

Sensorbaseret badevandsvarsling

I Aarhus Kommune har vi udviklet og afprøvet en ny og simple metode til overvågning af badevandskvaliteten. Vi har opbygget en statistisk model, som varsler om forhøjet indhold af E. coli i badevandet. Modellen baseres på målinger af badevandets ledningsevne. Måling af elektrisk ledningsevne foretages ”real-time” med en billig sensor, der placeres i badevandet. Data fra sensoren opsamles og sendes automatisk. Modelberegningerne sikrer straks en prognose om badevandskvaliteten til de ansvarlige myndigheder.

NIKOLAJ KRUSE CHRISTENSEN, SØREN BASTHOLM & MICHAEL R. RASMUSSEN

Indledning

Sommeren 2018 har været rekord varm, hvilket får mange til at søge mod vandet for at blive nedkølet. Mange af os tager det som en selvfølge, at badevandskvaliteten er i top, når vi hopper i bølgen blå. Sådan er det også for det meste, men desværre ikke altid.

I mange byer har man et ønske om at etablere bade faciliteter tættere på byen. Det kan være en god idé, hvis badevandskvaliteten er tilstrækkelig høj. De færreste som hopper i vandet, tænker over de risici, der kan være forbundet med en svømmetur.

Overløb fra fælleskloakeret område i forbindelse med nedbør er den primære kilde til forurening ved mange danske badesteder. Det er et kendt problem, som forventes at tiltage yderligere, da ekstreme regnhændelser forventes at forekomme hyppigere og med højere intensitet i fremtiden. Andre kilder til forurening kan skyldes, overfladevand/regnvand fra separatkloakeret område, spildevand fra det åbne land (enkelthuse der ikke er tilsluttet kloak), udledning af rensset spildevand fra renseanlæg, fugle/kvæg/heste samt vilde dyr.

Myndighederne skal sikre, at badevandet ikke er sundhedsskadeligt. Ved kendte kortvarige forureninger skal kommunen således

fraråde de badende at hoppe i vandet. Derfor er det vigtigt at etablere et varslingsystem, som rettidigt kan advare borgerne om kortvarige forureninger, så de badende ikke bliver udsat for sundhedsfare.

Hvorfor skal vi måle badevandskvaliteten

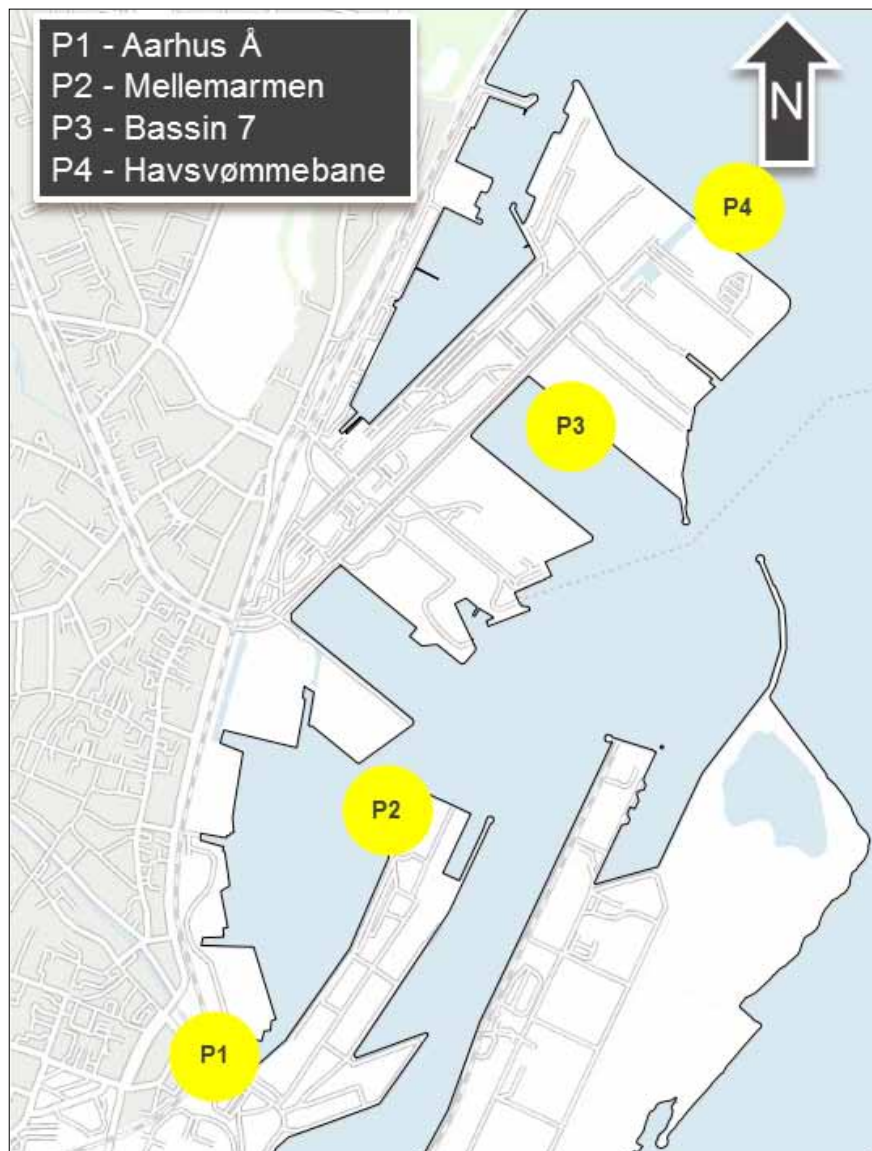
Danmark har en af Europas længste kyststrækninger, og der foretages hvert år målinger ved mere end 1000 badestrande og badesøer. Hele sommeren skal kommunerne føre tilsyn med badevandet og mindst én gang om må-

neden indsamles vandprøver til bakterieanalyser fra alle danske badesteder. Dette bliver gjort for at sikre, at de badende ikke kommer til at svømme i forurenede vand /1/.

Badevandskvaliteten vurderes på baggrund af data fra fire på hinanden følgende år og skal mindst bestå af 16 prøver. I badevand anvendes E. coli bakterier (EC) og Intestinale enterokokker (IE) (tarnbakterier) som indikator på fækal forurening. I realiteten er de en indikator for tilstedeværelsen af andre sygdomsfremkaldende bakterier og vira, der er rent eksperimentelt er vanskelige at dyrke og iden-



Figur 1 Havnebadet på Aarhus Ø. (Foto: Aarhus Kommune)



Figur 2 Oversigtskort over undersøgellespositioner. Undersøgellesposition P1, P2 og P3 er placeret i Aarhus havn. undersøgellesposition 4 er placeret på ydersiden af molen og er referenceundersøgellespositioner.

tificere. Indholdet af EC og IE vurderes statistisk, hvor hvert badested opnår en given klassifikation. Kategoriseringen henviser til kvalitetsklasserne i EU badevandsdirektiv /2/, der er implementeret i dansk lovgivning via Bekendtgørelse om badevand og badeområder /3/, hvor udmærket er den bedste kvalitetsklasse.

Badevandskvaliteten skal som minimum klassificeres som tilfredsstillende for at det kan betragtes som badevand. Skulle der opstå problemer med badevandet, skal kommuner-

ne informere borgerne om forureningen ved at melde badeforbud eller fraråde badning /3/.

Howdan måler vi badevandskvaliteten

Badevandskvalitet vurderes normalt på baggrund af analyser, der tidligere er foretaget af badevandet. Det tager typisk 2-3 dage før resultaterne af vandprøverne er færdiganalyseret, og varsling baseret på vandprøve vil derfor altid være bagudrettet. Endvidere er en bakterieanalyse en "stik-prøve". Der er derfor

en sandsynlighed for, at man ikke "fanger" en eventuel forurening.

De fleste badesteder berøres aldrig eller sjældent af f.eks. overløb. Den traditionelle overvågning med "stik-prøver" vil derfor normalt være tilstrækkelig.

Myndighederne skal advare de badende, hvis vandkvaliteten under bestemte forhold er ringere end tilfredsstillende. Varsling af kendt kortvarig forurening kan ikke baseres på de traditionelle analyser, da prøverne kun tages sjældent. Yderligere er analyse resultaterne typisk først til rådighed efter flere dage

Hvis man ønsker bade faciliteter på steder, der kan være påvirket af spildevand (fx i en større by), så er der derfor behov for et online varslingsystem. Varslingsystemet skal forudse, hvornår der er risiko for kortvarig forurening, så myndighederne kan fraråde badning rettidigt.

Howdan kan man varsl om forringet badevandskvaliteten?

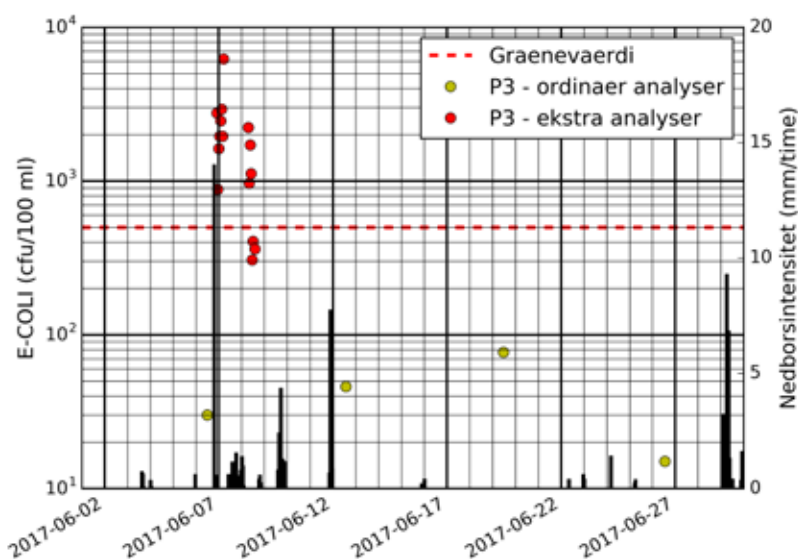
Varslingsystemerne der anvendes i f.eks. København, Aarhus og mange andre kommuner er deterministiske computermodeller i 3D. Det vil sige, at systemet simulerer både den rumlige (horisontalt og ned gennem vandet) og tidslige udvikling. Disse modeller holder styr på vandets bevægelser, hvordan bakterierne, f.eks. EC og IE, spredes med vandets bevægelser samt hvor hurtigt bakterierne dør. Disse computermodeller svarer groft sagt til de modeller, som meteorologerne anvender til at lave vejrudsigter /4/. Denne type model kræver dog meget præcise randbetingelser for at kunne lave præcise forudsigelser. Det kan i praksis være svært at etablere målepunkter nok til at modellen rammer alle detaljer i strømningerne.

Derfor kan der alternativt anvendes statistiske og datadrevne modeller (kunstig intelligens) til at forudsige badevandskvaliteten. Fordelen er, at der kunne forudsiges vandkvalitet i de kritiske punkter (f.eks ved havnebad) i stedet for at beregne vandkvaliteten alle steder. De statistiske modeller (Regression, multivariat, neuralnetværk etc.) opstilles ved at sammenholde målinger af indikator bakterier (EC og IE) med forskellige metrologiske eller hydrodynamiske forhold (vindretning, vandtemperatur, tidevand, nedbørshændelser og turbiditet (vandets uklarhed) etc.). Statistiske modeller baseret på nedbørshændelser eller turbiditet er flere steder anvendt med succes til at varsl om forhøjede niveauer af indikator-bakterier /5/.

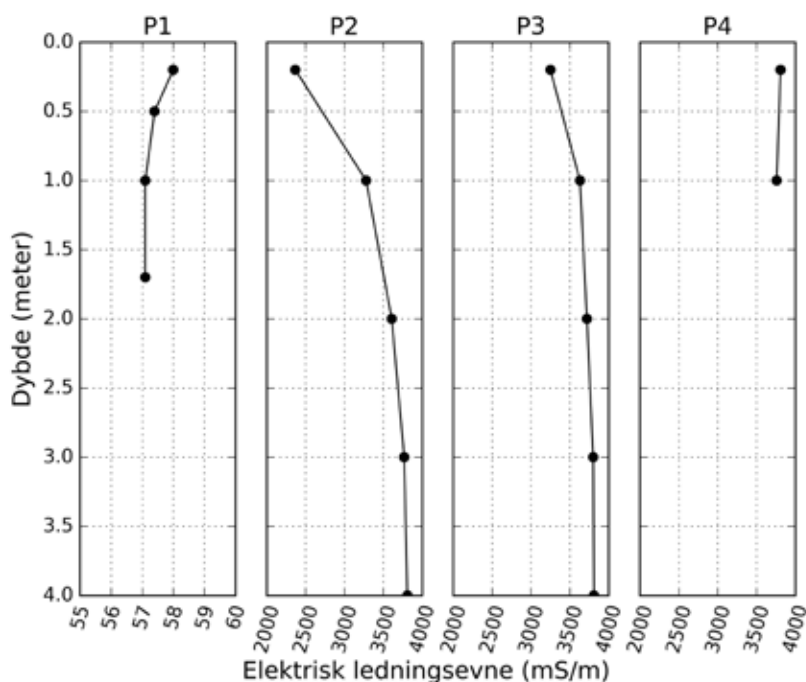
I Aarhus Kommune har vi gennem 5 år taget vandprøver i bassin 7 ved Aarhus Ø. Fra 2016 er analyser af indikator-bakterier supple-

Tabel 1. Kategorisering af badevand i henhold til /3/. * 95 procent percentil, ** 90 procent percentil.

Klassifikation (saltvand)	Ring	Tilfredsstillende	God	Udmærket
E-Coli (cfu/ml)	>500**	500**	500*	250*
I-enterokokker (cfu/ml)	>185**	185**	200*	100*



Figur 3. Sammenhæng mellem forekomst af E. coli (EC) og nedbør. Rød stiplede linje (grænseværdi) viser grænsen for "tilfredsstillende" badevandskvalitet.



Figur 4. Måling af elektrisk ledningsevne (EL) i forskellige dybder på de fire undersøgselspositioner i Aarhus havn. Undersøgspositioner fremgår af Figur 2.

ret med samtidig målinger af badevandets elektriske ledningsevne (EL). Der har vist sig at være en sammenhæng mellem havvandets indhold af bakterier og EL. Det har herved været muligt at opbygge en relation (statistisk model), som kan anvendes til at varsle, om koncentrationen af bakterier på baggrund af sensormålinger af vandets elektriske ledningsevne. Sensordata opsamles og sendes automatisk, hvorved der er realtime information til rådighed for de ansvarlige myndigheder, der kan anvendes til varsling om forringet badevandskvalitet.

Test case – Aarhus havn

Aarhus Å har sit udløb i bunden af Aarhus Havn, se Figur 2. I oplandet til Aarhus Å er to af Aarhus' fire renselanlæg samt en række sparerbassiner. Hovedparten af Aarhus bycentrum er stadig fælleskloakeret, hvor regn- og spildevand løber i samme ledning. Under kraftig regn er der ikke kapacitet i ledningerne til de ekstra mængder vand, og der sker derfor overløb af blandet regn og spildevand. Overløbene sker primært til Aarhus Å, hvorfor spildevandet strømmer med det ferske å-vand ud i Aarhus Havn (P1). Å-

vandet strømmer forbi mellemarmen (P2) og bassin 7 (P3), inden det ender ude i det åbne hav (P4). Strømningsforholdene præges desuden af tidevandet og vindretning, hvorfor man hydraulisk kan betragte strømningsforholdene i havneområdet (P1,P2 og P3) som et "floddelta".

Datagrundlag

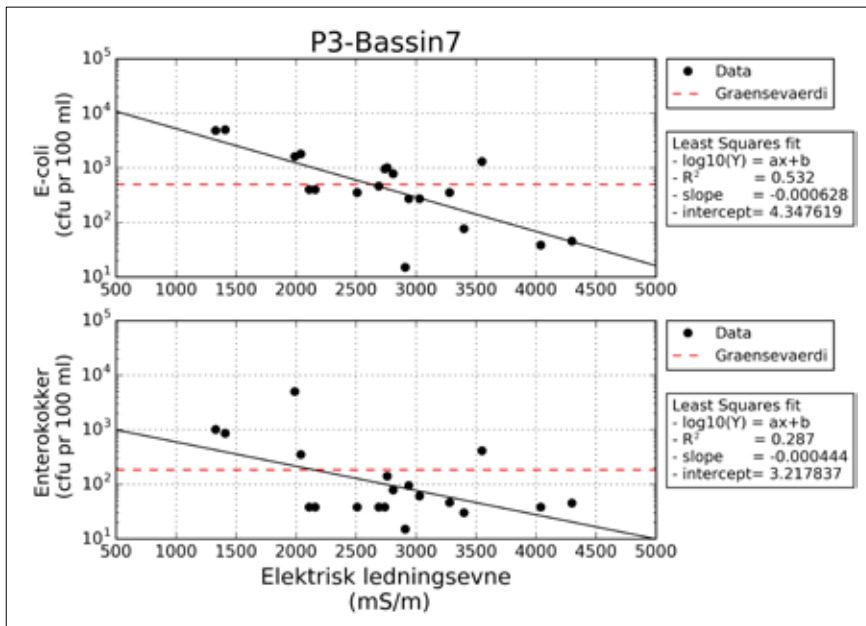
Badevandsdata

I forbindelse med udviklingen af Aarhus Ø er der et ønske om at tilbyde rekreative tilbud. Bassin 7 blev udpeget som muligt område for rekreative vandaktiviteter. Der er derfor indsamlet prøver af badevandet til analyse af indikator-bakterier fra 2012. Der er siden 2012 taget vandprøver i badesæsonen (1. juni til 1. september) i henhold til Bekendtgørelse om badevand og badeområder /3/. Som nævnt i afsnit 3 udtages vandprøverne som "stik-prøver". Specifikt for position P3-bassin 7 betyder det, at der tages en "ordinær" badevandsprøve hver mandag i badesæsonen.

På Figur 3 ses EC (gule prikker) for uger i badesæsonen 2017. For alle fire analyser er EC koncentrationerne under grænseværdien (rødstiplede linje), hvorfor badevandskvaliteten synes at være udmærket jf. Tabel 1. Vi ved, at der kan ske overløb. Derfor er der som supplement indsamlet supplerende vandprøver. I Figur 3 er der vist resultatet af to målekampagner (røde prikker), der klart viser, at indholdet af indikator-bakterier langt overskrider det tilladte niveau efter regn. Det er værd at bemærke at "målekampagne 1" er foretaget efter et kort, men intensivt regnvejr, mens "målekampagne 2" er foretaget efter en periode med konstant regn. Begge typer af nedbørshændelser (kort-intensiv og dagsnedbør) kan føre til overskridelse af kloakkens kapacitet og dermed overløb af urensset spildevand. Det ordinære prøvetagningsprogram "fanger" således ikke korttidsforureningerne efter kraftigt nedbør. Det vil sige, at i forbindelse med regnvejr vil der være mange overskridelser af grænsen for tilfredsstillende badevandskvalitet. Disse overskridelser ville ikke være observeret, hvis badevandskvaliteten alene var overvåget med den krævede prøvetagningsfrekvens (gule prikker i Figur 3).

Lagdeling

Som en del af målekampagnerne er der også foretaget undersøgelser af blandings- og fortyndingsforholdene i Aarhus Havn. Der er lavet vertikale profiler af vandets elektriske ledningsevne på de fire undersøgselspositioner i Aarhus Havn. Målinger i Aarhus Å (P1) viser som forventet at å-vandet er fersk, og at den øverste del kan være påvirket af salt havvand.



Figur 5. Sammenhæng mellem målinger af indikator bakterier og vandets elektriske ledningsevne. De rød stiplede linjer viser grænsen for "tilfredsstillende" badevandskvalitet for henholdsvis EC og IE. Den sorte linje viser resultatet af regresionsanalysen.

På målestation P2 og P3 er den øverste del af vandsøjlen påvirket af fersk å-vand. I 3 meters dybde er der ingen påvirkning af ferskvandet. På målestation P4 er der kun målt høje EL-værdier svarende til, hvad man forventer at

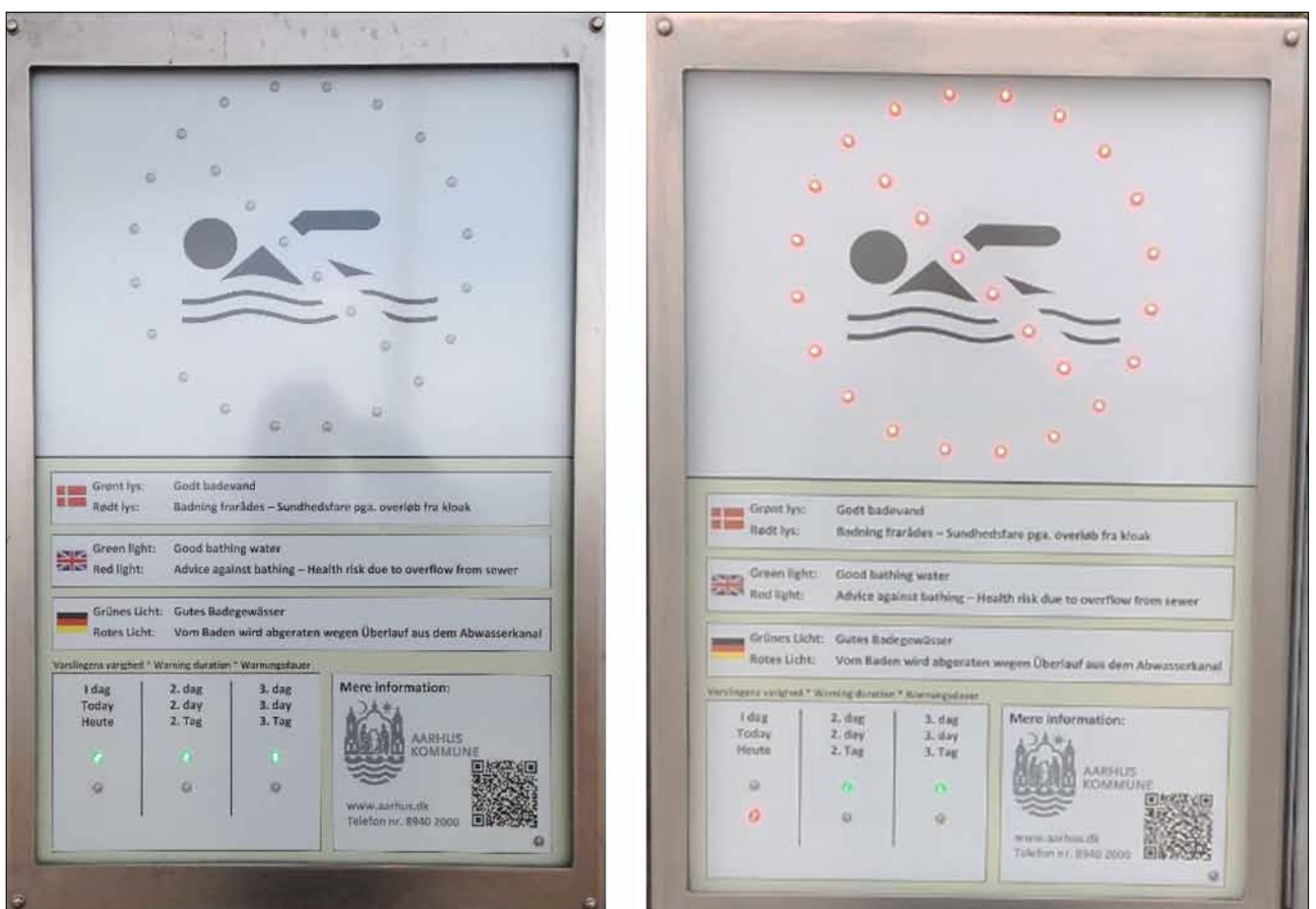
måle i havvand.

Målinger fra position P2 og P3 viser, at det ferske å-vand kun i nogen grad blandes med det salte havvand. Den ringe opblanding og fortynding skyldes forskellene i massefylde og

temperatur mellem havvandet og å-vandet. Å-vandet strømmer/transporteres ovenpå havvandet, hvilket kan observeres helt ud i bassin 7 (P3).

Modellering af Badevandskvalitet

I 2016 og 2017 har der været fortaget grundige analyser af vandkvaliteten i bassin 7 (P3). Sammenhørende målinger af koncentrationen af indikator-bakterier og vandets elektriske ledningsevne i Bassin 7 viser en tydelig sammenhæng (Figur 5). Figur 5 viser, at ved lave elektriske ledningsevneværdier (0-2.000 mS/m) er bakteriekoncentrationen i bassin 7 meget høj. For høje elektriske ledningsevneværdier (3.000-4.000 mS/m) er bakteriekoncentrationen i bassin 7 relativ lav. Analysen understreger hypotesen om, at jo mere ferskvand der er i bassin 7, desto større er risikoen for sundhedsfaren på grund af bakterier i vandet. Med denne viden konstrueres der et varslingsystem, hvor der monteres en sensor, som kan måle den elektriske ledningsevne af vandet i bassin 7. Den målte elektriske ledningsevne omsættes til et teoretisk bakterieniveau (den sorte linje), se Figur 5. Badevandskvaliteten bliver problematisk når vandets EL er under 2550 mS/m. Vi kalder



Figur 6. Lysdiodeskilt til automatiseret varsling om forringet badevandskvalitet. (Foto: Amphi-Bac)

denne grænse "cuf-off værdien". Cuf-off værdien beskriver, hvornår badevandet ikke kan forventes at holde minimumskravet på tilfredsstillende. Registerer sensoren EL-værdier under Cuf-off værdien er vandet uegnet til badning og vice versa.

Resultatet sendes til en varslingsstavle som viser om vandet i bassin 7 er egnet til badning eller ej. Hvis det beregnede bakterieniveau er i kategorien "ringe", jf. Tabel 1, vil varslingsstavlen advare om kortvarig forurening af badevandet ved hjælp af røde lysdioder, se Figur 5. Varslingsstavlen lever op til badevandsdirektivets krav /2/ til skiltning i forbindelse med kendt kortvarig forurening af badevandet.

Konklusion og fremtidsperspektiver

Forudsætningen for sensorbaseret varsling er adgang til store datamængder. Data skal bruges til at etablere relationen mellem indikator-bakterier og elektrisk ledningsevne. Data skal dække et bredt spektrum af situationer: Før og efter overløb, før og efter flod/ebbe, forskellige vandføringer i Aarhus Å, etc. For at minimere fejl skal varslingsmodellens forudsigelser løbende valideres. Prøvetagning til validering af modellen planlægges, så man får analyseret vandet ved både lav og høj elektrisk ledningsevne. Der skal særligt tages mange prøver omkring cut-off værdien, hvor badning og aktiviteter med vandkontakt frarådes.

I det konkrete tilfælde er det ikke nødvendigt at kende de enkelte forureningskilder fra byen afløbssystem, da vandet i Aarhus Å er belastet fra to renseanlæg og overløb fra afløbssystemet /6/. Der vil derfor altid være et højt niveau af bakterier i å-vandet. Dette er årsagen til at der er udstedt et permanent badeforbud mellem P1 og P2. Ved P3 er strømningsmønstrene mere dynamiske. Her kan vandet gå fra at være rent havvand til at være meget forurennet af å-vand, se Figur 5. Ved direkte at måle vandets elektriske ledningsevne får vi indirekte information om badevandskvaliteten, men også indirekte information om strømningsforholdene i havnen.

Strømningsforholdene er dynamiske og ændrer sig hele tiden. Strømningsforholdene drives af naturlige forhold som tidevand, vind og vandføringen fra Aarhus Å. De mange bygge- og anlægsprojekter i Aarhus Ø, herunder jordtippinge, anlæg af havnebad, samt etablering af interne kanaler, er med til at ændre strømningsforholdene og introducerer nye kilder til forurening. Fejlkoblinger, driftsforstyrrelser på renseanlæg og tilstoppede kloak medfører utilsigtede udledninger af spildevand. Ved løbende at indsamle data til at forbedre varslingsmodellen får vi samtidig information om utilsigtede udledninger af spildevand, der ellers ville være umuligt at monitere eller forudse..

Ingen kan garantere, at badevandets kvali-

tetskrav altid er opfyldt. Badevandsdirektivet kræver, at myndighederne skal advare de badende, når der er kendskab til forringet badevandskvalitet. Sensorbaseret varsling af forringet badevandskvalitet kan derfor være en effektiv metode til at sikre, at dette krav er opfyldt.

Referencer

- /1/ <https://mst.dk/natur-vand/vandmiljoe/badevand>
- /2/ Europaparlamentets og rådets direktiv om badevandskvalitet <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32006L0007>
- /3/ Bekendtgørelse om badevand og badeområder <https://www.retsinformation.dk/forms/R0710.aspx?id=181956>
- /4/ <http://badevand.dk/>
- /5/ Anouk de Brauwere, Nouho Koffi Ouattara & Pierre Servais (2014) Modeling Fecal Indicator Bacteria Concentrations in Natural Surface Waters: A Review, Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 44:21, 2380-2453, DOI: 10.1080/10643389.2013.829978
- /6/ <http://webgis.aarhus.dk/minimaps/spildevandsplan20172020.html>

NIKOLAJ KRUSE CHRISTENSEN, Ph.d., Teknik & Miljø – Aarhus Kommune

SØREN BASTHOLM, Direktør, Amphi-Bac ApS

MICHAEL R. RASMUSSEN, Professor, Institut for Byggeri og Anlæg, Aalborg Universitet

Salpeter...

Selv om Vand&Jords Salpeter er kommet på plejehjem så vil han gerne nu og da bidrage med sine vise ord: Når nu EU er så glad for akronymer (AK), så forslår kan af VRD indekset DVFI benævner værdien God Økologisk Kvalitet for GAK (God Akvaøkologisk Kvalitet). Jo, forstår I lyder det fra gyngestolen: GØK går jo ikke, thi Ø er jo ikke i det franske alfabet.

