

HYGISENSE

- sensorplatform til styring af hygiejnisering
i udløbsvand



HYGISENSE - SENSORPLATFORM TIL STYRING AF HYGIEJNISERING I UDLØBSVAND

DATO: 13. marts 2020

Projekt ID: 1157.2017

Udgiver:
DANVA

Udarbejdet af:

Lotte Bjerrum Friis-Holm, sektionsleder, ph.d., Teknologisk Institut

Casper Laur Byg, specialist, ph.d., Teknologisk Institut

Jonas Lembke Andersen, specialist, ph.d., Teknologisk Institut

Jacob Andersen, produktionschef, Hjørring Vand

Finansiering:

Projektet er finansieret af

VUDP, Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram

Samarbejdspartnere:

Hjørring Vand

Teknologisk Institut

Kategori (Spildevand, drikkevand eller klimatilpasning):

Spildevand

Indholdsfortegnelse

1	Sammenfatning	3
2	English summary	4
3	Introduktion	5
4	Projektets betydning for vandbranchen	6
4.1	Marked og/eller anvendelsesmuligheder	6
4.2	Næste skridt	7
4.3	Formidlingsplan	7
5	Projektet	8
5.1	Formål	8
5.2	Output	8
5.3	Projektresultater	8
5.4	Konklusion	21

1 Sammenfatning

Udløbsvands indhold af potentielt patogene bakterier (hygiejnisk kvalitet) er særlig relevant ved udledning til recipienter som søer og badestrande, der benyttes til rekreative formål. I Danmark er dette aktuelt for en række renseanlæg, der udleder til badeområder direkte eller indirekte via vandløb.

For at nedbringe koncentrationen af patogene bakterier i udløbsvandet anvender flere danske og udenlandske renseanlæg, der udleder til badeområder, desinfektionsmetoder (hygiejnisering) som UV eller tilsætning af biocider, således at niveauet af potentielt patogene fækale bakterier holdes nede.

Behovet for hygiejnisering og effekten af hygiejniseringen vurderes i dag vha. dyrkningsbaserede teknikker, der kræver lang analysetid (3-5 dage). Det betyder, at der p.t. ikke er en klar sammenhæng mellem tilsætningen af biocid og det reelle behov for hygiejnisering.

Formålet med projektet var at udvikle en løsning til:

- Realtidsovervågning af indholdet af aktive bakterier i rensed spildevand
- Bedre styring af biocidtilsætningen.

Hjørring Vandselskab A/S og Teknologisk Institut har i fællesskab udviklet en sensorplatform på baggrund af både laboratorie- og fuldskalaforsøg. Sensorplatformen, HygiSense, måler mikrobiel aktivitet som funktion af biologisk, aerob respiration, dvs. iltforbrug. Sensoren kan give et hurtigt onlinemål for mængden af aktive mikroorganismer i udløbsvandet før og efter hygiejnisering. En prototype af sensorplatformen har været testet i laboratoriet på Teknologisk Institut med både rensed spildevand og renkulturer af E. coli. Dernæst har den været testet hen over to badesæsoner on-site på Nr. Lyngby renseanlæg ved Hjørring.

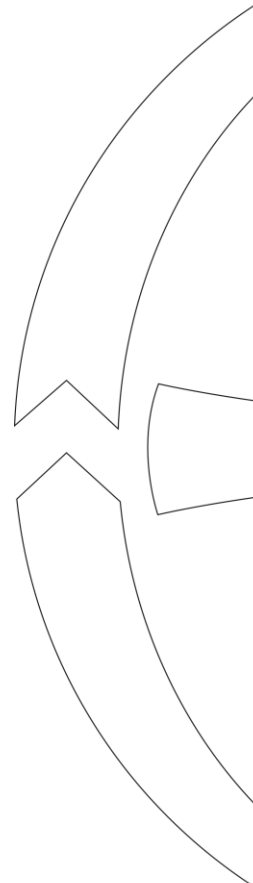
Udvikling af sensorplatform og laboratorieforsøg

Baseret på tidlige laboratorieforsøg blev kravene til sensorplatformen sammensat, så platformen bl.a. baserer sig på en sekvens af vandindtagning, opvarmning, recirkulation af prøvevandet og løbende måling af iltkoncentrationen. Målesekvensen er løbende optimeret i projektet. Indledende laboratorieforsøg med renkultur og udløbsvand viste tilfredsstillende sammenhæng mellem bakteriekoncentration og iltforbrug.

Sensormålinger on-site på renseanlæg

On-site test af sensorplatformen på Nr. Lyngby renseanlæg er udført i 2018 og 2019 i badesæsonen fra maj til september. Der er sideløbende gennem hele forløbet taget udvidede vandprøver til bakterieanalyse, som er sammenholdt med det målte iltforbrug.

Baseret på resultaterne kan det konkluderes, at sensorplatformen kan varsle om et kraftigt stigende bakterieniveau, længe før konventionelle prøvesvar ville være tilgængelige.



2 English summary

In wastewater, the content of potentially pathogenic bacteria (hygienic quality) is particularly relevant in case of discharge to such recipients such as lakes and bathing beaches, which are used for recreational purposes. In Denmark, this is of great importance to many wastewater treatment plants with indirect or indirect discharges in water flows to bathing areas.

To reduce the concentration of pathogenic bacteria in discharge water, several wastewater treatment plants with discharge to bathing areas in Denmark and abroad are applying disinfection methods (hygienization) such as UV or biocide addition to ensure that the levels of potentially pathogenic fecal bacteria are kept down.

Currently, the need and the effect of hygienization are assessed applying cultivation techniques with a long analysis time (3-5 days), which gives a poor connection between the addition of biocides and the actual need for hygienization.

The aim of this project was to develop a solution for:

- Realtime monitoring of active bacteria content in treated wastewater.
- Improved control of biocide addition.

Hjørring Vandselskab A/S and Danish Technological Institute together have developed a sensor platform based on lab- and full-scale tests. The sensor platform, HygiSense, measures microbial activity as a function of biological aerobic respiration, i.e. oxygen consumption. The sensor provides a fast online measurement of the amount of active microorganisms in discharge water before and after hygienization. A prototype of the sensor platform has been tested in the laboratory at Danish Technological Institute with both wastewater and E.coli pure culture. Thereafter, it was tested on site during 2 bathing seasons at Nr. Lyngby wastewater treatment plant near Hjørring.

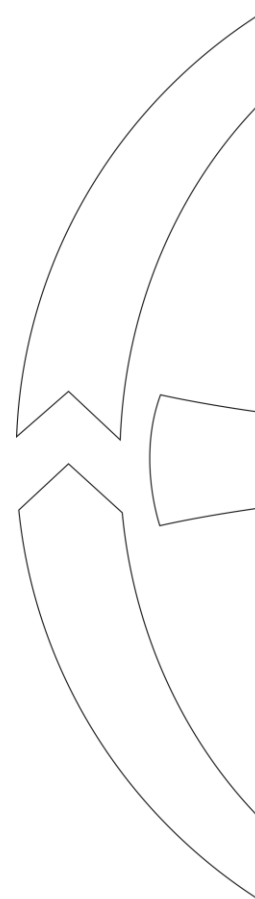
Development of sensor platform and laboratory tests

As a result of early laboratory tests, the requirements to the sensor platform were combined so that the platform is, among others, based on a sequence of water intakes, heating up, recirculation of sample water and continuous measurements of oxygen concentration. The measuring sequence was optimized during the project. Introductory laboratory tests with pure culture and discharge water showed a successful correlation between bacterial concentration and oxygen consumption.

On-site sensor measurements at wastewater treatment plants

On-site testing of the sensor platform at Nr. Lyngby wastewater treatment plant was performed in 2018 and 2019 during bathing season from May to September. During the entire project, extended water samples were collected for bacterial analysis, which were compared to the measured oxygen consumption.

The results achieved in this project show that the sensor platform is able to notify about a rapidly increasing bacterial levels long before the conventional sample results are available.



3 Introduktion

For at opretholde sikkerheden for badende ved strande med udledning fra renseanlæg stilles der krav om, at udløbsvandet fra det pågældende renseanlæg overholder kravene til badevand. For at nedbringe koncentrationen af potentielt patogene bakterier i udløbsvandet anvender flere danske og udenlandske renseanlæg, der udleder til badeområder, desinfektionsmetoder (hygiejnisering) som UV eller tilsætning af biocider.

Behovet for hygiejnisering og effekten af hygiejniseringen vurderes i dag vha. mikrobiologiske dyrkningsteknikker, der kræver lang analysetid (3-5 dage). Det betyder, at der p.t. ikke er en klar sammenhæng mellem tilsætningen af biocid og det reelle behov for hygiejnisering i real tid.

I løbet af en badesæson kan der være mange faktorer, der bevirker, at kvaliteten på udløbsvandet fra et renseanlæg kan variere. Der kan fx være tørkeperioder, kraftige regnskyl, pludselige ændringer i personækvivalenter (PE) grundet specielle events såsom ferieperioder, festivaler, sportsstævner el.lign., eller der kan opstå tekniske udfordringer på anlægget. I sådanne tilfælde ville det være optimalt at kunne styre og ændre hygiejniseringen med kort varsel (timer).

På Hjørring renseanlæg i Nr. Lyngby desinficeres udløbsvandet i hele badesæsonen for at sikre badegæsterne i Nr. Lyngby og Løkken. Der anvendes et miks af permyresyre og brintoverilte (Kemira, DesinFix), som doseres til udløbsvandet efter efterklaringstanken. Behandlingen foregår uproblematisk, og der har ikke været påvist overskridelser på bakteriesiden i behandlingsperioden (efter en empirisk indkøringsfase). Dog bliver der størstedelen af tiden sandsynligvis doseret mere kemi end nødvendigt i mangel af en metode til at kontrollere behovet i realtid.

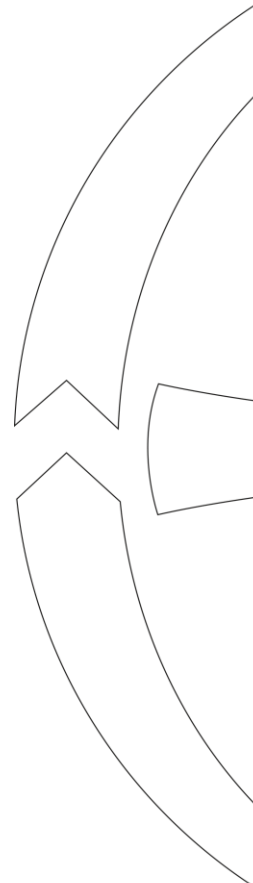
I samarbejde med Teknologisk Institut ville Hjørring Vand med dette projekt gøre en indsats for at udvikle en sensorteknologi til bedre at styre hygiejniseringen i fremtiden. Kravet til sensoren var, at den skulle være robust, prisbillig og enkelt i drift og samtidig kræve så lidt vedligehold som muligt. Desuden ønskedes mulighed for sammenkobling med doseringsenheden for hygiejnisering, således at måling, styring og dosering kunne foregå automatiseret. En sensorprototype til indirekte måling af bakterieniveauet i spildevandet er i projektet blev udviklet på Teknologisk Institut og afprøvet i laboratoriet på både udløbsvand og renkulturer af E. coli. Efterfølgende er sensoren blevet sat op på Nr. Lyngby renseanlæg ved Hjørring, hvor den har målt løbende i to på hinanden følgende badesæsoner (2018, 2019). Hjørring Vand har undervejs foretaget intensive målekampagner for bakterieniveauet og foretaget det nødvendige tilsyn og vedligehold af sensoren. Ligeledes er der leveret data ind til projektet på alle relevante driftsparametre på renseanlægget såsom regndata, flow og COD.

Projektet har på overordnet plan været inddelt i tre arbejdsopgaver som vist herunder. Resultaterne præsenteres dog sammenhængende i naturlig rækkefølge og ikke bundet op på arbejdsopgaverne.

AP1: Laboratorieafprøvning af respirationsmålinger som funktion af mikrobiel aktivitet og antal.

AP2: Udvikling af sensorsystem til måling af mikrobiel aktivitet.

AP3: Sensorperformance under driftsforhold.



4 Projektets betydning for vandbranchen

Projektets output har især betydning for forsyninger, der har behov for at styre behandlingen af forsyningens udløb efter bakterieniveau, fx som i dette tilfælde i forbindelse med udledning til badeområder. Der er stort fokus fra forsyningerne på ikke at lede unødige kemikalier til vandmiljøet. Ved kun at tilsætte den nødvendige mængde af desinfektionsmiddel spares der penge, ligesom det sikres, at alt tilsat kemikalie reagerer og opbruges inden udløb. Ligeledes vil sensoren give værdi på steder, hvor man hygiejniserer på anden vis, fx via UV, hvor den optimale eksponeringstid kan justeres løbende og energiforbruget holdes på det minimale/nødvendige niveau.

Sensoren vil ligeledes, i samspil med øvrige sensorer på et renseanlæg, kunne varsle driftspersonalet på anlægget, hvis driften ikke kører optimalt. Så snart beluftningstanken, denitrifikationen eller slamfældningen er udfordret, vil det med stor sandsynlighed kunne måles ved en ændret bakterieaktivitet i efterklaringstanken. Dette vil give et ændret signal og evt. SMS-varsel fra HygiSensoren.

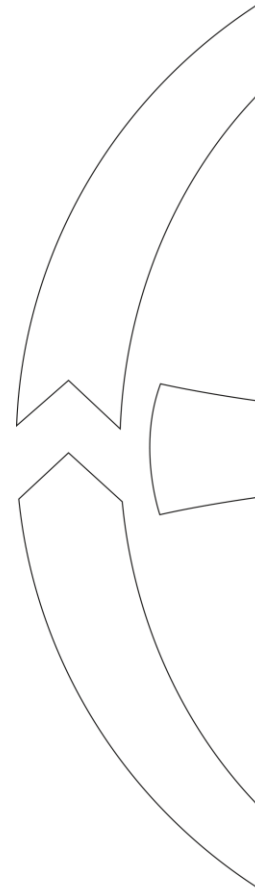
Hele vandbranchen har stor interesse i at sikre rent vand i naturen, og derfor formodes sensoren, når den er færdigudviklet, at kunne finde bred anvendelse. P.t. stilles der alene krav til overholdelse af badevandskvalitet, hvis rensat spildevand udledes til badeområder, men dette må forventes at ændre sig i fremtiden, hvor der ligeledes kan komme krav til overløb fra fælles kloakerede områder og krav til øvrige centrale og decentrale renseanlæg.

4.1 Marked og/eller anvendelsesmuligheder

Forsyninger over hele Danmark og i Europa vil potentielt være aftagere af sensorplatformen. Der er særligt i Sydeuropa mange steder, hvor hygiejnisering er nødvendig, og hvor der sælges hygiejniseringsløsninger. Her kunne en sammenkobling med HygiSensoren give stor værdi.

Ud over forsyningsselskaber vil også virksomheder, som har et stort vandforbrug, og som er afhængige af hurtig og simpel viden om bakterieniveauet i vandet (fx dambrug), kunne få glæde af teknologien. Der findes efterhånden flere hurtigmetoder, der vil kunne give en indikation om bakterieniveauet, fx LuminUltra, der er en ATP-baseret metode. Det er dog stadig metoder, der kræver manuel prøvetagning og -håndtering og således ikke et online-værktøj som HygiSensoren, der løbende monitorerer og om nødvendigt giver en advarsel.

Det vurderes, at der vil være et marked for sensorplatformen på to fronter: Som sensor til løbende vurdering af udsving i bakterieniveau i forskellige vandmatrixer, og som sensorplatform, hvor sensoren kobles med hygiejniseringsdelen, fx kemikaliedoseringen, for på den måde at sikre en optimal hygiejnisering.



4.2 Næste skridt

Det er planlagt, at det videre forløb for sensorudviklingen skal afklares ved opfølgende møder med bl.a. udstyrs- og kemikalieleverandører og forsyninger. Det er vigtigt, at der indgås aftale med en teknologileverandør, der vil stå for at producere og sælge den endelige løsning i samarbejde med projektpartnerne.

Der er i projektet udviklet en tidlig prototype, som var meget fleksibel med hensyn til at afprøve forskellige målesekvenser og antagelser. I forhold til færdigudvikling fra prototype til produkt, er der identificeret en del tiltag, som vil forbedre sensorplatformen. Centralt i sensorplatformen er iltsensoren, og der findes meget robuste optiske iltensorer på markedet. Det vil være meget fordelagtigt at benytte en type, der kan klare pasteuriseringstemperaturer (>50 °C) og evt. kemisk rensning (CIP).

Den færdigudviklede sensorplatform forventes at blive opbygget som et mindre målekammer med indbygget varmelegeme og sensorholder. At reducere målevolumenet til fx 500 mL har den fordel, at en ny vandprøve hurtigere kan indpumpes og opvarmes. Det vil også være en fordel at designe kammeret, så det let kan rengøres med en børste eller vha. CIP-rengøring.

Endelig vil der i et endeligt produkt være standardkommunikation til anlæggenes kontrolsystemer, hvorved kemikaliedoseringen automatisk kan korrigeres om nødvendigt.

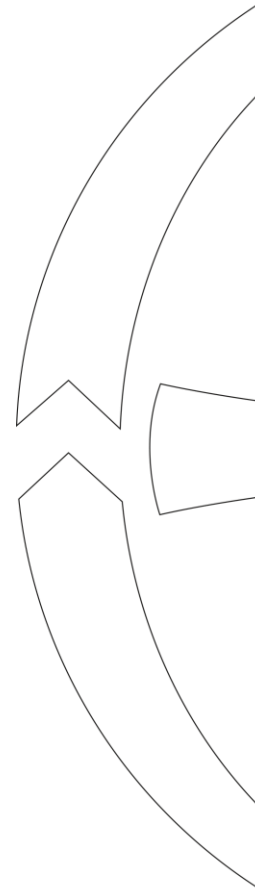
4.3 Formidlingsplan

Projektidéen og de opnåede resultater er løbende blevet formidlet under dialog med branchen og på Teknologisk Instituts hjemmeside.

Projektidéen blev præsenteret på DANVAs årsmøde i foråret 2018 umiddelbart efter opstart, og resultater fra projektet blev præsenteret ved et indlæg på Dansk Vandkonference i Aarhus i november 2019.

Efter afslutningen af projektet vil resultaterne blive formidlet igennem artikel i Watertech (Ingeniøren Pro) og/eller Spildevand.

Projektet var planlagt præsenteret på Vandforum 2020 den 23. april i Vandhuset i Skanderborg, hvilket dog blev aflyst pga. Corona. Der arbejdes på evt. alternativ formidling.



5 Projektet

5.1 Formål

Formålet var at designe, bygge og teste en sensorplatform til måling af bakterieniveau i udløbsvand fra renseanlæg. Praktisk eftervises det, hvordan implementering af iltforbrug til bestemmelse af antallet af bakterier, kan give værdi i en robust sensor. Sensoren vil kunne give en optimal og rettidig hygiejnisering.

5.2 Output

Output af projektet er en prototype af en sensorplatform (HygiSensor) til realtidsmåling af bakterieniveauet i vand (konkret udløbsvand fra renseanlæg). HygiSensoren virker stabilt på renseanlæg med minimalt vedligehold hen over en badesæson. Prøvetagning og målinger foregår automatiseret, og data opsamles løbende og kan tilgås via nettet. Der foreligger ligeledes en metode til brug og vedligehold af opstillingen.

5.3 Projektresultater

Resultaterne af projektet er dels det fysiske målesystem, der er udviklet i projektet og viden om anvendelsen af målesystemet, dels resultaterne af målekampagnerne på Nr. Lyngby rensningsanlæg i badesæsonerne 2018 og 2019 og i laboratoriet på Teknologisk Institut i den mellemliggende periode.

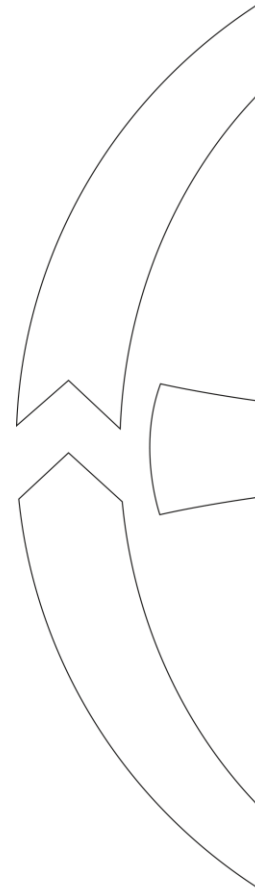
Design af målesystemet

Metoden, der ønskes anvendt til målesystemet, måler iltforbruget (respiration) i en spildevandsprøve og korrelerer dette iltforbrug med antallet af bakterier i vandprøven. Det antages, at antallet af totale bakterier (Kim37) er stærkt korreleret til antallet af sygdomsfremkaldende bakterier (bl.a. E. coli. og intestinale enterokokker). Derved vil metoden kunne bruges til at vurdere behovet for hygiejnisering af udløbsvandet i næsten realtid.

Idéen med målesystemet er derfor automatisk at udtage en repræsentativ vandprøve fra rensningsanlægget, før (eller efter) desinfektionsstofferne tilsættes. Den udtagne vandmængde skal opbevares i en ilt- og vandtæt beholder, hvorved en iltsensor over tid (ca. 2 timer) bestemmer iltforbrugsraten af vandprøven.

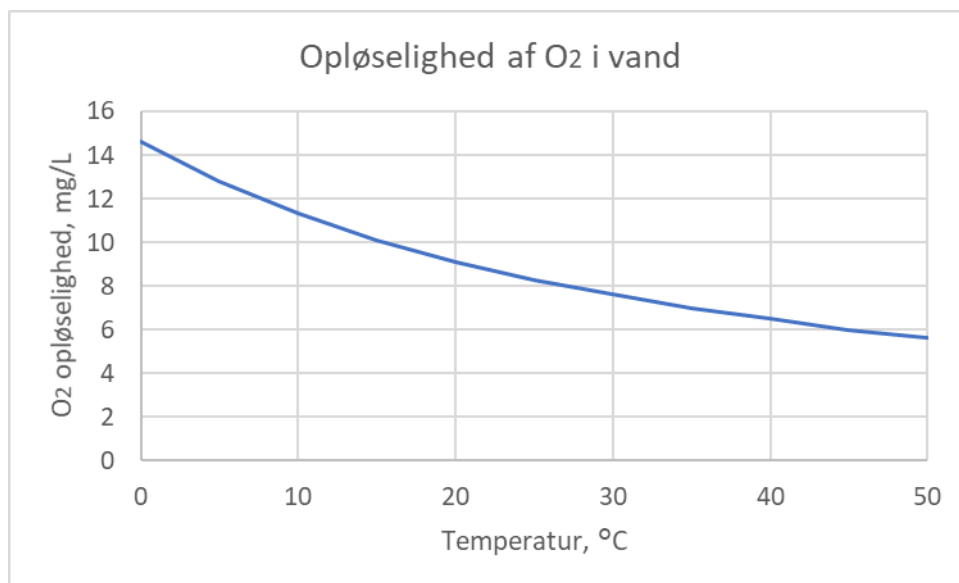
De identificerede faktorer, der spiller ind på iltforbrugsraten, er:

- Bakteriekoncentration af aerobe bakterier
- Vandtemperatur
- Bevægelse i vandet (homogenisering for at undgå udfældning/bundfældning)
- Næringsindhold (bakterierne oxiderer næringen vha. ilt)
- Iltkoncentration ved start af målingen
- Bobler i systemet
- Utætheder
- Begroninger/forureninger i målesystemet.



Disse faktorer er håndteret bl.a. ved selve opbygningen af systemet, og ved den sekvens hvorved målingen udføres. Da vandtemperaturen i rensningsanlægget varierer (typisk 5-18 °C), skal vandet opvarmes til samme temperatur i sensor-kammeret (37 °C er valgt) for at få sammenlignelige målinger. Der er kontinuert bevægelse i vandet under målingen for at undgå bundfældning af bakterier, som vil kunne føre til opkoncentrering af bakterier omkring et sensorhoved placeret lavt i opstillingen. Baseret på historiske COD-værdier, som typisk er over 20 mg/L, er det vurderet, at der ikke er behov for tilsætning af næring. Systemet er bygget op, så ilt- og eventuelt nitrogenbobler stiger op i en vandlås i toppen af udstyret og derved ikke kan fanges i fx pumpen eller varmelegemet. Begroninger i systemet er undgået ved at indføre et pasteuriseringsstrin, hvorved vandet opvarmes til ca. 48 °C i ca. 2 timer.

Da opvarmning af prøvevandet er nødvendigt for at opnå en reproducerbar måling, er det vigtigt at forholde sig til opløseligheden af ilt i vand, som er vist i Figur 1. Opløseligheden afhænger af temperatur og saliniteten af vandet. Hvis vandtemperaturen hæves fra fx 10 °C til 37 °C, kan det betyde, at en prøve med 8 mg/L går fra, at alt ilt i prøven er opløst, til at prøven blive overmættet, og iltten danner bobler. Dette vil forstyrre en måling, da det målte iltforbrug vil være afhængigt af, hvordan iltboblerne opløses igen. Da der opvarmes til 37 °C i systemet, er det et krav, at prøvevandet ikke overstiger ca. 6 mg/L (svarende til 60 % iltmætning).



Figur 1: Opløselighed af ilt i rent vand og havvand¹.

Målesystemet er opbygget med følgende elementer:

1. **Grovfilter:** Filter/kurv før indfødningsslangen til at forhindre større partikler i at tilstoppe slanger og udstyr (Se Figur 3)
2. **Indfødningspumpe:** Peristaltisk pumpe med en kapacitet på ca. 2 L/min, Solinst peristaltic pump, model 410 med silikoneslange købt gennem Aquasense

¹ Kilde: https://www.engineeringtoolbox.com/oxygen-solubility-water-d_841.html



Figur 3: Kurv, der fungerer som grovfilter, sænkes ned i vandet og monteres med kæder. Den monterede slange er forbundet til indfødningspumpen. Inderste slange er af silikone. Den yderste slange er af PVC og fungerer som mekanisk beskyttelse og som lysbarriere for at undgå algevækst i slangen.

Måleproceduren

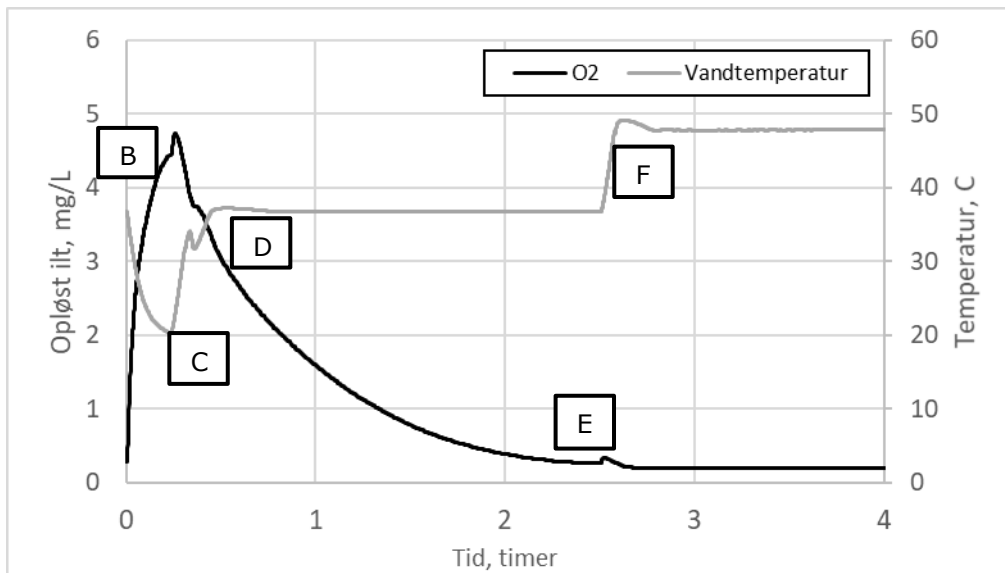
Måleproceduren er løbende udviklet i projektet. Dette har været muligt pga. en programmerbar styring, som ad flere omgange er blevet optimeret til bl.a. at undgå dannelse af bobler, justering af opvarmningsrater osv. Den optimerede målesekvens foregår som følger:

- A. Ny logfil gemmes, og cirkulationspumpen startes
- B. Indfødningspumpen starter og kører 14 minutter, og dermed gennemskylles hele volumen mindst 10 gange. Det ses, at temperaturen falder i systemet. Afløb til kloak.
- C. Opvarmning startes, og der opvarmes med ca. $2,7 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, til temperaturen når ca. $32 \text{ }^\circ\text{C}$. Derefter holdes der en pause, hvor også cirkulationspumpen stoppes, for at lade eventuelle bobler stige op i vandlåsen på afløbet. Efter ét minut kører indfødningspumpen ét minut for at skylle eventuelt luft ud af systemet. Cirkulationspumpen startes igen, og opvarmning forsættes med $1,1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, til temperaturen når $37 \text{ }^\circ\text{C}$, hvorefter den holdes stabil.
- D. Efter i alt ca. 25 minutter er temperaturen stabil på $37 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Målingen fortsætter i ca. 2 timer, hvorved iltkoncentrationen falder eksponentielt. Iltforbruget bestemmes med et fit:

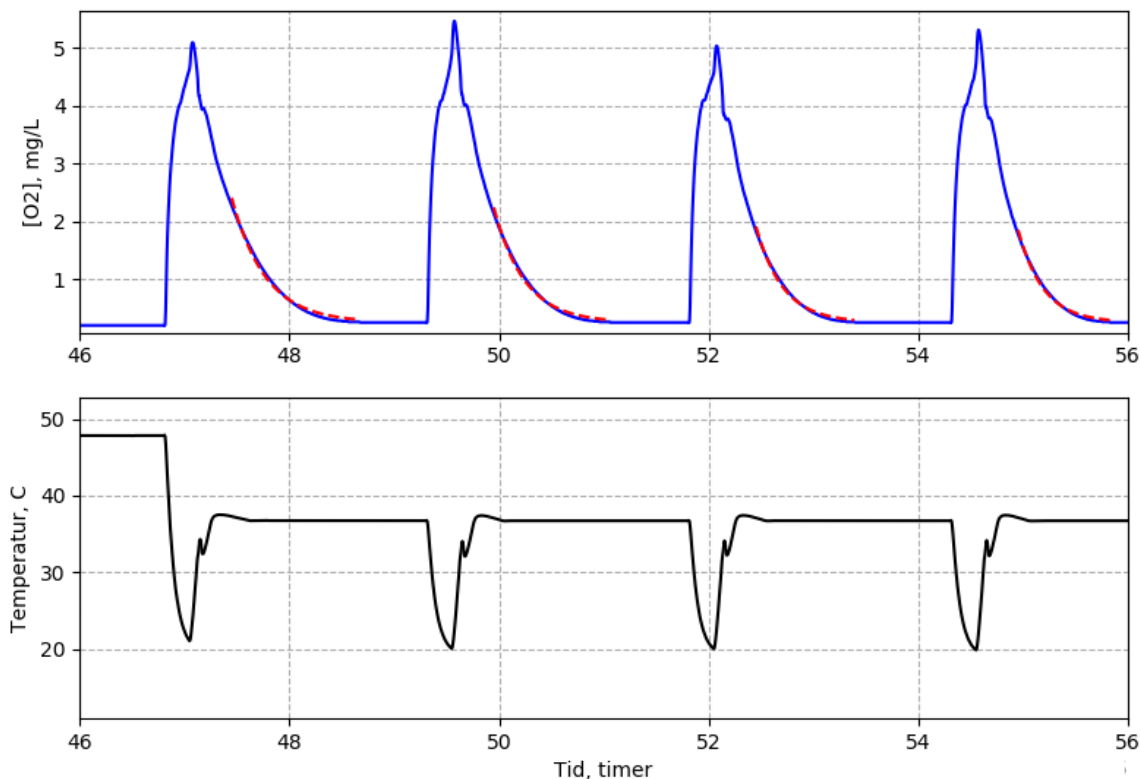
$$O_2(t) = ae^{-(t-t_0)/\tau} + b$$

hvor t_0 er tiden til de 37 °C er nået, a er (omtrent) start-iltkoncentrationen, b er ilt-sensorens mindsteværdi på 0,25 mg/L, og τ er henfaldstiden i timer. Iltforbrugsraten R bestemmes $R = a/\tau$, som derved er raten bestemt ved t_0 og har enheden mg/L/h. Denne værdi ligger typisk i intervallet 0,2-30 mg/L/h. Eksempler på måle-data og fit til iltforbruget er vist i Figur 5.

- E. Iltforbrugsraten gemmes sammen med dataene, og der udføres et kvalitetscheck af fit og værdier. Disse kan afrapporteres til styringselektronik eller til manuel overvågning.
- F. Efter hver fjerde cyklus (dvs. 2 gange i døgnet) hæves temperaturen til 48 °C for at pasteurisere målesystemet og dermed kraftigt hæmme vækst og urenheder i systemet. Pasteurisering foretages i ca. 2 timer.
- G. Gentag fra A



Figur 4: Måle- og pasteuriseringscyklus. Bogstaverne refererer til beskrivelsen af proceduren ovenfor.



Figur 5: Eksempel på måledata på iltkoncentrationen (øverst) og vandtemperaturen (nederst). De røde stiplede linjer er fit til iltforbruget. Der fittes kun til måledata, hvor temperaturen er konstant på 37 °C.

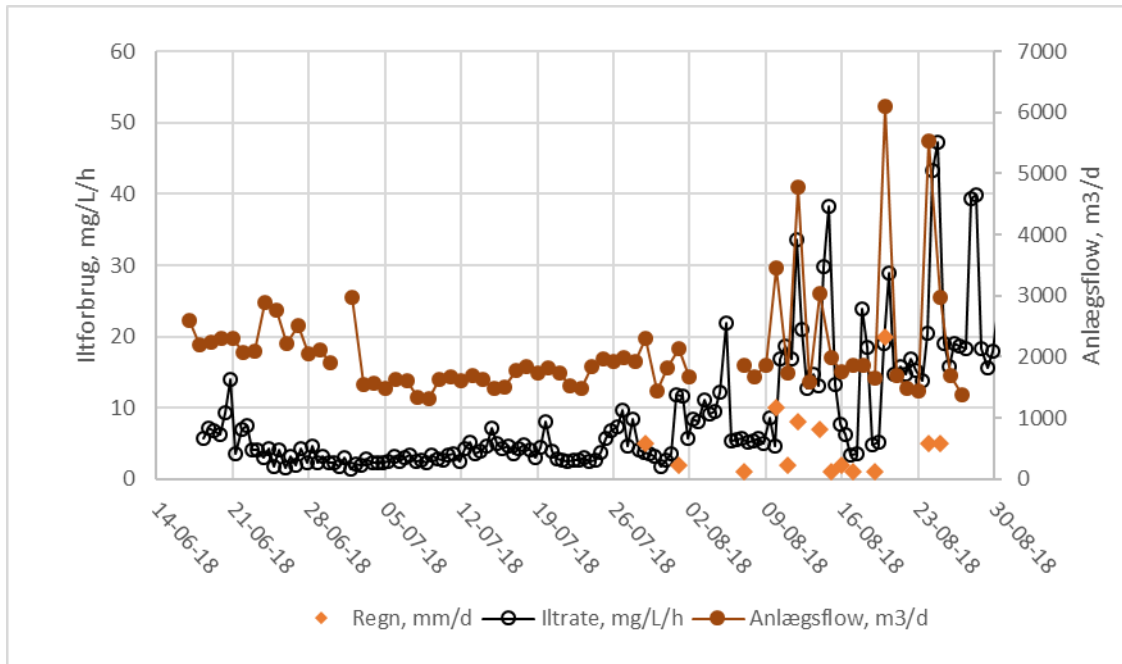
Målekampagne 2018

Formålet med første målekampagne var at teste metoden og det udviklede udstyr under realistiske betingelser for at opnå erfaring med evt. svage punkter og utilsigtede udfordringer i designet. Udstyret blev opstillet den 11/6 2018 og stoppet igen den 18/9 2018. Prøvevandet blev udtaget umiddelbart inden tilsætningen af permyresyre. Udstyret fungerede uden driftstop i hele perioden; dog stoppede varmelegemet og cirkulationspumpen med at fungere ved udgangen af målekampagnen. Sensoren blev kontrolleret ugentlig for begroninger mv. og blev rensset et par gange i løbet af perioden. Slangen i den peristaltiske pumpe blev skiftet en enkelt gang i perioden.

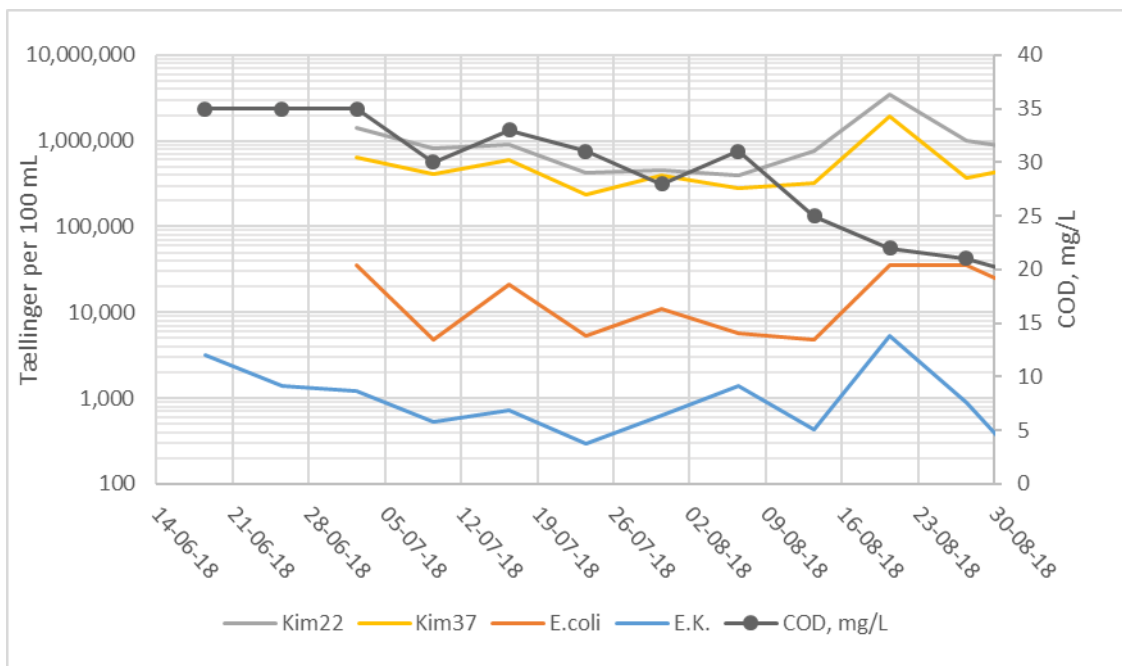
Resultaterne for iltforbruget, anlægsdriftsdata og bakterietællinger er vist i Figur 6 til Figur 8. Sommeren 2018 var usædvanlig varm og tør med meget lidt regn indtil slutningen af juli. Det havde den betydning, at anlægget kørte helt optimalt med et meget stabilt anlægsflow på ca. 1500 m³/d, hvilket kan ses i Figur 6. Selv en stigende PE-belastning i løbet af sommerferien (bl.a. meget høj PE-belastning i dagene 22-29/7) betød ikke, at iltforbruksraten var væsentlig større. I de mikrobiologiske analyseresultater i Figur 7 ses også meget stabile bakterietællinger (typisk indenfor +/- 50 %).

I efteråret fra midt august faldt der en del regn, som betød, at anlægsflowet blev mere varieret. Der ses derfor en fornuftig sammenhæng mellem, at iltforbruksraten stiger ved højere flow på grund af den reducerede opholdstid i anlægget, og en nedsat rensningsgrad og/eller slamudfældning. I Figur 8 vises iltforbruksraten sammenholdt med de mikrobiolo-

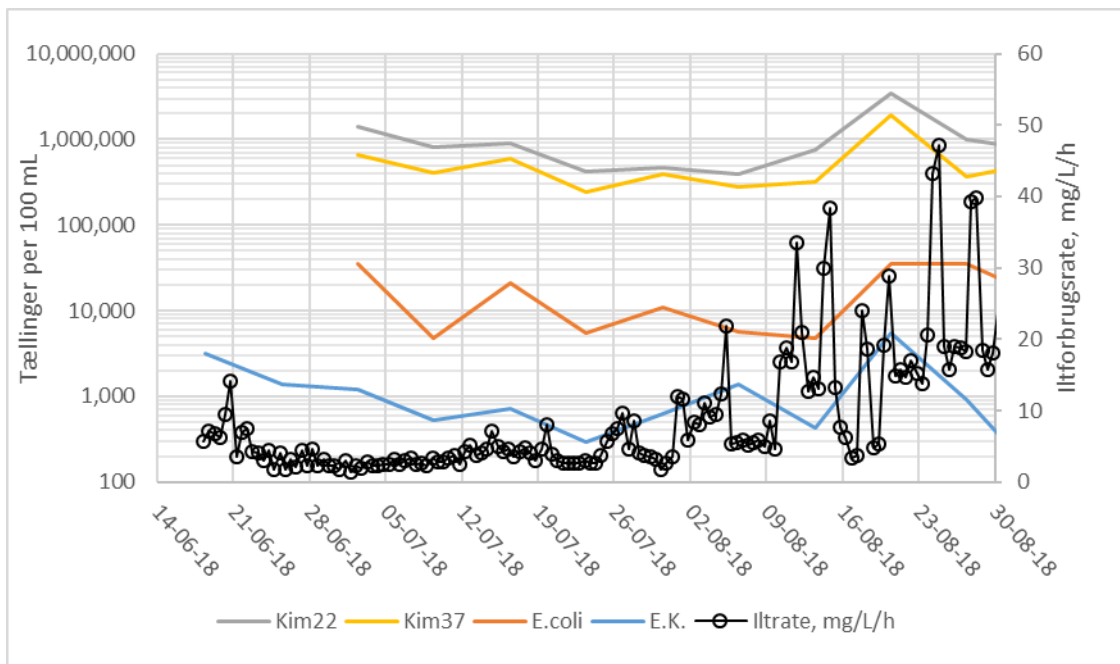
giske resultater, og der ses en tendens til, at bakterietællingerne er højere i midt/slut august end i resten af perioden, hvilket er sammenfaldende med de højere iltforbrugsrater. Modsat forholder det sig med COD-niveauet, som er faldende ved det stigende flow sidst på sommeren, hvilket må forventes at skyldes det regnfortyndede spildevand.



Figur 6: Iltforbrugsrate, anlægsflow (højre akse) og regn (per døgn) under 2018-målekampagnen.



Figur 7: Mikrobiologiske analyseresultater og COD (højre akse) under 2018-målekampagnen.



Figur 8: Iltforbrugsraten sammenholdt med de mikrobiologiske analyseresultater i 2018-målekampen.

Diskussion

Målekampen i badesæsonen 2018 har vist, at sensorplatformen kører meget stabilt og langt hen ad vejen yder tilfredsstillende. Som beskrevet var sommeren 2018 en atypisk sommer, der var meget tør og uden store udsving i driften af anlægget. Dette medførte en meget lille variation i bakterietællingerne i udløbsvandet og i iltforbrugsrater den første 2/3 af perioden. Fra midten af august steg mængden af regn og dermed anlægsflowet, hvilket dog ikke var sammenfaldende med en højere PE-belastning. Iltforbrugsraten varierer dog mere end 100 % fra dag til dag i denne periode, og da der kun er taget ugentlige vandprøver til bakterieanalyse, er det svært at vise en entydig sammenhæng mellem bakterietællingerne og iltforbrugsraten.

I målekampen blev der forsøgt målt iltforbrug ved hhv. 20 °C, 27 °C, 32 °C og 37 °C; dog betød det varme sommervejr og opvarmning af vandet pga. brug af pumpen, at temperaturerne 20 °C og 27 °C ikke kunne holdes stabile. Desuden var der marginal forskel på resultaterne af iltforbruget ved 32 °C og 37 °C. Det blev derfor besluttet kun at køre ved 37 °C i næste målekampagne og derved få flere daglige målinger.

Det blev desuden observeret ved nedtagningen, at kurven/filteret var betydeligt tilgroet, og at indfødningsslangen også var beskidt. Pasteurisering ved 48 °C fungerer tilfredsstillende, da der ikke kunne ses betydelige begroinger eller ophobning af materiale, hverken i selve beholderen med iltsensoren eller i slanger.

Målekampagne 2019

Formålet med denne målekampagne var at evaluere optimeringen af udstyret og metoden under realistiske betingelser. Udstyr blev optimeret med rene og nye ilttætte slanger i opstillingen, ny cirkulationspumpe og nyt varmelegeme, og der blev implementeret mulighed for at udføre et returskyl af indfødningsslangen. Metoden blev optimeret ved kun at måle

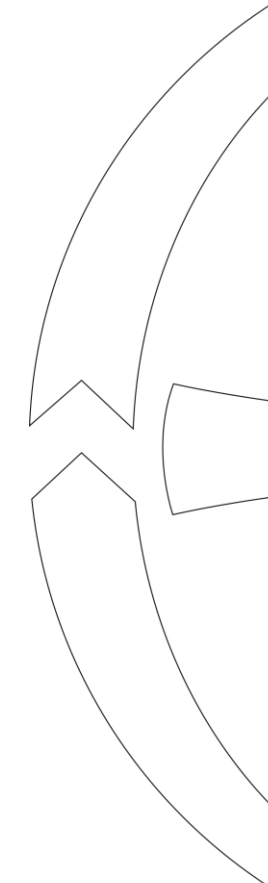
ved 37 °C (ca. 4 gange så mange målinger pr. døgn), og der blev indført en pause til at lade eventuelle bobler stige op i vandlåsen under opvarmning. Opgraderingerne viste sig at have betydning for den absolutte størrelse af iltforbruget, som i 2019-sæsonen blev op til 8 mg/L/h, hvorimod den i 2018 var op til 50 mg/L/h.

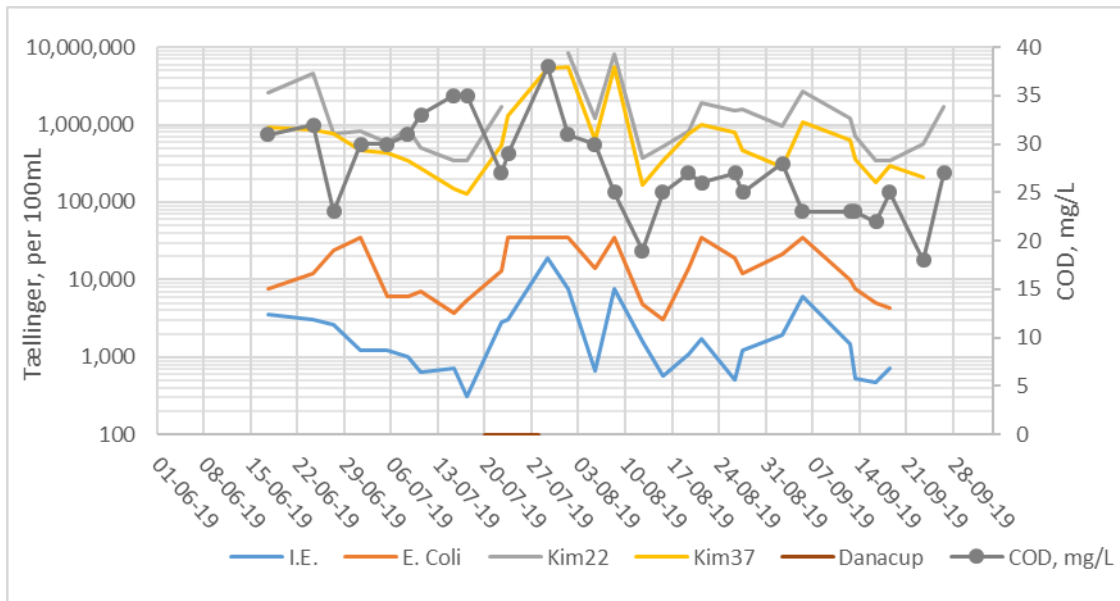
Udstyret blev installeret samme sted som i 2018-sæsonen, dvs. ved efterklaringstanken før tilsætningen af permyresyre. Installationen fandt sted den 27/5 2019, og den blev flyttet den 2/10 2019 til efter tilsætning af permyresyren (resultaterne heraf er beskrevet i afsnittet "Målekampagne efter permyresyretilsætning"). Udstyret fungerede igen tilfredsstillende, om end der var et mindre nedbrud af styringssoftwaren i den første uge af august. Der blev udført returskyl af indfødningslange og kurv to gange i perioden, og sensoren blev rengjort én gang.

Resultaterne i målekampagnen 2019 er vist i Figur 9 til Figur 11. I Figur 9 ses de mikrobiologiske analyseresultater (på logaritmisk akse), hvor der klart ses væsentlige udsving på flere størrelsesordner i alle bakterietællingerne. Bl.a. stiger mængden af I.E. over en periode på 12 dage med en faktor 60. E. coli-tællingerne blev adskillige gange målt til >35.000 per 100 mL. De største variationer sker i perioden 20/7-28/7 2019, som er sammenfaldende med kraftige regnskyl, sommerferie og Danacup (større fodboldturnering i Hjørring med 40.000 deltagere), hvor PE-belastningen øges betydeligt.

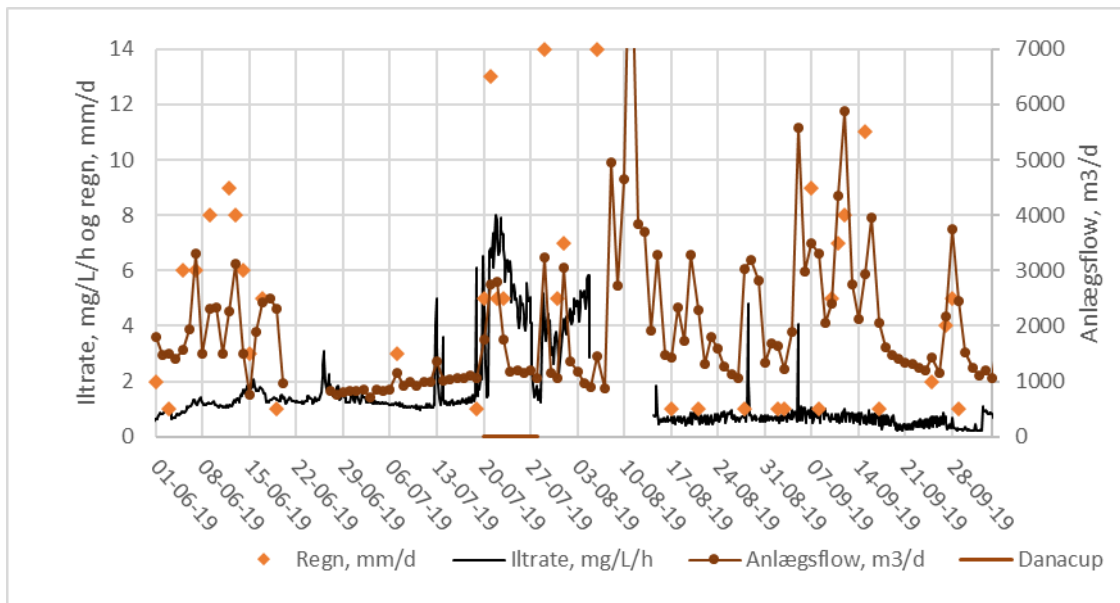
I Figur 10 ses den målte iltforbrugsrate sammenholdt med anlægsflowet og regnmængden. Det er værd at bemærke, at der var en meget jævn fordeling af regnhændelser over perioden, hvilket har en vis betydning for anlægsflowet, dog uden at være den altafgørende faktor. Under perioden med Danacup ses det, at iltforbruget stiger væsentlig til over 5 mg/L/h fra omkring et niveau på 1 mg/L/h, og der falder desuden en del regn. Den høje iltforbrugsrate forsætter videre ind i starten af august, dog med enkelte dage på et lavt niveau. Efter midten af august forbliver iltforbruget for det meste omkring 1 mg/L/h. Det formodes, at sammenfaldet med høj PE-belastning og højt anlægsflow (hydraulisk belastning) pga. kraftige regnskyl i slutningen af juli reducerede rensningseffekten på anlægget. Dette er i kontrast til perioden fra midt august, hvor anlægsflowet ligeledes er højt, men PE-belastningen til gengæld er lavere, hvilket tilsyneladende ikke har samme negative indvirkning på rensningseffekten.

I Figur 11 sammenholdes bakterietællingerne (E. coli og Kim37) med iltforbruget. I perioden omkring midt juli til start august er iltforbruget kraftigt forhøjet, hvilket har en fin sammenhæng med de meget høje bakterietællinger.

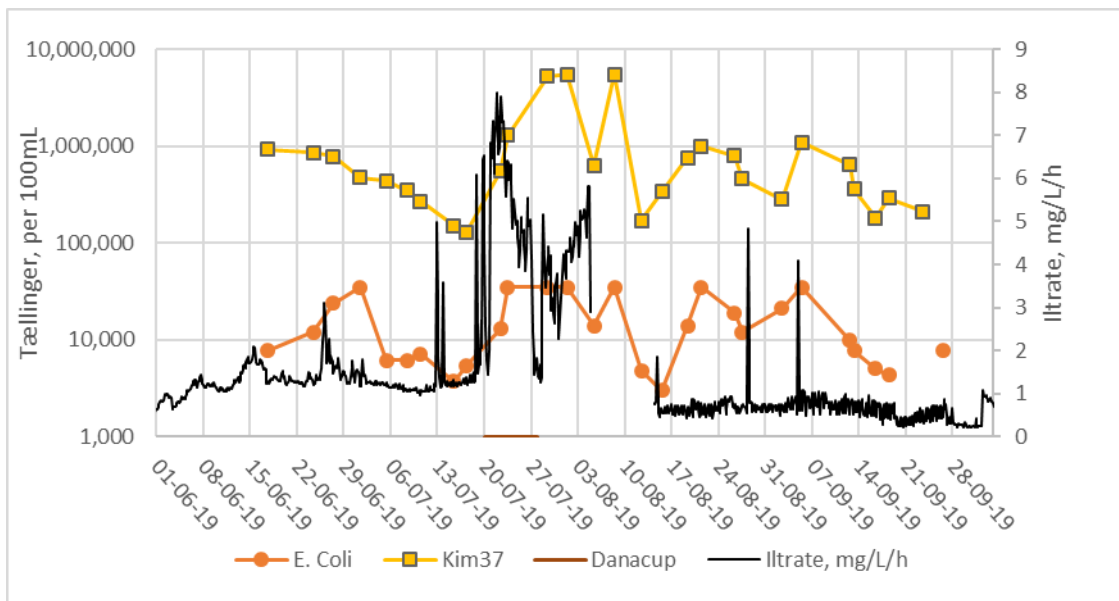




Figur 9: Mikrobiologiske analyser under 2019-målekampagnen. Perioden med Danacup er markeret med en rød streg (20/7-28/7). COD er vist på lineær skala på højre akse.



Figur 10: Iltforbrugsrate, regn og anlægsflow i 2019-målekampagnen. Perioden med Danacup er markeret med en rød streg (20/7-28/7 2019).



Figur 11: Iltforbrugsrate sammenholdt med E. coli- og Kim37-tællinger i 2019-målekampagnen. Perioden med Danacup er markeret med en rød streg (20/7-28/7 2019).

Diskussion

Målekampagnen i badesæsonen 2019 har vist, at sensorplatformen igen kører meget stabilt og yder meget tilfredsstillende uden videre vedligeholdelse. De optimerede punkter fra 2018-sæsonen forbedrede både stabiliteten og kvaliteten af målingerne. Det var et enkelt udfald, som skyldtes en softwarerelateret fejl.

Modsat sæsonen 2018 så var sæsonen 2019 vejrsmæssigt mere typisk og ustabil, og iltforbrugsraten viste store udsving specielt i juli, hvilket skyldtes en kombination af høj PE-belastning (30.000 PE ekstra) grundet sommerferie, Danacup (fodboldturnering) og kraftige regnskyl. Desuden havde anlægget i en del af samme periode nogle driftsudfordringer, som bevirkede, at beluftningskapaciteten blev reduceret.

Baseret på disse resultater kan det konkluderes, at sensorplatformen kan indikere kraftigt stigende bakterieniveauer, længe før svarene på konventionelle vandanalyser ville være tilgængelige. Det har også været muligt at opnå forståelse af, hvordan kombinationen af høj personbelastning og høj hydraulisk belastning kan spille ind på anlæggets rensningseffektivitet.

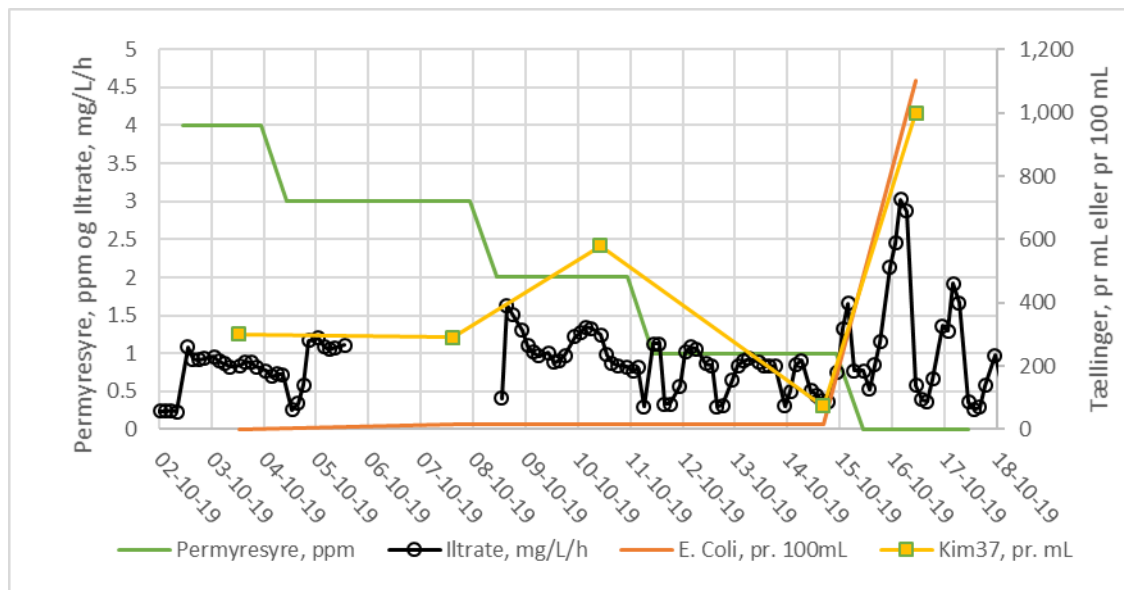
Målekampagne efter permyresyretilsætning

I 2018 og første del af 2019-kampagnen (frem til den 1/10 2019) blev vandprøverne udtaget før tilsætningen af permyresyre for direkte at kunne måle den parameter, som permyresyrekoncentrationen skal styres efter. I oktober 2019, efter afslutningen af badesæsonen, blev sensorplatformen flyttet til efter tilsætningen af permyresyren i et bassin, hvor vandet har en opholdstid på 3-4 timer.

Dette eksperiment havde til formål at undersøge, om effekten af permyresyren kunne bestemmes ud fra iltforbrugsraten og dermed online måle, at udløbskravet er overholdt. Hermed vil man kunne styre doseringen således at der tilsættes minimal kemikaliemængde,

samtidig med at udløbskravene overholdes. Eksperimentet blev foretaget ved, at tilsætningen af permyresyre blev reduceret hver 3.-4. dag, så den aftog fra 4 ppm til 0 ppm over ca. 14 dage. Inden tilsætningen blev reduceret, blev en vandprøve udtaget til mikrobiologisk analyse.

I Figur 12 ses resultaterne af doseringseksperimentet. Det ses, at permyresyre, selv ved den laveste koncentration på 1 ppm, er meget effektiv til at reducere E. coli, som er målt til at være på detektionsgrænsen af den mikrobiologiske analyse. Efter at tilsætningen stoppes den 15/10, stiger både E. coli og Kim37 kraftigt. Desuden ses en markant stigning i iltforbruksraten med en faktor 2-4.



Figur 12: Iltforbruksraten under doseringsforsøget i oktober 2019. Der er også vist permyresyretilsætningen i perioden (ppm) og E. coli- og Kim37-tællingerne.

Diskussion

Resultatet fra sensorplatformen kan enten benyttes som styring eller kontrol, hvor styringen ideelt set måler på vandet før tilsætningen, og ved kontrol måles der på udløbsvandet efter tilsætningen. De to lange målekampagner i 2018 og 2019 viste anvendeligheden af HygiSensoren til styring, hvorimod den kortere periode beskrevet herover har til formål at dokumentere muligheden for at bruge sensoren til kontrol af kravene til udløbsvandet.

Det ses, at selv laveste dosis er effektiv til at reducere E. coli, og iltforbruksraterne er i perioden tilsvarende lave. Da tilsætningen af permyresyre stoppes, ses et klart spring i antallet af E. coli og Kim37, ligesom iltforbruksraten også steg betydeligt. Dog ses iltforbruget at svinge cyklisk på daglig basis, efter at tilsætningen er stoppet. Det er ikke afklaret, hvad dette kan skyldes.

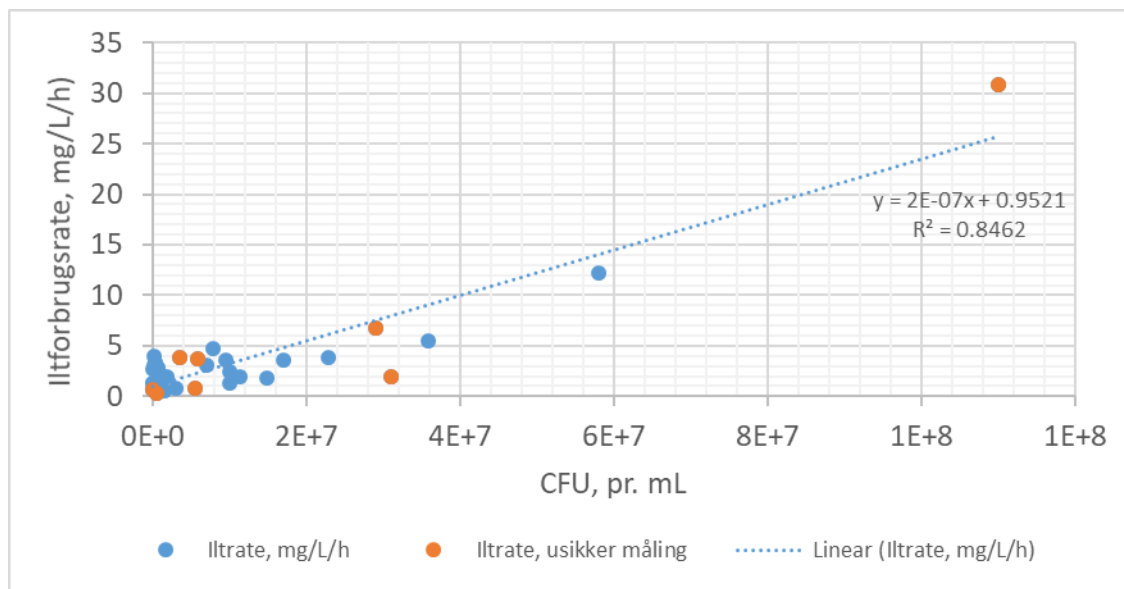
Baseret på eksperimentet kan det konkluderes, at HygiSensoren potentielt kan angive, om doseringen er korrekt, og om der ved høje udsving er behov for at øge eller reducere doseringen.

Laboratorieforsøg

I projektet er der udført en del laboratorieforsøg med det formål dels at indkøre og teste ydelsen af sensorplatformen, dels at forsøge at opnå en laboratorievalidering af selve iltforbrugsmetoden, dvs. at iltforbruget korrelerer med bakteriekoncentrationen. Det har været særdeles vanskeligt at finde en måde at fremstille repræsentative vandprøver i laboratoriet. Udløbsvandet består af en kompleks sammensætning af bakterier, næring og iltindhold, som ældes meget hurtigt (<3 timer). Det er muligt at opbevare en afkølet vandprøve i en kortere periode, men den vil typisk stadig forbruge den ilt (og den næring), der er til stede i prøven, hvilket betyder, at den rette mængde ilt skal tilsættes før en måling. Da vandprøverne opvarmes til 37 °C, er det vigtigt, at tilsætningen ikke overstiger ca. 6 mg/L, da det ellers vil føre til dannelse af iltbobler under opvarmningen.

Alternativet til at bruge udløbsvand er at bruge en dyrket renkultur. Med det formål at validere sammenhængen mellem antallet af bakterier og iltforbrugsraten blev der derfor udført forsøg vha. en renkultur af (ikke-patogen) E. coli. Der blev fremstillet en meget koncentreret opløsning (10⁸ pr. mL), som løbende blev fortyndet for hver målecyklus i sensorplatformen. Umiddelbart før indfødning til iltensoren blev der udtaget en vandprøve til bakterietælling. Resultatet af eksperimentet er vist i Figur 13. Nogle af punkterne er markeret med orange, hvilket illustrerer, at de har en væsentlig større usikkerhed, som fx skyldes, at en vandprøve har stået natten over, inden der er tilføjet ilt, og målingen er startet.

Generelt kan det siges, at der er vist en nogenlunde sammenhæng mellem bakteriekoncentrationen og iltforbrugsraten; dog er der en ikke uvæsentlig spredning på målingerne - specielt ved de laveste koncentrationer.



Figur 13: Iltforbrugsrate ved varierende koncentrationer af renkultur af E. coli.

5.4 Konklusion

I projektperioden er sensorplatformen designet og testet under forskellige relevante betingelser i laboratoriet og i pilotskala. HygiSensoren har opereret i to hele badesæsoner, hvor den har målt under realistiske forhold på udløbsvand både før og efter hygiejnisering.

Generelt har sensorplatformen ydet tilfredsstillende og har over en lang periode levet op til vanskelige forhold og betingelser i forbindelse med måling i udløbsvand. Sensorplatformen er løbende optimeret ved udskiftning af problematiske elementer, og målesekvensen er optimeret, så målekvaliteten er yderst tilfredsstillende.

Forsøgene har vist, at sensorplatformen og dermed iltforbrugsmetoden kan anvendes til at alarmere ved kraftig stigning af iltforbruget, som kan være forårsaget af en række faktorer. Det er bl.a. overvejet, om en høj PE-belastning sammenholdt med et medium eller højt anlægsflow har stor betydning for iltforbrugsraten. Desuden har HygiSensoren potentiale for at kunne varsle om større udsving i bakterieniveau på få timer, hvilket er en kraftig forbedring i forhold til den nuværende metode med udtagning af vandprøver til dyrkning og efterfølgende afrapportering.

HygiSensoren er på nuværende tidspunkt i videst mulig udstrækning testet på vand før en hygiejnisering. Målinger fra doseringeksperimentet i oktober 2019 viser dog, at der også er potentiale for at bruge sensoren til udløbskontrol efter en hygiejnisering.

Sensorplatform vil derfor kunne bidrage til sikring af badevandskvaliteten og til en minimal belastning af miljøet.

