



SUNDHEDSTJEEK AF SØER, VANDLØB OG FJORDE VIA DERES METABOLISME

Om forfatterne:



Dennis Trolle er partner i WaterTech. Han er uddannet miljøingeniør fra Aalborg Universitet og har en ph.d.-grad fra University of Waikato, New Zealand og tidligere professor ved Aarhus Universitet. dt@watertech.com



Anders Nielsen er partner i WaterTech. Han er uddannet miljøingeniør fra Aalborg Universitet og har en ph.d.-grad fra Aarhus Universitet, hvor han også har arbejdet som seniorforsker. an@watertech.com

Med en kombination af ilt-sensorer og avanceret databehandling er det muligt at estimere den biologiske omsætning af stof – dvs. metabolismen – i søer, vandløb og fjorde. Det åbner op for en enkel og billig måde løbende at overvåge et vandmiljøes sundhedstilstand.

Tilstanden i søer, vandløb og fjorde bestemmes i dag ud fra standardiserede overvågningsprogrammer, som inkluderer både fysiske, kemiske og biologiske elementer. Antallet af prøvetagninger og laboratorieanalyser, der hvert år gennemføres for de danske søer, vandløb og fjorde, er reduceret betydeligt siden 90'erne, overvejende for at opnå besparelser.

Der findes i dag også sensor-baserede løsninger til direkte overvågning af vandkvaliteten i felten – eksempelvis sensorer, der kan bestemme biomassen af alger og koncentrationen af næringssalte. Der findes imidlertid ikke sensorer, der kan bestemme alle elementer i overvågningsprogrammet. De sen-

sorer, der kan anvendes til blandt andet vandkemi har desuden en præcision og et behov for vedligeholdelse, som betyder, at de ikke kan erstatte traditionel laboratoriebaseret overvågning. De fleste vandkvalitetssensorer er endvidere forholdsvis dyre og kræver omfattende og løbende vedligehold, hvilket øger omkostningerne ved denne form for overvågning.

Der findes imidlertid simple optiske sensorer, der løbende kan måle både iltkoncentration og temperatur, som til sammenligning typisk er langt mere driftssikre. Data fra disse kan – via avancerede computermødelles – oversættes til metaboliske rater, dvs. hvor meget stof, der omsættes pr tidsenhed af alle de

biologiske organismer i økosystemet. Metaboliske rater er interessante, fordi de typisk er stærkt korreleret med de traditionelle vandkvalitetsparametre såsom koncentrationen af næringssalte og biomassen af alger. Kombinationen af optiske ilt-sensorer og metabolismemødelles er derfor en omkostningseffektiv måde at opnå løbende indsigt i miljøtilstanden. Princippet kan sammenlignes med et "Smart Watch", som overvåger en persons puls og bruger denne i en modelberegning til løbende at give en vurdering af personens sundhedstilstand.

Omsætningen i et økosystem
Økosystemers metabolisme (den samlede biologiske omsætning af stof og energi pr tidsenhed)

er en anerkendt og fundamental nøgleegenskab ved et økosystem. Metabolismen i søer, vandløb og fjorde beskrives via økosystemernes samlede primærproduktion og respiration fra alle organismene i systemet lige fra bakterier og alger til fisk og hvaler.

Metabolismen udtrykkes via henholdsvis brutto-primærproduktionen, økosystemets respiration, samt netto-økosystemproduktionen, hvor sidstnævnte kan beregnes ved at trække økosystemets respiration fra brutto-primærproduktionen. Disse rater giver et indblik i økosystemets overordnede sundhedstilstand, hvor for eksempel brutto-primærproduktionen og respirationen typisk er højere i uklare, næringsrige søer sammenlignet med renere næringsfattige søer med højere biodiversitet. Det skyldes, at brutto-primærproduktionen stiger, når mængden af næringsalte stiger, hvilket samtidig betyder, at der produceres mere organisk stof via eksempelvis alger, som kan omsættes via respiration. Ydermere stiger brutto-primærproduktionen og respirationen generelt også med stigende temperatur. Ved at følge disse to metaboliske rater over længere tid kan man derfor få indsigt i, hvorvidt et økosystem går mod en forbedret eller forværret tilstand, og også hvordan et stadigt varmere klima har indflydelse på denne.

Bestemmelse af metabolisme ud fra iltmålinger

Når man udleder de metaboliske rater, foregår det ved hjælp af en såkaldt proces-baseret model. Det er i praksis et sæt af avancerede ligningsudtryk, som indeholder en række parametre, der kan beregne brutto-primærproduktionen, respirationen og iltkoncentrationen. Modellen kalibreres ved at justere på værdierne af de forskellige modelparametre og dernæst sammenligne de beregnede iltkoncentrationer med de observerede iltkoncentrationer over 24 timer. Selve kalibreringen kan gennemføres automatisk ved hjælp af machine-learning, hvor en computer sættes til løben-

Metabolisme som udtryk for vandkvalitet

Flere studier, som eksempelvis Caffrey (2004) og Solomon et al. (2013), har dokumenteret en sammenhæng mellem metaboliske rater (brutto-primærproduktion (BPP) og respiration (R)) og koncentrationen af næringsalte (eksempelvis fosfor) og alger i søer og fjorde.

Desuden har studier påvist, at metabolismen i vandløb også kan anvendes som indikator på en forstyrrelse af tilstanden, for eksempel som følge af en pludselig høj tilførsel af forurening. Det er illustreret her, baseret på en illustration fra Bernhardt et al. (2018).

de at justere på modelparametrene, indtil den modellerede iltkoncentration er så tæt som muligt på den observerede iltkoncentration. Herefter kan brutto-primærproduktionen og respirationen udtrækkes fra den færdigkalibrerede model. Modellen kan tage lidt forskellig form afhængig af, om man arbejder med et system, som lagdeles, og som dermed kan få meget forskellige iltkoncentrationer i overfladen sammenlignet med bunden (for eksempel mange søer og fjorde), eller om det antages, at systemet overvejende er vertikalt opblandet, som er typisk i de fleste studier af vandløb.

Den grundlæggende metode til at bestemme metabolisme ud fra iltmålinger har været kendt siden 1950'erne, da den første gang blev anvendt til at forstå metabolismen i et koralrev. Udviklingen indenfor både sensor- og computerteknologi har siden betydet, at beregningerne i metoden i dag kan udføres med en langt højere tidslig opløsning og også med hensyntagen til flere detaljerede fysiske processer, som alt sammen har bidraget til, at metoden i dag er mere præcis.

Vi har nu udviklet en metode der ved hjælp af machine-learning, automatisk kan kalibrere modellen

Sensorer til måling af iltkoncentration

Der findes forskellige elektrokemiske og optiske sensorer til måling af iltkoncentrationen i vand. De seneste godt 10 år er der gjort store fremskridt indenfor udvikling af optiske sensorer, og denne type sensorer har flere fordele.

Eksempelvis er de lette at kalibrere, og de har en hurtig respons kombineret med høj nøjagtighed. De kræver heller ikke meget vedligehold, men de bør dog rengøres med mellemrum – for eksempel en gang om måneden i sommerhalvåret, hvis man bruger dem i produktive næringsrige søer. På nogle typer af sensorer kan der monteres et kobberhoved, som reducerer begroning,



eller et viskerblad, som automatisk renser sensorhovedet flere gange dagligt, og dermed potentielt kan reducere behovet for manuel rengøring. På billedet ses et eksempel på en optisk iltsensor med kobberhoved, som begrænser begroning på sensorhovedets overflade.

baseret på dagsvariationer i profiler af temperatur og ilt. Metoden bygger på de nyeste metabolismemodeller fra den videnskabelige litteratur og er herudover forbedret på en række punkter. Disse forbedringer gør det for eksempel muligt at gennemføre beregningerne hurtigt på selv meget store datasæt. Metoden kan anvendes sammen med enten en målebøjle, som måler i én eller flere dybder, eller alternativt bygges ovenpå eksisterende computermodeller, der simulerer temperatur og iltkoncentrationer.

Metabolisme i Ormstrup Sø

Ormstrup Sø i Viborg Kommune er på flere måder en typisk dansk sø. Søen er relativt lavvandet (med en middeldybde på cirka 2,3 meter og en maksimal dybde på cirka 5,5 meter) og næringsrig med en stor biomasse af alger særligt i sommermånederne. Flere gange om året opstår der lagdeling i søen, hvilket kan forårsage perioder med iltsvind ved bunden og algeopblomstring ved overfladen. Ormstrup Sø har igennem de seneste år indgået i et forskningsprojekt finansieret af Poul Due Jensen Fonden, hvilket blandt andet har betydet, at der er udviklet en digital tvilling af søen (beskrevet nærmere i Aktuel Naturvidenskab nr. 4/2022). Her indsamles observationer fra en målebøjle, der blandt andet måler temperatur og iltkoncentration, og disse observationer indgår i en realtids økosystemmodel for søen. Modellen giver detaljerede estimater på dagsvariationer i både temperatur og ilt i hele søens dybdeprofil. Det giver derfor en god mulighed for at teste den nye metabolismemetode og samtidig undersøge, hvordan søens metabolisme varierer som funktion af de observerede perioder med lagdeling og iltsvind.

I 2020 havde Ormstrup Sø flere perioder med lagdeling og iltfrie forhold ved bunden. I april måned blev søen for eksempel lagdelt to gange i perioder på godt en uge, og begge gange opstod der iltsvind ved bunden. Efterfølgende blev søen igen lagdelt i godt en måned fra starten af juni – igen med iltsvind til følge. På baggrund af temperatur- og ilt-data fra denne periode har vi beregnet de metaboliske rater for søen, altså brutto-primærproduktionen og respirationen. Vores beregninger viser, at primærproduktionen generelt stiger kraftigt i

Metabolismeberegninger

For at kunne udlede metaboliske rater – det vil sige brutto-primærproduktionen og respirationen – ud fra iltkoncentrationen og temperaturen i for eksempel en sø, har man brug for en model, der så nøjagtigt som muligt beskriver, hvordan disse faktorer hænger sammen, og samtidig tager højde for, hvordan opblanding i vandet har indflydelse på iltkoncentrationen. For et system, hvor der periodevist sker en lagdeling af vandsøjlen (hvilket gælder de fleste søer) vil modellen typisk have en form, der kan udtrykkes med denne ligning:

$$\frac{\delta O_2(i)}{\delta t} = BPP_i - R_i + D_{z(i)} - D_{v(i)} - D_{s(i)}$$

Den beskriver ændringer i iltkoncentrationen over tid i et givent vertikalt lag (i), som funktion af brutto-primærproduktionen (BPP), respirationen (R) samt tre faktorer, der beskriver ilt-strømningen (fluxen) forårsaget af forskellige processer. Her beskriver D_z ilt-fluxen forårsaget af ændringer i opblandingsdybde, D_v beskriver ilt-fluxen forårsaget af den vertikale opblanding, som er drevet af turbulens og diffusion i vandsøjlen, og D_s beskriver ilt-fluxen forårsaget af genluftningen mellem atmosfæren og vandets overflade.

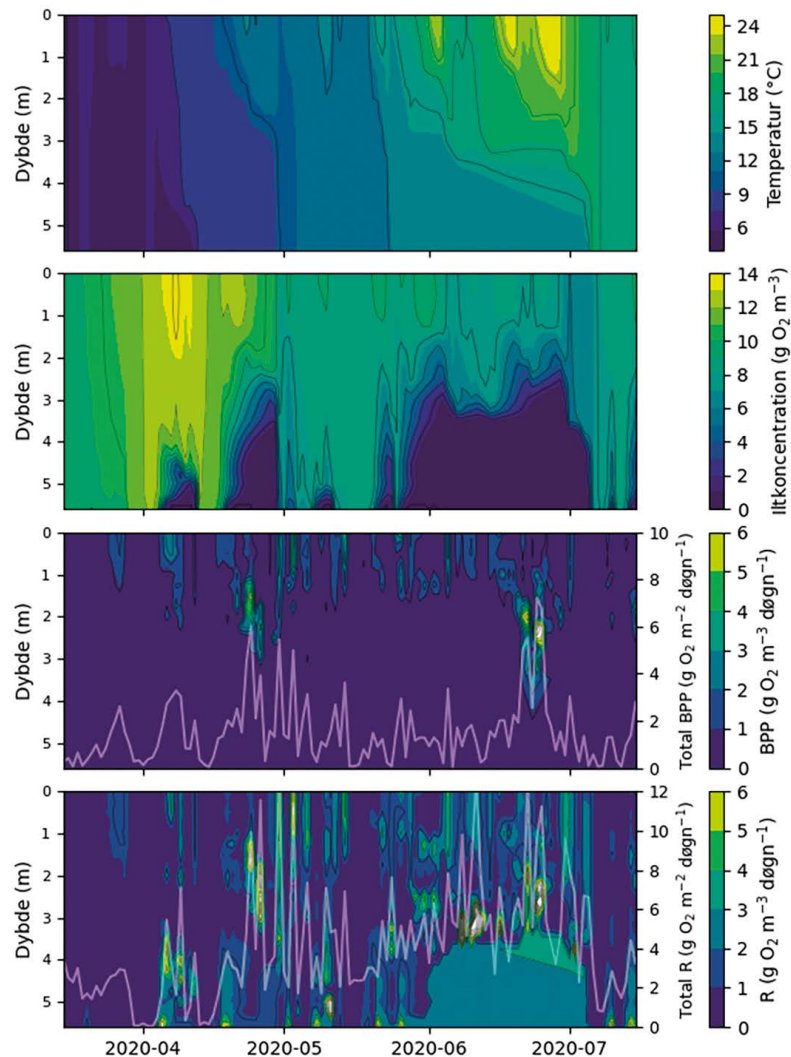
En række forskellige modelparametre indgår i beregningen af de enkelte processer. Disse modelparametre kan kalibreres med forskellige optimeringsalgoritmer, som har til formål at få den modellerede iltkoncentration til at stemme godt overens med den målte iltkoncentration. Brutto-primærproduktionen og respirationen kan herefter udtrækkes fra den færdigkalibrerede model.

overfladen i forbindelse med disse periodiske lagdelinger. Respirationen stiger ligeledes i disse perioder og er generelt højst der, hvor der også er høj primærproduktion. Den højeste primærproduktion findes ofte nær springlaget – dvs. det lag, der skiller vandsøjlen i overfladevand, som er lidt varmere og med en lidt lavere densitet, fra bundvandet, som er koldere og med en højere densitet. Det kan forklares med, at der nær springlaget findes de samlet set bedste vækstforhold for algerne i forhold til tilgængeligheden af lys og næringssalte. Selv i perioder med lagdeling kan næringsstoffer i et vist omfang transporteres igennem springlaget fra det næringsrige bundvand via turbulens og diffusion.

Ormstrup Sø bliver igennem 2024 restaureret ved at oppumpe og fjerne en del af det næringsrige bundsediment. Målet er at opnå en mere klar vandet sø, hvor primærproduktionen er betydeligt reduceret, og skifter fra at være domineret af alger, til at være domineret af undervandsplanter. Metabolismemetoden vil derfor igen blive taget i brug, for at beregne hvor stor en effekt restaureringen reelt har haft på brutto-primærproduktionen.

Fremtidens vandmiljøovervågning

På grund af den relativt tekniske og avancerede metode, der skal anvendes for at estimere metaboliske rater ud fra dagsvariationer i iltkoncentrationen, har beregningerne hidtil været forbeholdt specialiserede forskningsmiljøer. Men med den nye implementering af metodikken i et webbaseret værktøj (WaterWebTools), kan metoden nu anvendes bredt for målebøjer eller økosystemmodeller. WaterWebTools-webplatformen er designet til løbende at processere sensordata i realtid og bruge disse data i en række forskellige modeller samtidig med, at output gøres let forståelig og nemt tilgængelig. Det er selvsamme platform, som anvendes til den digitale tvilling af Ormstrup Sø. Det betyder, at når for eksempel en ny



Figuren viser temperatur og iltkoncentrationer fra den digitale tvilling af Ormstrup Sø samt brutto-primærproduktion (BPP) og respirationen (R) udledt via metabolismemetoden for perioden 15. marts til 15. juli 2020. De fuldt optrukne hvide linjer på de to nederste diagrammer repræsenterer hele søens samlede areal-vægtede brutto-primærproduktion og respiration.

målebøje med iltensorer kobles til platformen, vil udregningerne kunne aktiveres og udføres automatisk, uden behov for detaljeret og teknisk modelleringsindsigt. Der er således et stort potentiale for, at metabolisme kan blive en integreret del af vandmiljøovervågningen nationalt som internationalt.

Metabolismeberegningerne kan ikke erstatte den eksisterende, standardiserede overvågning, der indeholder en længere række forskellige kvalitetselementer. Men metabolismeberegningerne kan give en væsentlig mere detaljeret indsigt i systemernes tilstand i realtid og ikke mindst også give grundlag for langtidsovervågning ud fra relativt simple og stabile målinger. ■

Videre læsning

Om metoden til bestemmelse af metabolisme: Staehr, P.A., Christensen, J.P., Batt, R.D., Read, J.S. 2012. Ecosystem metabolism in a stratified lake. *Limnology and Oceanography*, 57(5): 1317-1330. doi:10.4319/lo.2012.57.5.1317.

Om sammenhænge mellem metabolisme og vandkvalitet: Solomon, C.T., et al (2013). Ecosystem respiration: Drivers of daily variability and background respiration in lakes around the globe. *Limnology and Oceanography*, 58(3), 849-866. doi.org/10.4319/lo.2013.58.3.0849.

Bernhardt, E.S. et al (2018). The metabolic regimes of flowing waters. *Limnology and Oceanography*, 63(S1), S99-S118, doi.org/10.1002/lno.10726.

Caffrey, J.M. 2004. Factors controlling net ecosystem metabolism in U.S. estuaries. *Estuaries*, 27(1), 90-101. doi.org/10.1007/BF02803563.

Om den digitale tvilling: Trolle, D., Andersen, T.K., Nielsen, A., Bolding, K., Schnedler-Meyer, N.A. 2022. Søens digitale tvilling – et virtuelt laboratorium. *Aktuel Naturvidenskab*, nr. 4, 2022, s 20-23. aktuelnaturvidenskab.dk/fileadmin/Aktuel_Naturvidenskab/nr-4/AN4-2022-digital-soe.pdf