

# SØENS DIGITALE TVILLING

## – et virtuelt laboratorium

Computer-modeller af økosystemer kan betragtes som virtuelle fuldskala laboratorier, og kan anvendes til at simulere eksperimenter, som ikke altid er praktisk mulige at gennemføre i den virkelige verden.

### Om forfatterne



Dennis Trolle er professor, [trolle@ecos.au.dk](mailto:trolle@ecos.au.dk)



Tobias K. Andersen er postdoc, [tka@ecos.au.dk](mailto:tka@ecos.au.dk)



Anders Nielsen er seniorforsker, [an@ecos.au.dk](mailto:an@ecos.au.dk)



Karsten Bolding er seniorforsker, [bolding@ecos.au.dk](mailto:bolding@ecos.au.dk)

Alle ved Sektion for Søøkologi, Inst. for Ecoscience, Aarhus Universitet



Nicolas Azaña Schnedler-Meyer er postdoc ved DTU Aqua, Institut for Akvatiske Ressourcer

Målebøje i Ormstrup Sø. Foto: Kåre Nielsen fra INcaseOF

Computer-modeller kan anvendes til at beskrive fysiske, kemiske og biologiske processer og bruges i stor stil i både forskning og forvaltning af akvatiske økosystemer. Computer-modellerne består af en række matematiske beskrivelser af virkelige processer, som tilsammen forsøger at beskrive, hvordan energi og stof flyttes rundt i et økosystem. Modellerne består af en række matematiske beskrivelser af virkelige processer, som tilsammen forsøger at beskrive, hvordan energi og stof flyttes rundt i et økosystem. Modellerne består af en række matematiske beskrivelser af virkelige processer, som tilsammen forsøger at beskrive, hvordan energi og stof flyttes rundt i et økosystem. Modellerne består af en række matematiske beskrivelser af virkelige processer, som tilsammen forsøger at beskrive, hvordan energi og stof flyttes rundt i et økosystem.

re mængder data, lige fra information omkring temperaturlagdeling til bevægelsesmønstre for fisk, og derfor udgør modeller også et naturligt samlingspunkt for forskellige fagfelter indenfor forskningen.

Hvis modellerne på tilfredsstillende vis kan beskrive dynamikkerne i det individuelle system, kan de anvendes til at gennemføre en lang række virtuelle eksperimenter. Eksperimenterne kan give bedre forståelse for søens processer eller hjælpe med at identificere områder, hvor denne forståelse mangler. De kan også anvendes til at forstå, hvordan et økosystem potentielt vil reagere på påvirkninger som øget forurening og klimaforandringer. Dette er særdeles belejligt, da nogle eksperimenter på grund af størrelse eller økonomi simpelthen ikke lader sig gøre at teste i fuld skala i den virkelige verden. Et godt eksempel

er eksperimenter, som undersøger effekter af klimaforandringer på søer. Et fuldskala-forsøg, hvor en hel sø skulle opvarmes og følges over en længere årrække er ikke praktisk eller økonomisk muligt. Men en model-simulering, hvor blandt andet input af lufttemperatur ændres, kan nemt gennemføres og analyseres for årtier eller århundreder bag computeren.

### Fokus på de kortvarige processer

I Danmark er der en lang og stærk tradition for udvikling og brug af økosystem-modeller, som kan testes og videreudvikles på baggrund af det omfattende data, der indsamles via det nationale overvågningsprogram NOVANA. I dag repræsenterer WET-modellen (Water Ecosystems Tool), der er udviklet ved Aarhus Universitet, state-of-the-art indenfor området.



Overvågningsprogrammer som NOVANA indsamler imidlertid typisk kun data en eller to gange om måneden. Det kan være en udfordring, da der er en stigende erkendelse af, at højfrekvente processer – det vil sige processer, som kan udspille sig over få dage, timer eller sågar minutter og sekunder (for eksempel kortvarige lagdelinger af vandsøjlen) og som også kan forekomme ofte – kan have stor betydning for den overordnede dynamik og stofbalance over længere tid. Derfor er forskere i stigende grad interesseret i at kunne kvantificere de fysiske, kemiske og biologiske processer i høj tidlig opløsning. Her får forskerne hjælp af sensor-teknologi, som automatisk kan måle for eksempel vandets temperatur og ilt hvert 15. minut, samt økologiske modeller med en tidlig opløsning på en time eller mindre. Disse nye muligheder anvender forskerne nu i stigende grad til at opnå en bedre forståelse for betydningen af forskellige højfrekvente processer.

### Model skal simulere Ormstrup Sø

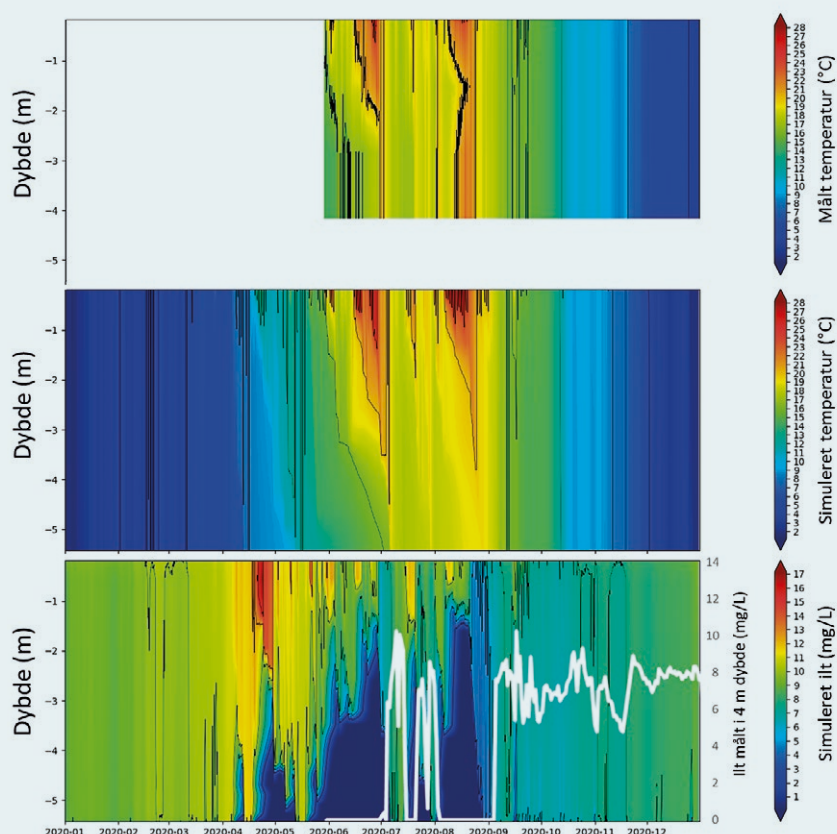
Et aktuelt eksempel på dette er et projekt finansieret af Poul Due Jensen Fonden, der fokuserer på den danske Ormstrup Sø. Projektet skal skabe en bedre forståelse for mekanismerne, der er i spil i forbindelse med sørestaurering. Håbet er, det vil gøre os i stand til at vælge og optimere de mest optimale sørestaurerings-tiltag, således indsatsen resulterer i en klarvandet sø med høj biodiversitet, hvor den klarvandede tilstand bevares i så lang tid som muligt.

I projektet er der udlagt en målebøje på søens dybeste sted, som måler temperaturprofiler hvert 15. minut samt iltkoncentrationen i top og bund (4 meters dybde). Desuden indsamles og analyseres der vandprøver ugentligt for kemiske og biologiske vandkvalitets-elementer, herunder næringssalt- og klorofyl-koncentrationer. Søen, som i dag er særdeles uklar med høj koncentration af alger, restaureres i projektet ved flere omgange af bio-manipulation, hvor der fjernes fred-fisk fra søen, og efterfølgende ved

## Metoder til at eksperimentere med økosystemer

Computermodeller udgør en af flere forskellige metoder til at undersøge effekter af for eksempel klimaforandringer på søer. Eksempler på andre metoder er såkaldte "space-for-time" studier, hvor søer på tværs af en klimagradiant sammenlignes; mesocosm-eksperimenter, hvor mindre forsøgstanke forsøger at gengive forholdene i en sø; paleolimnologi, hvor bundsedimentets sammensætning undersøges og aldersbestemmes; og lange tidsserier af observationsdata. Alle disse metoder har, ligesom computer-modellerne, fordele, ulemper og begrænsninger. Men tilsammen kan de give en god indikation af fremtiden for søernes økosystemer.

### Temperatur- og iltprofiler

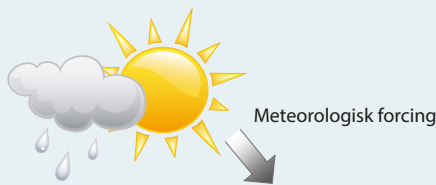


Figurerne viser øverst de observerede temperaturprofiler fra søens målebøje (bemærk, at målebøjen blev udlagt i maj måned 2020 og med dybeste sensor i 4 meter, hvorfor der ikke er observationsdata før maj eller under 4 meters dybde).

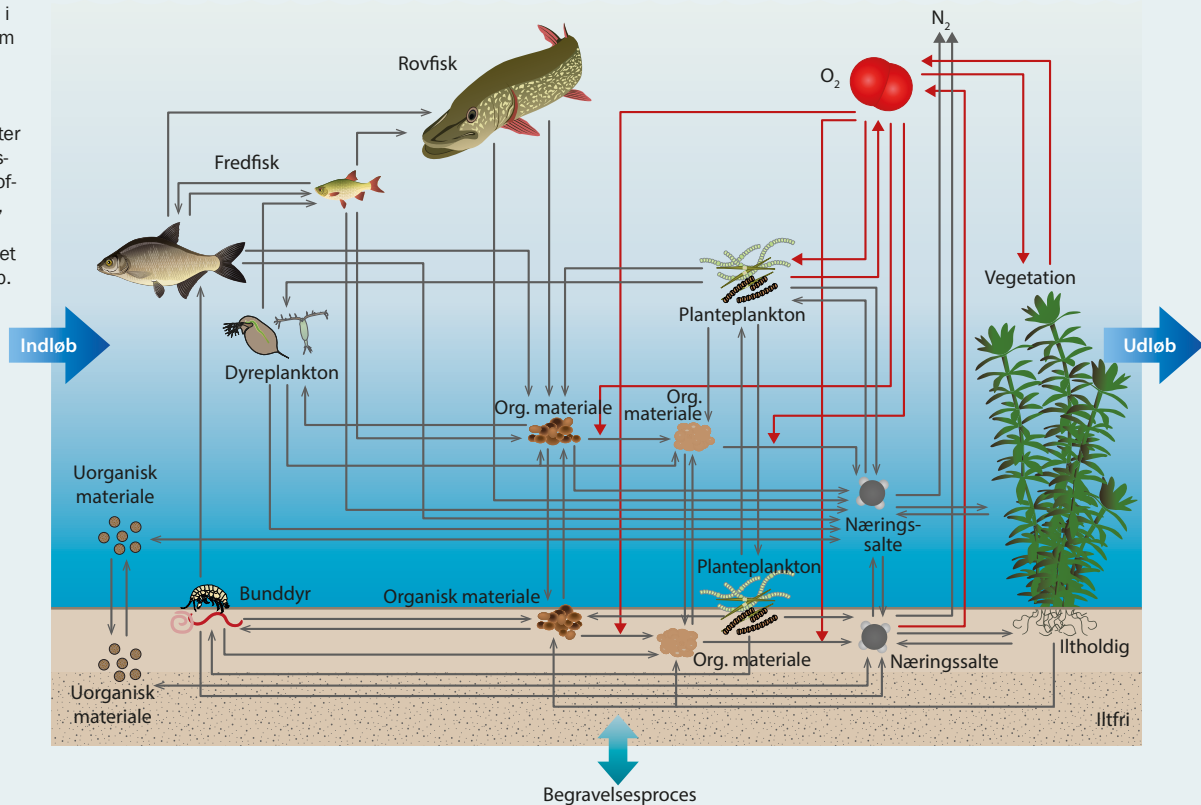
I midten vises de modelsimulerede temperaturprofiler, og nederst vises den modelsimulerede iltkoncentration (for hele vandsøjlen) og den observerede iltkoncentration i 4 meters dybde repræsenteret af hvid linje. Når den model-simulerede ilt-dynamik sammenlignes med den observerede iltkoncentration ved bunden ses det, at tidspunkterne, hvor der sker lagdeling (hvor iltkoncentrationen falder i bundvandet) og efterfølgende opblanding (hvor iltkoncentrationen hurtigt stiger i bundvandet), simuleres med stor nøjagtighed af modellen.

oppumpning af fosforholdigt bund-sediment. Målet med den økologiske model er at træne modellen mod det omfattende data og videreudvikle på modellens procesbeskrivelser, så-

des den i højere grad kan simulere de observerede dynamikker. I sidste ende er målet at anvende modellen til at simulere holdbarheden af restaureringen – det vil sige, hvor



Eksempel på en konceptuel model i WET. Pilene mellem de forskellige tilstandsvariable repræsenterer processer, der flytter masse (i henholdsvis fosfor-, kvælstof- og tørstofenheder, sorte pile) eller ilt (røde pile) rundt i et økologisk kredsløb.



## WET-modellen

I Danmark er der en lang og stærk tradition for udvikling og brug af økosystem-modeller. Lige fra Glumsø-modellen udviklet af Sven Erik Jørgensen ved Danmarks Farmaceutiske Højskole i 1970'erne, som indeholdt tre trofiske niveauer (alger, dyreplankton og fisk), til WET-modellen (WET = Water Ecosystems Tool) udviklet af Aarhus Universitet, som i dag repræsenterer state-of-the-art og kan tilpasses søer i hele verden.

WET-modellen er særdeles fleksibel i forhold til, hvilke trofiske niveauer der ønskes simuleret og kan dermed tilpasses et givent økosystem i både indland og udland. Dette kan gøres ved at ændre sammensætningen af organismegrupper i fødenettet i den konceptuelle computermodel, hvor der kan tændes eller slukkes for de forskellige typer af organismer, og samtidig kan der også inkluderes en eller flere organismer fra samme gruppe – eksempelvis for at repræsentere flere forskel-

lige arter af fisk. Ligesom i projektet i Ormstrup Sø kan modellen tilpasses yderligere til den enkelte sø eller fjord ved at træne modellen imod lokale observationsdata. I praksis gøres dette ved at ændre på parameter-værdier i modellen, typisk ved brug af maskinlærings-algoritmer, således modellens output i højere grad kommer til at stemme overens med observationer.

WET-modellen kan kobles til forskellige fysiske modeller. Det inkluderer den én-dimensionelle General Ocean Turbulence Model (GOTM), som er særdeles god til at simulere lagdeling, eller den tre-dimensionelle model General Estuarine Transport Model (GETM), som eksempelvis er egnet til at repræsentere dynamikken i større søer og fjorde. WET-modellen anvendes i dag over hele verden lige fra søer og fjorde i tempererede Danmark til søer og drikkevandsreservoirer i det tropiske Ghana.

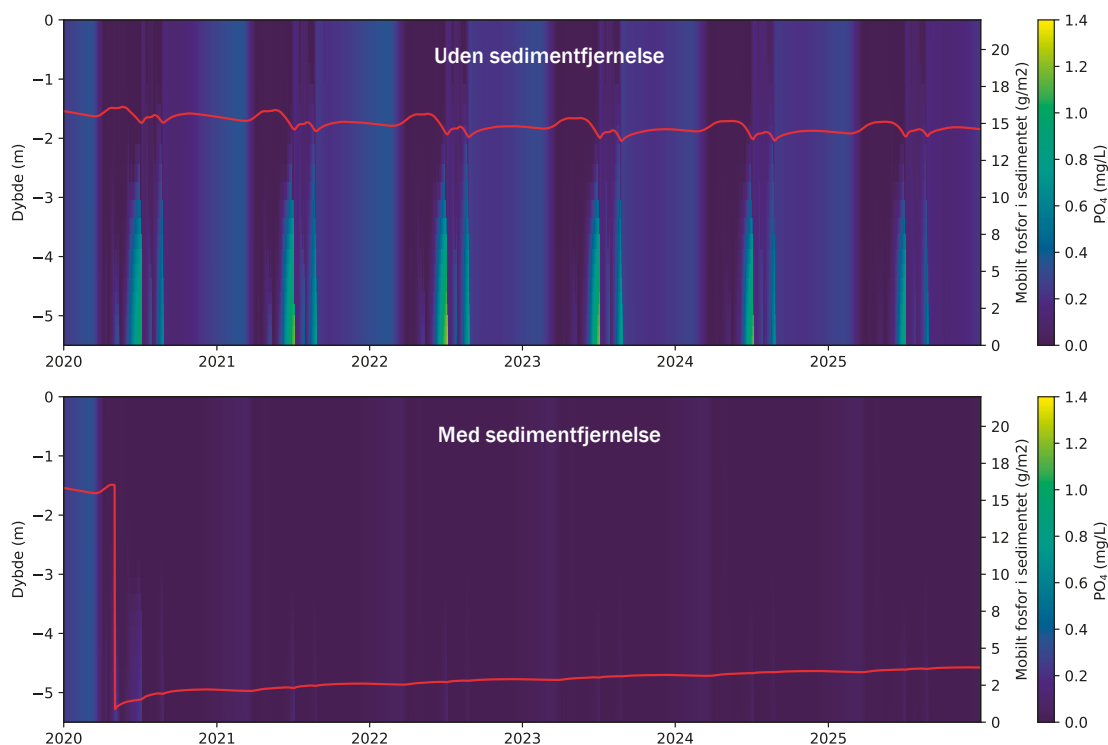
lang tid restaureringen må forventes at "holde" søen i en klarvandet tilstand, og om der eventuelt senere må forventes at blive behov for en opfølgende indsats for at bevare søen i den ønskede tilstand.

Projektet i Ormstrup sø er første gang i Danmark, at en sømodel holdes op i mod et datasæt med høj

tidslig opløsning. I projektet anvender vi WET-modellen, som er koblet med en model, der fysisk simulerer lagdeling i vandsøjlen (General Ocean Turbulence Model, GOTM). Den koblede model trænes via de observerede højfrekvente temperaturprofiler og iltkoncentrationer samt data fra det detaljerede kemiske og biologiske måleprogram.

## Simulering og målinger stemmer godt overens

Både måledata og modelsimuleringen viser, at Ormstrup Sø gennemgår flere midlertidige lagdelinger henover foråret og sommeren. Varigheden af lagdelingsperioderne varierer fra nogle få dage til over en måned. Effekten af lagdelingen er særdeles tydelig på iltkoncen-



Virtuelt modeleksperiment, hvor en situation uden (øverst) og med (nederst) sedimentfjernelse sammenlignes. I model-eksperimentet (nederst) er der fjernet 95% af den mobile pulje af fosfor i de øverste 20 cm af søens bund på én gang i maj måned 2020, hvilket giver en tydeligt effekt på frigivelsen af fosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) til vandsøjlen. I modelsimuleringen uden sedimentfjernelse kan det ses, hvordan fosforpuljen i sedimentet (rød kurve) varierer i løbet af året, hvor puljen i nogle perioder stiger og i andre perioder falder, da den mobile fosforpulje frigives delvist til vandsøjlen.

trationen, som typisk falder hurtigt og i løbet af få dage under en lagdelingsperiode, hvilket resulterer i, at søen bliver helt iltfri i bundlagene flere gange om året. Når måledata sammenlignes med modelsimuleringen, fremgår det, at modellen i høj grad er i stand til at simulere de ellers meget dynamiske lagdelingsperioder og også hastigheden, hvor med ilt forsvinder fra bundlagene, når lagdeling indtræffer. Modellen, som simulerer alle dybdelag i søen, giver desuden en indikation af, hvor tæt på overfladen de iltfrie lag kommer. På den måde kan modellen udfylde et datahul, da observationer fra iltssensorer kun findes i overfladen samt i 4 meters dybde. Iltsvind ved bunden betyder typisk, at jern-bundet fosfor frigives fra bundsedimentet og siver op i vandsøjlen, hvorefter det bliver tilgængeligt for alger i overfladen, når søen igen opblandes efter en lagdelingsperiode. Samtidig viser data fra fiskenes bevægelse, at de som forventet søger mod overfladen, når ilten forsvinder fra bunden. Dette bevægelsesmønster simulerer modellen også.

En stor del af årsagen til, at Ormstrup Sø er næringsrig og uklar, findes på søens bund. En meget stor pulje af næringsstoffer i form af både fosfor og kvælstof ligger i søbunden efter års deposition, som delvist frigives til vandet særligt i sommermånederne. I næste fase af projektet vil en stor mængde sediment blive fjernet fra søen med det formål at reducere søens næringsindhold og dermed gøre den mere klarvand. Samtidig vil vi træne modellen for Ormstrup Sø yderligere på baggrund af data, der løbende indsamles i projektet. Vi har lavet indledningsvise virtuelle eksperimenter med sedimentfjernelse for at undersøge, hvor store mængder der nødvendigvis skal fjernes fra søens bund for at opnå en god tilstand i søen.

Disse virtuelle eksperimenter viser, at sedimentfjernelse har stor og længerevarende effekt på fosforfrigivelsen fra søens bund, som udgør en meget væsentlig del af den samlede næringsstoftilførselse til søen.

### Et værktøj til fremtiden

Modelværktøjet, som udgør det virtuelle laboratorium for Ormstrup sø, trænes løbende til data, der indsamles i projektet, men de foreløbige resultater viser, at modellen i høj grad allerede er i stand til at simulere to vigtige elementer i høj tidlig opløsning, nemlig lagdeling og ilt dynamik. Det er en central forudsætning for, at vi også kan simulere næringsstofdynamikker samt fiskenes bevægelser, for eksempel som følge af iltsvind. Modellen indikerer også, at der kan forventes en væsentlig effekt af den planlagte fjernelse af sediment fra Ormstrup Sø, forudsat at der herved fjernes en meget stor del af den eksisterende næringsstoftilførselse på bunden.

Selve WET-modellen, som videreudvikles i projektet, er open source og kan allerede nu frit downloades og anvendes. Forskerne bag projektet vil løbende opdatere modellen, og interesserede kan følge med i modeludviklingen på informations-siden [www.wet.au.dk](http://www.wet.au.dk).

### Videre læsning

Om NOVANA:  
[novana.au.dk](http://novana.au.dk)

Om Glumsø-modellen:  
Jørgensen SE (1976) *A eutrophication model for a lake*. *Ecol Model* 2:147 - 165.

Om WET-modellen:  
Hu F, Bolding K, Bruggeman J, Jeppesen E, Flindt MR, van Gerven L, Janse JH, Janssen ABG, Kuiper JJ, Mooij WM, Trolle D (2016) *FABM-PLake - linking aquatic ecology with hydrodynamics*. *Geosci. Model Dev.* 9:2271-2278.

Schnedler-Meyer, N.A, Andersen, T.K., Hu, F.R.S, Bolding, K., Nielsen, A, Trolle, D. (2022). *Water Ecosystems Tool (WET) 1.0 - a new generation of flexible aquatic ecosystem model*. *Geosci. Model Dev.* 15:3861-3878.