

Drivhusgasser fra nye søer

Udveksling af drivhusgasser mellem søer og luften har kun i sjældne tilfælde været undersøgt systematisk og sjældent omfattet både kul-dioxid, metan og lattergas. Det er overraskende, da søer kan være vigtige kilder til især kuldioxid og metan. Vi har som de første undersøgt udledningen af de tre drivhusgasser fra nye danske søer for at vurdere gassernes relative betydning. Målingerne har kun været foretaget som en ugelang kampagne i august, så generalisering er vanskelig, men der tegner sig alligevel et billede.

THOMAS DAVIDSON, KENNETH THORØ
MARTINSEN, JOACHIM AUDET, ETI LEVI,
JIANMING DENG, MARTIN SØNDER-
GAARD, SARA EGEMOSE, LARS BAASTRUP-
SPOHR & KAJ SAND-JENSEN

Studier gennem de seneste år har vist, at de ferske vande udleder alle tre drivhusgasser, kuldioxid (CO_2), metan (CH_4) og lattergas (N_2O), som driver klimaforandringerne. Søer rummer de biogeokemiske processer, der kan danne betydelige mængder af ovennævnte drivhusgasser, samtidig med, at de kan optage og deponere kulstof i søbunden /1, 2/. Global opvarmning forventes i sig selv at kunne øge udledningen af drivhusgasser fra vandløb og søer ved at accelerere nedbrydningen af organisk stof og skabe iltfrie forhold, der fremmer dannelse af metan og lattergas /3,4/. Mesokosmosforsøg i lavvandede søer har vist, at kombinationen af opvarmning og næringsberigelse kan øge udledningen af metan kraftigt /5/. Med klimaforandringer kan søer derfor både give positive og negative feedbacks, hvilket gør det vigtigt at indsamle data, så vi bedre kan forudsige deres rolle i fremtiden.

Forvaltning af søer og deres klimaaftryk

Pålidelige data af drivhusgassernes dynamik i danske ferske vande er en mangelvare. Især er der utilstrækkelige data til at forstå, hvad der styrer drivhusgastabene (emissioner)

Boks 1: Måling af drivhusgasser fra søer

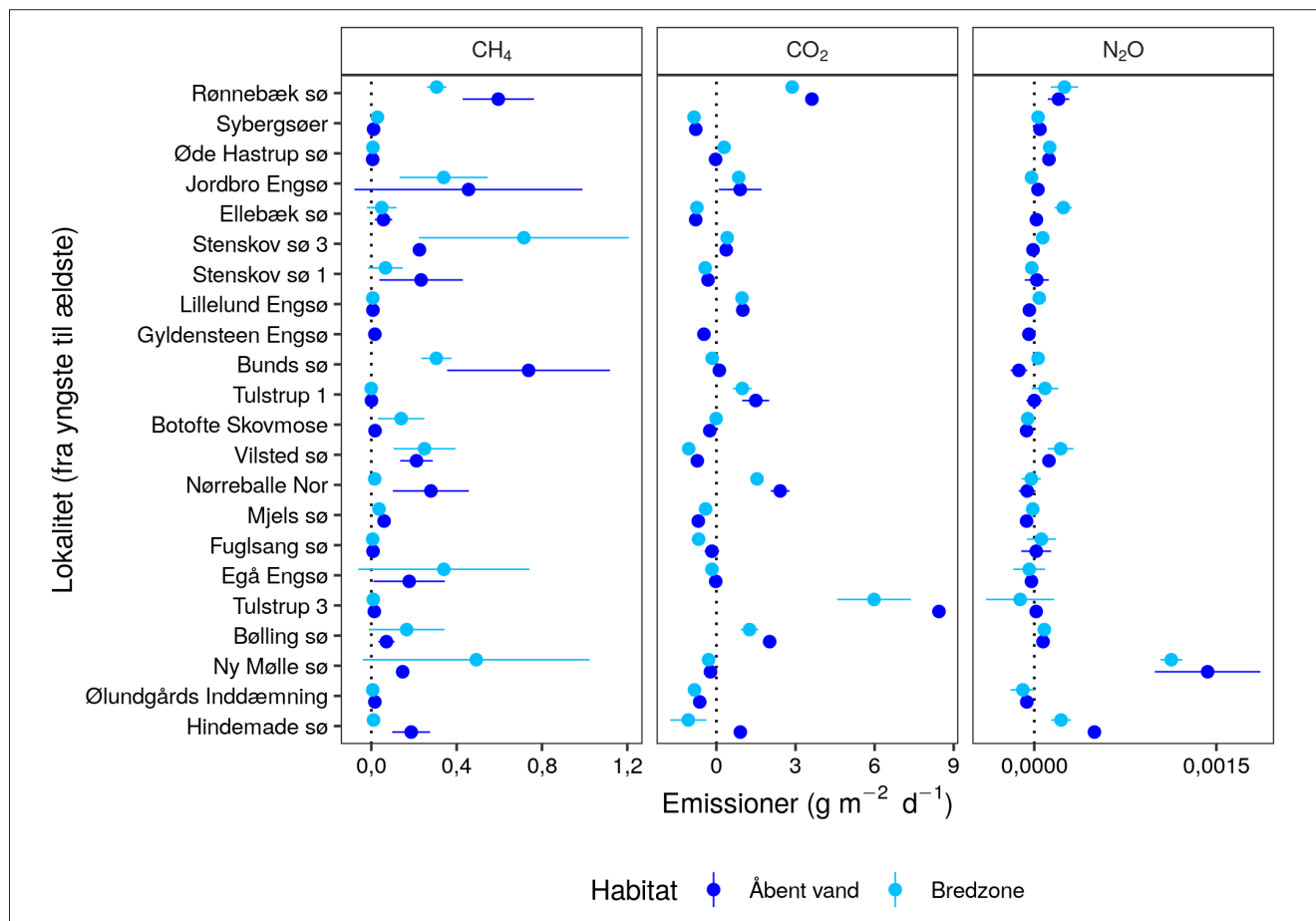
I dette studie har vi målt udvekslingen af de tre drivhusgasser fra 22 nye søer af forskellig alder. Udvekslingen måles med flydekamre (se foto), som placeres i grupper af 2-3 kamre på det dybeste sted i søen og på lavt vand nær bredden. I søer med områder med tæt plantedække blev en gruppe af kamre placeret her. Fra flydekammerne udtages gasprøver med 10-20 minutters mellemrum over en periode på 1,5 til 2 timer. Koncentrationerne af CO_2 , metan og lattergas i prøverne bestemmes derefter på en gaskromatograf. Ud fra koncentrationændringerne i kammeret over tid kan udvekslingen beregnes. Den blev målt en gang på hver sø i dagstimerne i sensommeren i 2017, 2018 og 2019. Ud over målinger over kort tid, blev et flydekammer også efterladt på søen i 5-7 dage, hvorefter der blev udtaget en gasprøve. Målingen over lang tid giver et estimat for emissionen af metan som bobler oven i den fortløbende diffusive emission. Denne 'boble flux' kan variere meget mellem forskellige steder i søen og kræver derfor flere kamre for at kunne blive bestemt præcist



og kunne forudsige, hvordan de kan forventes at ændre sig i fremtiden. Denne forståelse er nødvendig, hvis vi ønsker at kunne forvalte naturlige systemer på en måde, som mindsker deres klimaaftryk. Denne viden er også meget

relevant for forvaltning af søer og etablering af nye søer.

Det er tillige vigtigt at øge vores forståelse af, hvordan drivhusgasdynamikken i søer er relateret til søernes biodiversitet og økologi-



Figur 1. Variationen i drivhusgasemissioner fra 22 nye søer rangeret efter alder (yngst for oven). Fluxen af de tre drivhusgasser fra bredzonen (lys blå) og det åbne vand (mørk blå) er vist som middelværdi +/- standardafvigelse. Metan: CH₄ og lattergas: N₂O.

ske tilstand. Eksisterer der konflikter eller synergier mellem forskellige formål i forvaltningen? Vil en forvaltning, der søger at øge biodiversitet kunne resultere i højere drivhusgasemission? Omvendt, kan de negative virkninger af eutrofieringen på den økologiske tilstand føre til øget CO₂-optagelse fra atmosfæren. At forstå og kvantificere drivhusgasdynamikken i nye søer indgår derfor også i en samlet vurdering af deres betydning for klima, natur og biodiversitet.

Et vigtigt aspekt i dette studie var at analysere alle tre drivhusgasser, idet de enkelte molekylers egenskaber er meget forskellig. I forhold til CO₂ er drivhuseffekten 28 gange større for metan og 298 gange større for lattergas. Det har vi taget hensyn til ved at omregne drivhusgasemissioner til CO₂-ækvivalenter (dog ikke figur 1). Vi har målt drivhusgasemissioner (Boks 1) fra 22 nye søer med forskellig alder spredt ud over Danmark. Der blev målt både i bredzonen og på det åbne vand. Alle målinger er udført i dagtimerne og i løbet af en uge i august. Da emissionerne kan ændre sig meget fra uge til uge og mellem årstiderne, kan målingerne ikke give et billede af årsbalancerne, men de giver et indtryk af forskelle mellem søerne og af betyd-

ningen af de tre drivhusgasser, der kan være om sommeren. Den begrænsede måleaktivitet betyder, at disse målinger mest skal betragtes som et pilotstudie af drivhusgasdynamik i nye søer.

Store variationer i drivhusgasudvekslingen

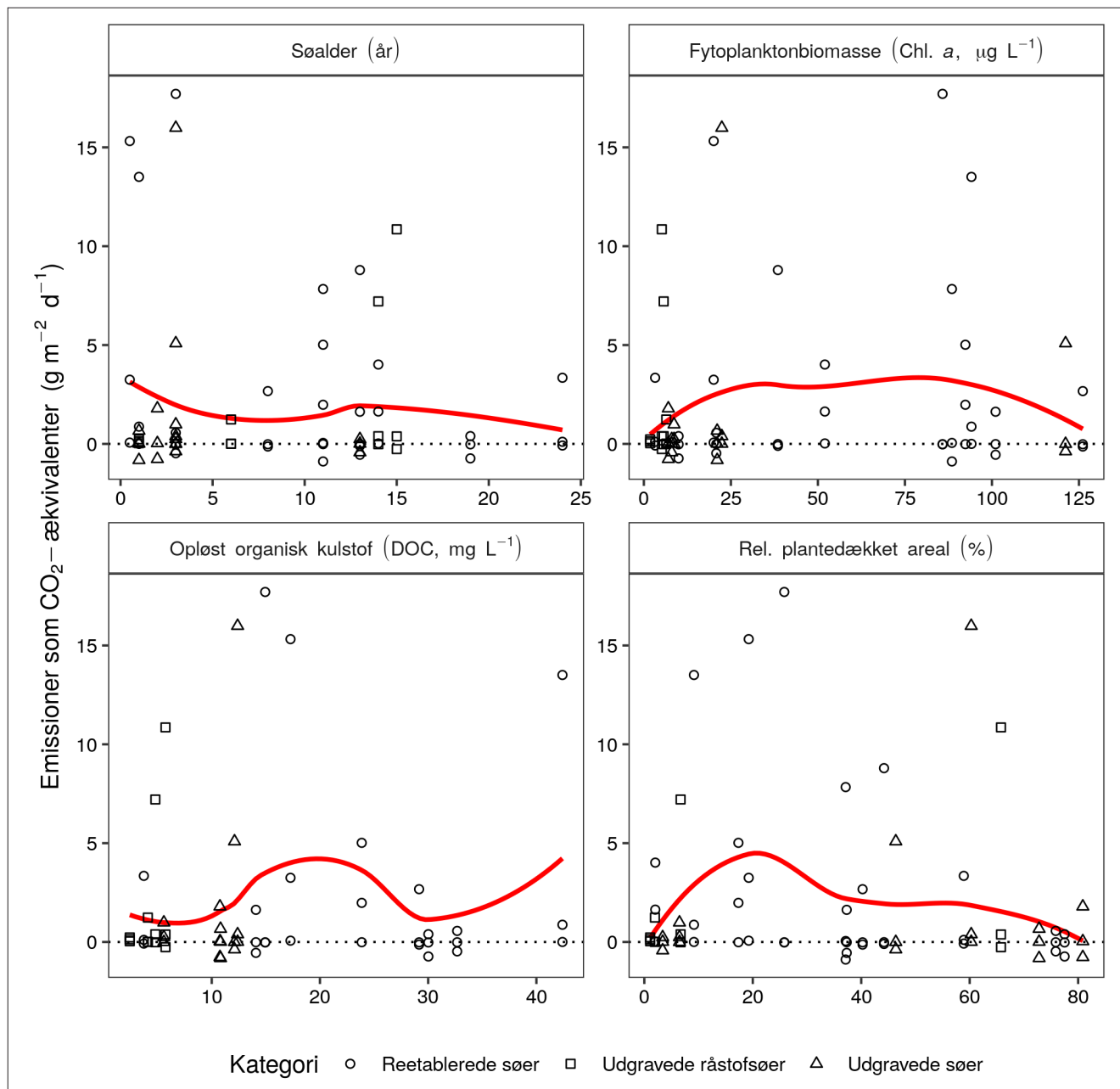
Variationen var stor i udvekslingen af drivhusgasser mellem søoverfladen og luften mellem de forskellige søer og mellem de tre gasser (Figur 1). Mange af søerne optog CO₂ fra luften, i hvert fald ved vores målinger i dagtimerne i august, når primærproduktionen var høj, men der var betydelige forskelle mellem søerne. Årsagerne til disse forskelle er dog svære at udlede, fordi der ikke var stærke sammenhænge mellem CO₂-udvekslingen og de målte miljøvariable (Figur 2). Nogle svage sammenhænge var dog til stede. For eksempel, så havde søer med relativt høje CO₂-emissioner en tendens til have et mindre areal dækket af undervandsplanter og et højere indhold af organisk stof i sedimentet. Søer uden undervandsplanter havde dog ikke altid høje CO₂-emissioner.

Mønstrene i lattergasemissionerne er også meget variable mellem søerne, som både kan

optage og frigive. En enkelt sø, råstofsøen Ny Mølle Sø, frigav ganske meget lattergas til atmosfæren, men denne dynamik kan ikke forklares ud fra de eksisterende data.

Af de tre drivhusgasser, vi har målt, udviste metan den største variation. Der var både store variationer mellem søerne, men også imellem de forskellige steder, hvor der blev målt i den enkelte sø (i bredzonen eller på åbent vand). Det skyldes sandsynligvis til dels de forskellige transportveje for metan fra søbunden til luften (Boks 2). Frigivelse af metan som bobler kan føre til meget pludselige, meget høje, men også meget lokale frigivelser til luften. Det viser sig som høje standardafvigelser omkring middelværdierne i Figur 1. På trods af denne høje variation, følger metanemissionerne et vist mønster. For eksempel målte vi de højeste emissioner fra helt nye søer, omend de ikke alle havde høje emissioner.

Udover øget metanemission med stigende temperatur, så kan andre miljøvariable, ifølge tidligere undersøgelser, også udvise sammenhænge med emissionen; det gælder fytoplanktonbiomassen (som klorofyl a, /6/), opløst organisk kulstof (DOC) i søvandet /7/ og organisk kulstof i sedimentet. Derimod har et stort arealdække af undervandsplanter vist



Figur 2. Emission af drivhusgasser fra nye søer udtrykt som CO₂-ækvivalenter som funktion af søalder (år), fytoplanktonbiomasse (klorofyl a, µg L⁻¹), opløst organisk kulstof i søvandet (DOC, mg L⁻¹) og relativt plantede areal (%). Den røde linje er en 'LOESS smoother', som viser tendensen i data. De forskellige søkategorier henviser til baggrunden for søernes dannelse (se Egemose et al. 2020, dette nummer).

den modsatte effekt /5/. Der var dog ingen tydelige mønstre i de data, vi indsamlede (Figur 2). Manglen på tydelige sammenhænge skyldes nok, at emissionerne kun blev målt en enkelt gang i sensommeren og de, som allerede nævnt, kan variere meget med årstiden og vind og vejr. Data med stor tidslig opløsning, men derfor begrænset til én eller meget få søer, ville derfor være bedre egnet til at undersøge de miljøvariable, som kan forventes at styre drivhusgasdynamikken.

De meget forskellige søtyper som indgår blandt de nye undersøgte søer, gør det også svært at fortolke resultaterne. Det er især søer i tidligere råstofgrave, som adskiller sig fra de øvrige søer. Råstofsøernes emissioner var

domineret af CO₂. Metantabet kan være begrænset af, at råstofsøerne var de mest næringsfattige, og dermed kan forventes at have mineralske sedimenter med lav metanproduktion. Deres større vanddybder betyder også, at de på de dybeste steder udvikler et temperaturspringlag og metanfrigivelsen fra sedimentet derfor til dels tilbageholdes og omsættes i bundvandet.

På trods af mangler i vores data, så giver de dog mulighed for at vurdere den relative betydning af forskellige drivhusgasser i forhold til deres klimapåvirkninger i en sensommersituation. Udledningen af metan kan forventes at være højere i sommerhalvåret og meget lille i vinterhalvåret på grund af temperaturen. Sæ-

sonændringer i dannelsen og tabet af lattergas er sværere at forudsige da den i høj grad afhænger af tilgængeligheden af nitrat /8/. Omvendt kan tabet af CO₂ til luften forventes at være størst om efteråret og vinteren, hvor forbruget til primærproduktionen er lavt pga. manglen på lys, mens CO₂-dannelsen ved nedbrydning af organisk stof fortsætter gennem efteråret og vinteren. Er søerne lagdelte om sommeren, vil der ved omrøring af vandmassen i efteråret ske en høj, pludselig frigivelse, når bundvand rigt på CO₂ fordeles i hele vand søjlen og skaber overmætning ved vandoverfladen.

Vores data fra august – alle omregnet til CO₂-ækvivalenter ved at tage hensyn til de

større drivhusgaseffekter for metan (28) og lattergas (298) – viser tydeligt, at metan dominerer emissionerne i de nye søer, bortset fra råstofsøerne Tulstrup 1 og 3 (Figur 3). Tabet af lattergas er i alle tilfælde forsvindende. Selv om vi ikke har medtaget metantabet som bobler, så dominerer det diffusive metantab de nye søers drivhusgaspåvirkning. Vores simple langtidsestimat for metantabet over en uge matchede i øvrigt mønstrene for det diffusive metantab (Figur 4). I eksemplet fra Hindemadede, var tabet af metan fra lavt vand med mange vandplanter på bunden således markant lavere end tabet fra dybt vand uden planter på bunden. Den samlede opgørelse af de tre drivhusgasser illustrerer endvidere – med forbehold for at dette er baseret på denne ene augustmåling – at langt de fleste søer er nettobidragydere af klimagasser til atmosfæren.

Hvad har vi lært?

Vores resultater bygger på observationer i dagstimerne i august. Værdierne vil variere både over døgnet, med vejret og med sæsonerne, så en solid vurdering af de nye søers klimaaftryk kræver grundigere undersøgelser. Data viser dog tydeligt, at metan er en vigtig komponent i drivhusgasdynamikken i søerne

Boks 2: Frigivelsen af alle tre drivhusgasser

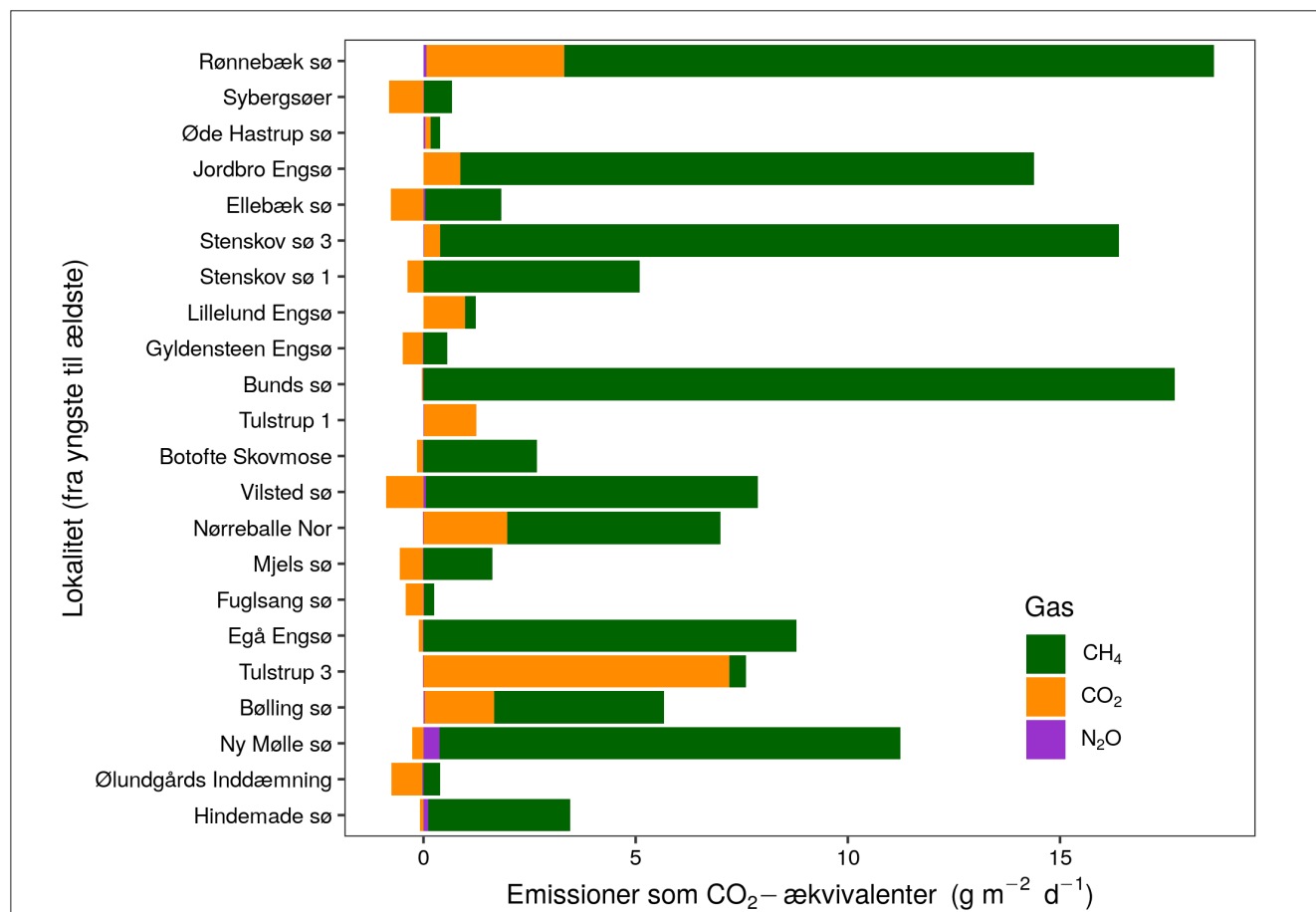
Frigivelsen af de tre drivhusgasser kan foregå ad forskellige veje. CO₂ er meget opløseligt i vand og derfor foregår transporten fra vand til atmosfære, eller den modsatte vej, via diffusion ved en forskel i partialtrykket mellem vand og luft. Metan produceres for det meste under iltfrie forhold i sediment, og selvom metan er mindre opløseligt end CO₂, så opløses det også og kan derved transporteres ved diffusion mellem søvandet og luften. Men når metanproduktionen overgår opløsningshastigheden på lavere vand, så dannes metanbobler som periodisk og uforudsigeligt kan frigives direkte til atmosfæren, den såkaldte 'boble-flux'. Disse bobler kan have koncentrationer af metan på flere 100.000 ppm, mens atmosfæren indeholder blot 1,6 ppm. Boblerne kan derfor udgøre et vigtigt tab af metan til luften. Derudover kan der transporteres gas mellem vand og atmosfære via planternes luftkanaler. Her fokuserer vi på de to første transportveje. Lattergas dannes ved denitrifikation under iltfrie forhold. Lattergas transporteres overvejende via diffusion, men ved forhøjede koncentrationer også i bobler.

uanset deres alder, og metanemissionerne fra søoverfladen resulterede i en generel negativ effekt af søer på atmosfærens indhold af drivhusgasser. De store emissioner af metan, og i mindre grad af CO₂, fra nye søer kan dog være et korttidsfænomen med mindre indflydelse på klimaet, hvilket kræver mere detaljerede studier over længere tid og bredere vurderinger. Det er dog opløftende, at data indikerer, at søer med bedre vandkvalitet havde minimal og nogen gange endda en positive indflydelse ved at optage drivhusgas-

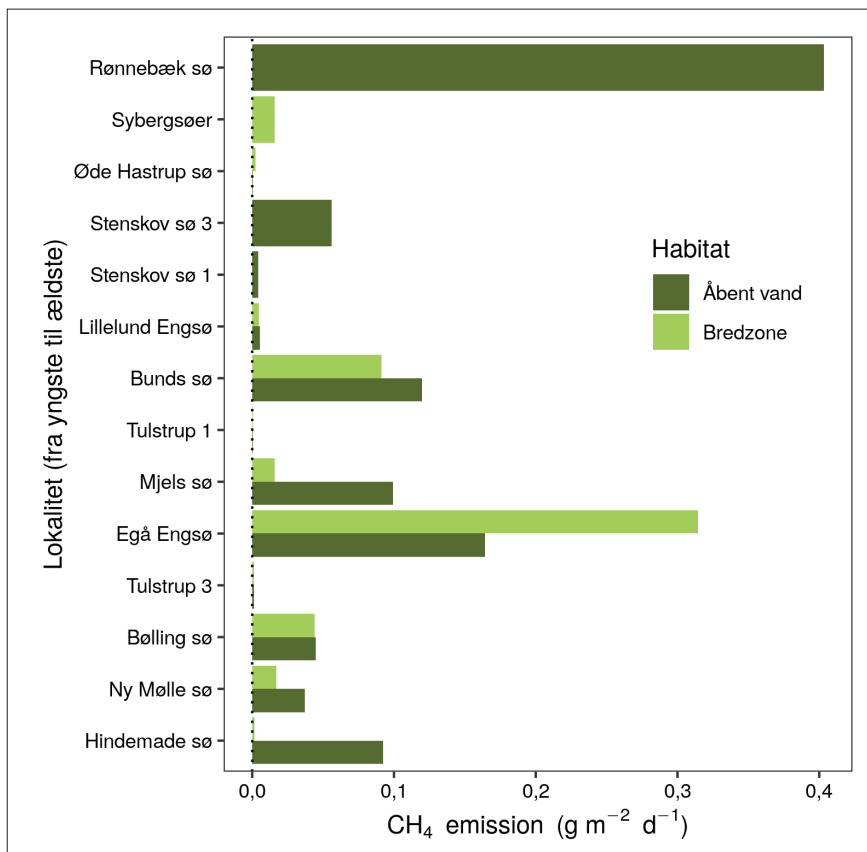
ser som i Gyldensteen Engsø, Fuglsang sø og Ølundgårds inddæmning.

I et større perspektiv

Vurderingen af drivhusgasbalancerne for de nye søer bør ses i et større perspektiv, der også inddrager balancerne fra de nu oversvømmede jorde og fra vandløbene før området blev sat under vand. Drejede det sig om dyrkede, kulstofrige lavbundslande, så havde de alle uden undtagelse en meget stor frigivelse af CO₂ og en vis frigivelse af metan



Figur 3. Den totale drivhusgasemission i august omregnet til CO₂-ækvivalenter i 22 nye søer rangeret efter alder (yngste for oven) med de tre drivhusgassers individuelle bidrag. Der er angivet et gennemsnit af målinger fra bredzone og åbent vand.



Figur 4. Langtidsemission af metan målt over 5-7 dage i bredzonen (lys grøn) og på åbent vand (mørk grøn). Fra nogle af søerne er der kun målinger fra én habitattype (brede søjler).

og lattergas /9/. Vandløbet, der nu fører vand til søen, havde også på sit tidligere forløb en markant CO₂-frigivelse til luften. Afløbet fra søen kan frigive metan, men vil nu have en meget lav CO₂-frigivelse, fordi vandets lange opholdstid betyder, at søen og afløbet kommer tæt på CO₂-ligevægt mellem vandet og luften /10/. Endelig kan CO₂-frigivelsen længere nede ad vandløbet dæmpes af den sedimentation af organisk stof, der sker i søen, og som nu ikke vil blive omsat til CO₂, som det tidligere skete. Nu kan det organiske stof i stedet hobes op på søbunden og med tiden føre til ny tørvedannelse.

Disse overordnede vurderinger af drivhusgasbalancer i forbindelse med etablering af nye søer kræver overvejelser og målinger på

landarealer og i vandløbene før søen bliver etableret, og målinger i søen og i vandløbet efter søen er etableret. Derudover skal tilgængeligheden af omkostningseffektive metoder til at måle emissionerne øges. CO₂ koncentrationer kan allerede nu bestemmes med automatiske sensorer og lignende teknologi er på trapperne for metan. Det er nogle af fremtidens muligheder og udfordringer.

Referencer

/1/ Holgerson M.A. & Raymond P.A. 2016. Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds. *Nature Geoscience* 9: 222-226.
 /2/ Taylor S., Gilbert P.J., Cooke D.A., Deary M.E. & Jeffries M.J. 2019. High carbon burial rates by small ponds in the landscape. *Frontiers in Ecology and the*

Environment 17: 25-31.
 /3/ Martinsen K.T., Kragh T. & Sand-Jensen K. 2020. Carbon dioxide efflux and ecosystem metabolism of small forest lakes. *Aquatic Sciences* 82, 9.
 /4/ Weyhenmeyer G.A., Kosten S., Wallin M.B., Tranvik L.J., Jeppesen E. & Roland F. 2015. Significant fraction of CO₂ emissions from boreal lakes derived from hydrologic inorganic carbon inputs. *Nature Geoscience* 8: 933-936.
 /5/ Davidson T.A., Audet J., Jeppesen E., Landkildehus F., Lauridsen T.L. & Søndergaard M. et al. 2018. Synergy between nutrients and warming enhances methane ebullition from experimental lakes. *Nature Climate Change* 8: 156-160.
 /6/ DelSontro T., Beaulieu J.J. & Downing J.A. 2018. Greenhouse gas emissions from lakes and impoundments: Upscaling in the face of global change. *Limnology and Oceanography* 21: 64-75.
 /7/ Zhou Y., Zhou L., Zhang Y., Garcia de Souza J., Podgorski D.C. & Spencer, R.G.M. et al. 2019. Autochthonous dissolved organic matter potentially fuels methane ebullition from experimental lakes. *Water Research* 166: 115048.
 /8/ Audet J., Carstensen M.V., Hoffmann C.C., Lavaux L., Thieme K. & Davidson T.A. 2020. Greenhouse gas emissions from urban ponds in Denmark. *Inland Waters*: 1-13.
 /9/ Tiemeyer B., Freibauer A., Borraz E. A., Augustin J., Bechtold M., Beetz S., Beyer C., Ebli M., Eickenscheidt T., Fiedler S. & Förster C. 2020. A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators* 109, 105838.
 /10/ Sand-Jensen, K., Christensen J.C.B., Pedersen N.L. & Stæhr P. A. 2007. Vandløbene er et vindue for CO₂-frigivelse til atmosfæren. *Vand & Jord* 14: 146–150.

Seniorforskere THOMAS DAVIDSON, MARTIN SØNDERGAARD, forsker JOACHIM AUDET og akademisk medarbejder ETI LEVI er ansat ved Bioscience, Aarhus Universitet. Associate professor JIANMING DENG er fra Nanjing Institute for Geography and Limnology. Lektor LARS BAASTRUP-SPOHR, professor KAJ SAND-JENSEN og videnskabelig assistent KENNETH THORØ MARTINSEN er fra Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet. Lektor SARA EGEMOSE er fra Biologisk Institut, Syddansk Universitet.