

Effekter af et 6 graders varmere klima på danske søers tilstand

Søernes økosystemer er følsomme overfor ændringer i klimaforhold, og forøget temperatur resulterer generelt i forringelse af tilstanden (eutrofiering). Med udgangspunkt i et opvarmningsscenario, hvor klimamodel-beregninger angiver at temperaturen stiger 6 °C i Danmark, har vi analyseret effekterne på økosystemerne i danske søer.

DENNIS TROLLE, ANDERS NIELSEN, JONAS ROLIGHED, HANS THODSEN, HANS E. ANDERSEN, IDA B. KARLSSON, JENS CHR. REFSGAARD, JØRGEN E. OLESEN, KARSTEN BOLDING, BRIAN KRONVANG, MARTIN SØNDERGAARD & ERIK JEPPESEN

Introduktion

Klimafremskrivninger for Danmark viser, at nedbøren i fremtiden vil stige i vintermånederne, hvilket sammen med øget vinter-temperatur kan resultere i et forøget tab af næringsstoffer fra landskabet til overfladevand /1/. Kombineret med et varmere klima kan dette resultere i øget dominans af giftproducerende blågrønner i søer og dårligere økologisk tilstand /2/. Hidtil har klimaeffektstudier fokuseret på moderate emissions-scenarier så som A1B (et middel emissions-scenario defineret af IPCC), der resulterer i en opvarmning på 2-3 °C ved år 2100 i forhold til nutidens klima. IPCC har imidlertid i den 5. Assessment Report illustreret, at de seneste års udvikling i drivhusgas-emissioner følger eller overstiger et fremtidsscenario (RCP8.5), der vil resultere i en global opvarmning mellem 2,6 og 4,8 °C for perioden 2081-2100 i forhold til 1986-2005. I det scenarie vil opvarmningen endvidere fortsætte og opnå en global temperaturstigning på omkring 6,5 °C i 2181-2200 (og ifølge nogle klimamodeller endnu højere temperaturer). I et tværdisci-

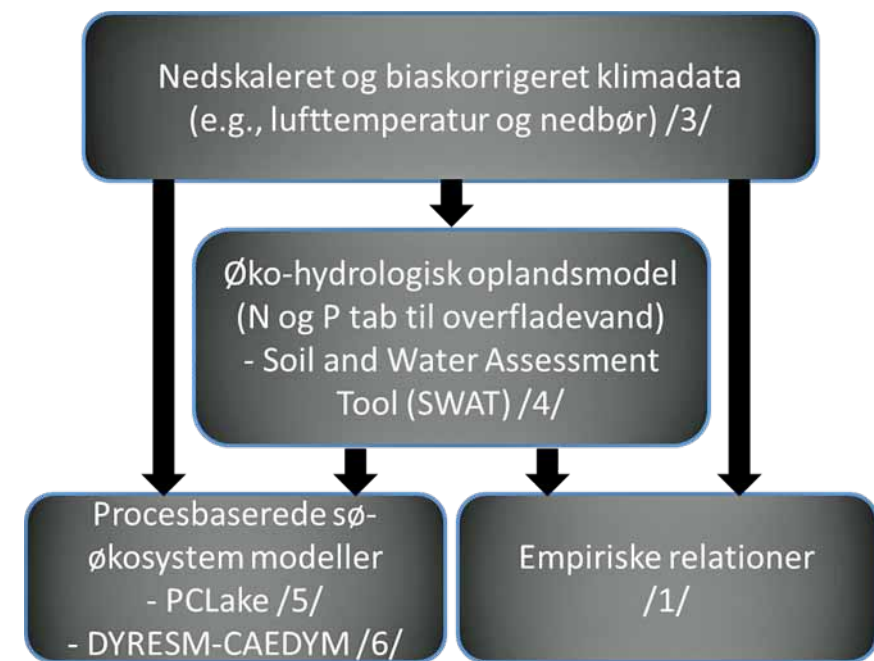


Fig. 1. Oversigt over modeller og dataflow, som er anvendt i analysen.

plinært samarbejde forankret i det danske klimaforskningscenter CRES (Center For Regional Change in the Earth System, www.cres-centre.dk), har vi analyseret de potentielle effekter af et 6 °C opvarmningsscenario på økosystemerne i danske søer.

Metoder

For at estimere effekterne af et radikalt anderledes klima på danske søer har vi anvendt en række forskellige modeltilgange. Det fremtidige klimascenario blev genereret af en

koblet global-regional klimamodel (ECEARTH-HIRHAM) drevet af Danmarks Meteorologiske Institut (DMI), hvor det fremtidige klima blev dannet ved at øge den atmosfæriske CO₂-koncentration med 1 % årligt indtil en global opvarmning på 6 °C i forhold til 1986-2005 blev opnået, hvorefter CO₂-koncentrationen blev holdt konstant. Årlige tidsserier af klimamodeldata kunne herefter udtrækkes og efter en biaskorrection anvendes som forcering (input) til sømodeller. Klimascenariet repræsenterer således ikke et specifikt tidspunkt i

fremtiden, men et klima, der er 6 °C varmere end i dag, og som potentielt kan realiseres i fremtiden (mere information omkring klimascenarier findes i /3/ i denne Vand og Jord temaudgave). Til at beskrive effekterne på søernes økosystemer har vi anvendt to forskellige modeltilgange: 1) procesbaserede økosystemmodeller, som er opsat og tilpasset fire forskellige danske søer (hhv. Ravn Sø, Engelsholm Sø, Arreskov Sø og Søbygaard Sø), samt 2) empiriske relationer/modeller mellem vandkvalitetsparametre (for eksempel biologiske indikatorer) og temperatur, hydraulisk opholdstid og næringsstofbelastning baseret på data opsamlet fra mere end 900 danske søer. Modellerne beskriver således på forskellig vis, hvorledes næringsstofniveauer og temperatur påvirker forskellige nøglekomponenter i et søøkosystem (eksempelvis algebiomasse, dyreplankton-biomasse, total kvælstof (N) og total fosfor (P) koncentrationer). Samtidig anvendes en procesbaseret oplandsmodel (Soil and Water Assessment Tool, en økohydrologisk, semi-distribueret model) der, baseret på de klimamodelberegne ændringer i klimaet (herunder lufttemperatur og nedbør), giver en overordnet indikation af, hvordan kvælstof- og fosfor-tabet til overfladevand vil kunne ændres i fremtiden. Dette anvendes til at generere scenarie-input for fremtidig næringsstofbelastning til hhv. de procesbaserede og empiriske sømodeller (fig. 1).

Ligesom de procesbaserede sømodeller og de empiriske relationer, baseres den øko-hydrologiske oplandsmodel også på den eksisterende modelopsætning fra Danmark som i dette tilfælde dækker hele Fyn.

For søerne undersøges den fremtidige kombinerede effekt af en temperaturstigning og en ændret næringsstofbelastning. Fælles for modellerne i analysen er, at de er tilpasset og evalueret i forhold til danske forhold (eksemplificeret i fig. 2).

Vandafstrømning og transport af næringsstoffer i et fremtidigt klima

Modelsimuleringer med oplandsmodellen med input af data for det projekterede fremtidige klima viser, at ændringer i års-tidsvariationen i lufttemperatur og nedbør giver tilsvarende store ændringer i vandafstrømning samt næringsstofftransport (baseret på et vandføringsvægtet middel af de model-simulerede vandløb på Fyn, fig. 3). Vandafstrømningen vil således stige mest i vintermånederne, med gennemsnitlig 89 % i januar måned, og falde i sensommeren og tidlige efterår. Næringsstofftransporten i vandløbene vil følge et lignende mønster med

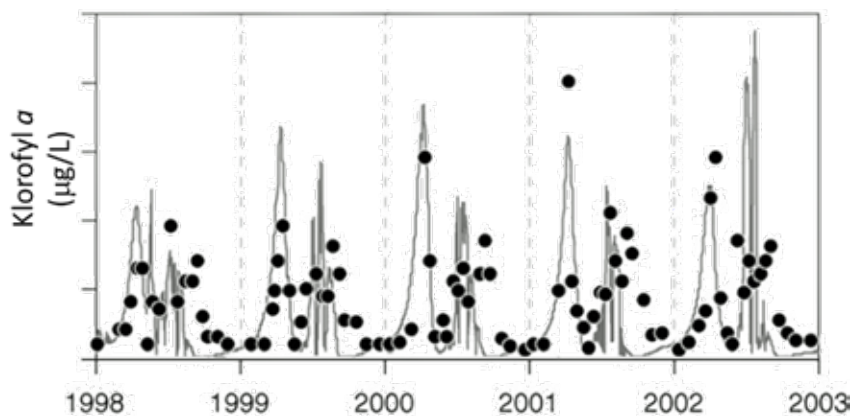


Fig. 2. Et eksempel på hvordan modellerne i analysen er blevet tilpasset danske forhold (eksempel fra /7/), hvor modelparametre er kalibreret med det formål at opnå bedre overensstemmelse mellem modeloutput og observationsdata fra Ravn Sø – i dette tilfælde en validering af total algebiomasse (repræsenteret ved klorofyl a simulering for Ravn Sø).

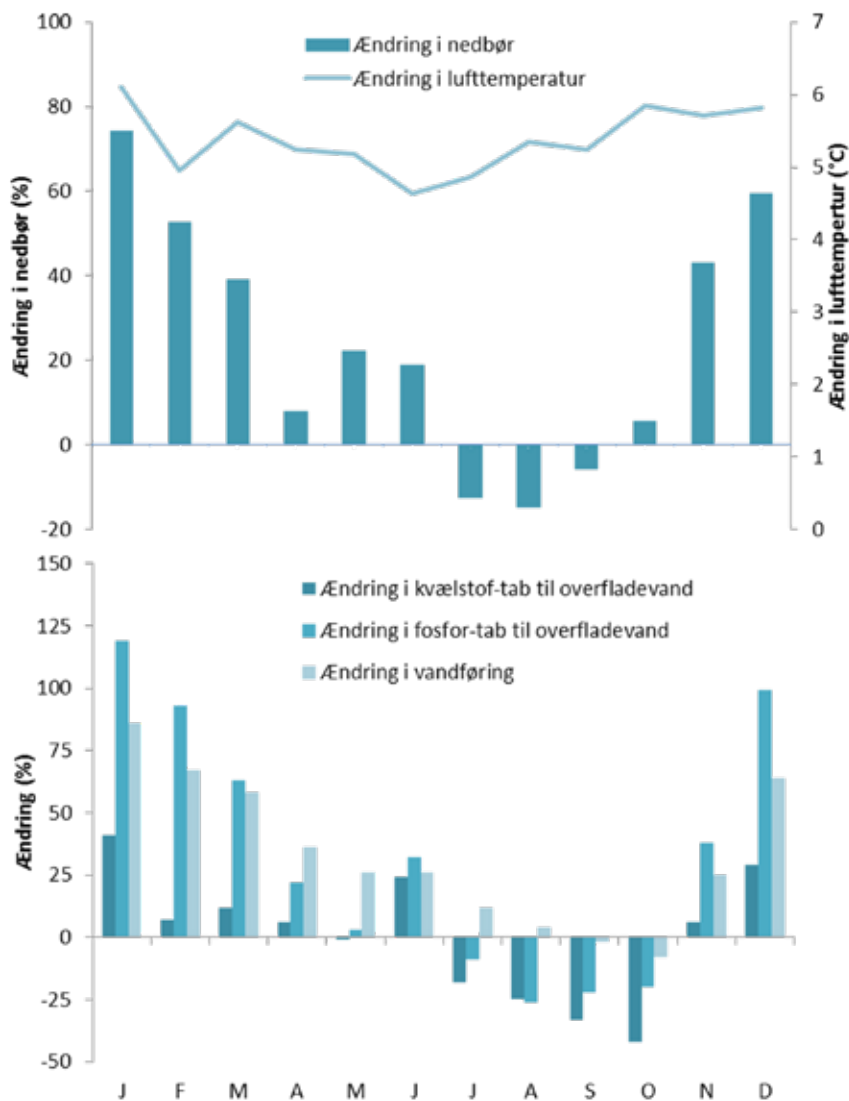


Fig. 3. Månedlige ændringer i lufttemperatur, nedbør, vandføring og oplandets tab af næringsstoffer ifølge klimamodelprojektion og oplandsmodellen.

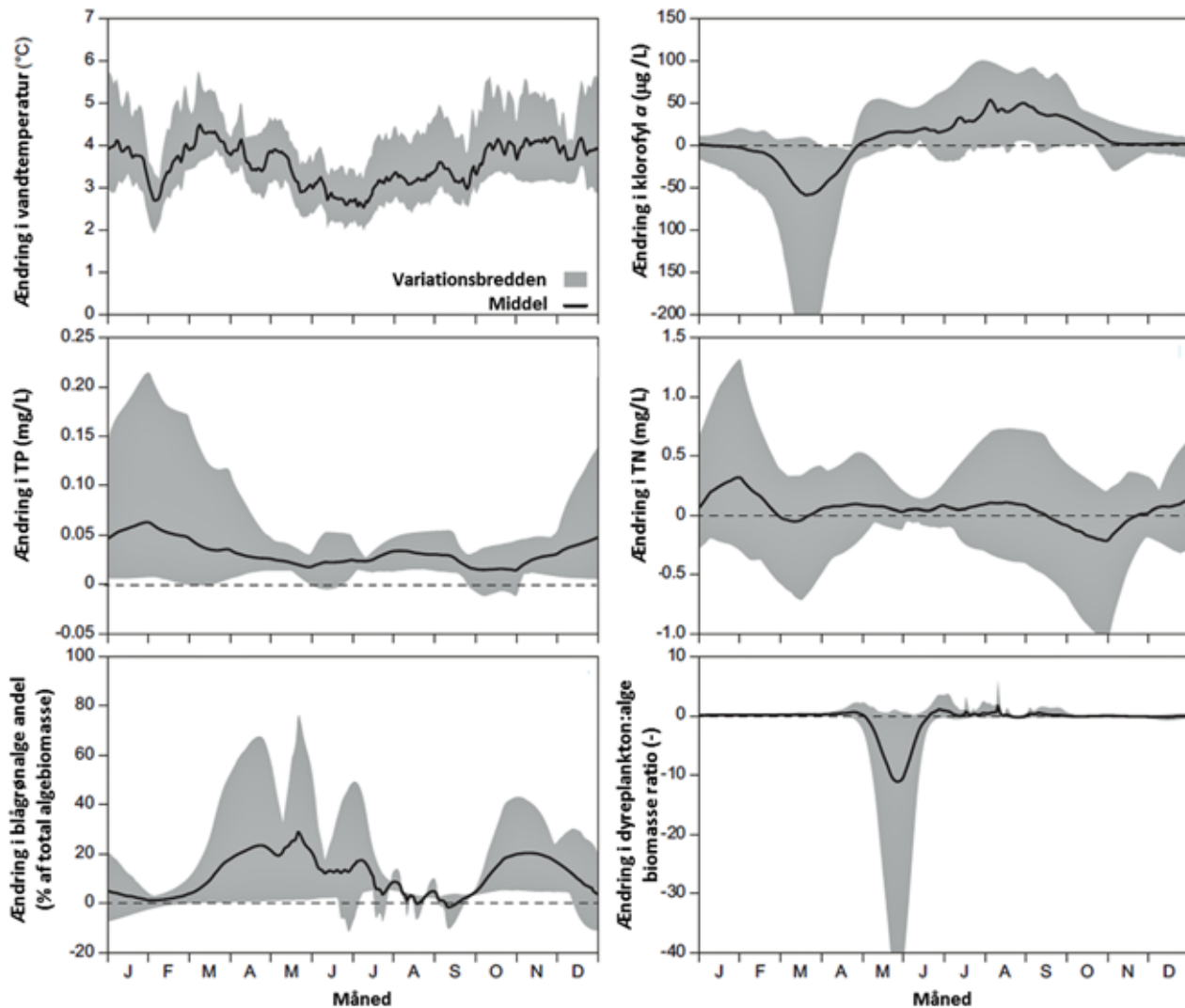


Fig. 4. Sæsonmæssige ændringer (fremtidssimulering minus baselinesimulering) af en række nøglekomponenter i et økosystem, baseret på simuleringer af fire procesbaserede sø-økosystem modeller. Variationsbredden, som er repræsenteret af området i gråtoner, illustrerer forskellen på de ændringer som de forskellige sø-modeller har simuleret, og den fuldt optrukne sorte streg angiver den gennemsnitlige ændring baseret på alle fire procesbaserede modeller.

store stigninger i vintermåneder og et fald særligt i sensommeren (fosfortransporten vil for eksempel stige 119 % i januar, og falde med 26 % i august). På årsbasis vil nedbøren i det fremtidige scenarie stige med 24 %, vandafstrømningen med 46 %, fosfortransporten med 64 % og kvælstoftransporten med 13 %. Disse estimater er naturligvis behæftet med væsentlige usikkerheder (eksempelvis vil landbrugspraksis formentlig gradvist blive tilpasset ændringer i klimaet, og arbejde imod uændret eller forøget udbytte samtidig med at tab af næringsstoffer til vandmiljøet reduceres), men modelberegningerne indikerer dog, at der kan være tale om meget store ændringer hvad angår vandafstrømning og næringsstofftab ved et sådant radikalt klimascenarie.

Ændringer i søernes økologi forårsaget af temperaturstigning og ændringer i næringsstoftransport

Både de procesbaserede økosystemmodeller og de empiriske relationer viser, at den økologiske tilstand i søerne vil forværrer betragteligt som følge af en stor opvarmning og øget næringsstofbelastning. Ifølge de procesbaserede modeller vil den samlede algebiomasse (repræsenteret af klorofyl a) stige særligt i sommermånederne, samtidig med at andelen af blågrønner forøges betydeligt, og ifølge modellerne udgøre en væsentlig del af algesamfundet allerede i forårmånederne (fig. 4). Procentuelt ses der ikke helt så store ændringer af blågrønne-andelen i sommermånederne, hvilket dog hænger sammen med, at blågrønnerne allerede i dag generelt udgør en stor andel af algebiomassen i denne periode (i de søer som er med i analysen).

Samtidig falder dyreplanktons betydning i

søerne, hvilket ses via de empiriske relationer, som illustrerer (fig. 5), at blågrønne-biomassen vil stige, samtidig med at den gennemsnitlige størrelse på dafnier falder (størrelsen af dafnier har betydning for græsningsstrykket på alger, hvor større individer bedre evner at kontrollere algerne). Disse skift i balancen i økosystemet ses ikke blot i den virtuelle computerverden, men kendes også fra den virkelige verden. Eksempelvis stiger forholdet (ratioen) mellem biomassen af fisk og biomassen af dyreplankton fra det nordlige til det sydlige Europa, samtidig med at ratioen mellem dyreplanktonbiomassen og algebiomassen falder /8/. Kaskade-effekten, som ændringer i fiskebiomasse kan give i økosystemet, er kun svagt indbygget i de procesbaserede modeller, og det er således sandsynligt, at modellerne i nogen grad underestimerer effekterne af opvarmning og øget næringsstofbelastning.

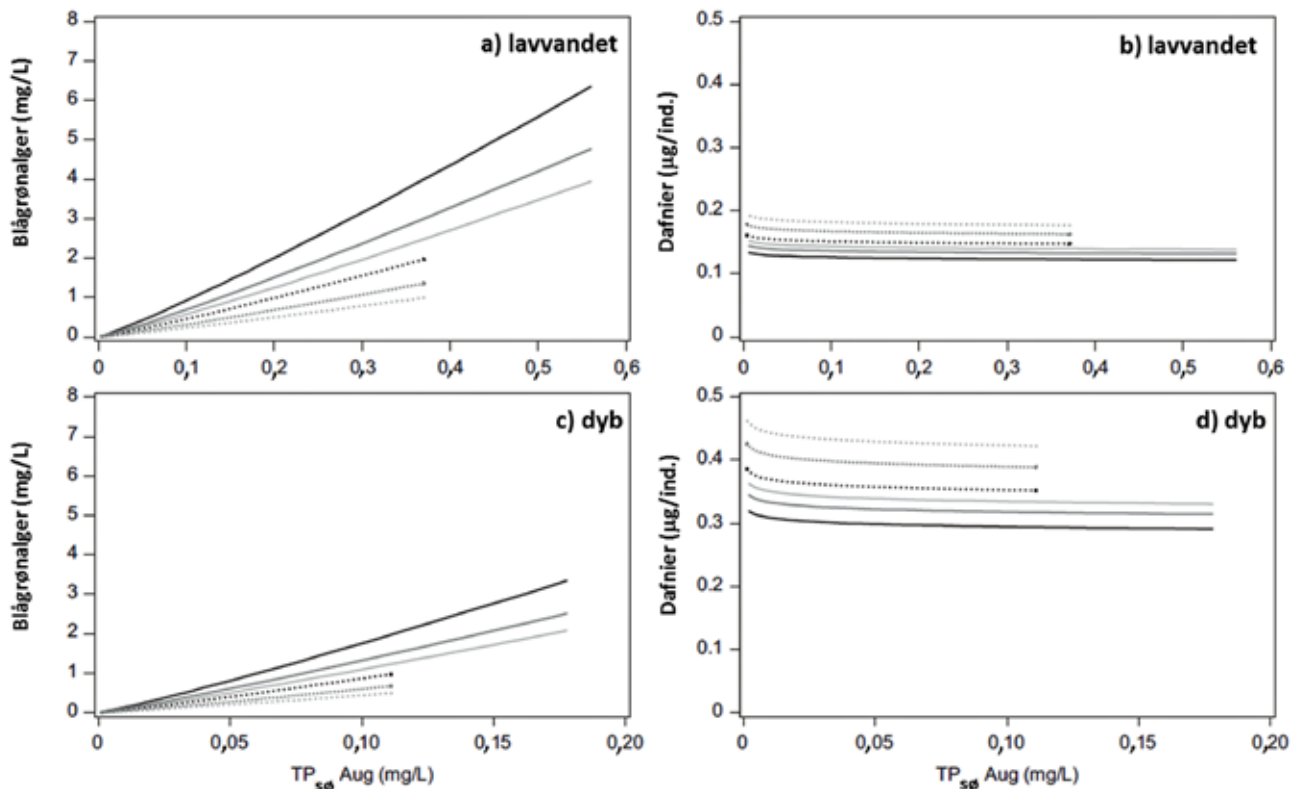


Fig. 5. Biomasse af blågrønner og den gennemsnitlige individstørrelse af dafnier (en væsentlig gruppe af dyreplankton i danske søer) i august måned, baseret på empiriske relationer fra danske søer. Resultaterne er eksemplificeret for hhv. lavvandede søer (middeldybde < 3 m og opholdstid på 1 år) og dybe søer (middeldybde > 3 m og opholdstid på 10 år) langs en fosforgradient. Fosforgradienten er længere for fremtidens søer, da disse oplever stigende næringsstofforsyning via input til de empiriske relationer. De stiplede linjer repræsenterer nutidens klima og næringsstofbelastning, og de fuldt optrukne linjer repræsenterer fremtidens klima og næringsstofbelastning. Gråtone-skalaen angiver endvidere 10, 50 og 90 % percentilen (fraktilen) af temperaturerne for hhv. nutidens og fremtidens klima (hvor de mørkeste streger angiver det varmeste, dvs. 90 % percentilen, af hhv. nutidens og fremtidens klima).

Muligheder og udfordringer for klimatilpasning i forhold til vandkvalitet i søer

Da symptomerne af klimaopvarmning på søernes økosystemer i nogen grad svarer til effekterne ved eutrofiering (øget næringsstofniveau), har studier også vist, at effekter af opvarmning kan modvirkes på samme måde som eutrofiering modvirkes – nemlig ved at reducere den eksterne næringsstofforsyning /9/. Den nuværende økologiske tilstand i danske søer kan således bibeholdes i et varmere klima under forudsætning af, at næringsstofforsyningen reduceres. Der er behov for ganske betydelige reduktioner i næringsstofforsyning. Eksempler fra litteraturen peger på en 25-50 % reduktion i ekstern næringsstofforsyning for at modsvare effekten af en 3 °C opvarmning /9/ (i dette tilfælde samme reduktion for både kvælstof- og fosforforsyning) og en 75 % reduktion ved en 6 °C opvarmning /9/ (ligeledes for både kvælstof- og fosforforsyning i dette studie). Samtidigt stiger behovet for fødevarerproduktion, som antages at skulle fordobles i 2050 for at kunne brødføde et stigende antal mennesker med stigende velstand. Dette vil

give yderligere pres på søernes økosystemer i områder, der forventes påvirket mindst af klimaforandringer, såsom Nordeuropa, hvilket kan resultere i yderligere intensivning af landbrugssektoren i disse områder med et øget tab af næringsstoffer til vandmiljøet til følge /11/. Denne åbenlyse konflikt mellem behovet for en øget fødevarerproduktion og behovet for at sikre god økologisk tilstand i vandmiljøet vil således forværres i et varmere klima. Såfremt denne konflikt skal løses, vil det kræve radikal udvikling af ny teknologi (eksempelvis indenfor fødevarerproduktion) og ændringer i menneskets livsstil (eksempelvis kostvaner).

Referencer

- /1/ Jeppesen, E., Kronvang, B., Meerhoff, M., Søndergaard, M., Hansen, K. M., Andersen, H. E., Lauridsen, T. L., Beklioglu, M., Özen, A. og Olesen, J. E. 2009: Climate change effects on runoff, catchment phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *Journal of Environmental Quality* 38, 1030-1041.
- /2/ Trolle, D., Elliott, J. A., Mooij, W. M., Janse, J. H., Bolding, K., Hamilton, D. P. og Jeppesen, E. 2014:

- Advancing projections of phytoplankton responses to climate change through ensemble modelling. *Environmental Modelling and Software*, online, doi: 10.1016/j.envsoft.2014.01.032
- /3/ Christensen, J. H. med flere. IPCCs SRES udslipsscenarioer og de nye RCP scenarier, Vand og Jord Tema udgave (samme Vand og Jord tema udgave)
 - /4/ Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. og Williams, J.R. 1998: Large area hydrologic modeling and assessment - Part 1: Model development. *Journal of American Water Resources Association* 34, 73-89.
 - /5/ Janse, J. H. og van Liere, L. 1995: PCLake: A modelling tool for the evaluation of lake restoration scenarios. *Water Science and Technology* 31, 371-374.
 - /6/ Hamilton, D.P. og Schladow, S.G. 1997: Prediction of water quality in lakes and reservoirs. Part 1: Model description. *Ecological Modelling* 96, 91-110.
 - /7/ Trolle, D., Skovgaard, H. og Jeppesen, E. 2008: The Water Framework Directive: Setting the phosphorus loading target for a deep lake in Denmark using the 1D lake ecosystem model DYRESM-CAEDYM. *Ecological Modelling* 219, 138-152.
 - /8/ Gyllström, M., Hansson, L. A., Jeppesen, E., Garcia-Criado, F., Gross, E., Irvine, K., Kairesalo, T., Kornijow, R., Miracle, M. R., Nykanen, M., Nöges, T., Romo, S., Stephen, D., Van Donk, E. og Moss, B. 2005: The

role of climate in shaping zooplankton communities of shallow lakes. *Limnology and Oceanography* 50, 2008-2021.

- /9/ Nielsen, A., Trolle, D., Bjerring, R., Søndergaard, M., Olesen, J. E., Jeppesen, E., Janse, J. H. og Mooij, W. M. 2014: Effects of climate and nutrient load on the water quality of shallow lakes assessed through ensemble runs by PCLake. *Ecological Applications*, in press.
- /10/ Trolle, D., Hamilton, D. P., Pilditch, C. A., Duggan, I. C. og Jeppesen, E. 2011: Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: Implications for lake restoration and management. *Environmental Modelling and Software* 26, 354-370.
- /11/ Olesen, J. E., Tmka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Seguin, B., Peltonen-Saino, P., Rossi, F., Kozyra,

J. og Micale, F. 2011: Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy* 34, 96-112.

- DENNIS TROLLE (dtr@dmu.dk) er seniorforsker ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience
- ANDERS NIELSEN (an@dmu.dk) er tidligere Ph.D. studerende ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience og Institut for Agroøkologi
- JONAS ROLIGHED (jro@dmu.dk) er videnskabelig assistent ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience
- HANS THODSEN (hath@dmu.dk) er seniorrådgiver ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience
- HANS E. ANDERSEN (hea@dmu.dk) er seniorforsker ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience
- IDA B. KARLSSON (ika@geus.dk) er Ph.D. studerende ved

De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland

JENS CHR. REFSGAARD (jcr@geus.dk) er professor ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland

JØRGEN E. OLESEN (JorgenE.Olesen@agrsci.dk) er professor ved Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi

KARSTEN BOLDING (bold@dmu.dk) er seniorforsker ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience

BRIAN KRONVANG (bkr@dmu.dk) er professor ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience

MARTIN SØNDERGAARD (ms@dmu.dk) er seniorforsker ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience

ERIK JEPPESEN (ej@dmu.dk) er professor ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience



Miljøtilstanden i vandløb og søer vil i fremtiden i endnu højere grad være betinget af tilførsel af næringsstoffer fra oplandet.
Foto: Jørgen E. Olesen