

Nordisk landbrug i en meget varmere verden

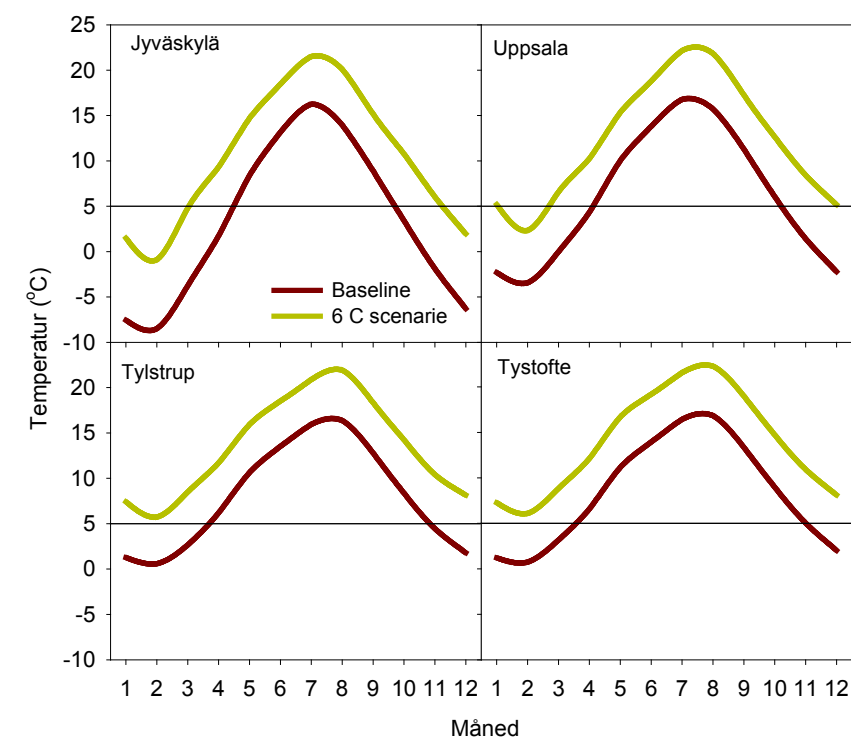
Klimaændringerne forventes i stort omfang at ændre betingelserne for naturressourcer og dermed for landbrug i Norden. Klimaændringerne skaber både nye risici og muligheder for nye produktionssystemer. I modsætning til andre steder på jordkloden vil selv kraftige klimaændringer kunne øge landbrugets produktionspotentiale i Norden.

JØRGEN E. OLESEN, JOHN R. PORTER,
MANUEL MONTESINO SAN MARTIN,
MOHAMED JABLON, ISIK ÖZTÜRK &
MIROSLAV TRNKA

Introduktion

Effekter af klimaændringer går ikke kun gennem direkte effekter på afgrødernes udbytter, men også på effekter af produktionen på miljøet, især i forhold til forurening af grundvand og overfladevand. Samtidig spiller ændringer i muligheder for eksport af højværdiprodukter en stor rolle for landbrugsproduktionen, ikke mindst i velstående lande som de nordiske. I det omfang betingelserne for en sådan produktion forringes eller bliver mere usikker i lande under sydligere himmelstrøg, vil dette kunne styrke fødevaresektoren i Danmark og resten af Norden.

Norden er det eneste sted på kloden, hvor de klimatiske forhold tillader produktivt landbrug på høje breddegrader med mørke vintrere. Denne unikke geografiske placering gør det vanskeligt at overføre viden fra andre dele af verden til de miljømæssige forhold i Norden, hvor både planter og dyr er tilpasset til at overleve lange, mørke og kolde vintrere. I store dele af regionen vil de forventede klimaændringer betyde varmere vintrere med øget variabilitet i form af regn, sne og isdække. Dette vil udgøre en udfordring for de nuværende produktionssystemer og kræver nye



Figur 1. Gennemsnitlig månedlig temperatur for fire klimastationer i Norden under nuværende klima og under 6°C-scenariet.

løsninger for både plante- og husdyrproduktionen.

Opvarmningen vil føre til et vinterklima, der ligger ud over de forhold, der for nuværende er kendte og forståede. Virkningerne af sådanne ændringer er vanskelige at forudsige, og der er kun lidt forskning at basere vurderinger af potentielle virkninger på økosyste-

mernes funktion, og hvordan dette vil påvirke landbrugsproduktionen. Her tager vi udgangspunkt i et klimascenarie hvor den globale middeltemperatur stiger med 6°C med henblik på at vurdere hvordan dette vil påvirke vilkårene for planteproduktion i Norden. Mange steder i verden må dette forventes at føre til betydelige udbyttefald i landbrugsaf-

grøderne /1/. Spørgsmålet er om dette også vil være tilfældet i Norden, hvor klimaet for nærværende er så køligt at det bremser for dyrkning af en række afgrøder. Vi har valgt at fokusere på vinterhvede, som dyrkes over det meste af kloden, også i Norden.

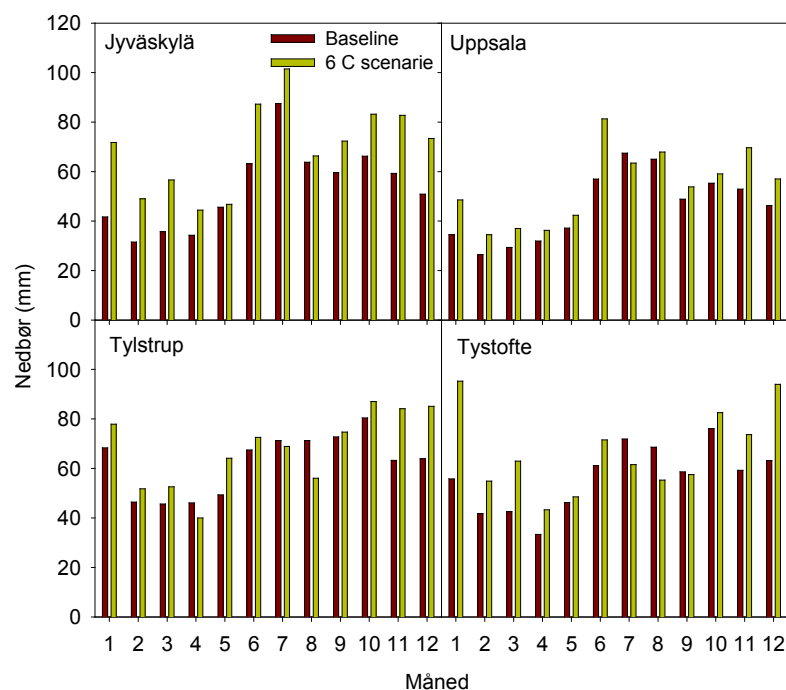
Klima og grundlaget for planteproduktion

Vi baserer vores analyse på et klimascenarie med den globale klimamodel EC-Earth. CO₂ koncentrationen er specificeret til at stige med 1 % om året, indtil den globale middeltemperatur er steget med 6°C. For at få en bedre rumlig beskrivelse af klimaet er der efterfølgende lavet en beregning med den regionale klimamodel HIRHAM5, som dækker Europa. Denne model har en rumlig opløsning på ca. 25 km og vi har udvalgt klima for fire steder i Norden; Jyväskylä i det sydlige Finland, Uppsala nord for Stockholm, Tylstrup i Nordjylland og Tystofte på Sydsjælland.

Planternes vækst kan især være begrænset af tre forhold: 1) passende temperatur, 2) tilstrækkelig nedbør og 3) solstråling til at sikre fotosyntesen. Ved temperaturer under ca. 5 grader (som markeret i Figur 1) vil væksten være begrænset i de fleste plantearter. Figur 1 viser at vækstperiodens længde øges betydeligt i hele Norden ved en temperaturstigning på 6 grader. I Danmark vil det selv midt om vinteren ikke være koldt nok til at plantevæksten begrænses /2/. Længere nordpå i Sverige og Finland vil der dog fortsat være en periode midt vinter hvor lave temperaturer og manglende lys begrænser plantevæksten, men dette til trods øges vækstperiodens længde betydeligt under 6 graders scenariet. I klimascenariet er vækstperioden således længere i Finland end den er for det nuværende klima i Danmark. Den længere vækstperiode øger i princippet mulighederne for planteproduktion, forudsat at der er tilstrækkelig med nedbør og solstråling.

I de nordiske lande er nedbøren nogenlunde ligeligt fordelt over hele året (Figur 2), og med klimaændringsscenariet stiger nedbørmængden i alle måneder i Sverige og Finland, og i langt de fleste måneder i Danmark. Alle steder øges nedbørmængden især om vinteren. Et varmere klima vil dog medføre betydelige stigninger i fordampningen, således at risikoen for tørke om sommeren øges. Det vil øge presset for vanding, især for afgrøder med en længere vækstperiode.

Solstrålingen følger stort set samme årlige variation ved alle de valgte klimastationer i Norden (Figur 3). Solstrålingen er særlig lav i november til januar, mens den er tilstrækkelig høj plantevækst fra marts og fremefter. En for-



Figur 2. Gennemsnitlig månedlig nedbør for fire klimastationer i Norden under nuværende klima og under 6°C scenariet.

længelse af planternes vækstsæson i det tidlige forår under et varmere klima vil derfor øge mulighederne for planteproduktion. I 6 graders scenariet sker dette overalt i Norden, men dog mest udpræget i Danmark.

Vinterhvede

Udbytter i afgrøder som vinterhvede afhænger ikke kun af klimaet i de forskellige måneder, men også af vækstperiodens længde. Men de valgte scenarie ændres så tidligt fra midt september til ultimo oktober, blomstring fra midt juni til sent i maj og modenhed fra primo august til primo juli. Hermed øges efterårsperioden med bar jord mellem høst af afgrøden til såning af den næste vintersædsafgrøde med mere end et par måneder.

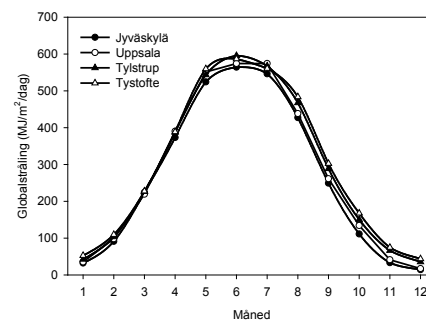
Med den senere såning og tidligere høst af kornafgrøden kunne det forventes at udbyttet vil falde under 6 graders scenariet. For at undersøge dette nærmere har vi beregnet udbyttet i vinterhvede med tre forskellige simulationsmodeller, der været anvendt til sådanne analyser i Danmark og Norden (AFRC /3/, Daisy /4/ og FASSET /5/). Modellerne er brugt på de fire lokaliteter for en sandblandet lerjord og vi har for 6 graders scenariet kørt modellerne både med og uden forhøjet CO₂, som jo har en gunstig effekt ikke kun på planternes fotosyntese, men som også mindsker planternes vandforbrug.

Modellerne afviger i udbyttens niveau i udgangssituationen i Finland, hvor afgrøden i AFRC modellen aldrig modner og derfor ikke kan beregnes at give et udbytte. Også FASSET

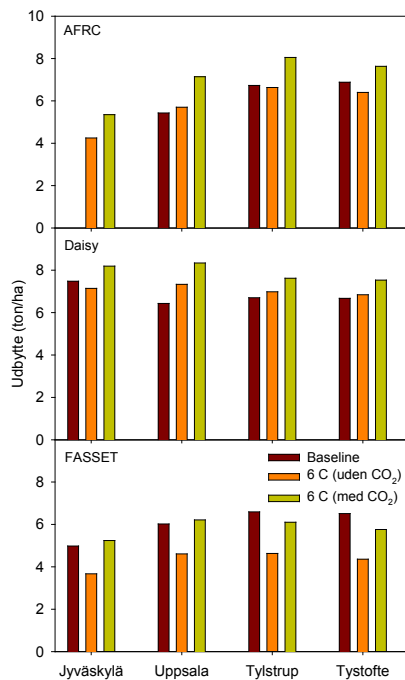
modellen giver lave udbytter her, men Daisy beregner de højeste udbytter i Finland, dog formentlig på en afgrøde der næppe når at modne helt af. Modellerne varierer noget i deres respons på klimaændringerne uden øget CO₂. Daisy giver en lille udbyttstigning, AFRC giver stort set uændrede udbytter og FASSET giver et udbyttetfald. Disse afvigelser mellem modeller er i overensstemmelse med en sammenligning af mange hvedemodeller under mere varme himmelstrøg /6/. Her var variationen betydelig, når temperaturen blev øget med 6°C. Med øget CO₂ giver både AFRC og Daisy udbyttstigninger på alle lokaliteter, mens dette kun er tilfældet for Sverige og Finland med FASSET modellen.

Ekstremhændelser

Udbyttet i landbrugsafgrøderne vil ikke kun være betinget af de generelle klimaforhold. En række ekstremhændelser som regn under såningen, frost, intens tørke, kraftig regn



Figur 3. Gennemsnitlig månedlig globalstråling for fire klimastationer i Norden.



Figur 4. Modelberegnete gennemsnitsudbytter for vinterhvede med tre simuleringsmodeller (AFRC, Daisy og FASSET) for baseline klima og for 6°C scenariet uden og med effekt af øget CO₂ på plantevækst.

under afmodningen, og varmestress under og efter blomstringen kan i betydelig grad skade afgrøden og føre til store udbyttetab [7]. Her har vi for hvede beregnet risikoen for disse faktorer under både det nuværende klima og 6 graders scenariet (Figur 5). Dette er beregnet som antal dage med mulighed for kritiske klimatiske forhold.

Figuren viser, at der generelt kun er små ændringer i risikobilledet. Risikoen for frost øges markant i Finland, hvilket skyldes, at der under det ændrede klima vil være et betydeligt mindre snedække og dermed mere barfrost, der potentielt kan skade afgrøden. Omfanget af kraftig regn øges en smule de fleste steder, men dog ikke i noget skadende omfang. Derimod mindskes risikoen for intens tørke, hvilket især skyldes, at vækstsæsonen skubbes ca. en måned frem i tid, og herved undgås perioden med høj fordampning i juni og juli, der påvirker afgrøden. I det hele taget skyldes de neutrale effekter på både beregnet udbytte og på indikatorerne for ekstremer, at vækstsæsonen forskubbes i tid til en periode, hvor der stadig er gunstige lysforhold for planteproduktion, men uden alt for høje og skadelige temperaturer. Det skal dog understreges, at dette er baseret på modelberegninger, som bør understøttes med eksperimentelle data, og her har vi pt. et hul i vores viden.

Nye afgrøder og nye muligheder

Den længere og varmere vækstsæson åbner for dyrkning af nye afgrøder. I Norden vil der i de nordlige egne være en stigning i landbrugsafgrøder i almindelighed, mens ændringerne i Danmark især vil være ændringer i form af dyrkning af varmekrævende afgrøder som f.eks. majs. Og med en temperaturstigning på 6 °C åbner der sig mange nye muligheder for soyabønne, solsikke, vin m.v. Over hele Norden vil en så betydelig temperaturstigning betyde, at varmekrævende afgrøder som majs vil kunne brede sig til et meget stort område og så langt som det nordlige Sverige og Finland (Figur 6). Dette giver selv sagt nye landbrugsmæssige muligheder og potentiale for øget landbrugsproduktion.

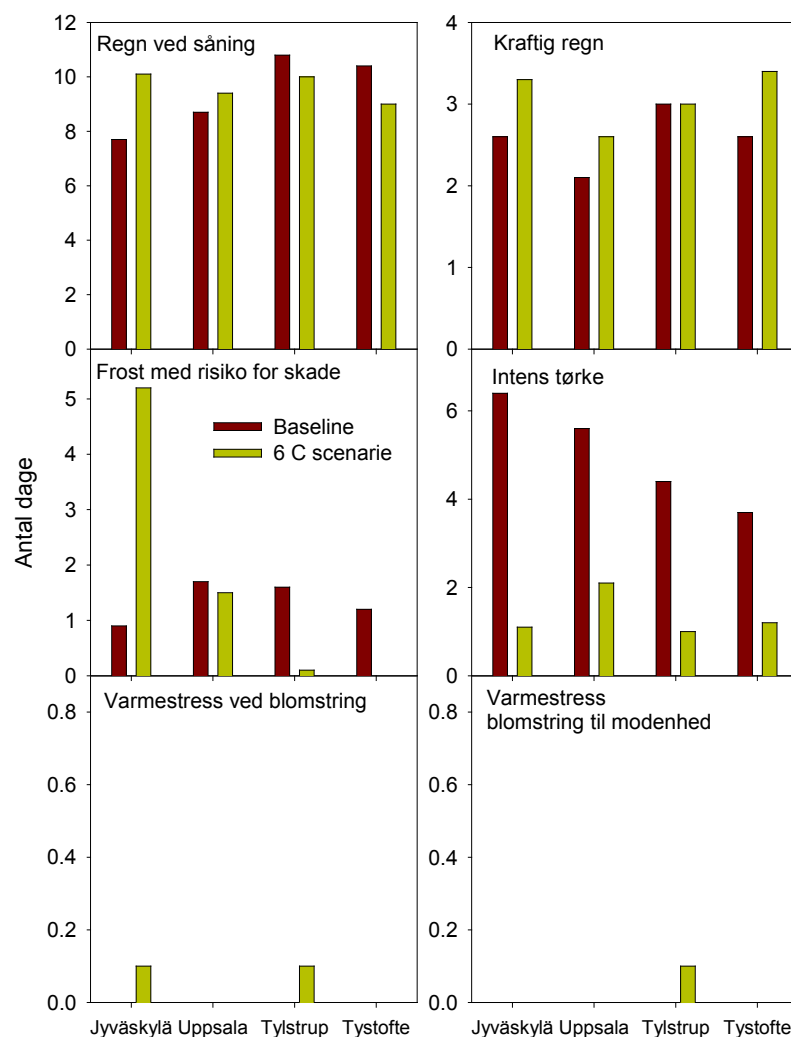
Norden som klimamæssigt smørhul

Meget tyder på, at effekterne af klimændringer på landbruget vil være betydeligt mere positive i Norden end for mange andre steder

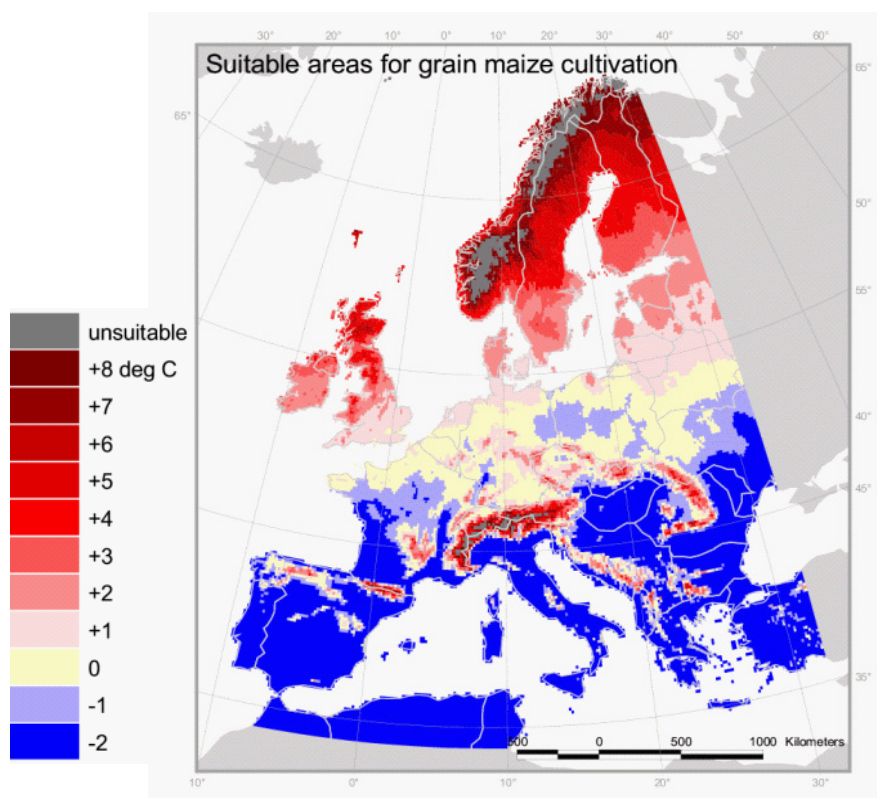
i verden. Det giver nye muligheder og vil også føre til et pres for opdyrkning af nyt landbrugsland, ikke mindst i Sverige, Norge og Finland, ofte på bekostning af den eksisterende skov. Medvirkende til dette pres er både den voksende globale efterspørgsel efter fødevarer og klimændringernes negative konsekvenser for landbrugets produktivitet under sydlige himmelstrøg. Konsekvenser kan blive øget pres på vandressourcer til vanding og forværrede forhold for bl.a. vandmiljøet, hvor især Østersøen allerede nu er alt for stærkt belastet af næringssalte fra bl.a. landbruget. Der er derfor behov for udvikling af nye dyrkningsmetoder, hvis dette klimamæssige eventyr skal kunne udnyttes fornuftigt af Nordiske landmænd.

Referencer

- /1/ Challinor, A.J., Watson, J., Lobell, D.B., Howden, S.M., Smith, D.R., og Chhetri, N., 2014. A meta-analysis of crop yield under climate. *Nature Climate Change* 4, 287-291.



Figur 5. Gennemsnitligt antal dage med kritiske klimahændelser som kan påvirke udbyttet af vinterhvede negativt for baseline klima og for 6 °C scenariet.



Figur 6. Temperaturbetinget egnethed for dyrkning af kernemajs ved forskellige niveauer for øget middeltemperatur. Ved øget temperatur vil nogle af områder i Sydeuropa blive uegnede som følge af tørke og vandmangel.

/2/ Thomsen, I.K., Lægdsmand, M., og Olesen, J.E. 2010. Crop growth and nitrogen turnover under increased temperatures and low autumn and winter light intensity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139, 187-194.

/3/ Montesino-San Martin, M., Olesen, J.E., og Porter, J.R. 2014. A genotype, environment and management (GxE_M) analysis of adaptation in winter wheat to climate change in Denmark. *Agricultural and Forest Meteorology* 187, 1-13.

/4/ Børgesen, C.D., og Olesen, J.E. 2011. A probabilistic assessment of climate change impacts on yield and nitrogen leaching from winter wheat in Denmark. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 11, 2541-2553.

/5/ Patil, R., Lægdsmand, M., Olesen, J.E., og Porter, J.R. 2012. Sensitivity of crop yield and N losses in winter wheat to changes in mean and variability of temperature and precipitation in Denmark using the FASSET model. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B Plant and Soil* 62, 335-351.

/6/ Asseng, A., Ewert, F., Rosenzweig, C., Jones, J.W., Hatfield, J.L., Ruane, A., Boote, K.J., Thorburn, P., Rötter, R.P., Cammarano, D., Brisson, N., Basso, B., Martre, P., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Bertuzzi, P., Biernath, C., Challinor, A.J., Doltra, J., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Heng, L., Hooker, J., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurralde, R.C., Kersebaum, K.C., Müller, C., Kumar, S.N., Nendel, C., O'Leary, G.O., Olesen, J.E., Os-borne, T.M., Palosuo, T., Priesack, E.,

Ripoche, D., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Steduto, P., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Travasso, M., Waha, K., Wallach, D., White, J.W., Williams, J.R., og Wolf, J. 2013. Uncertainties in simulating wheat yields under climate change. *Nature Climate Change* 3, 827-832.

/7/ Trnka, M., Rötter, R., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., Zalud, Z., og Semenov, M.A. 2014. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change* 4, 637-643.

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

JOHN R. PORTER (jrp@plen.ku.dk) er professor ved Københavns Universitet, Institut for Plante- og Miljøvidenskab

MANUEL MONTESINO SAN MARTIN (manuelmontesino@plen.ku.dk) er PhD studerende ved Københavns Universitet, Institut for Plante- og Miljøvidenskab

MOHAMED JABLOUN (Mohamed.Jabloun@agrsci.dk) er PhD studerende ved Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi

ISIK ÖZTÜRK (Isik.Ozturk@agrsci.dk) er postdoc ved Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi

MIROSLAV TRNKA (mirek_trnka@yahoo.com) er professor ved Mendel University in Brno, Institute of Agriculture Systems and Bioclimatology & Global Change Research Centre, Czech Academy of Sciences, Brno, Tjekkiet

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 opvarmningsscenarie, 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 blågrønalger i søer og dårligere økologisk tilstand /2/. Hidtil har klimaeffektstudier fokuseret på moderate emissions-scenarier så som A1B (et middel emissions-scenarie 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 fremtidsscenarie (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-

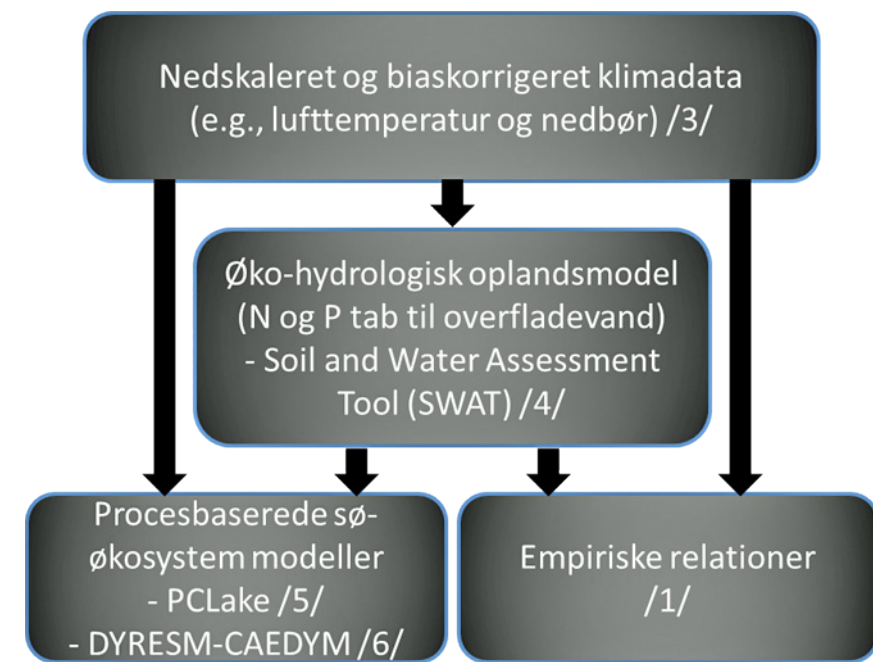


Fig. 1. Oversigt over modeller og dataflow, som er anvendt i analysen.

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 opvarmningsscenarie 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 klimascenarie 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 biaskorrektion 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 en 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 årstidsvariationen i lufttemperatur og nedbør giver tilsvarende store ændringer i vandafstrømning samt næringsstoftransport (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. Næringsstoftransporten i vandløbene vil følge et lignende mønster med

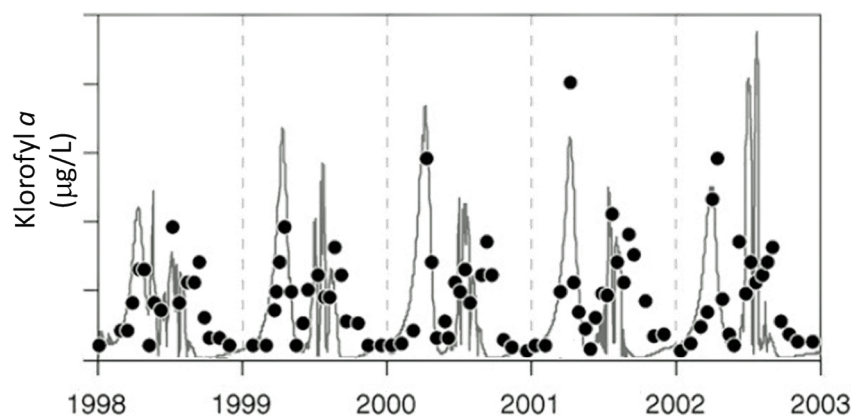


Fig. 2. Et eksempel på hvordan modellerne i analysen er blevet tilpasset danske forhold (eksempel fra /7/), hvor modelparametre er kalibreret med det formål at opnå bedre overensstemmelse mellem modeloutput og observationsdata fra Ravn Sø – i dette tilfælde en validering af total algebiomasse (repræsenteret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

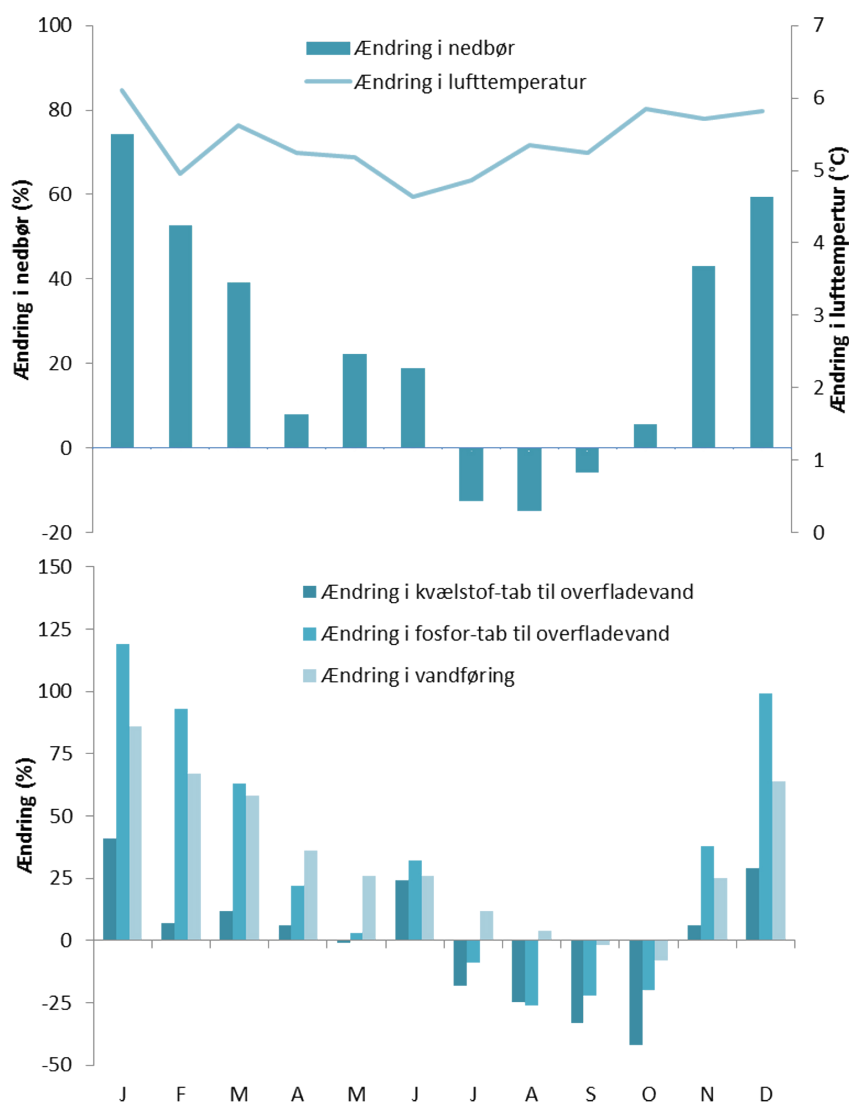


Fig. 3. Månedlige ændringer i lufttemperatur, nedbør, vandføring og oplandets tab af næringsstoffer ifølge klimamodelprojektion og oplandsmodellen.

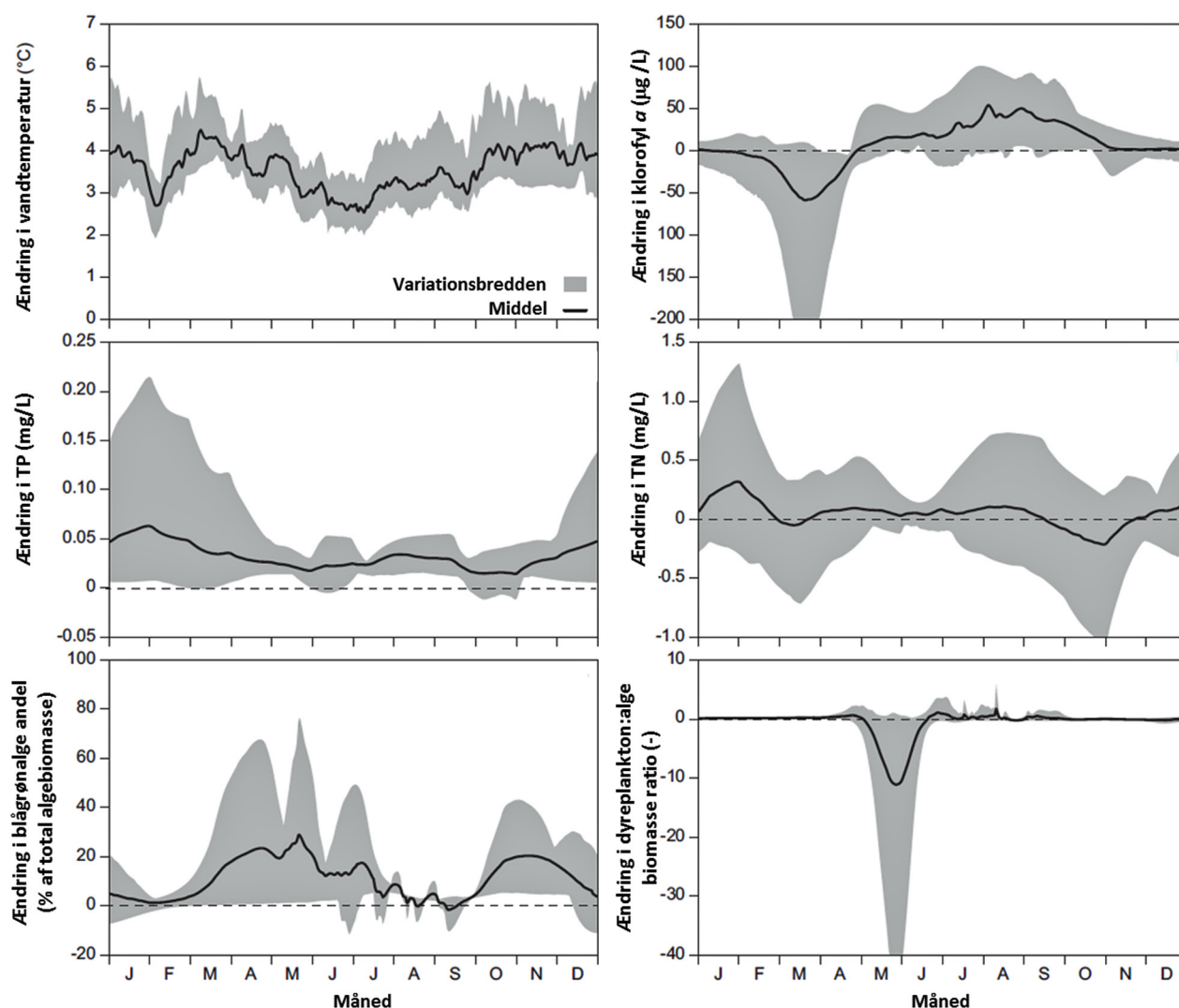


Fig. 4. Sæsonmæssige ændringer (fremtidssimulering minus baselinesimulering) af en række nøglekomponenter i et økosystem, baseret på simuleringer af fire procesbaserede sø-økosystem modeller. Variationsbredden, som er repræsenteret af området i gråtoner, illustrerer forskellen på de ændringer som de 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 formodentlig 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 forværres 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 blågrønaler forøges betydeligt, og ifølge modellerne udgøre en væsentlig del af algesamfundet allerede i forårsmånederne (fig. 4). Procentuelt ses der ikke helt så store ændringer af blågrønalg-andelen i sommermånederne, hvilket dog hænger sammen med, at blågrønalerne 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 blågrønalg-biomassen vil stige, samtidig med at den gennemsnitlige størrelse på dafnier falder (størrelsen af dafnier har betydning for græsningstrykket 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.

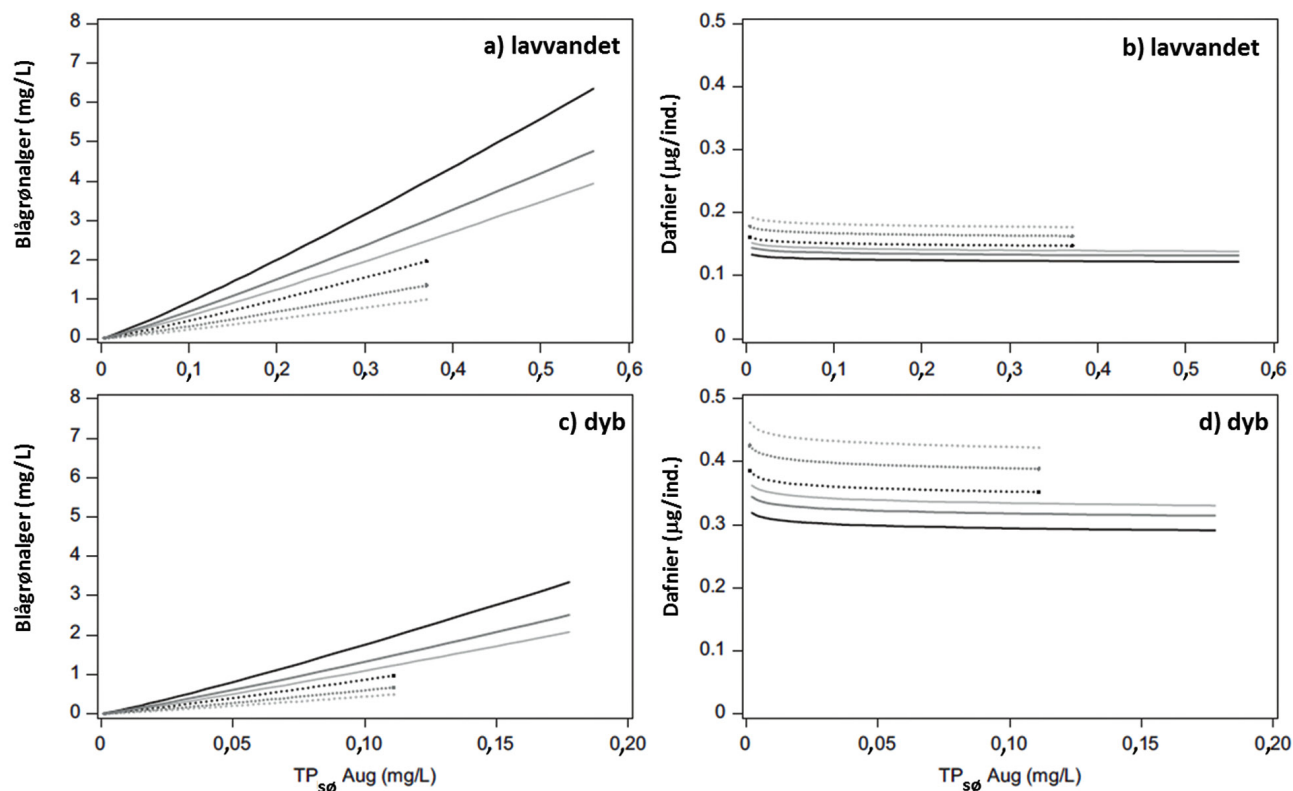


Fig. 5. Biomasse af blågrønalger og den gennemsnitlige individstørrelse af dafnier (en væsentlig gruppe af dyreplankton i danske søer) i august måned, baseret på empiriske relationer fra danske søer. Resultaterne er eksemplificeret for hhv. lavvandede søer (middeldybde < 3 m og opholdstid på 1 år) og dybe søer (middeldybde > 3 m og opholdstid på 10 år) langs en fosforgradient. Fosforgradienten er længere for fremtidens søer, da disse oplever stigende næringsstofftilførsel via input til de empiriske relationer. De stiplede linjer repræsenterer nutidens klima og næringsstoffbelastning, og de fuldt optrukne linjer repræsenterer fremtidens klima og næringsstoffbelastning. 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 næringsstoffniveau), har studier også vist, at effekter af opvarmning kan modvirkes på samme måde som eutrofiering modvirkes – nemlig ved at reducere den eksterne næringsstofftilførsel /9, 10/. Den nuværende økologiske tilstand i danske søer kan således bibeholdes i et varmere klima under forudsætning af, at næringsstofftilførslen reduceres. Der er behov for ganske betydelige reduktioner i næringsstofftilførsel. Eksempler fra litteraturen peger på en 25-50 % reduktion i ekstern næringsstofftilførsel for at modsvare effekten af en 3 °C opvarmning /9/ (i dette tilfælde samme reduktion for både kvælstof- og fosfortilførsel) og en 75 % reduktion ved en 6 °C opvarmning /9/ (ligeledes for både kvælstof- og fosfortilførsel 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 intensivering 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 scenarioer, Vand og Jord Tema udgave (samme Vand og Jord tema udgave)
- /4/ Arnold, J.G., Srinivasan, R., Mutiah, 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., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Skjelvåg, A. O., Seguin, B., Peltonen-Saino, P., Rossi, F., Kozyma,

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

Scenarier for fremtidens arealanvendelse i Danmark

Landskabet har mange funktioner, hvoraf nogle vedrører produktion især i forhold til landbrug og andre vedrører andre tjenester, som økosystemerne kan levere. Den fremtidige arealanvendelse vil kunne lægge vægt på forskellige aspekter. I CRES er der udviklet fire forskellige scenarier for fremtidig arealanvendelse, og disse er eksemplificeret ved et opland opstrøms Kratholm i Odense Å.

JØRGEN E. OLESEN, ERIK JEPPESEN, JOHN R. PORTER, CHRISTEN DUUS BØRGESSEN, DENNIS TROLLE, JENS CHRISTIAN REFSGAARD, TORBEN SONNENBORG, & IDA BJØRNHOLT KARLSSON

Indledning

Danmark er fortsat et udpræget landbrugsland. Med 62 % af landarealet i landbrugsmæssig anvendelse og med hovedparten i korn dyrkning hører Danmark til blandt de mest intensivt dyrkede lande i verden. Dette sammen med det omfattende husdyrhold har haft konsekvenser for det omgivende miljø, især i form af udledninger af kvælstof og fosfor forbindelser til vandmiljø og atmosfære.

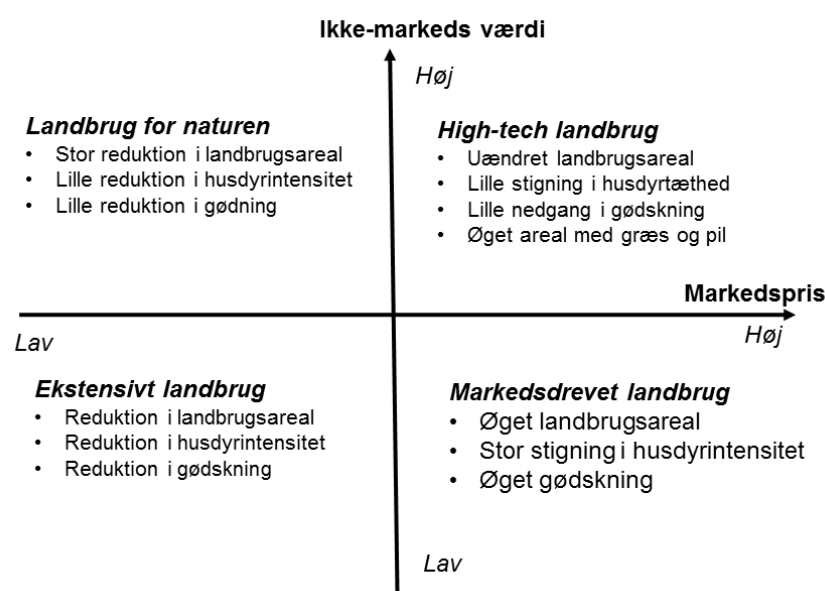
Over de seneste 20 år har Vandmiljøplanerne reduceret overskuddet af kvælstof og fosfor i landbruget og sammen med andre tiltag resulteret i et betydeligt fald i kvælstofudvaskningen. For en række vandløb, søer og fjorde er belastningen dog fortsat for høj, og der lægges derfor i forbindelse med implementeringen af EU's Vandrammedirektiv op til yderligere stramninger i forhold til landbrugets næringsstofanvendelse og med mulige konsekvenser også for arealanvendelsen. Med Natur- og Landbrugskommissionens rapport fra sidste år lægges der op til, at en sådan reduktion i næringsstofbelastning vil kunne løses smartere gennem geografiske forskelle i

indsatser, således at indsatsen foregår, hvor effekten er størst.

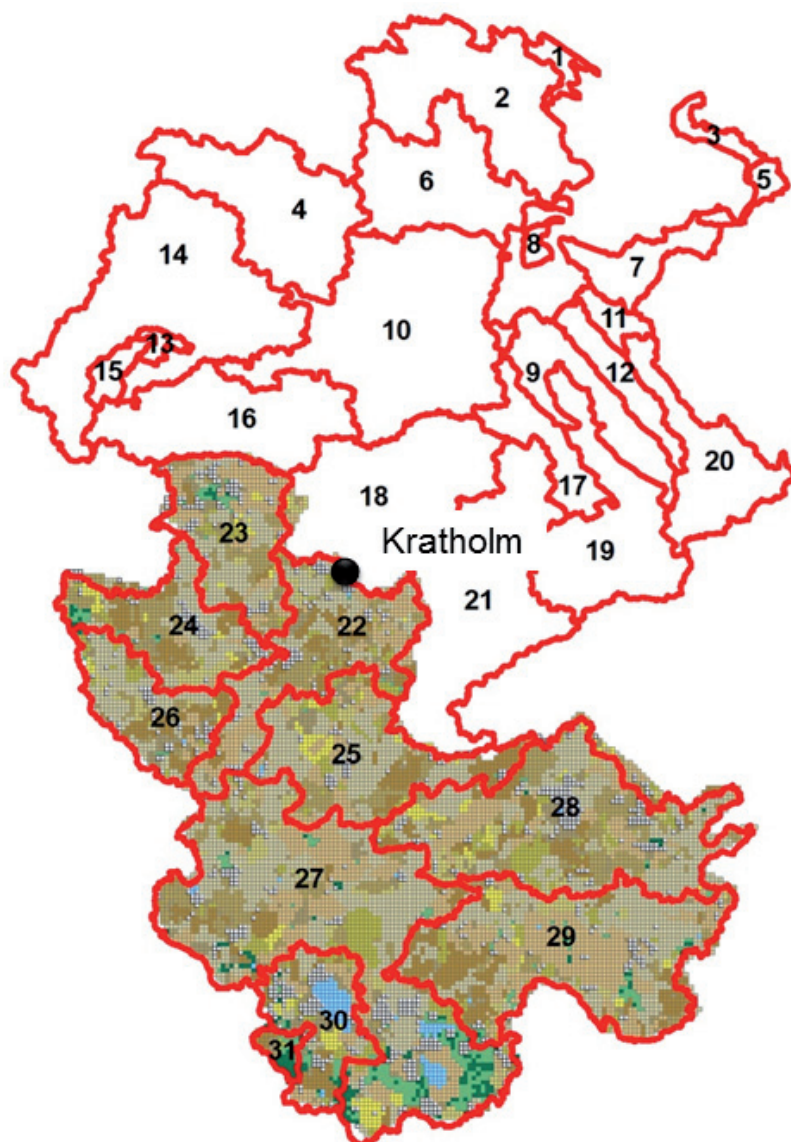
Den fremtidige arealanvendelse i Danmark vil ikke alene være afgørende for landbrugets udviklingsmuligheder, men også for naturen og vandmiljøet. Dette vil være bestemt af den globale udvikling i efterspørgsel efter fødevarer og biobrændstoffer kombineret med EU's og Danmarks politikker inden for landbrug, vedvarende energi, miljø og klima. Samtidigt vil klimaændringer antageligt give nye og ændrede muligheder for dyrkning af afgrøder i Danmark. Det mulige udfald af disse mange

drivkræfter er selvsagt mangfoldigt.

I CRES (Centre for Regional change in the Earth System) indgår modelbaserede analyser af, hvordan klimaændringer påvirker vand- og stofkredsløb i Danmark og i specifikke afstrømningsoplande. Klimaændringerne vil i sig selv påvirke temperatur- og nedbørforhold og dermed afstrømning af vand og næringsstoffer til vandløb, søer og fjorde. For at kunne belyse effekter af samspillet mellem klimaændringer og arealanvendelse har vi i CRES opstillet en række scenarier for den fremtidige arealanvendelse. Disse scenarier har



Figur 1. Scenariegrupper og scenariekarakteristika.



Figur 2. Odense Å oplandet med deloplande og markering af arealet opstrøms Kratholm målestation.

været diskuteret ved en workshop med input fra forskere, landbrugserhvervet, miljømyndigheder og naturbeskyttelsesorganisationer (Boks 1).

Drivkræfter

På globalt plan er det uden tvivl den stærkt voksende middelklasse (fra nu ca. 2 mia. til 5 mia. i 2050), der vil være hoveddrivkraften bag udviklingen i landbruget og dermed også i arealanvendelsen, både globalt og i Danmark /1/. Denne vækst i velstand har to konsekvenser. For det første vil der være en stærkt stigende efterspørgsel efter fødevarer. Det forventes således at det globale kødforbrug vil øges med mindst 70 % frem mod 2050 /2/, hvilket i betragtning af at verdens landbrugsareal ikke forventes at vokse nævneværdigt, stiller store krav til øget intensivering af landbrugsproduktionen. Samtidigt stiller en

befolkning med større velstand også højere krav til miljøets kvalitet, herunder til naturens tilstand. Dette har betydelige konsekvenser for fremtidig arealanvendelse /3/.

På dette grundlag har vi identificeret en række drivkræfter, der må forventes at påvirke arealanvendelsen i Danmark i de kommende årtier. Disse kan inddeles i fire hovedområder: 1) Ændret efterspørgsel på landbrugsprodukter (fødevarer, foder, fiber og bioenergi), 2) Ændringer i teknologi, især inden for landbrugets arealanvendelse, 3) Ændringer i arealanvendelse til prioritering af anden anvendelse end landbrug, f.eks. øget natur eller grundvandsbeskyttelse, 4) Ændringer i klima. Disse drivkræfter vil påvirke arealanvendelsen både gennem nationale og regionale beslutninger og gennem EU regulering og støtteordninger samt udvikling i globale markeder.

Scenariegrupper

For at diskutere mulige scenarier for fremtidig arealanvendelse i Danmark gennemførte vi en workshop med en række interessenter (Boks 1). Disse interessenter blev bedt om at reflektere på følgende hovedkategorier af ændringer i arealanvendelse og drift af landbrugssystemer: 1) Overordnet arealanvendelse (landbrug, skov, by, vådområder, permanent græs m.v.), 2) Ændringer i bedriftsstruktur (f.eks. husdyrtæthed, husdyrtype), 3) Ændringer i den landbrugsmæssige drift (f.eks. afgrødevalg, efterafgrøder, gødningsniveau).

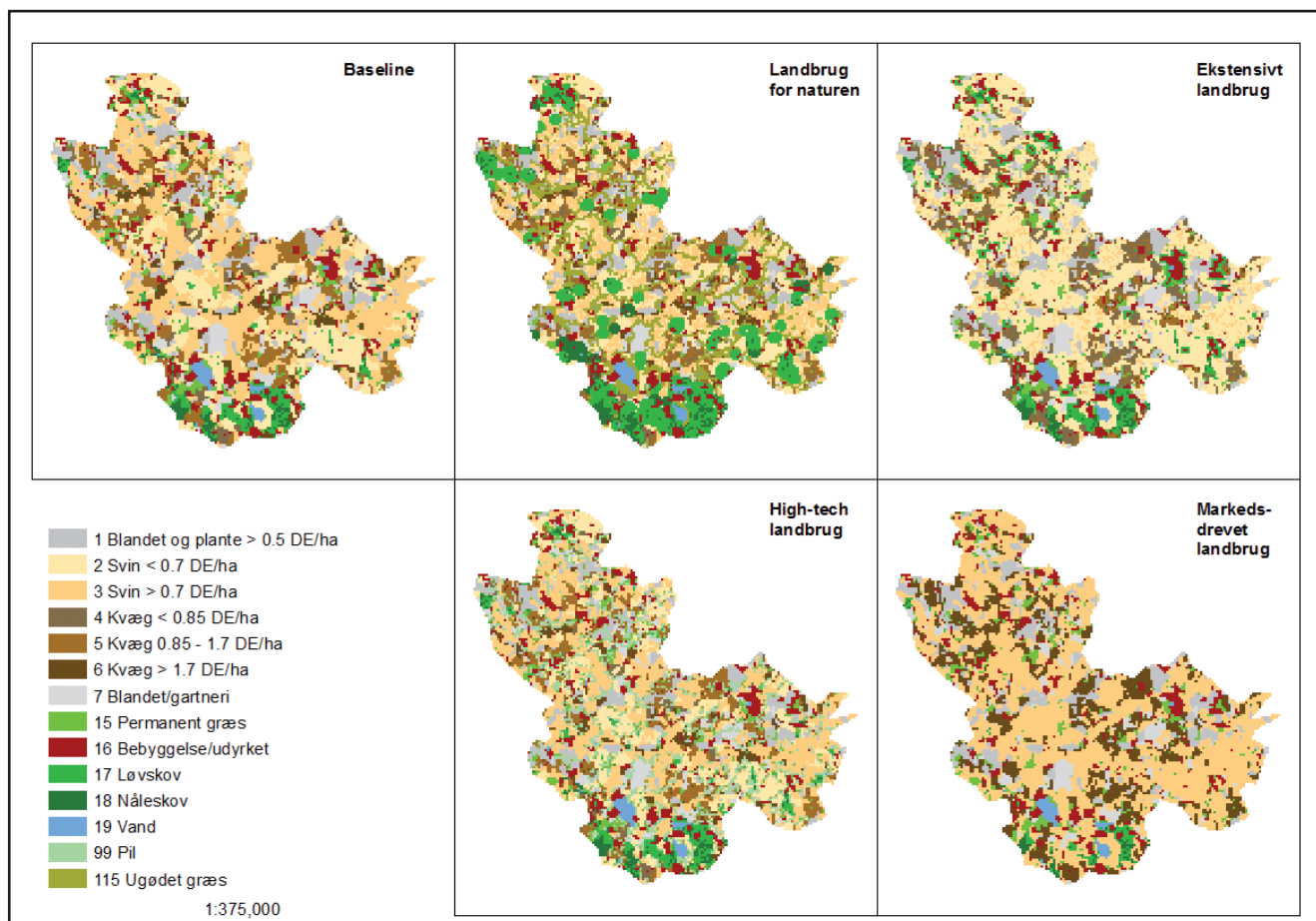
Under workshoppen diskuterede vi disse ændringer i arealanvendelse i forhold til mulige udviklingsveje for landbrug og natur i Danmark. Dette fulgte to forskellige akser i forhold til markeds kræfter og samfundsmæssige prioriteringer (Figur 1). Den vandrette akse er markedsprisen på fødevarer og andre landbrugsprodukter, og den lodrette akse er den ikke-markedsmæssige værdi af landskabet, som kan relatere til rent miljø (grundvand og overfladevand) og til rekreative værdier. Dette resulterer i fire forskellige scenarier for arealanvendelse: 1) Landbrug for naturen (reduktion i landbrugsareal og husdyrbrug), 2) Ekstensivt landbrug (reduceret intensitet i landbruget og husdyrbruget), 3) High-tech landbrug (højere produktivitet i landbruget), og 4) Markedsdrevet landbrug (øget landbrugsareal og højere intensitet).

Disse scenarier er konverteret til ændringer i overordnet og landbrugsmæssig anvendelse i Odense Å oplandet opstrøms Kratholm målestation (Figur 2). Dette område afvander kun omkring halvdelen af afstrømningsoplandet til Odense Fjord, men har dog en relativt stor del af den samlede landbrugsmæssige anvendelse i det samlede opland.

Der er ved ændringer af arealanvendelsen taget udgangspunkt i den nuværende arealanvendelse baseret på et 200x200 m grid, hvor den landbrugsmæssige anvendelse er delt op i forskellige bedriftstyper med forskellig husdyrintensitet (Figur 3). Denne baseline er efterfølgende modificeret for de forskellige scenarier ud fra nogle regler for hvor og hvordan arealanvendelsen skal ændres – i overensstemmelse med logikken i det pågældende scenarie.

Landbrug for naturen

I dette scenarie sker der et stort fald i landbrugsarealens størrelse, som reduceres med 36 % af arealens størrelse i baseline. Dette gøres ved at konvertere de gridceller, der ligger nærmest vandløb, søer og skove til græs



Figur 3. Arealanvendelse i de forskellige scenarier for Odense Å oplandet opstrøms Kratholm. Baseline viser den nuværende arealanvendelse.

eller skov. Husdyrtætheden er tilpasset så mængden af kvælstof tilført i husdyrgødning på landbrugsarealet er reduceret med 13 %. Dette er gjort ved at ændre gridceller fra højere til lavere husdyrintensitet. Mængden af kvælstof tilført landbrugsarealet pr. ha er reduceret med 40 % for at afspejle en lavere intensitet ved lavere priser på landbrugsprodukter. I forhold til de øvrige scenarier er andelen af landbrug i dette scenarie betydelig mindre nær ved vandløb og søer (Figur 4). Dette tidligere areal med landbrug er ændret til både permanent græs og skov.

Ekstensivt landbrug

I scenariet med ekstensivt landbrug sker der kun en mindre reduktion i landbrugsarealet på 3 %, og det antages at dette sker ved konvertering af gridceller tæt på byområder til løvskov. Husdyrtætheden i resten af landbrugsarealet ændres så den totale kvælstofmængde i husdyrgødning falder med 50 % i forhold til baseline. Dette er gjort ved at ændre fra højere til lavere husdyrtæthed i de enkelte gridceller. Desuden er der sket en reduktion i total-N mængden pr. ha på landbrugsarealet, så det samlet reduceres på 60

%. Resultatet er et generelt fald i intensiteten af landbrugsproduktionen i landskabet, men den overordnede geografiske fordeling af landbrug i oplandet er bibeholdt.

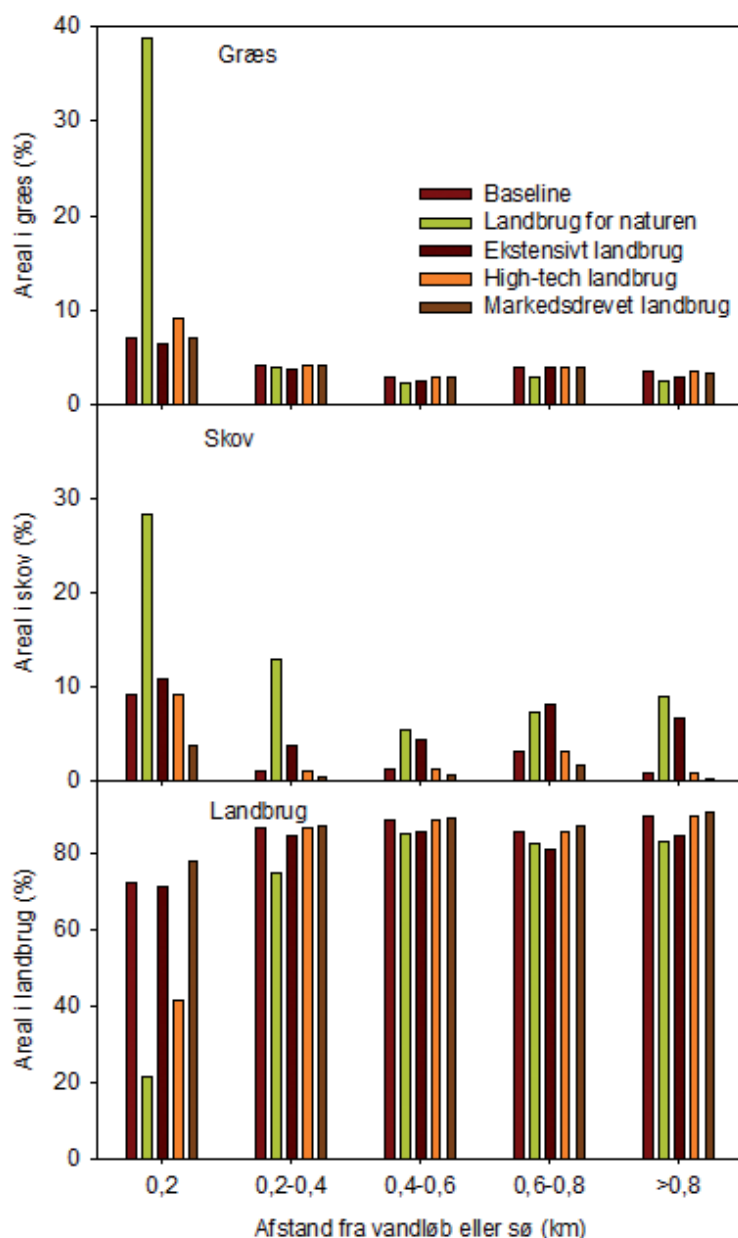
High-tech landbrug

Scenariet med high-tech landbrug indebærer som scenariet med ekstensivt landbrug et fald i landbrugsarealet på 3 %, men her sker det ved at ændre gridceller med landbrug tæt ved vandløb og søer til permanent ugødet græs.

Desuden er 15 % af landbrugsarealet ændret til flerårige biomasseafgrøder, hvilket her angives som pli med tilførsel af husdyrgødning. Disse flerårige energiafgrøder kan dog også være andre flerårige energiafgrøder med en betydelig biomasseproduktion (græsmarker eller elefantgræs). Husdyrtætheden på det resterende areal er justeret således, at der tilføres samme mængde total-kvælstof på landbrugsarealet som i baseline. Arealet med permanent græs og flerårige energiafgrøder

Boks 1. Deltagere i workshoppen om ændret arealanvendelse

John R. Porter, Manuel Monesino San Martin, KU-LIFE
 Jørgen E. Olesen, Christen D. Børgesen, AU-AGRO
 Erik Jeppesen, Anders Nielsen, Dennis Trolle, AU-BioScience
 Torben Sonnenborg, GEUS
 Anna Hvid, DTU-Risø
 Lise Andreasen, ICROFS
 Harley Bundgaard Madsen, Miljøcenter Odense
 Jørgen Bidstrup, Miljøcenter Aalborg
 Gustaf Højriis Bock, Leif Knudsen, Videncenter for Landbrug
 Thyge Nygaard, Danmarks Naturfredningsforening
 Bruno Sander Nielsen, Landbrug og Fødevarer
 Brian Jacobsen, Fødevarøkonomisk Institut, KU-LIFE



Figur 4. Arealanvendelse i form af permanent græs, skov og landbrug afhængig af afstand til vandløb eller sø i de forskellige scenarier.

er i scenariet placeret tæt på vandløb og søer, således at der er sket et betydeligt fald i landbrug her (Figur 4).

Markedsdrevet landbrug

I dette scenarie forudsættes en betydelig stigning i efterspørgslen på landbrugsprodukter, således at landbrugsarealet øges med 21 % af det ikke-dyrkede areal. Dette blev gjort ved at konvertere gridceller med skov og permanent græs til svinebrug. Efterfølgende er husdyrtætheden på landbrugsarealet øget med 63 % ved at konvertere gridceller fra

lavere til højere husdyrintensitet samt at konvertere plantebrug til husdyrbrug. Mængden af total-N tilført på markerne blev øget med 20 % ved at antaget et højere kvælstofbehov i afgrøderne.

Scenariernes relevans

Den fremtidige arealanvendelse er afhængig af mange forhold, ikke mindst politiske prioriteringer. For at kunne foretage sådanne prioriteringer er der behov for at kende konsekvenserne af forskellige udviklingsveje. I CRES har vi valgt at belyse nogle principielt

meget forskellige udviklingsveje, som afspejler sig i andel af areal med landbrug og i landbrugets intensitet. Vi har også valgt at medtage forskelle i den geografiske fordeling af udtagning af landbrugsareal, da dette må forventes at påvirke effekter på naturkvalitet.

I CRES har formålet været at belyse, hvordan klimaændringer spiller sammen med ændringer i arealanvendelse. I Odense Å oplandet opstrøms Kratholm er der i udgangspunktet et meget højt landbrugstryk, hvilket har betydet at ændringerne i arealanvendelse kun får mindre effekt. Effekterne vil kunne være anderledes i andre oplande afhængig af nuværende arealanvendelse. Overførsel af beregnede effekter fra Odense Å oplandet til andre egne af Danmark skal derfor gøres med stor forsigtighed.

Referencer

- /1/ Foley, J.A., Ramankutty, N., Brauman, K.A., Cassidy, E.S., Gerber, J.A., Johnston, M., Mueller, N.D., O'Connell, C., Ray, D.K., West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D. og Zaks, D.P.M. 2011: Solutions for a cultivated planet. *Nature* 478, 337-342.
- /2/ Smil, V. 2014: Eating meat: Constants and changes. *Global Food Security* 3, 67-71.
- /3/ Foley, J.A., DeFries, R., Asner, G., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S.R., Chain, F.S., Coel, M.T., Daily, G.C., Gibbs, H.K., Helkowski, J.H., Holloway, T., Howard, E.A., Kucharik, C.J., Monfreda, C., Patz, J.A., Prentice, I.C., Ramankutty, N. og Snyder, P.K. 2005: Global Consequences of Land Use. *Science* 309, 570-574.

JØRGEN E. OLESEN (JorgenE.Olesen@agrsci.dk) er professor ved Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi
 ERIK JEPPESEN (ej@dmu.dk) er professor ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience
 JOHN R. PORTER (jrp@plen.ku.dk) er professor ved Københavns Universitet, Institut for Plante- og Miljøvidenskab
 CHRISTEN DUUS BØRGESSEN (Christen.Borgesen@agrsci.dk) er seniorforsker ved Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi
 DENNIS TROLLE (dtr@dmu.dk) er seniorforsker ved Aarhus Universitet, Institut for Bioscience
 JENS CHR. REFSGAARD (jcr@geus.dk) er professor ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland
 TORBEN SONNENBORG (tso@geus.dk) er seniorforsker ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland
 IDA BJØRNHOLT KARLSSON (ika@ign.ku.dk) er PhD studerende ved GEUS og Københavns Universitet

Scenarier for fremtidig vandbalance og vandstrømning i Odense Å

Fremtidens klima er, selv hvis emissionen af CO₂ antages kendt, be-
hæftet med betydelige usikkerheder som skyldes forskelle mellem
klimamodeller. Tilsvarende vil valget af hydrologisk model påvirke
vores beregninger af det fremtidige vandkredsløb. Samtidig vil sam-
fundsdrivne ændringer i eksempelvis arealanvendelse påvirke det
hydrologiske kredsløb. Vi præsenterer her resultater, hvor vi har
kombineret fire klimamodeller, tre hydrologiske modeller og fire
arealanvendelsesscenarier. Der er fokuseret på forskellene i forud-
sigelserne af vandløbsafstrømningen i hhv. en tør, middel og våd
situation.

TORBEN O SONNENBORG, IDA KARLS-
SON, DENNIS TROLLE, CHRISTEN DUUS
BØRGESSEN, ERIK JEPPESEN, JØRGEN E
OLESEN & JENS CHRISTIAN REFSGAARD

Indledning

Klimaændringer forventes at få markante
effekter på vandkredsløbet i Danmark. Det
er imidlertid vanskeligt at give et nøjagtigt
bud på, hvordan fremtidens vandkredsløb vil
udvikle sig. Dels vil resultaterne fra forskel-
lige klimamodeller ikke være ens. Dels vil
samfundet udvikle sig i takt med klimaæn-
dringerne, og det må forventes, at der sker
en sideløbende ændring i arealanvendelsen
i Danmark. Arealet dækket af landbrug vil
sandsynligvis ændre sig, og det må også for-
ventes, at valget af afgrøder ændrer sig som
følge af f.eks. stigninger i temperaturen.
Sådanne ændringer i vegetationsdækket
vil påvirke blandt andet fordampningen og
dermed også vandressourcerne i grundvand
og vandløb. Endelig vil vores forudsigelser
af, hvordan ændringer i klima og arealanven-
delse påvirker vandkredsløbet også afhænge
af, hvilken hydrologisk model vi anvender til
at kvantificere effekterne. Vi vil her fokusere
på de usikkerheder i vandbalancen som

skyldes (1) valg af klimamodel, (2) fremtidig
arealanvendelse og (3) valg af hydrologisk
model.

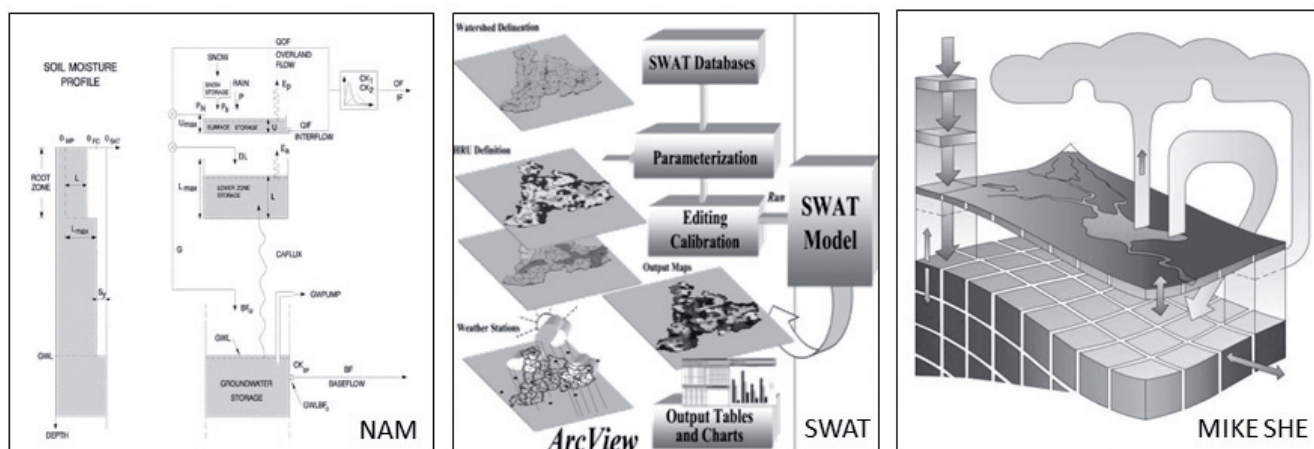
Metodik

På basis af en screening af resultaterne fra
EU-projektet ENSEMBLES har vi udvalgt fire
klimamodeller. Modellerne er udvalgt så de
repræsenterer hhv. en våd, en tør, en middel
og en varm klima udvikling blandt ENSEM-
BLES-modellerne. Alle fire modeller er kørt
med IPCC emissionsscenarioet A1B, og forskel-
lene skyldes derfor udelukkende, at model-
lerne ikke er opbygget helt ens, og at deres
parametre er forskellige. Resultaterne fra de
fire modeller er blevet nedskaleret til Odense
Å oplandet for perioden 2080-2099.

Ud over den nuværende arealanvendelse er
der anvendt fire fremtidsscenarier defineret i
/1/. De fire scenarier er baseret på forskellige
antagelser om bl.a. den økonomiske udvik-
ling. I det første scenarie, LU1, omlægges
store områder til skov eller permanent græs. I
LU2 ekstensiveres landbrugsproduktionen,
hvilket giver anledning til en mindre reduk-
tion i landbrugsareal. I LU3 udvikler landbru-
get sig i en mere teknologisk retning, hvilket
resulterer i omlægning til pile-planter og en
øget husdyrtæthed. Endelig beskriver LU4 en
markedsdriven virkelighed, hvor landbrugs-

arealet øges i forhold til det nuværende, og
der drives en meget intensiv produktion.

Til at kvantificere effekten af ændringer i
klima og arealanvendelser har vi anvendt tre
principielt forskellige hydrologiske modeller,
se Figur 1. Som den ene yderlighed er ned-
bør-afstrømningsmodellen NAM anvendt.
NAM er en model, hvor sammenhængen mel-
lem input og output ikke er baseret på en fy-
sisk beskrivelse af naturen. I stedet er der op-
stillet et ligningssystem, som vha. et sæt
empiriske parametre kan reproducere obser-
veret vandføring for et opland. Hele det be-
skrevne opland forudsættes at kunne beskri-
ves ved ét sæt parameterværdier, og der er
dermed ikke mulighed for at introducere en
rumlig variation i oplandskarakteristika. MIKE
SHE er valgt som en repræsentant for den an-
den ende af spektret, hvor den opbyggede
model så vidt muligt er baseret på en fysisk
beskrivelse af vandstrømningen. F.eks. er
strømningen i undergrunden baseret på Dar-
cy's lov. Modellen giver mulighed for at lave
en distribueret beskrivelse af både grund-
vandszonen, rodzonen, jordoverfladen og de
øvrige elementer i modellen. Der er med an-
dre ord mulighed for at specificere præcist,
hvor i oplandet der dyrkes hvede, eller på
hvilke arealer jordbunden er leret. Som en
mellemløbet mellem NAM og MIKE SHE er



Figur 1 Skematisk illustration af NAM, SWAT og MIKE SHE.

SWAT valgt. Til forskel fra MIKE SHE anvender SWAT ikke en opløsning af oplandet, som er baseret på beregningskasser. I stedet defineres et antal hydrologiske respons-enheder, indenfor hvilke der kan antages at være ensartede forhold. Der kan i princippet defineres et uendeligt antal enheder, og MIKE SHE og SWAT tilgangen kan derfor bringes til at ligne hinanden, når det gælder beskrivelsen af jordoverfladen og rodzonen. Til gengæld er de to modeller principielt forskellige i grundvandszonen, hvor SWAT benytter et lineært reservoir, som minder mere om tilgangen i NAM.

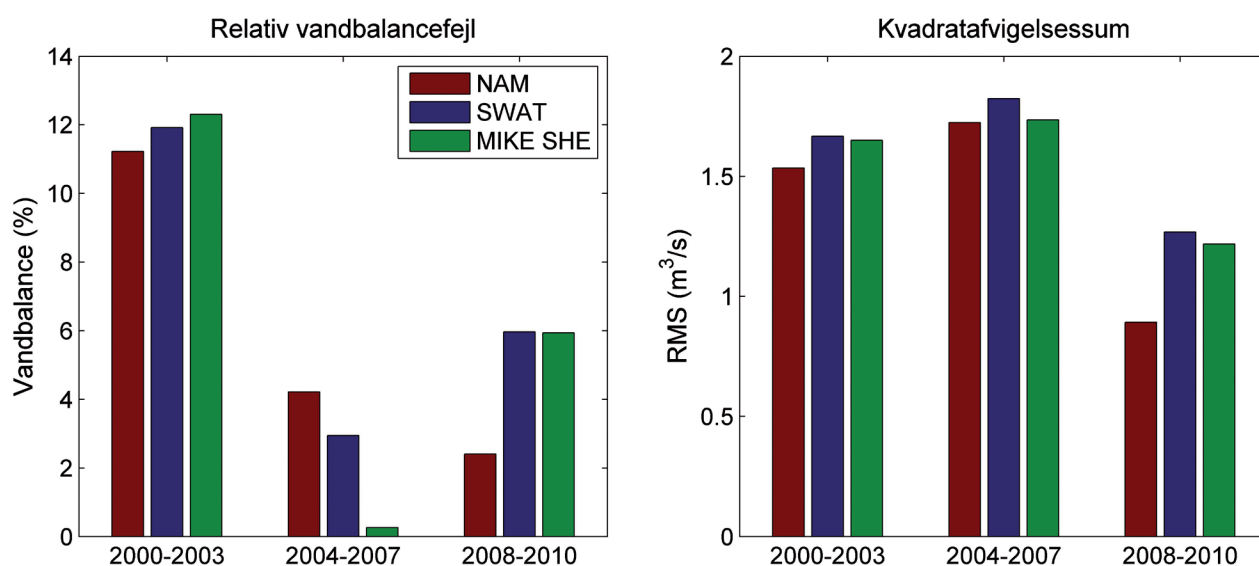
De tre modeller er opstillet så de i videst muligt omfang benytter samme input data (klimadata), samme simuleringsperiode (1990-2010), samme kalibreringsperiode (2004-2007) og samme kalibreringsmetodik. På Figur 2 ses forskellen mellem observeret og beregnet vandføring (til venstre) og kvadrat-

afvigelsessummen for udstrømningen fra et opland på Fyn (se /2/ for nærmere beskrivelse af oplandet) for de tre modeller. Det ses, at for kalibreringsperioden er vandbalancen lidt bedre for MIKE SHE end for NAM og SWAT. Til gengæld klarer NAM og SWAT sig lidt bedre i valideringsperioderne. Mht. kvadratafgivelsessummen (Figur 2, til højre) er de tre modeller stort set lige gode. Vi konkluderer derfor, at alle tre modeller kan simulere vandløbsafstrømning ved nedstrøms vandføringsstation med nogenlunde samme nøjagtighed.

Resultater

I Figur 3 ses, hvor meget vandføringen ændrer sig, når man går fra det nutidige klima til fremtidsklimaet i 2080-2099. Fremtidsklimaet er fundet med hver af de fire klimamodeller beskrevet ovenfor. For alle modellerne er resultater for 1%, 50% og 99% fraktilerne

fundet, svarende til den vandføring der overskrides i 99% af tiden, 50% af tiden og kun 1% af tiden. For 50% fraktilen, figuren i midten, er de tre hydrologiske modeller mere eller mindre enige om resultatet. Den "tørreste" klimamodel, ARPEGE-RM5.1, giver reduktioner i 50% fraktilen på ca. 30%. Den "vådeste" model, ECHAM5-HIRHAM5, resulterer i stigninger på mellem 40% og 60%. Hvis minimumsvandføringen betragtes, svarende til 1% fraktilen vist øverst i Figur 3, findes der generelt konsensus mellem de tre hydrologiske modeller. Når de hydrologiske modeller anvender input fra de to våde klimamodeller (ECHAM5-HIRHAM5, ECHAM5-RCA3), findes dog et markant anderledes resultat. Her forudsiger SWAT en stigning i 1% fraktilen på over 250%, mens NAM og MIKE SHE finder stigninger på 50% eller herunder. Det skal fremhæves, at da afstrømningen svarende



Figur 2 Resultater for vandbalance og kvadratafgivelsessum for kalibreringsperioden (2004-2007) og valideringsperioderne (2000-2003 samt 2008-2010).

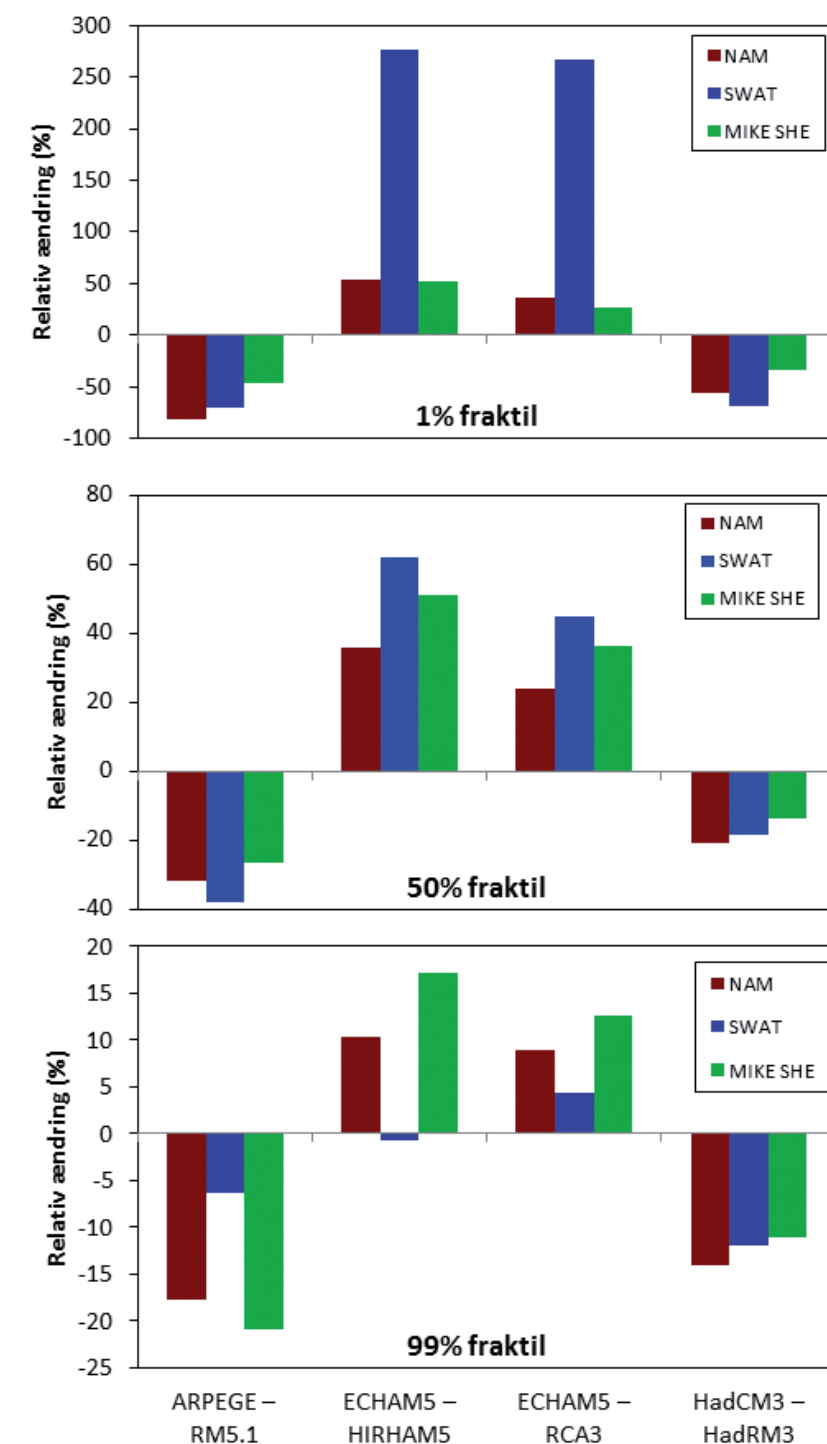
til 1% fraktilen er forholdsvis lav, skal der kun relativt små ændringer i den absolutte vandføring til for at opnå store procentuelle ændringer.

Tilsvarende uoverensstemmelser findes for 99% fraktilerne, nederst i Figur 3. Det skal bemærkes, at skalaen på denne figur dækker et betydeligt mindre interval end på de to andre figurer. Men der findes trods det igen en tendens til, at SWAT afviger fra de to andre hydrologiske modeller. Specielt når resultater fra klimamodellen ECHAM5-HIRHAM5 anvendes som input, divergerer resultaterne kraftigt. SWAT finder her et svagt fald i afstrømning for 99% fraktilen, mens NAM og MIKE SHE finder stigninger på mellem 10% og 20%.

På Figur 4 er effekten af forskellige arealanvendelsesscenarier vist for et fremtidigt klima, som er givet ved klimamodellen ECHAM5-RCA3. Der er kun vist resultater fra SWAT og MIKE SHE, da det ikke er muligt at ændre afgrødefordelingen i NAM. I figuren er vist, hvor meget afstrømningen fra oplandet ændrer sig, når den nutidige arealanvendelse skiftes ud med de fire scenarier. Det skal først bemærkes, at ændringerne mellem arealanvendelse i Figur 4 generelt er betydeligt mindre end ændringerne mellem klimamodeller præsenteret i Figur 3. Klimaændringerne har dermed større effekt på afstrømningen end arealanvendelsen har. For MIKE SHE ses ændringerne i arealanvendelse at have relativ lille betydning, i de fleste tilfælde nogle få procents ændring af afstrømning. Effekten er markant større for SWAT, specielt for scenarie 1 og 3. I begge scenarier reduceres landbrugsarealet betydeligt, og mens det i scenarie 1 erstattes af skov og permanent græs, så erstattes det scenarie 3 også af pileplantager. De relativt store ændringer, som findes med SWAT, skyldes delvist ændringer i den aktuelle fordampning, men skyldes måske nok så meget, at dræningen på arealer, som omlægges fra landbrug til skov, antages at ophøre (og vice versa). Den manglende dræning på skovarealerne må forventes at have en betydelig effekt på de fundne resultater.

Konklusioner

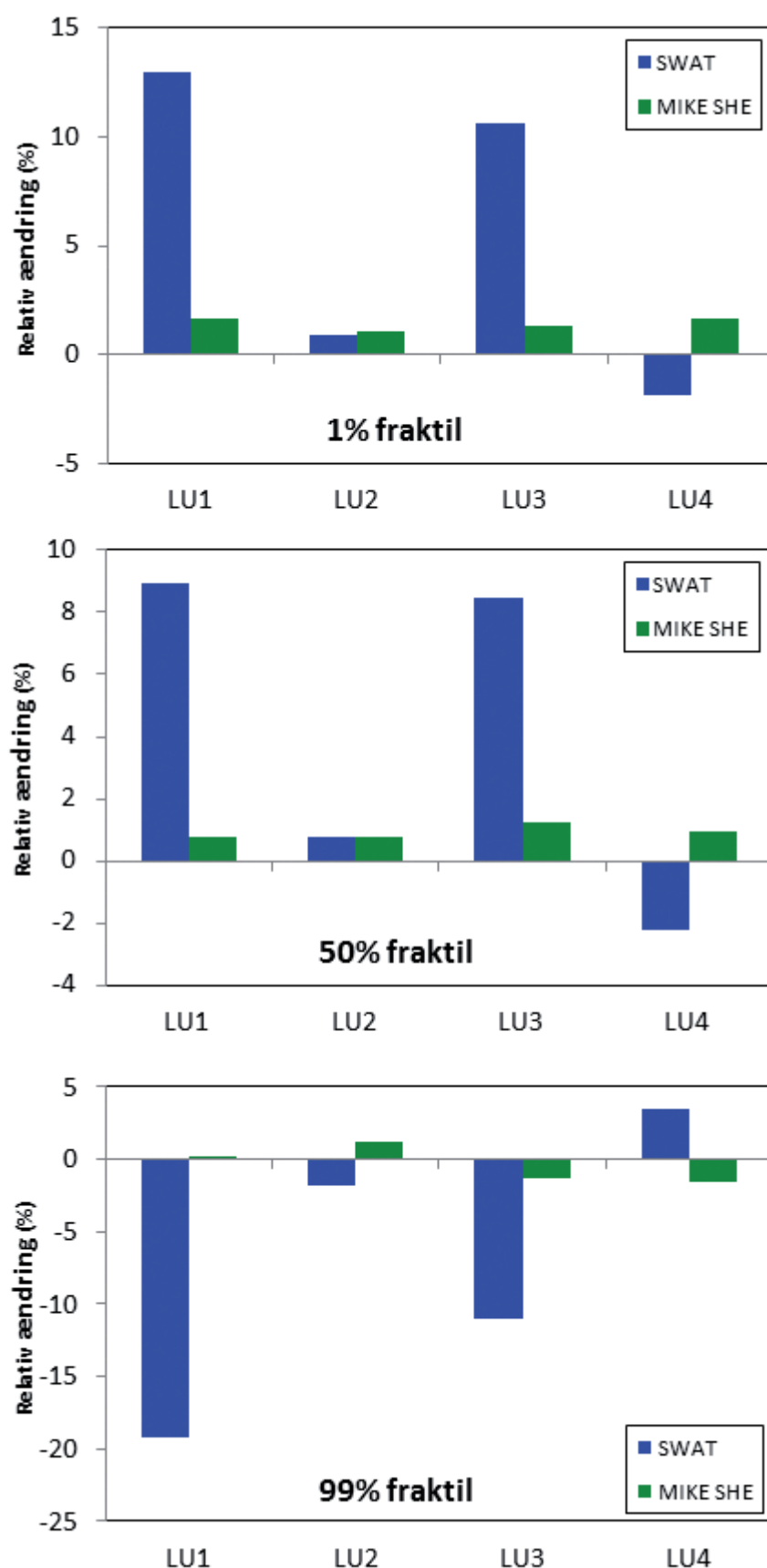
Klimaændringerne vil, selv under antagelse af et relativt moderat emissionsscenarie som A1B, få markante effekter på fremtidens vandkredsløb. Valget af klimamodel har imidlertid stor betydning for fremskrivningerne af vandløbsafstrømning, og vil i de fleste tilfælde være bestemmende for, om man kan forvente en stigning eller et fald i afstrømning. Størrelsen af ændringerne afhænger til en vis grad af valget af hydrologisk model og hvilket afstrømningsregime man fokuserer



Figur 3 Ændring i vandføring for NAM, SWAT og MIKE når de påføres et fremtidigt klima (2080-2099) bestemt ved anvendelse af fire forskellige klimamodeller.

på. Hvis middelfafstrømningen (eller 50% fraktilen) betragtes, er de tre hydrologiske modeller forholdsvis enige om, hvordan klimaændringerne vil påvirke afstrømningen, og her er valg af klimamodel helt afgørende for resultatet. For de lave afstrømninger (1% fraktilen) blev der fundet store forskelle mellem de hydrologiske modeller, specielt i de tilfælde, hvor klimaet bliver mere vådt. For de høje afstrømninger (99% fraktil) var der også forholdsvis stor uoverensstemmelse mellem

de tre hydrologiske modellers forudsigelser, og i et enkelt tilfælde (for klimamodellen ECHAM5-HIRHAM5) var de tre modeller ikke engang enige om, hvorvidt ændringen i vandføring skulle være positiv eller negativ. Det må derfor konkluderes, at det ikke er uvæsentligt, hvilken hydrologisk model der benyttes, når effekten af klimaændringerne skal kvantificeres. Det er desværre specielt i de kritiske perioder for vandløbene, ved både lav og høj afstrømning, at uoverens-



Figur 4 Effekt af ændringer i arealanvendelse på vandløbsafstrømning i fremtidigt klima (2080-2099 – fundet vha. klimamodellen ECHAM5-RCA3) for hhv. SWAT og MIKE SHE.

stemmelsen er størst. Forsat arbejde med modeludvikling efter dette ensemble koncept er derfor nødvendigt. Resultaterne for ændringer i arealanvendelse indikerer, at for de to modeller, der er anvendt her, har vegetationen ikke signifikant betydning for fordampningen og dermed vandløbsafstrømningen. Der opnås betydeligt større effekter, hvis ikke kun vegetationen men også dræningsintensiteten ændres. Det må forventes, at omlægning fra landbrug til eksempelvis skov vil resultere i, at drænrørene vil blive ødelagt og at vandet derfor ledes langsommere væk fra de pågældende arealer. Det er imidlertid vanskeligt at forudsige, hvor meget dræningsintensiteten reduceres, og det må derfor forventes, at sandheden ligger et sted mellem SWAT og MIKE SHE resultaterne. Generelt indikerer resultaterne dog, at ændringerne i arealanvendelse (med eller uden dræn) har mindre betydning fra vandløbsafstrømningen end valg af klimamodel eller valg af hydrologisk model.

Referencer

- /1/ Olesen, J.E. et al. (2014) Scenarier for arealanvendelse og klima i Odense Å, Vand & Jord, dette nummer.
- /2/ Sonnenborg, T.O., I.B. Karlsson, J.C. Refsgaard, og K.H. Jensen (2014) Vandressourcer i en 6 graders varmere verden, Vand & Jord, dette nummer.

TORBEN OBEL SONNENBORG (tso@geus.dk), Ida B. Karlsson, og JENS CHRISTIAN REFSGAARD er hhv. senior forsker, phd-studerende og forskningsprofessor ved GEUS. DENNIS TROLLE og ERIK JEPPESEN er hhv. senior forsker og professor ved Institut for Bioscience, Aarhus Universitet, CHRISTEN DUUS BØRGESSEN og JØRGEN E. OLESEN er hhv. seniorforsker og professor ved Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet.