

FORSKERE STREAMER LIVET I SØER

Et tværfagligt projekt i Ormstrup sø anvender en avanceret, automatisk målebøje til kontinuerligt at måle vandkvalitetsrelaterede data, mens fiskenes adfærd overvåges med speciel teknologi. Søens tilstand live-streames direkte til forskernes pc og giver en bedre indsigt i søers økosystemer og deres dynamik.

Om forfatterne



Anders Nielsen er seniorforsker ved Sektion for Søkologi, Aarhus Universitet
an@ecos.au.dk



Martin Søndergaard er seniorforsker ved Sektion for Søkologi, Aarhus Universitet
ms@ecos.au.dk



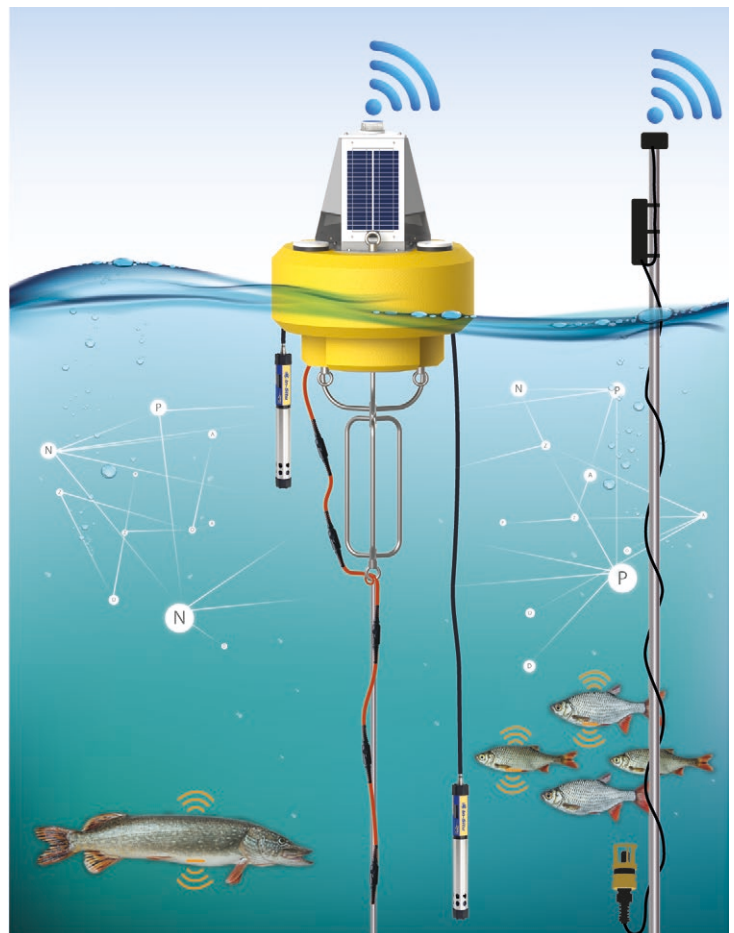
Henrik Baktoft er seniorforsker ved DTU Aqua, Sektion for Ferskvandsfiskeri og Økologi.
hba@aqu.dtu.dk



Christian Skov er lektor ved DTU Aqua, Sektion for Ferskvandsfiskeri og Økologi.
ck@aqu.dtu.dk

Søer verden over tjener mange formål. De er essentielle miljøer for biologisk mangfoldighed. De interagerer i kulstof- og næringsstofkredsløbet. De giver mulighed for fiskeri og har stor rekreativ værdi og er ikke mindst en drikkevandsressource (omend drikkevand i Danmark altovervejende kommer fra grundvandsmagasiner). Søerne er imidlertid sårbare over for øget næringsstoffertilførsel, som på forskellig vis ændrer deres økologiske balance, der kommer til udtryk som blandt andet iltvind og algeopblomstringer.

I Danmark har der især siden 80'erne været fokus på mange søers forringede tilstand, der hovedsagelig skyldes øget tilførsel af fosfor og kvælstof som følge af spildevandspåvirkning og landbrugsintensivering. Igennem årene er der gennemført en række tiltag, som har haft til formål at forbedre søernes tilstand. For at vurdere effekten af disse tiltag har søernes tilstand været fulgt via forskellige overvågningsprogrammer, som betyder, at der i dag eksisterer lange tidsserier for udvalgte søer i Danmark. Disse tidsserier giver helt unikke muligheder for at analysere søernes tidsmæssige udvikling og for eksempel se på indflydelsen fra



Bøje-systemet er solcelledrevet og fuldautomatisk og måler blandt andet vandtemperaturen i fem dybder samt i luften. En del af fiskene er mærket med akustiske transmittere, og deres adfærd kan følges i real-tid.

klimaændringer og effekterne af initiativer iværksat for at reducere tilførslen af næringsstoffer. Samtidig danner tidsserierne basis for at

benytte computerbaserede virtuelle laboratorier, som kan forudsige, hvordan søerne vil opføre sig i fremtiden.

Søernes dynamik

De lange tidsserier har vidt forskellige målefrekvenser. I bedste fald måles to gange månedligt i sommerperioden, men ofte foretages kun månedlige prøvetagninger eller nogle gange endda sjældnere. Og hvad fisk angår, kan der gå adskillige år mellem fiskebestandsmonitoring. Det kan være godt nok til at fastlægge et niveau for søens tilstand, men mange søer gennemgår store kortvarige udsving, som den rutinemæssige overvågning overhovedet ikke fanger (se graf). Det kan for eksempel være korte, midlertidige iltsvind ved søbunden eller næringsstofændringer, som kan stimulere algeopblomstringer og gøre vandet uklart. Med nye metoder får vi nu bedre kendskab til disse kortvarige dynamikker og dermed ny viden til at forstå søernes tilstand og deres omskiftelighed.

Avanceret bøjesteamers data

For at blive klogere på søernes kortvarige udsving anvender vi nu særlige målebøjer. Det gælder for eksempel i et stort tværfagligt projekt med udgangspunkt i Ormstrup Sø syd for Bjerringbro, finansieret af Poul Due Jensen Fonden. Her har vi på en bøjesteam, der flyder i overfladen installeret et monitoringssystem, der ned gennem vandsøjlen måler en række parametre, der siger noget om søens vandkvalitet. Bøjesteamet er solcelledrevet og fuldautomatisk og måler blandt andet vandtemperaturen i fem dybder samt i luften. Vandtemperaturen siger meget om, hvordan søen er lagdelt, og med bøjesteamet kan vi med stor detaljegråd kortlægge, hvor ofte, hvor længe og hvor dybt, søen lagdeler. Bøjesteamet måler også iltkoncentrationen i overfladen og ved bunden, samt vandets turbiditet (klarhed) og mængden af alger (via deres pigmenter) i overfladen.

Måling af algemængder med sensorer

Kontinuerte og automatiserede målinger af vandtemperatur og iltkoncentration er velafprøvede teknikker, der oftest giver pålidelige data. Det er derimod mere vanske-



Foto: Kåre Nielsen fra InCaseOF

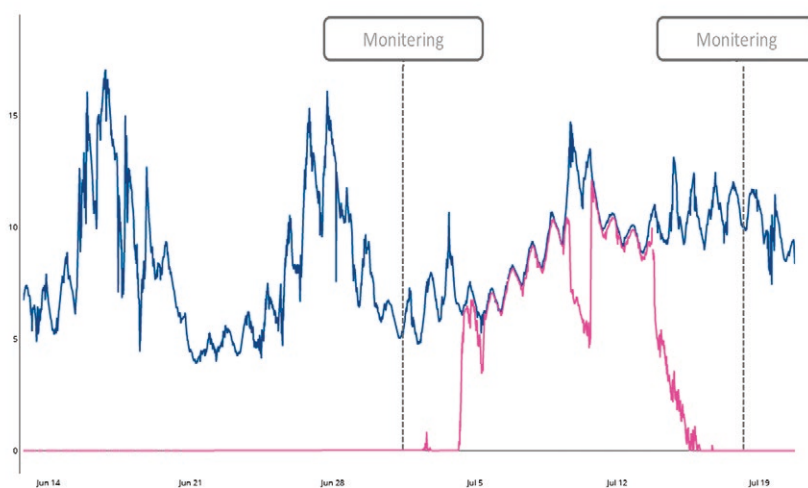
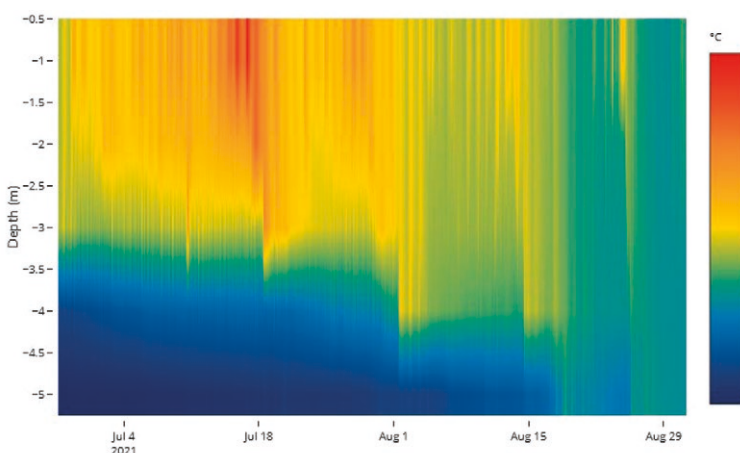


Illustration af kontinuert målt ilt-koncentration i Ormstrup Sø i henholdsvis overfladen (blå) og ved bunden (pink). Man kan se, at søen i lange perioder er uden ilt ved bunden, undtagen en kort periode i starten af juli. Målinger hver 14. dag (indikeret med stiplede lodrette linjer) vil ikke fange den korte periode, hvor der er ilt i hele vandsøjlen.



Konturplot af temperaturfordelingen ned gennem vandsøjlen i Ormstrup Sø over tid. I perioder hvor temperaturen i søens nederste del er koldere end den øverste, er søen lagdelt med et springlag i midten. Lagdelingen fungerer som en barriere, hvorved bundvands ilt-niveau falder, hvilket kan give anledning til en række afledte effekter som næringsstoffrigivelse fra bunden.

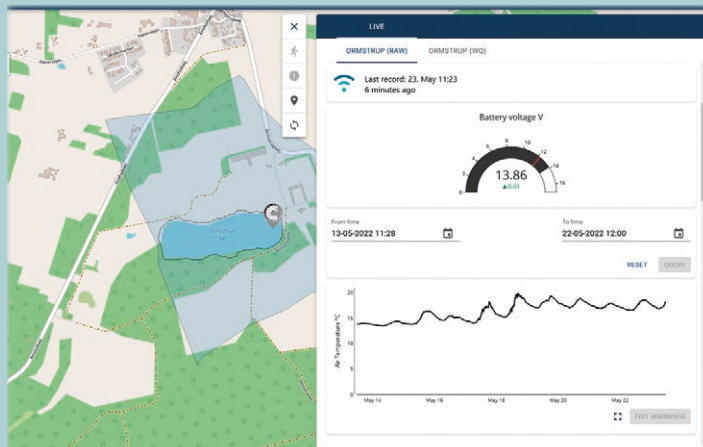


↑ Se et eksempel på datavisualisering.

Målebøjen

Bøjesystemet måler hvert 15. minut, det vil sige næsten 100 gange i døgnnet, og data sendes ved hjælp af LoRaWAN (der står for Long Range Wide Area Network) til et cloud-baseret system. Herfra bliver data visualiseret og streamer et realtidsindblik i søens dynamik til en offentlig hjemmeside

LoRaWAN kan dække relativt store områder med meget lidt hardware og giver mulighed for energibesparende løsninger, som er nødvendig, når bøjesystemet er udlagt i søen og alene genererer strøm via solpaneler. Energiforbruget fra et monitoringssystem kan være en udfordring, navnlig på danske breddegrader, hvor vintermånedernes solindstråling er begrænset. Men bøjesystemet har været testet over vinteren uden problemer.



adfærd, for eksempel i forhold til fødesøgning, og i hvilket omfang byttefisk, som skallerne, er i stand til at undvige rovfiskene. Som en del af projektet i Ormstrup sø har vi mærket gedder, skaller og aborrer i søen med særlige sendere, der udsender et akustisk signal cirka en gang i minuttet. Derudover har vi opsat lyttestationer i søen samt udviklet et avanceret system, der gør det muligt at beregne fiskenes position her og nu. På den måde får vi et ret præcist overblik over, hvor fiskene opholder sig, og hvordan de bevæger sig rundt i søen. Det avancerede system muliggør desuden, at fiskenes position med få minutters forsinkelse bliver streamet til en offentlig hjemmeside døgnet rundt. Her kan forskere og andre nysgerrige følge med i fiskenes adfærd her og nu via tusindvis af daglige data om fiskenes placering, og man kan blandt andet se, hvordan fiskene opfører sig under kortvarige iltsvind:

<https://live.telemetry.fish>

Projektets samarbejde
Forskningselementerne, som beskrives i artiklen, er finansieret af Poul Due Jensens Fond og er en del af projektet: *Lake Stewardship (Monitoring af Ormstrup Sø 2020-2023)*, hvor flere danske universiteter indgår.

Udover artiklens forfattere har følgende personer bidraget til arbejdet - fra Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience, Sektionen for Søøkologi:

Thomas A. Davidson, Eti E. Levi og Dennis Trolle samt fra Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Akvatiske Ressourcer (DTU Aqua): Martin Hage Larsen og Nicolas Azaña Schnedler-Meyer.

Videre læsning

Læs mere om projektet på hjemmesiden: www.pdjf.dk/programmer/baeredygtig-soerestauring

ligt at opnå gode målinger af algemængden. Konceptet i det automatiske bøje-monitoringssystem er at anvende optiske sensorer, som udsender lys ved specifikke bølglængder, der matcher for eksempel det spektrum, hvor algers klorofyl-a pigment auto-fluorescerer og derpå måle på den returnerede lysmængde, som udtryk for koncentrationen af klorofyl-a. Metoden har et stort potentiale, men også udfordringer. Eksempelvis er oversættelsen af de tal, som de optiske sensorer måler, til faktiske algekoncentrationer påvirket af en række faktorer som algesammensætning, begroning og såkaldt quenching (som betyder, at algerne midt på dagen kan beskytte sig selv mod kraftigt lys). Der er derfor brug for grundig kalibrering. I Ormstrup-projektet foretager vi løbende kontrolprøver af algekoncentrationerne, som anvendes til kalibrering, men der er fortsat behov for mere viden og tests af sensorerne for at opnå valide tal for de faktiske algekoncentrationer. Denne viden er også central i forhold til at vurdere, om sensorerne

på et tidspunkt vil kunne erstatte (eller supplere) den traditionelle og tidskrævende laboratoriemetodik i takt med, at sensorerne bliver endnu bedre. Sensorerne har dog stadig værdi her og nu, da de giver vigtig information om den relative ændring af algeniveauer og kan dermed for eksempel varsle, om en algeopblomstring er undervejs og også danne grundlag for at beslutte, hvornår der skal indhentes manuelle vandprøver. Denne viden er interessant, hvis en given sø for eksempel benyttes til badning eller som drikkevandsreservoir, hvor alger kan udgøre en sundhedsrisiko.

Danmarks største akvarium

Tætheden af fisk og sammensætningen af arter har stor betydning for økosystemet i næringsforurende søer. Dominans af fredfisk, som skaller og brasen betyder, at søen typisk fremstår grøn og uklar, mens søer med en dominans af rovfisk som gedde og aborrer ofte vil fremstå mere klarvandede. Fiskenes betydning for søernes tilstand hænger blandt andet sammen med deres

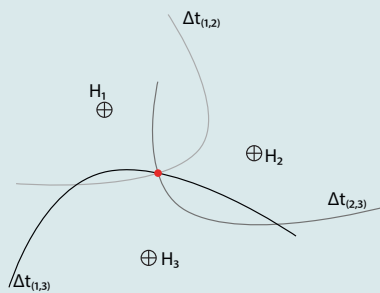
Bøjer skal tilpasses mindre søer

Højfrekvente målinger i søer har stort potentiale og har indtil nu kun i meget begrænset omfang været anvendt i Danmark. Ormstrup-projektet er derfor en vigtig "showcase", der giver værdifulde erfaringer at bygge videre på. En af udfordringerne er, at gængse bøjesystemer typisk er udviklet til offshore-industrien eller større Nordamerikanske søer og dermed *over-engineered* til de forhold, de udsættes for i danske søer. Næste skridt i Ormstrup-projektet er at udvikle bøjesystemer specifikt til mindre søer (som vi har i Danmark og mange andre steder i verden), som kan gøre højfrekvent dataindsamling meget mere tilgængeligt i den rutinemæssige overvågning af det akvatiske miljø og samtidig en naturlig del af for eksempel forskningsprojekter og forundersøgelser forud for restaureringsindgreb, som det er tilfældet i Ormstrup Sø.

Ormstrup Sø er ligeledes den første sø i verden, hvor man streamer fiskenes adfærd direkte til forskere og borgere. Ud over viden om

Real-time/live tracking af fisk

Ormstrup Sø er så vidt vi ved den eneste sø i verden, hvorfra man online kan følge fiskenes adfærd. For at kunne følge fiskene bliver de først mærket med sendere, der hver udsender et kodet lydsignal indeholdende et unikt ID samt fiskens dybde cirka en gang i minuttet. Signalerne opfanges af hydrofoner placeret langs søens kant, og data sendes via et LoRa (Long Range)-netværk til en pc hos DTU. Når denne pc modtager nye data, beregner den med det samme positionen for den fisk, der udsendte lydsignalet og sender positionen videre til en hjemmeside, hvorfra fiskene kan følges. Beregningen af positionerne er baseret på en teknik, der kan betegnes som "en omvendt GPS".



Figuren viser princippet i denne metode. Senderne udsender et lydsignal, der opfanges på de tre hydrofoner (H1, H2 og H3). Idet lydets hastighed gennem vand kan beregnes ud fra vandets temperatur og saltindhold (for eksempel 1450 m/s i 10 grader varmt ferskvand), bliver signalet registreret en lille smule tidligere på en



Et screen dump fra siden med live-visning af fiskenes positioner i søen. (Se <https://live.telemetry.fish>) Hver mærket fisk er repræsenteret af en prik, der viser fiskens seneste position og en streg, der viser, hvor fisken har været den sidste time.

$$\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} = c\Delta t_{(1,2)}$$

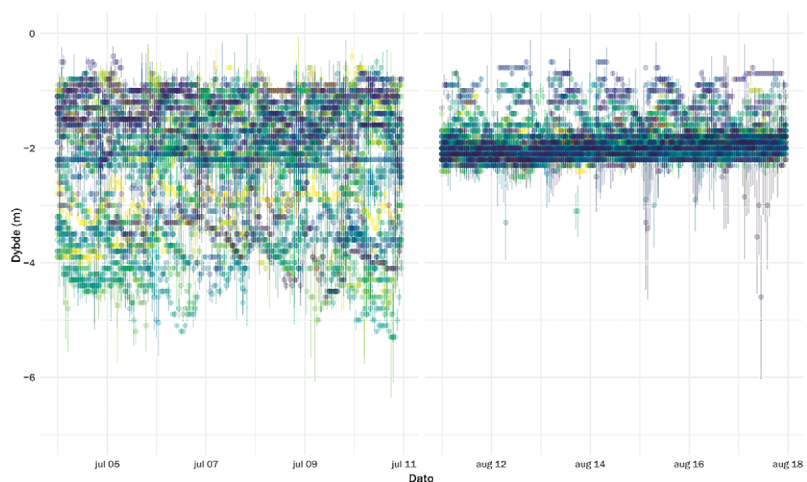
$$\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2} - \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} = c\Delta t_{(1,3)}$$

$$\sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2} - \sqrt{(x-x_3)^2 + (y-y_3)^2} = c\Delta t_{(2,3)}$$

hydrofon, hvis fisken er tæt på, end hvis den er længere væk (en forskel i størrelsesordenen 0-500 millisekunder). Forskellen i registreringstiden af de tre mulige parvise kombinationer af hydrofoner illustreres af linjerne $\Delta t_{(1,2)}$, $\Delta t_{(1,3)}$ og $\Delta t_{(2,3)}$, der beskrives af de viste ligninger. De tre ligninger indeholder to ukendte (x og y), der er fiskens position, c er lydets hastighed. Ved hjælp af avancerede matematiske modeller kobles alle registreringerne fra en given fisk sammen, og positionerne beregnes, hvorefter fiskens spor/track kendes.

adfærden af nogle af de mest almindelige fisk i Danmark giver undersøgelserne også ny viden om, hvordan fisk reagerer på sørestaureringstiltag. Håbet er at kunne udbrede metoden til flere søer, så det kan gøre os klogere på, hvordan forskellige miljøforhold i forskellige søer påvirker fiskene, deres adfærd og dermed økosystemet som helhed.

Ud over at forskere og interesserede borgere får indblik i søens tilstand her og nu og med en hidtil uset opløsning, indgår de højfrekvente data samtidig i skabelsen af en digital tvilling af søen. Her bliver sensordata anvendt sammen med en computer-model til at beskrive dynamikken i hele søens økosystem. ■



Figuren viser, hvordan gedderne i Ormstrup Sø indenfor få uger bliver begrænset i deres leveområde på grund af iltvind i søens dybe områder. Til venstre er afbilledet en periode på 7 dage i sommeren 2020, hvor der er ilt overalt i søen. Hver prik indikerer en dybdeposition af en af de cirka 40 mærkede gedder, som svømmer rundt i søen, og hver gedde har sin egen farve. Det fremgår, at gedderne anvender det meste af søens vandsøjle som opholdssted (søen er cirka 5,5 meter dyb). Til højre ses en periode på 7 dage cirka fem uger senere, hvor der er iltvind i søens dybe områder, det vil sige der findes næsten ingen ilt under cirka 2 meters dybde. Det ses tydeligt, at gedderne nu er koncentreret i søens øvre vandmasser.