# Procesbaserede sømodeller til mere målrettet forvaltning

Procesbaserede sømodeller kan være et centralt værktøj til at målrette forvaltningen af danske søer og øge sikkerheden i vurdering af indsatsbehovet. Men hvordan bruges de i praksis, og hvor gode er de til at beskrive miljøtilstanden sammenlignet med de klassiske empiriske modeller, som ofte anvendes?

Tobias K. Andersen, Anders Nielsen, Martin Søndergaard & Dennis Trolle

Søer og vandhuller er involveret i mange vigtige processer i landskabet, og de har en central rolle i den grønne omstilling af vores samfund. Søernes økologiske tilstand er især vigtig. For sammenlignet med næringsforurenede, uklare søer bidrager klarvandede søer i højere grad til bevaring af biodiversitet, øget næringsstoftilbageholdelse, højere rekreative værdier og mindre udledning af drivhusgasser. For at kunne vurdere søernes økologiske tilstand og beregne hvilket indsatsbehov, der eventuelt er nødvendig for at opnå en klarvandet sø med god økologisk tilstand, anvendes i dag simple empiriske sammenhænge mellem næringsstofindhold og forskellige indikatorer, der repræsenterer den økologiske tilstand. Disse empiriske sammenhænge etableres typisk for grupper af søer og kan anvendes til at vurdere de generelle sammenhænge. Empiriske modeller har den fordel, at kravet til inputdata er begrænset. Derved kan denne modeltype anvendes bredt for danske søer, men modeltypen har også en række begrænsninger. For eksempel tages der ikke højde for de naturlige forskelle, der er imellem alle søer, eksempelvis i morfologi eller belastningshistorik. Dermed vil der være en vis usikkerhed på bestemmelsen af målbelastningen, og nogle danske søer vil falde væsentligt uden for den generelle empiriske models sammenhæng mellem næringsstofbelastning og miljøtilstand. Samtidigt giver de empiriske modeller ikke muligheder for at vurdere årsagssammenhænge og mekanismerne bag søernes tilstand.

De procesbaserede sømodeller tager højde for mange af de velkendte begrænsninger, som empiriske modeller har. Disse modeller baserer sig på et komplekst ligningsapparat, der beskriver processer og årsagssammenhænge, hvor væsentlige elementer af et økosystem i en sø er beskrevet. I udgangspunktet skal der således opstilles en model for hver enkelt sø, men så er det også muligt at estimere en fremtidig tilstand ved eksempelvis reduceret næringsstoftilførsel, et varmere klima eller ved fjernelse af fisk. Anvendelsen af procesbaserede sømodeller kræver imidlertid en større viden og mere data om hver enkelt sø.

Et paradigmeskifte i forvaltningen af søer, hvor der også inddrages procesbaserede modeller, kræver derfor prioritering af en større ressource til modelopsætning per sø end de empiriske modeller, men gevinsten er, at der kan opnås større sikkerhed på de estimerede indsatsbehov. Dette vil bidrage til at optimere indsatsbehovet og dermed i sidste ende også det økonomiske behov. Valget af modeltype for danske søer behøver ikke være enten-eller. En kombination af både empiriske og procesbaserede modeller, som det kendes fra forvaltningen af de danske fjorde og de indre danske farvande, kan anvendes for individuelle områder og søer for at målrette miljøreguleringen /1/.

## Procesbaserede sømodeller og forudsigelse af miljøtilstanden i en sø

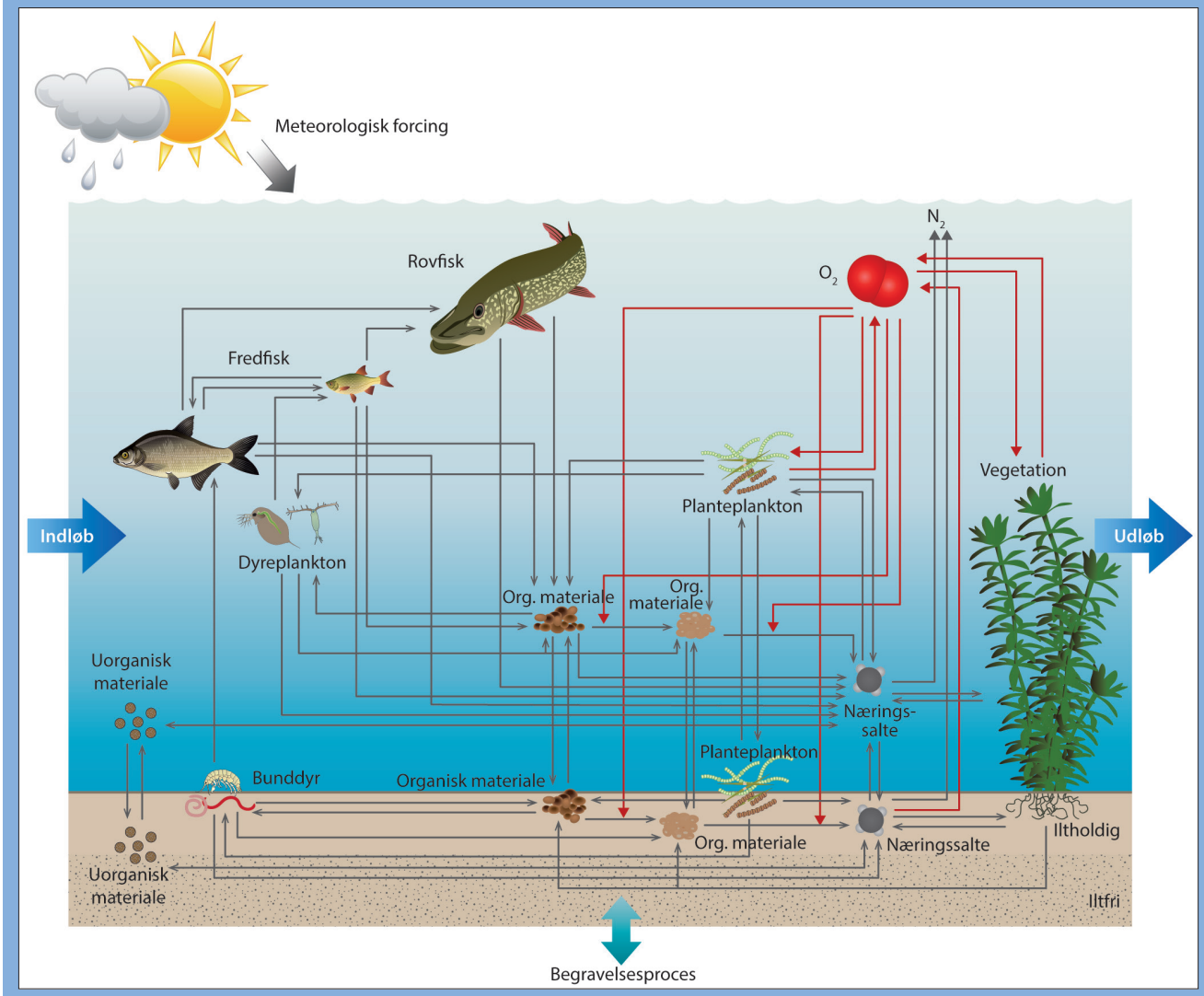
Flere studier med procesbaserede sømodeller har vist, at der kan opnås meget retvisende beskrivelser af søers tilstande (f.eks. /3/ og /4/), hvilket vil sige, at der er god overensstemmelse mellem modellernes simuleringer og søernes observationsdata. Opsætningen af dynamiske, procesbaserede modeller er imidlertid ressourcekrævende, og som nævnt er kravet til data væsentligt større sammenlignet med empiriske modeller. På trods af at overvågningsprogrammerne af danske søer har tilvejebragt et unikt datagrundlag, og dermed muliggør en langt større brug af procesbaserede modeller, eksisterer der kun et fåtal af modelopsætninger for danske søer.

I forsknings- og udviklingsprojekt "Dynamiske, procesbaserede modeller som forvaltningsværktøj for danske søer", finansieret af Miljøstyrelsen, er der udviklet værktøjer, som standardiserer og delvis automatiserer arbejdsgangene i forhold til opsætning af søspecifikke procesbaserede modeller /5/. Det muliggør en mere omkostningseffektiv opsætning og tilpasning af den endimensionelle GOTM-FABM-PCLake model (nu navngivet GOTM-WET) til danske søer. I projektet blev modellen testet for fem forskellige danske søer (Ravnsø, Bryrup Langsø, Søholm Sø, Arreskov Sø og Hinge Sø).

For at kunne eksekvere en procesbaseret sømodel, kræves som minimum et dybdekort af den enkelte sø, samt tidserier for en række meteorologiske variable (overflade forcering) og indløbs- og udløbs-data (grænsebetingelser). For at tilpasse sømodellen til en specifik sø kræves herudover en række tilstandsvariable fra en eller flere stationer i en sø (eksempelvis tidsserier af temperatur, samt ilt-, næringssalt-, planteplankton- og dyreplanktonkoncentrationer. Meteorologiske data eksisterer for alle sølokaliteter i Danmark, og detaljerede vand- og næringssaltbalancer opgøres løbende for intensivt overvå-

**Faktaboks: Konceptet bag modellen Water Ecosystems Tool**

Water Ecosystems Tool (WET) simulerer i udgangspunkt iltdynamik, organiske og uorganiske former for kvælstof, fosfor og silicium, forskellige grupper af alger, dyreplankton, bunddyr og fisk (både fredfisk og rovfisk) samt undervandsvegetation (se Figur 1 for en konceptuel figur af modellen). Ved kobling af WET til hydrodynamiske modeller som f.eks. vandsøjle-modellen GOTM, er det muligt at inkludere fysiske processer, der har indflydelse på disse tilstande igennem opblanding samt lys- og varmefordelingen i vandet. Koblingen muliggør også simulering af aktiv bevægelse hos organismer, f.eks. opdriften af cyanobakterier eller evnen til at undgå lav iltkoncentration for fisk, som kan bevæge sig op og ned gennem vandsøjlen. WET tillader ydermere en meget fleksibel modelopsætning. Der kan eksempelvis inkluderes flere eller færre typer af alger, dyreplankton, undervandsvegetation og fisk, og modellen kan således tilpasses den enkelte sø og det enkelte formål med modelanalysen. Modellen er open source, hvilket betyder, at den er frit tilgængelig for alle, samtidig med at den løbende forbedres med nye erkendelser indenfor forskningen (se /2/ for mere information).




*Figur 1: Den konceptuelle model af WET. Pilene mellem de forskellige tilstandsvariable repræsenterer processer, der flytter masse (i hhv. fosfor-, kvælstof- og tørstofenheder, sorte pile) eller ilt (røde pile) rundt i et økologisk kredsløb. Gentegnet og oversat fra /4/.*

gede søer, hvilket betyder, at det for en lang række danske søer er muligt at opstille procesbaserede modeller.

I projektet blev sømodellerne tilpasset de specifikke søer gennem automatisk kalibrering, hvor målet var at opnå bedst mulig overensstemmelse mellem model output og observationer fra søerne. Et omfangsrigt og unikt datasæt fra overvågnings-programmerne muliggjorde sammenligning med ti års tidsserier for vandtemperatur, opløst ilt, fosfat, nitrat, total fosfor og kvælstof samt klorofyl a koncentrationer. Sammenligningen mellem modelsimulering og observationer blev delt op i en kalibreringsperiode, hvor data anvendtes til parameterisering af modellen, og en valideringsperiode, hvor modellen blev testet på en delmængde af data, som ikke var anvendt i kalibreringen. For den lavvandede Hinge Sø, reproducerede modellen overordnet sæsonvariationer i total fosfor og klorofyl a koncentrationer (Figur 2).

Når de dynamiske, procesbaserede modeller sammenlignes med både danske og internationale eksempler fra forskningsartikler, er resultaterne for de fem danske søer særdeles gode. Projektets resultater viste, at usikkerheden (i form af den absolutte procent bias) på tilstandsbeskrivelsen for henholdsvis totalfosfor og klorofyl a gennemsnitligt gik fra 40 % og 54 % baseret på de empiriske modeller, som pt. anvendes i vandområdeplanerne, til 15 % og 22 % baseret på de procesbaserede modeller. Dette er ikke overraskende, da de procesbaserede modeller er tilpasset de specifikke søer, hvorimod de empiriske modeller er baseret på data fra en lang række mere eller mindre forskellige søer. Det skal dog nævnes, at enkelte af de empiriske modeller i nogle

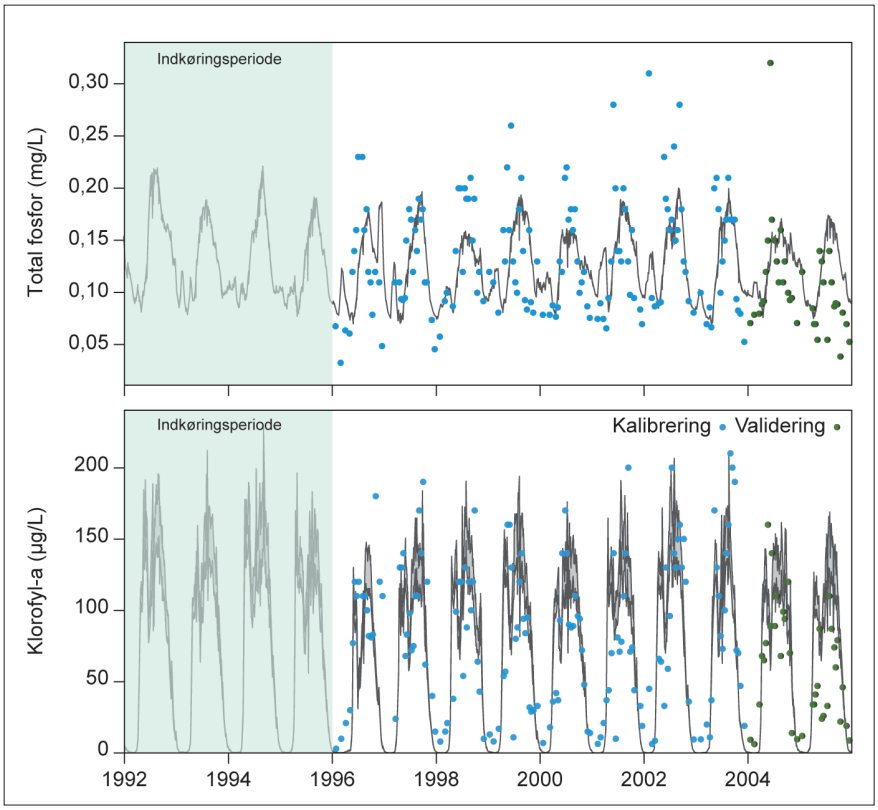
tilfælde også kan ramme middelværdien af observationer særdeles godt og endda lidt bedre end den procesbaserede model. Det var eksempelvis tilfældet med den empiriske Vollenweider-model for Ravnsø.

På baggrund af eksisterende data vil det for nuværende være muligt at opsætte og tilpasse specifikke sø-modeller for 30-40 danske søer. I takt med at modelopsætning af stadig flere søer øges, vil der gradvist opnås større indsigt i, hvorledes modellens parametre relaterer sig til f.eks. forskellige søtyper og deres karakteristika. Dermed kan modelparametre potentielt udbredes til andre søer - også søer med mindre datamængde til rådighed – så det i princippet vil være muligt, at alle eller i det mindste en meget stor andel af de målsatte søer på sigt kan have en procesbaseret model opsat (med forskellig grad af kompleksitet), som løbende kan optimeres og forbedres for at opnå et bedre forvaltningsmæssigt grundlag.

## Effekten af reduktionsbelastning og sø-restaurering

Når en procesbaseret sømodel er blevet tilpasset og valideret for en specifik sø, er det muligt at undersøge effekten af en række forskellige scenarier, såsom fremtidige næringsstof- eller klimapåvirkninger og mulige restaureringstiltag. For eksempel vil klimaforandringer med høj sandsynlighed øge danske søers vandtemperatur og forværre den økologiske tilstand, og det er muligt at estimere disse påvirkninger ved hjælp af procesbaserede sømodeller. En central komponent i sømodellerne er nemlig temperaturen, der har indflydelse på en lang række kemiske og biologiske processer, hvorfor procesbaserede – i modsætning til empiriske modeller – muliggør estimering af klimaforandringers potentielle indvirkning. Studier med procesbaserede sømodeller har bl.a. vist en øget forekomst af cyanobakterier i danske søer under et varmere klima eller ved hyppigere hedebølger /3/. Klimaforandringsscenarier kan også kombineres med scenarier, der repræsenterer restaureringstiltag, for dermed at simulere den nødvendige belastningsreduktion for at afbøde indvirkninger af at varmere klima /6/.

En procesbaseret model giver også direkte mulighed for at estimere eksempelvis den tidslige effekt af en reduceret ekstern næringsstoftilførsel, herunder intern belastning og tidspunktet for ligevægt mellem belastning og økosystemets tilstand. Muligheden for at konsekvensregne belastningsreduktioner med økosysteminteraktion via den procesbaserede model er illustreret i Figur 3. Her kan man tydeligt se, at størrelsen på et indgreb – i dette tilfælde en reduktion i næringsstoftilførslen – har stor indflydelse på, hvor langt tid der kan gå før man kan forvente at se den fulde effekt i en sø.



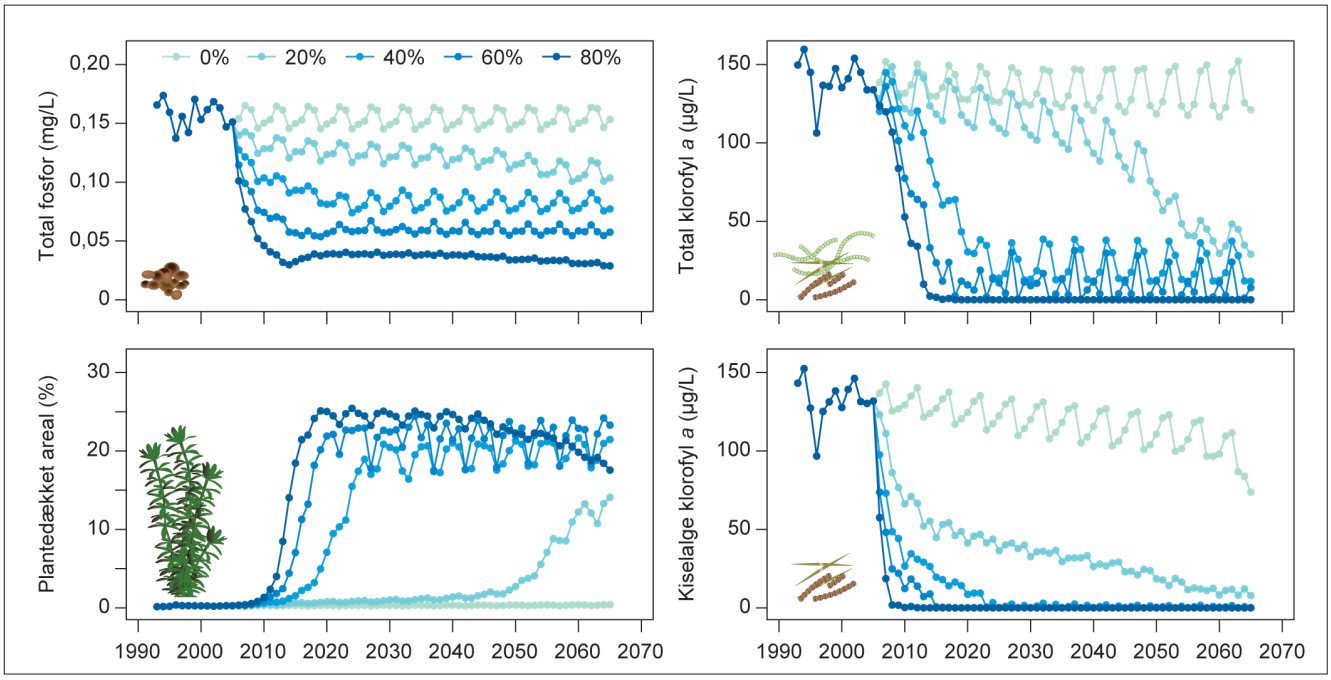

*Figur 2: Sammenligning af modelsimuleret total fosfor (øverst) og klorofyl a (nederst) koncentrationer med observationer for Hinge Sø for hele vandsøjlen. Grøn baggrund indikerer modellens indkøringssperiode, som bl.a. anvendes for at lade den simulerede næringssaltpulje i sedimentet indstille sig ift. den eksterne belastning før der kalibreres. Sort linje er modellens simulering. Gråt bånd mellem sorte linjer betyder, at der for et givet tidspunkt på x-aksen er vertikale koncentrationsgradienter i vandsøjlen. Punkterne er observationer delt i en kalibrering- (blå prik) og en valideringsperiode (grøn prik). Figurer er gentegnet fra /5/.*

For lavvandede søer kan den økologisk tilstand ved en given belastning afhænge af om søen tidligere har været klarvandet eller i en uklar tilstand (den såkaldte hysterese-effekt). For eksempel har undervandsvegetation en stabiliserende effekt på tilstanden på grund af feedbackmekanismer såsom mindsket resuspension af organisk materiale, herunder alger, optagelse af næringsstoffer og større tilbageholdelse i bundsedimentet, der hindrer algevækst. Vegetationen har også en positiv effekt på rovfisk, hvilket resulterer i øget græsning af alger gennem en trofiske kaskade. Disse feedbackmekanismer er indbygget i den procesbaserede sømodel, således tilstandsskift kan simuleres.

## Igangværende udvikling og fremtidige perspektiver

Den procesbaserede sømodel, WET, er under konstant udvikling med mange muligheder for at kunne håndtere lokale og globale udfordringer. I forhold til det danske vandplansarbejde, simulerer sømodellen også højere trofiske niveauer, der har direkte relevans i forhold til de biologiske kvalitetselementer, som anvendes i vandplanerne. Dog er modellens repræsentation af fisk (gram tørstof per liter) imidlertid ikke altid direkte sammenlignelig med måden, hvorpå fiskedata indsamles og kvantificeres i et overvågningsprogram, der typisk angiver et relativt udtryk via en "catch per unit effort", eller "fangstraten" på dansk, som ofte er fiskebiomasse og antal fanget per garn. Én tilgang, der bør undersøges, er derfor om der kan udvikles nye empiriske relationer mellem de biologiske kvalitetselementer og output fra de forskellige variable i den procesbaserede model. Dermed kan enten delkomponenter eller direkte økologiske kvalitetsindeks estimeres, som f.eks. demonstreret i /7/.

Interne restaureringstiltag, som fjernelse af fredfisk eller udplantning af undervandsplanter, er også muligt at simulere med modellen. Det gør det muligt at undersøge effekten og effektiviteten af forskellige restaureringstiltag for en given sø. For nuværende undersøges sømodellens kapacitet til at simulere biomanipulation i både dansk og tropisk klima, hvortil der også er videreudviklet på beskrivelsen af forskellige grupper af fisk. Der er også




*Figur 3: Modelsimuleringer med fem forskellige scenarier for reduktioner i ekstern fosforbelastning (20-80%) baseret på baseline perioden 2001-2005 (0%) for Hinge Sø, tilpasset efter /4/. Modellen for Hinge Sø inkluderede tre grupper af planteplankton (kiselalger, grønalger og cyanobakterier), hvor kiselalger var den dominerede algegruppe i baseline perioden.*

planer om udvikling af et "drivhusgas modul" til modellen, således effekter af restaurering på udledning af drivhusgasser også kan kvantificeres.

Der er også udviklet en grafisk brugerflade, softwaren QWET, til den procesbaseret sømodel, så potentielle brugere, der ellers måske mangler tilstrækkelig teknisk ekspertise, har mulighed for at anvende modellen gennem trinvis vejledning fra konfiguration og opsætning til modeludførelse. QWET anvendes i dag bl.a. til undervisning i miljøforvaltning i både ind- og udland, og i forskellige workshops med en global deltagerskare af forvaltere og forskere.

## Konklusion

Procesbaserede sømodeller kan skabe et forbedret fagligt grundlag for beslutninger om, hvordan søers tilstand kan forbedres gennem reduktion af ekstern næringsstoftilførsel eller restaurering. Dermed vil forvaltning af vores danske søer kunne blive langt mere målrettet og specifik. Vi har i Danmark en unik mulighed for i langt højere grad at anvende disse modeller, da vi har en model, der nu har bevist sig som én af de bedste modeller i verden, og vi har datagrundlaget til at anvende den.

## Referencer

/1/ Erichsen AC (Ed.), Timmermann K (Ed.), Christensen JPA, Kaas H, Markager S, Møhlenberg F (2017) Development of models and methods to support the Danish River Basin Management Plans. Scientific documentation. Aarhus University, Department of Bioscience and DHI, 191 sider.

/2/ Water Ecosystems Tool hjemmeside: www.wet.au.dk

/3/ Chen, W., Nielsen, A., Andersen, T.K., Hu, F., Chou, Q., Søndergaard, M., Jeppesen, E., Trolle, D., 2019. Modeling the Ecological Response of a Temporarily Summer-Stratified Lake to Extreme Heatwaves. Water 12, 94. https://doi.org/10.3390/w12010094

/4/ Andersen, T.K., Nielsen, A., Jeppesen, E., Hu, F., Bolding, K., Liu, Z., Søndergaard, M., Johansson, L.S., Trolle, D., 2020. Predicting ecosystem state changes in shallow lakes using an aquatic ecosystem model: Lake Hinge, Denmark, an example. Ecol. Appl. 30. https://doi.org/10.1002/eap.2160

/5/ Nielsen, A., Andersen, T.K., Søndergaard, M. & Trolle, D. 2020. Dynamiske, procesbaserede modeller som forvaltningsværktøj for danske søer. Forsknings- og udviklingsprojekt vedr. muligheden for anvendelse af dynamiske modeller i forvaltningen af søer i Vandområdeplaner. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 56 s. - Videnskabelig rapport nr. 402, http://dce2.au.dk/pub/SR402.pdf

/6/ Rolighed, J., Jeppesen, E., Søndergaard, M., Bjerring, R., Janse, J.H., Mooij, W.M., Trolle, D., 2016. Climate change will make recovery from eutrophication more difficult in shallow Danish Lake Søbygaard. Water (Switzerland) 8. https://doi.org/10.3390/w8100459

/7/ Søndergaard, M., Lauridsen, T.L., Kristensen, E.A, Baattrup-Pedersen, A., WibergLarsen, P., Bjerring, R. & Friberg, N. 2013. Biologiske indikatorer til vurdering af økologisk kvalitet i danske søer og vandløb. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 78 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 59. http://www.dmu.dk/Pub/SR59.pdf

Tobias Kuhlmann Andersen (tka@bios.au.dk) er biolog og PhD studerende ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience, og University of Chinese Academy of Sciences, Sino-Danish College

Anders Nielsen (an@bios.au.dk) er civilingeniør, PhD og seniorforsker ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience.

Martin Søndergaard (ms@bios.au.dk) er biolog, Dr. Lic Scient og seniorforsker ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience.

Dennis Trolle (trolle@bios.au.dk) er civilingeniør, PhD og professor ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience.