehåndtering var manuel.



Figur 4: Måleopstilling ved projektstart. (a) Computer til rådataaflysning, (b) Zurich Instruments impedans spektroskop, (c) sprøjtepumpe, (d) mikroskop hvorpå detekteringschip og holder lå på, (e) Zurich Instruments analog trans-impedans strømforstærker

3.2 Endegyldigt system

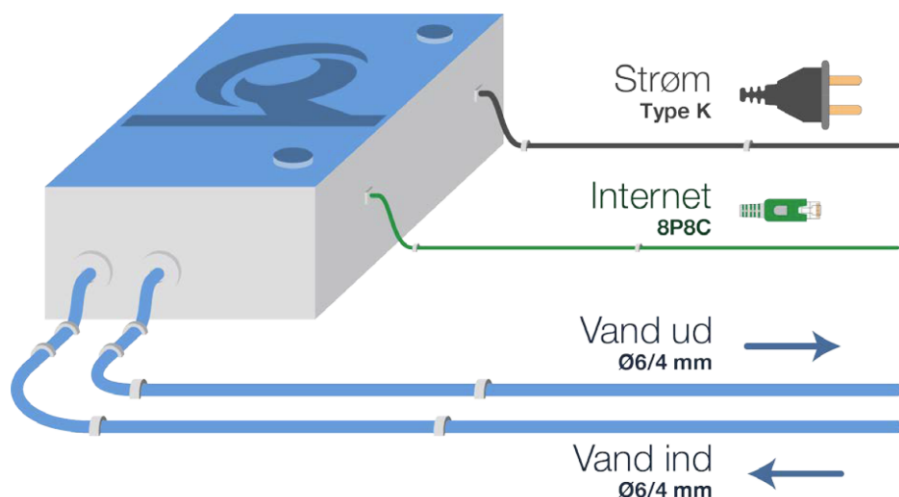
Alle funktioner som blev varetaget af delelementerne i Figur 4, blev bygget ned i en demonstrationsmodel, som er vist i Figur 5.



Figur 5: Den færdige demonstrationsmodel, som blev tilvejebragt i projektet.

Udviklingen af demonstrationsmodellen var planlagt at skulle tage 12 måneder, men udviklingsarbejdet viste sig at strække udover hele projektet grundet flere tekniske udfordringer. De tekniske udfordringer var primært at finde i det mekaniske design ift. at få systemet til at fungere 24/7 over en længere periode.

De nødvendige tilslutninger til demonstrationsmodellen er illustreret i Figur 6. Tilslutningerne er bredt anvendte standarder, dog skal vandtilslutningen modificeres til den enkelte applikation, da der var stor forskel på tilslutningskrav hos de forskellige testpartnere. Eksempelvis havde Royal Unibrew strenge krav til at det skulle være en steril Keofitt-prøvetagningsstuds, da sensoren skulle måle på vand, der efterfølgende blev anvendt i produktionen – det målte vand blev dog ledt i afløb. Hos ALK Abelló var en plastik studs tilstrækkelig, da vandet der måles på er en sidestrøm fra det procesvand, som anvendes i produktionen.



Figur 6: De fire tilslutningsformer til demonstrationsmodellen.

3.2.1 Vandtilslutning og afløb

Systemet udtager ca. 200 ml vand pr. minut. Der er et kontinuerligt flow gennem sensoren, så dette vandforbrug er konstant så længe der foretages målinger. SBT Aqua anvender som udgangspunkt en slange med Ø6/4mm dimensioner, og der er mulighed for at lave en lang række gevindtilslutninger på f.eks. kuglehaner. Det vil skulle evalueres fra case til case hvordan tilslutningen skal laves, såfremt det ikke er muligt at lave en gevindtilslutning. Systemet behandler ikke vandet på nogen måde, og på sigt er der derfor mulighed for at lave en recirkulering af det målte vand, således vandspildet forsvinder.

3.2.2 Strøm og internet

Hele systemet bruger omkring 45W i normal drift og kræver 230V for at operere. På sigt vil systemet skulle integreres i f.eks. SCADA-systemerne hos kunderne gennem et 4-20 mA signal, men grundet testens og projektets varighed var det urealistisk at programmere styringssystemerne hos testpartnere til at modtage data fra SBT Aquas sensor. Alle testdata blev derfor sendt til en SBT Aqua server. Denne forbindelse blev etableret ved brug af et 3G modem, som var sluttet til sensoren gennem CAT5. Alt data blev desuden gemt lokalt på et SD-kort i sensoren, således der eksisterede en backup, såfremt noget skulle gå galt under dataleverancen. SD-kortet havde kapacitet til at gemme flere måneders data.

4. Laboratorieforsøg

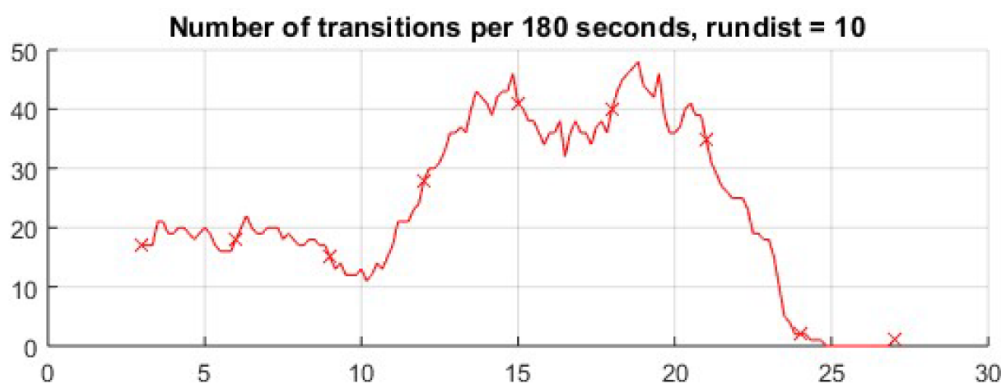
Inden felttesten blev teknologien valideret internt i laboratoriet. De to væsentligste forhold var om systemet kunne måle koncentrationer stabilt over tid, og om der kunne måles forskel på bakterier og partikler i væsker med varierende ledningsevne. Det blev eftervist, at systemet havde gode egenskaber i forhold til at kunne måle ændringer i partikelkoncentrationer, og at systemet kunne måle bakterier samt andre partikler i vand med varierende ledningsevne.

4.1 Responstid ved koncentrationsændringer

Formålet med forsøget var at undersøge modellens evne til at bestemme partikelkoncentrationen af en prøve. Der blev anvendt en forsøgsopstilling, hvor der kunne injiceres 2 µm plastik-kugler ind i vandstrømmen til demonstrationsmodellen med en sprøjtepumpe.

Fordobling af koncentrationen

Ved dette forsøg injicerede sprøjtepumpen en høj koncentration af 2 µm plastikugler ind i vandstrømmen med en flowrate på 28 µl/min. Efter 10 minutter blev injiceringsraten øget til 56 µl/min. Efter endnu 10 minutter blev der lukket for tilførslen af plastikugler. Figur 7 viser hvor mange partikler systemet målte med et bagudløbende gennemsnit på 180 sekunder. Det ses tydeligt, at der måles en stabil koncentration de første 10 minutter, hvilket bliver fordoblet, og derefter falder til 0, når der lukkes for tilførslen af plastikugler til vandstrømmen. Forsinkelsen i koncentrationsmålingerne, når der blev ændret i mængden af tilførte plastikugler, skyldtes at der blev anvendt et bagudløbende gennemsnit over 180 sekunder til at "tælle" partikler.



Figur 7: Måling af antal partikler i en vandstrøm for at verificere systemets egenskaber ift. at kunne måle koncentrationsændringer. Y-aksen viser hvor mange partikler der er talt over de sidste 180 sekunder. X-aksen er tid i minutter. Forsøget viste, at det var muligt at måle koncentrationsændringer inden for få minutter.

Stabile koncentrationsmålinger

Ved dette forsøg injicerede sprøjtepumpen en høj koncentration af 2 µm plastikugler ind i vandstrømmen med en konstant flowrate på 30 µl/min over 30 minutter. Efter de 30 minutter blev der lukket for tilførslen af plastikugler. Figur 8 viser hvor mange partikler systemet målte

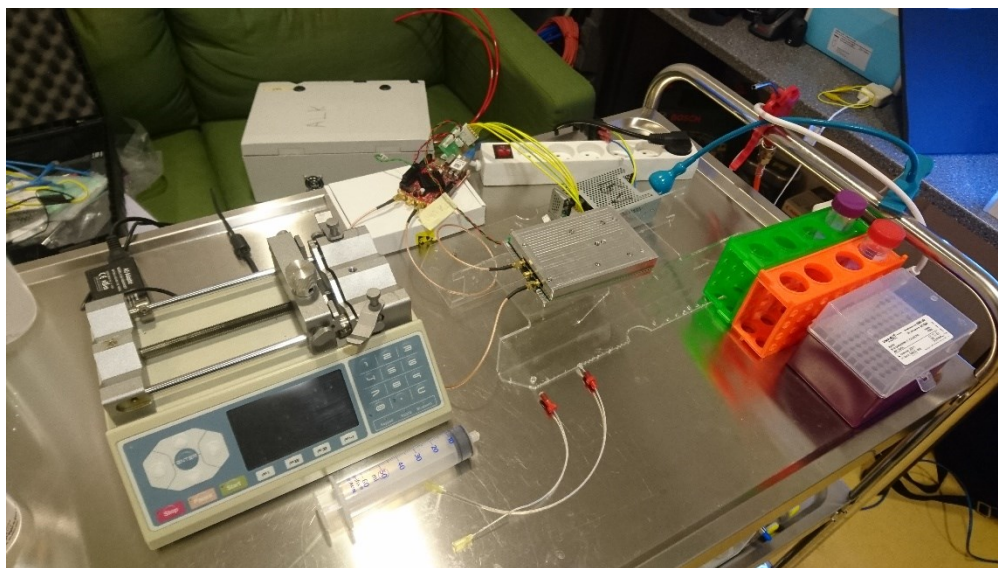
med et bagudløbende gennemsnit på 180 sekunder. Det ses tydeligt, at der er stabile målinger gennem de 30 minutter, og at målingerne falder til 0, når der lukkes for tilførelsen af plastikkugler til vandstrømmen.



Figur 8: Måling af antal partikler i en vandstrøm for at verificere, at systemet måler en fast koncentration stabilt over tid. Y-aksen viser hvor mange partikler der er talt over de sidste 180 sekunder. X-aksen er tid i minutter. Forsøget viste, at det var muligt at måle en stabil koncentration i 30 minutter.

4.2 Målinger af bakterier og partikler i væsker med varierende ledningsevne

Forskellige applikationer vil have vand med forskellig ledningsevne. Da måleprincippet er baseret på impedansmålinger var der et behov for at undersøge hvorvidt teknologien kunne måle og differentiere bakterier fra andre partikler i vand med varierende ledningsevne. Måleelektronikken, der blev anvendt i forsøget, var ens med elektronikken som var i demonstrationsmodellen. Laboratorieopstillingen er afbilledet i Figur 9.



Figur 9: Laboratorieopstilling hvor teknologien blev afprøvet med en kontrolleret sprøjtepumpe.

Fremgangsmåde

Der blev før forsøgets start konstrueret 6 fortyndinger af 1x PBS (Phosphate buffered saline) og deioniseret samt filtreret MilliQ-vand fra ren MilliQ til 1/15x PBS. MilliQ er sammenligneligt med Purified Water, men ikke produceret på samme anlæg. De 6 prøver blev fremstillet dagen før forsøget og ledningsevnen fra hver enkelt blev bestemt med et "conductivity meter". Ledningsevnen for de forskellige prøver er opsummeret i Tabel 2.

Tabel 2: Ledningsevne for prøverne anvendt til at verificere systemets evne til at måle bakterier og partikler i væsker med varierende ledningsevne.

Prøve	Ledningsevne [mS/m]
1	0,002
2	35
3	50
4	74
5	97
6	117

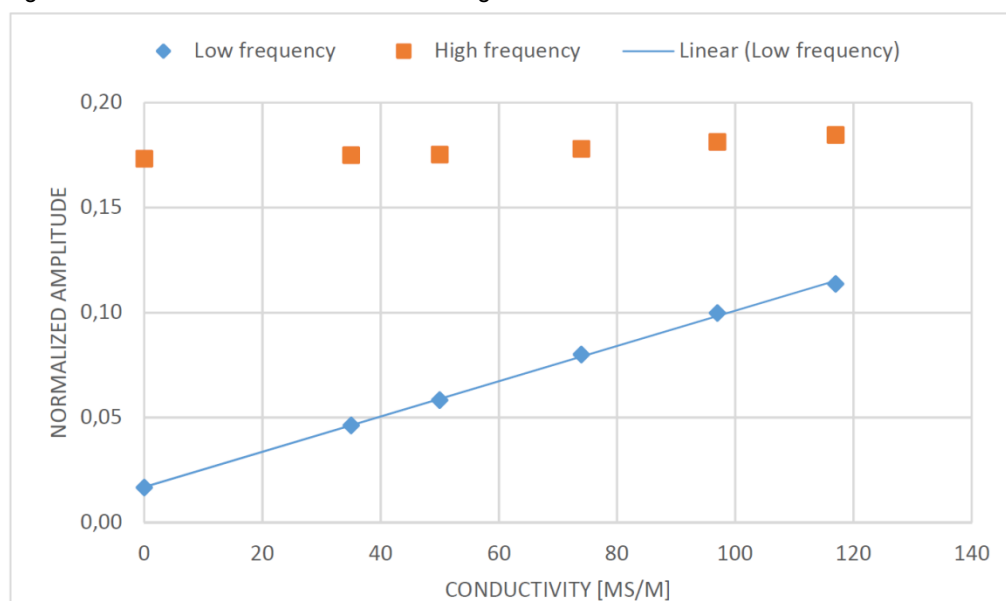
Dagen før forsøget blev en *E. coli* kultur klargjort og placeret i inkubator (37C, 22 timer, med rotation). På forsøgsgdagen blev *E. coli* kulturen resuspenderet i 1/20xPBS og fortyndet 2000 gange i de respektive medier.

Forsøgsprocedure var som følger:

1. Først skylles systemet igennem med rent medium med den ønskede ledningsevne
2. Absolutstrømmen mellem to elektrodesæt blev bestemt gennem den rå data
3. Herefter indføres prøven med bakterier og plastikkugler
4. Efter signalet er stabiliseret optages data i ca. 5 minutter
5. Proceduren gentages for alle prøver

Resultater

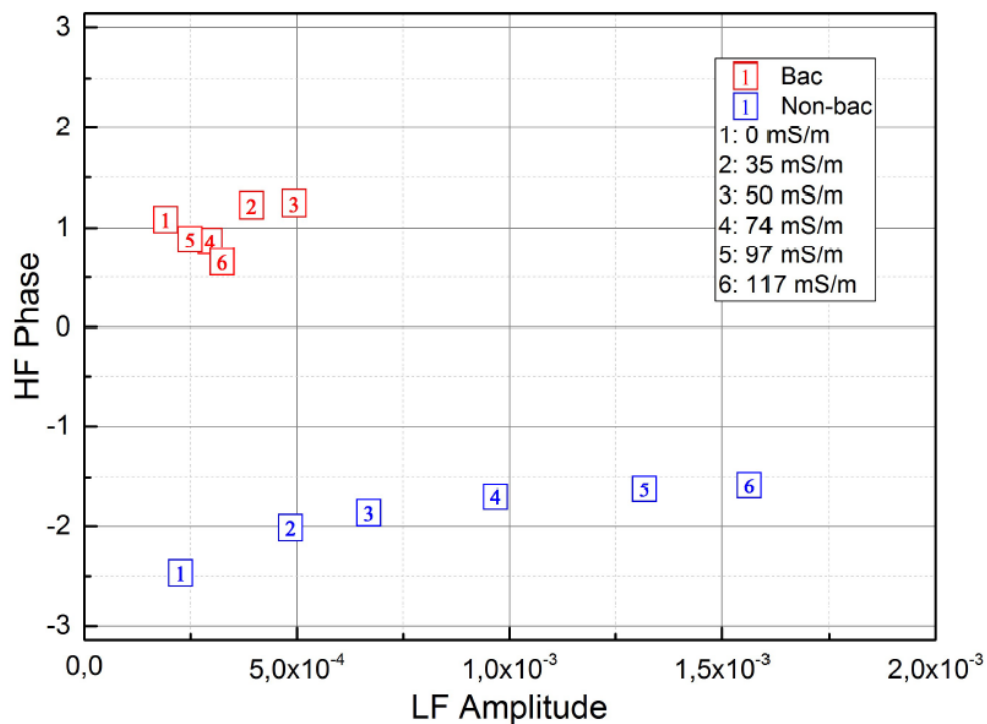
Der blev eftervist linearitet mellem målt signal og ledningsevne. Den normaliserede amplitude (absolut strømmen mellem et elektrodesæt) for det lavfrekvente og højfrekvente signal er vist i Figur 10 som en funktion af den målte ledningsevne.



Figur 10: Normaliseret amplitude (absolut strøm mellem et elektrodesæt) som funktion af ledningsevnen i prøven. Som forventet var den lave frekvens mest påvirket.

Det ses at den lave frekvens i kHz-området afhænger lineært af mediets ledningsevne, hvorimod den høje frekvens i MHz-området kun er svagt påvirket af ledningsevnen. Dette vil kunne bruges senere til at kalibrere sensorerne automatisk.

Derudover blev det eftervist, at systemet kunne identificere bakterier og ikke-bakterier ved forskellige ledningsevner. Gennemsnitsværdierne for bakteriepopulationerne og populationerne for de ikke-ledende plastik kugler er vist i Figur 11, hvor fasedrejningen i den høje frekvens er plottet mod amplituden i den lave frekvens.



Figur 11: Det blev eftervist, at teknologien kan differentiere bakterier og ikke-bakterier i væsker med varierende ledningsevner. Dette er væsentligt i forhold til at anvende teknologien i forskellige applikationer.

5. Feltstudier

Projektets testplan indbefattede tests hos Royal Unibrew, ALK-Abelló og Glostrup Hospital. Grundet uforudsete hændelser var det ikke muligt at afprøve løsningen hos Glostrup Hospital, men demonstrationsmodellen blev afprøvet i flere afarter hos Royal Unibrew og ALK-Abelló. Resultaterne fra feltstudierne viste, at demonstrationsmodellen ofte havde problemer med drift i længere perioder, og det lykkedes ikke at generere god data fra testbrugerne i projektet.

5.1 Testplan

Testplanen for projektet indbefattede tests hos Royal Unibrew, ALK-Abelló og Glostrup Hospital. Grundet forsinkelser i renselanlægget hos Glostrup Hospital blev der ikke testet hos Glostrup Hospital i løbet af projektperioden.

5.1.1 Forsøgsopstilling hos Royal Unibrew

Sensoren skulle i første omgang installeres på Royal Unibrews vandværk, hvor der skulle etableres en baseline for vandets kvalitet, hvorefter effekten af returskyl af sandfilter på vandets kvalitet skulle undersøges. Der findes to prøvehaner på vandværket, hvor sensoren fik lov at sidde permanent på den ene i hele testforløbet. Tilslutningen er en steril Keofitt tilslutning. Denne tilslutning passer ikke umiddelbart til SBT Aquas standardslanger på Ø6/4mm, men Royal Unibrew svejsede en studs på, således slangen kunne monteres på fittingen. Der fandtes et gulv afløb, hvor der blev ført en udløbsslange ned i, så det målte vand kunne ledes ud i kloak. Der var rige muligheder for tilslutning til 230V på vandværket. SBT Aqua leverede et 3G modem, så dataen kunne sendes til en server. Installationen var indendørs i et beskyttet miljø.

5.1.2 Forsøgsopstilling hos ALK-Abelló

Hos ALK Abelló var formålet med forsøget at måle på purified water, dvs. vand med en meget høj renhed. Det var ikke muligt, at teste sensoren direkte i produktionen grundet strenge myndighedskrav. Sensoren blev derfor opsat i ALK Abellós "sandkasse-lab", som bruges til mange forskellige formål, men stadig har en vandtilslutning direkte til det behandlede vand, der har den samme kvalitet som anvendes i produktionen. Sensoren blev monteret ved en laboriebænk, hvor den sluttes til vandnettet gennem en slangestuds, der er tilpasset SBT Aquas slanger. ALK Abelló sørgede for at lave slangestudsene klar. Der var nem adgang til både stikkontakt med 230V og vask, således det målte vand kunne ledes væk. SBT Aqua leverede et 3G modem, så dataen kunne sendes til en server.

5.1.3 Forsøgsopstilling hos Glostrup Hospital

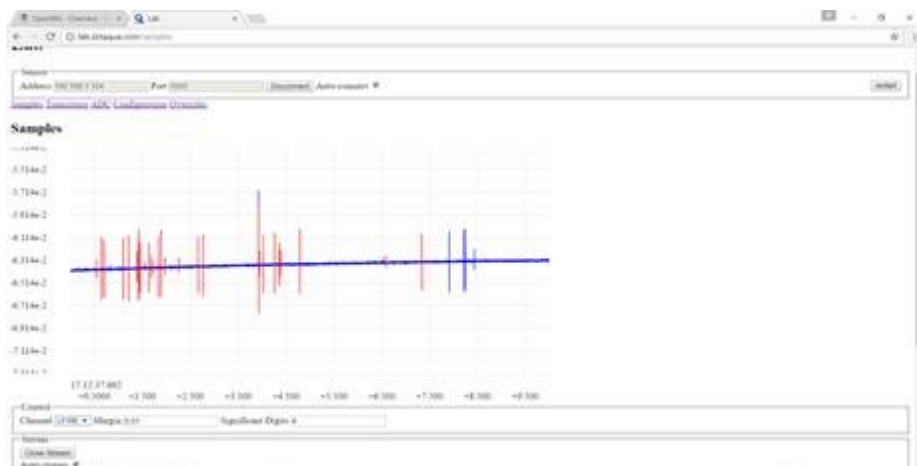
Grundet uforudsete forsinkelser i etableringen af renselanlægget på Glostrup Hospital nåede projektet ikke at foretage feltstudier i samarbejde med Glostrup Hospital.

5.2 Testresultater

Inden opsætningen af demonstrationsmodellerne blev de testet i eget værksted for at verificere, at de havde god måle-funktionalitet. Denne test blev foretaget med en opblanding af vand og 2 µm store plastiskugler. Derefter blev sensorerne opsat i en testperiode der varede fra 1-3 uger. Efter endt testperiode blev sensorerne taget ned, og afprøvet hjemme i eget værksted igen for at verificere, at de stadig havde måle-funktionalitet.

5.2.1 Udvalgte resultater fra test hos Royal UnibrewDer blev opsat i alt 3 forsøgsopstillinger hos Royal Unibrew.

I alle tilfælde blev det eftervist, at demonstrationsmodellen havde god målefunktionalitet inden den blev sat op hos Royal Unibrew. I Figur 12 er den rå datastrøm gengivet, hvor de farvede udslag er partikel-events som de udviklede software-algoritmer har detekteret som værende af interesse. I Figur 13 ses en forstørrelse af én af disse events. Forstørrelsen viser et lige stort positivt og negativt udslag i forhold til baseline, hvilket er hvad man vil forvente med systemet.



Figur 12: Den rå datastrøm fra online sensoren. Der ses et pænt fladt signal med tydeligt partikel-events. Alle events af interesse er registreret med rødt. Det skal bemærkes, at grundlaget for selve bakteriedetektering var 4 af ovenstående datastrømme der blev sammenlignet med hinanden.

Udover er der også én veldefineret top og bund.

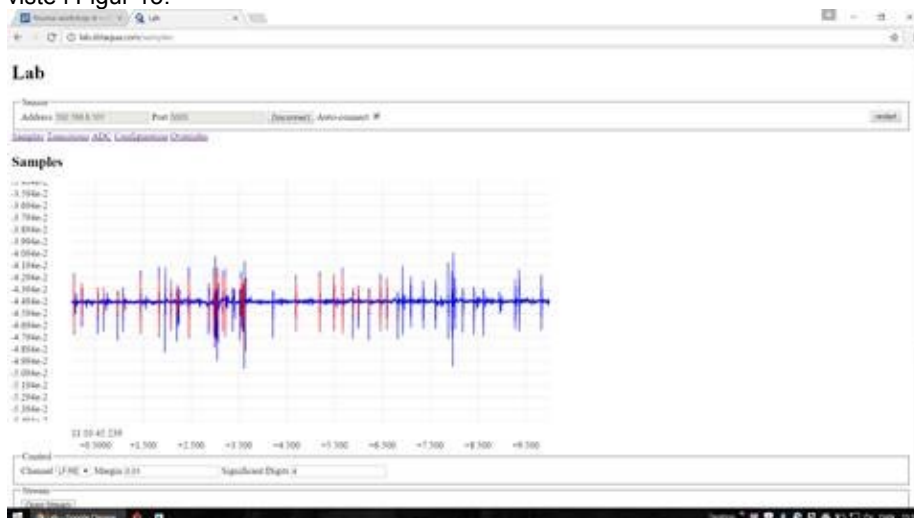
Resultaterne fra Figur 12 og Figur 13 kunne reproduceres og fungerede som indikation for at systemet virkede som forventet inden opsætningen til test. Grundet at systemet gerne skulle være så lidt forurenet som muligt, blev der kun kørt målinger i 24 timer inden selve testopsætningen.



Figur 13: Forstørrelse af et partikel-event fra Figur 12. Forstørrelsen viser et lige stort positivt og negativt udslag i forhold til baseline, hvilket er forventeligt med systemet. Udover er der også én veldefineret top og bund.

Efter testens afslutning viste analysen af dataen store problemer i datastrømmen, hvor problemerne allerede var opstået nogle timer inde i den flere uge lange test. Det blev konstateret, at

der var mange "falske" partikel-events, som vi mener skyldtes frigivet luft i vandet. Figur 14 viser selve datastrømmen, som er tydeligt anderledes fra Figur 12. Figur 15 viser en forstørrelse af et partikel-event i Figur 14, og her ses også et tydeligt andet karakteristika end det viste i Figur 13.



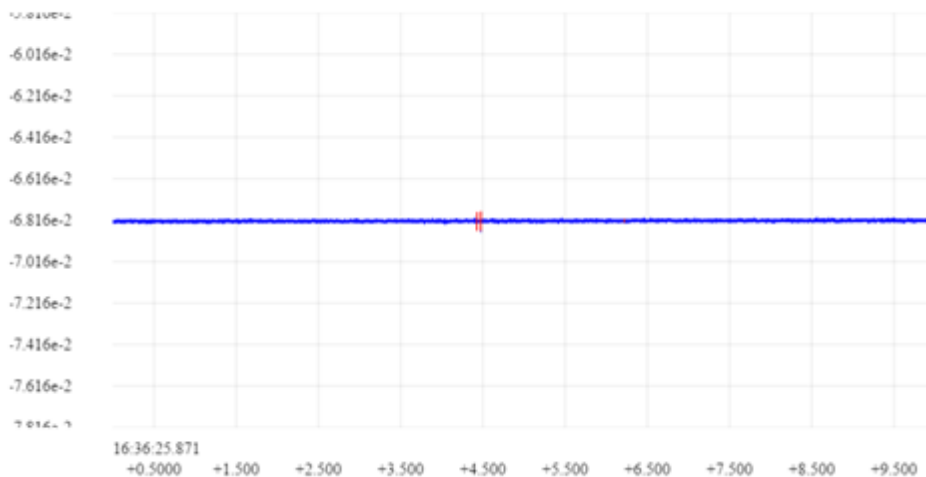
Figur 14: Dataanalysen hos testen hos Royal Unibrew viste et markant anderledes datasignal ift. testen der blev foretaget i eget laboratorium umiddelbart inden opsætning.



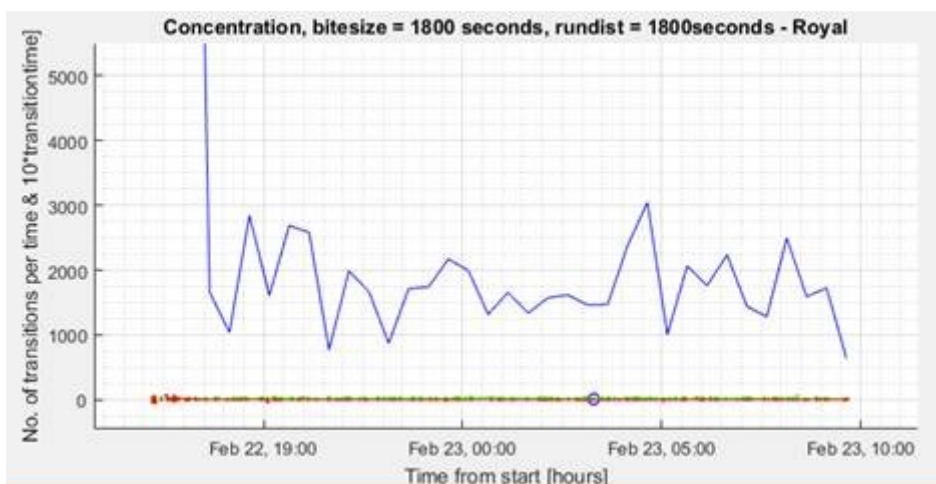
Figur 15: En forstørrelse af et registreret partikel-event i datastrømmen viste markant anderledes karakteristika end hvad der ellers er blevet observeret i forbindelse med målinger. Det antages, at udslaget kan skyldes luft i systemet.

Ved nedtagningen af demonstrationsmodellen blev det eftervist, at den stadig havde rigtig målefunktionalitet, eksemplificeret i Figur 15. Derefter fik demonstrationsmodellen lov til at stå og måle på vandhanevand i eget værksted, hvor den målte en stabil koncentration af partikler og bakterier over tid – se Figur 16.

Samples



Figur 15: Datastrømmen i modellen var god ved nedtagningstesten i eget værksted. Der var ikke mærkelige udsving, og der blev målt og registreret rigtige partikel-events.



Figur 16: Systemet var i stand til at måle en retvisende koncentration af bakterier og partikler i eget værksted. Dette var efter systemet havde målt forkert hos Royal Unibrew. Der var ikke blevet lavet nogle ændringer i systemer siden det var opsat hos Royal Unibrew.

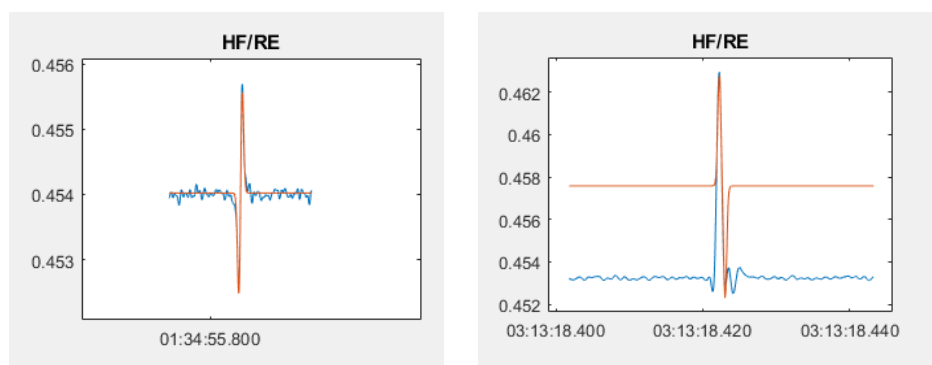
Hovedårsagen til problemet formodes at være luft i vandet, og det kunne ikke afhjælpes. Vi formoder problemet kom fra den specialfremstillede Keofitt løsning. Derudover var der en række andre problemer ved de foregående Royal Unibrew tests, hvor projektet havde udfordringer ift. systemets målinger. Projektet nåede derfor ikke at få målt vandkvalitet hos Royal Unibrew med online sensoren.

5.2.2 Udvalgte testresultater hos ALK-Abelló

Der blev opsat en demonstrationsmodel hos ALK-Abello. Formålet med opsætningen var at foretage målinger på Purified Water (PW) i ALK-Abellos sandkasse-lab. Inden opsætningen blev det testet og bekræftet at demonstrationsmodellen kunne detektere 2 μm plastikkugler i purified water og det blev derfor antaget at demonstrationsmodellen var klar til opsætning hos ALK-Abello.

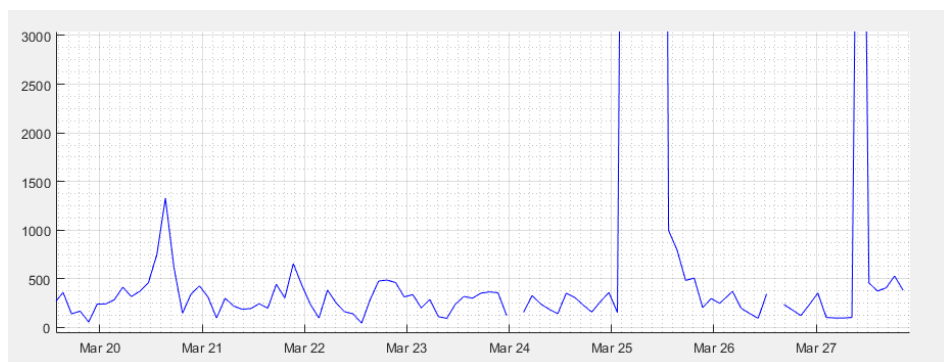
Demonstrationsmodellen har gennem projektet været teste omfattende på drikkevand eller vand med samme egenskaber som drikkevand. Da detektionsprincippet er baseret på elektriske målinger, vil vandets ledningsevne have væsentlig indflydelse på sensorens evne til at detektere partikler. Testen hos ALK var den første langvarige test på en vandstrøm med meget lav ledningsevne.

Ligesom i testen hos Royal Unibrew viste analysen af dataen en del anormale events, der ikke lignede de karakteristiske partikel/bakterie-events det forventedes at se. De anormale events havde dog en anderledes form end den hos de anormale event målt hos Royal Unibrew, og det er ikke sandsynligt at de i dette tilfælde skyldes luftbobler der passerer gennem demonstrationsmodellen. I Figur 17 ses et karakteristisk og et ikke karakteristisk events der er detekteret i løbet af testperioden. Det er uklart om de anormale events er egentlige partikler/bakterier der bevæger sig gennem demonstrationsmodellen, og at det ukarakteristiske signal udelukkende skyldes at vandets ledningsevne er lavere end normalt, eller om de opstår som et resultat af udefrakommende elektrisk eller mekanisk støj.



Figur 17: Rå-signal fra detekterede partikelevents under ALK-testen. Karakteristisk event som forventet (venstre) og anormalt, ikke karakteristisk, event (højre).

I løbet af måleperioden var der også perioder med meget høj elektrisk støj der forstyrrede målingerne. Denne støj gjorde at der opstod meget store udslag i koncentrationsmålingerne. Figur 18 viser den målte koncentration over en del af måleperioden. De høje spring i koncentrationen den 20., 25. og 27. marts skyldes støj i signalet og antages ikke at være retvisende ift. til vandets kvalitet.

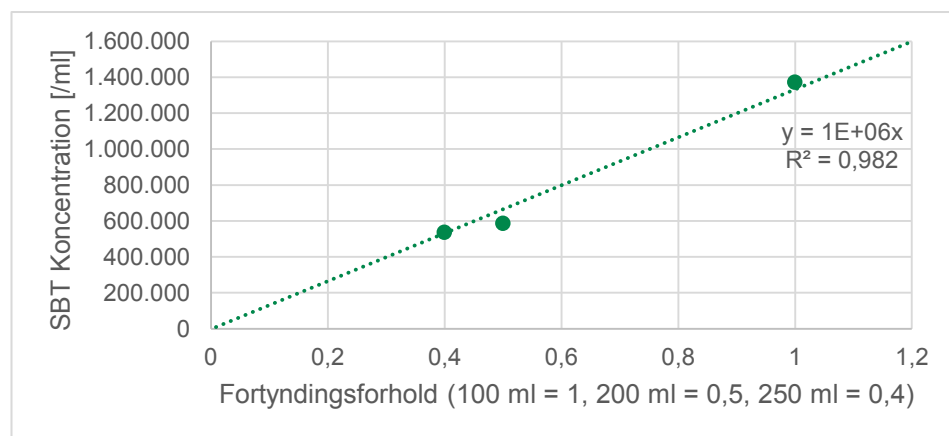


Figur 18: Målt partikelkoncentration i perioden 20. marts til 28. marts. De høje spring i koncentrationen den 20., 25. og 27. marts er skyldes støj i signalet og er ikke retvisende ift. til vandets kvalitet.

Efter real-time testens afslutning blev der opsat et forsøg hvor der blev målt på PW med tilsatte koncentrationer af *Pseudomonas aeruginosa*. Formålet med forsøget var at se hvor godt demonstrationsmodellen kan bestemme forureningsniveauet af en prøve med tilsatte bakteri-

er. Der tilsattes fra start ca. 100.000.000 bakterier til en prøve på 100 ml ren PW. Koncentrationen af prøven blev herefter bestemt med SBTs sensor. Prøven blev dernæst fortyndet med 100 ml rent PW, således at koncentrationen af bakterierne blev halveret. Til sidst blev yderligere 50 ml rent PW tilsat. De målte koncentrationer kan ses i

Figur 19.



Figur 19: Koncentrationer af *Pseudomonas aeruginosa* målt i tre fortyndinger af purified water.

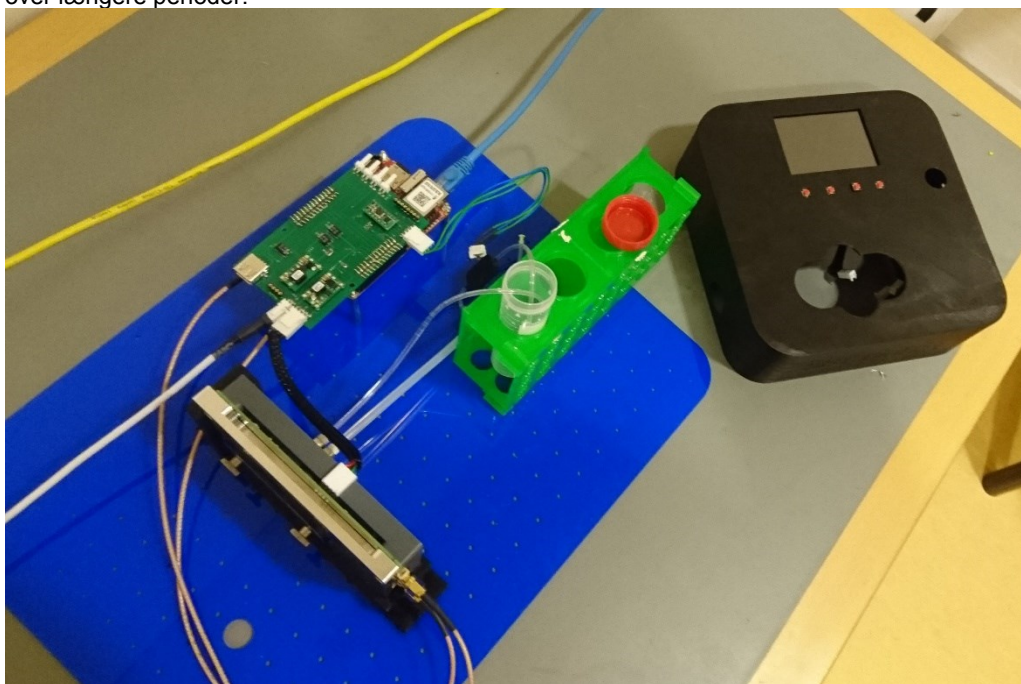
Der var en lineær koncentrationskorrelation mellem SBTs målte koncentrationer og fortyndingsforholdene. Forsøget viser at det er muligt at bestemme bakteriekoncentrationen i PW og at arbejdet med demonstrationsmodellen fremover bør fokusere kraftigt på stabiliteten af målingerne.

6. Afledt applikation

Laboratorieforsøgene i projektet viste, at der god målefunktionalitet i systemet, men feltstudierne viste samtidig, at systemet havde vanskeligheder ved at operere kontinuerligt i længere tid. Der er derfor tilvejebragt et system, som måler bakterier særdeles godt under kontrollerede forhold i kortere perioder, og dette system kan bruges til at måle på enkelte prøver, men ikke i en online-opstilling. Efter afslutningen af test- og udviklingsarbejdet i projektet, blev demonstrationsmodellen modificeret og afprøvet som en ikke-online opstilling med gode resultater.

6.1 Ikke-online måling af vandprøve hos Royal Unibrew

Ved projektets begyndelse var der identificeret to store værdiskabende aspekter ved løsningen; svar i realtid på bakterietallet og løbende data fra et online system. Udformningen af et online system har vist sig værende teknisk udfordrende, og SBT Aqua har derfor undersøgt muligheden for at fremstille et stykke udstyr, hvori man manuelt kunne indsætte en vandprøve og få et hurtigt svar på bakterietallet. Dette stykke udstyr har samme værdi som en online sensor ift. til at foretage hurtig kvalitetssikring samt frigivelse af produktionsudstyr, rensed vand, eller produkter – men løsningen er ikke i stand til at foretage automatisk dataopsamling over længere perioder.



Figur 20: Sensorløsning til hurtigmålinger af bakterier uden online funktion. Hele systemet forventes at kunne integreres i kassen set til højre, som er 18x18x7 cm.

Ved afslutningen af de planlagte brugertests i projektet blev prototypen til online-målinger modificeret, således flow-systemet kunne håndtere en prøvevolumen på ca. 10 ml i modsætning til en kontinuer vandstrøm. Et billede af denne opstilling er vist i Figur 20.

Den modificerede prototype var baseret på helt samme elektronik og flow celle, som der har været anvendt i online sensoren. Forskellen mellem de to systemer findes i valg af slanger og pumper. Der blev udtaget en ubehandlet vandprøve fra Royal Unibrew, som blev analyseret i den modificerede prototype. På 10 minutter målte sensoren en koncentration i prøven på ca. 31.000 bakterier/ml og ca. 15.000 andre partikler/ml. Disse værdier er i samme størrelsesorden, som tallene fra andet udstyr, der ligeledes tæller det totale bakterieantal i vand, og ikke kun de dyrkbare bakterier.¹⁰ Efterfølgende har SBT Aqua været ude og diskutere denne løsnings kommercielle aspekt med flere potentielle kunder, og markedet for en hurtig og billig løsning til kvalitetssikring af vandressourcen internt i virksomheder er blevet klarlagt. Det vurderes at der eksisterer et milliard-marked for en sådan løsning, da det i mange tilfælde vil være en 1-til-1 erstatning for den procedure, som virksomhederne anvender til kvalitetssikring af vandressourcen i dag. Fordelen ved SBT Aquas metode er blot, at svaret på analysen foreligger efter 10 minutter og ikke efter 3 dage.

¹⁰ B. Højris et. al., "A novel, optical, on-line bacteria sensor for monitoring drinking water quality", *Scientific Reports*, vol. 6, article number 23935, April 2016

7. Konklusion

Projektet havde til formål at afdække behovene i industrien, tilvejebringe en demonstrationsmodel til online målinger af bakterieniveauet i forskellige vandressourcer, afprøve systemet i laboratoriet samt afprøve løsningen hos projektpartnerne. Alle mål blev opfyldt, men resultaterne fra feltstudierne viste, at demonstrationsmodellen havde vanskeligt ved at måle over længere perioder.

Ved tidspunktet for projektansøgningen eksisterede der en velfungerende laboratorieteknologi, som hurtigt kunne måle bakterier under meget kontrollerede forhold. Inden projektstart var der stærke indikationer på at denne teknologi havde brede anvendelsesområder, og at den kunne anvendes til effektivere virksomheders vandforbrug gennem hurtigere kontrol med mikrobiologien af vandressourcen.

Projektet involverede partnere fra den private industri i form af Royal Unibrew og ALK-Abelló, samt en partner fra sundhedsvæsenet i form af Glostrup Hospital. De forskellige industriers behov og ønsker til måling af bakterieniveauet i deres respektive vandressourcer blev klarlagt, og det var tydeligt, at der var varierende behov. Eksempelvis ønskede ALK-Abelló at sikre den eksisterende vandressource, da den har høj betydning for produktet, mens Glostrup Hospital ønskede at genoprense vand med henblik på genanvendelse i andre sammenhæng. Fælles for alle deltagende partnere var dog, at der fandtes et optimeringspotentiale gennem en bedre kontrol med mikrobiologien i vandressourcerne.

Efter behovsafklaringen blev der tilvejebragt en demonstrationsmodel baseret på laboratorieteknologien. Udviklingen af demonstrationsmodellen foregik over flere iterationer, og den blev løbende afprøvet i laboratoriet. Laboratorieforsøgene viste gode måleegenskaber for teknologien, men alle forsøg var begrænset til kortere perioder. Projektets slutfase involverede opsætning af løsningen hos testbrugerne, hvor den blev testet hos Royal Unibrew og ALK-Abelló. Projektet nåede ikke at teste hos Glostrup Hospital grundet uforudsete hændelser og forsinkelser med etableringen af rensningsanlægget på hospitalet. Feltstudierne producerede ikke gode resultater, da det viste sig vanskeligt for demonstrationsmodellen at operere over længere tid af gangen. Dette var til trods for intensive tests forud for opsætningen hos testpartnerne.

Efter afviklingen af projektets udviklings- og testaktiviteter blev der afprøvet en modificeret demonstrationsmodel, som kunne måle bakterieniveauet i enkelte prøver, dvs. ikke kontinuerligt og online. Denne løsning har vist sig at være velfungerende, og projektholder vil forfølge en kommercialisering af teknologien baseret på den udvikling, som er foregået under projektet, dog uden online funktionalitet i første omgang.

Real-time vandkvalitetsmålinger i industrien og hospitalssektoren

Projektet har haft til formål at udvikle, teste og verificere en demonstrationsmodel til online og real-time mikrobiel kvalitetssikring af procesvand i industrien og hospitalssektoren.



Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk