

CO₂ i Skandinaviens vandløb analyseret med maskinlæring

Vi trænedede modeller på baggrund af kemiske målinger i danske, finske og svenske vandløb samt oplandskarakteristik for at kunne forudsige vandløbenes CO₂ indhold. Herefter kan CO₂ afgang estimeres, detailkort tegnes og landsresultatet beregnes.

KENNETH THORØ MARTINSEN &
KAJ SAND-JENSEN

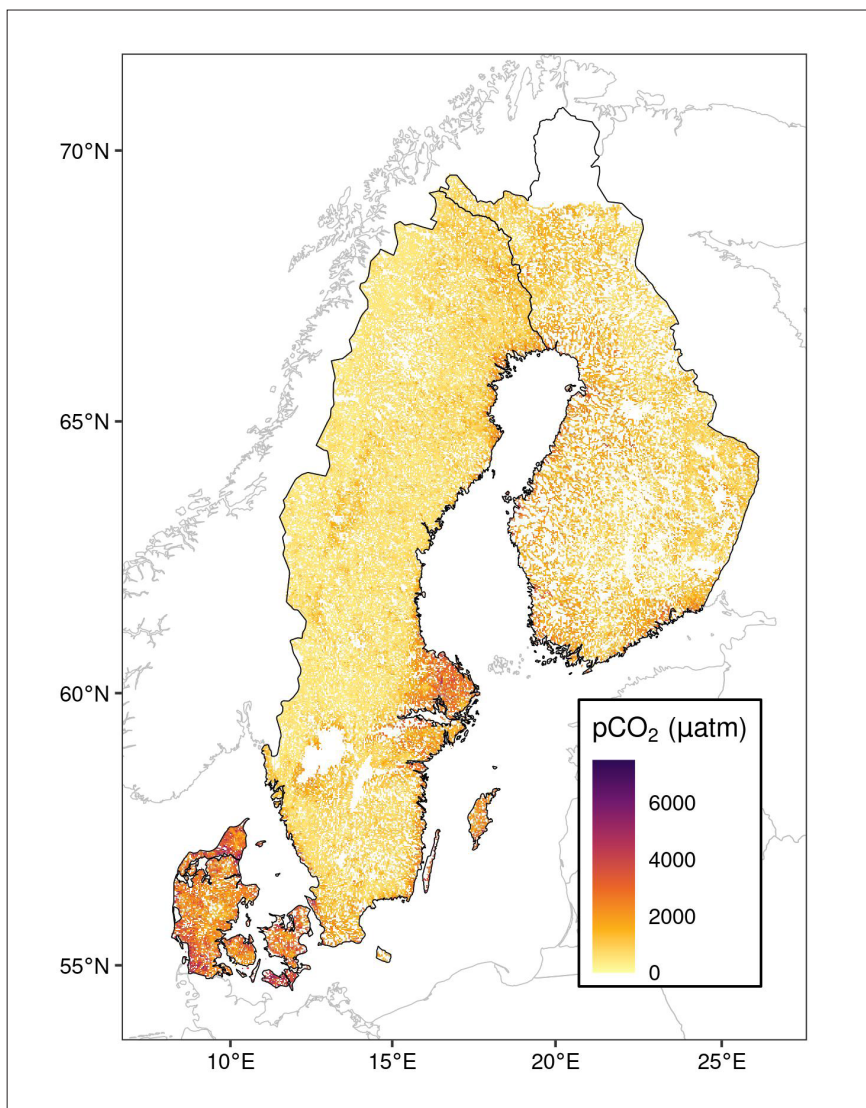
CO₂ er et nøglestof

CO₂ er et nøglestof i biologiske og kemiske omsætninger og samtidig den vigtigste drivhusgas. Derfor vil forskere gerne forstå de processer i landskabet, jorden og vandkredsløbet, der bestemmer både indhold og afgang af CO₂ til atmosfæren fra bl.a. vådområder. Klimaforskere og politikere efterspørger især tal for kilderne til den samlede nationale og globale CO₂ afgang.

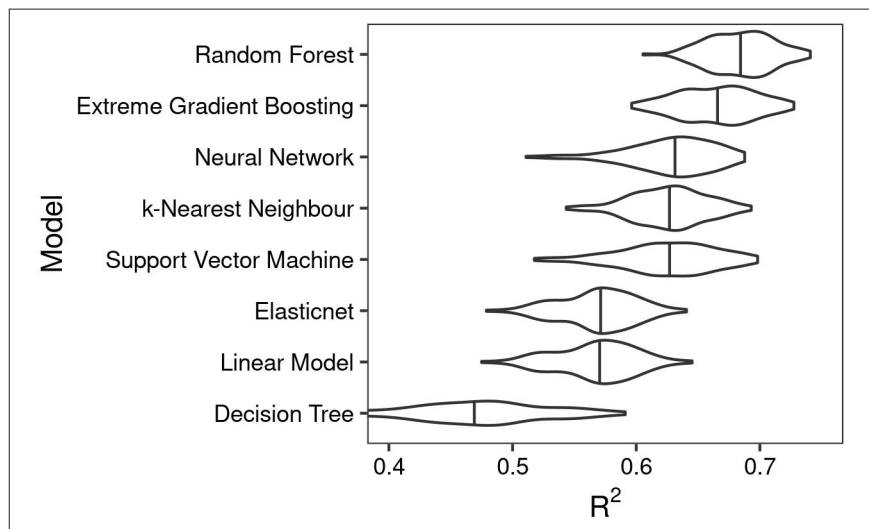
Tidligere målinger viser, at vandløb er hotspots for CO₂ afgang til atmosfæren; deraf fokus på at kende vandløbenes CO₂ afgang /1/. Vi har benyttet frit tilgængelige oplands- og vandkemiske data fra 2298 vandløbsstationer til at vurdere CO₂ indhold og afgang fra Skandinaviens vandløb ved anvendelse af "maskinlæring" (machine learning). Det er en ny tilgang til økologiske data med henblik på at skabe bedre opgørelser på stor skala (fig. 1).

Hvordan håndteres kompleksitet

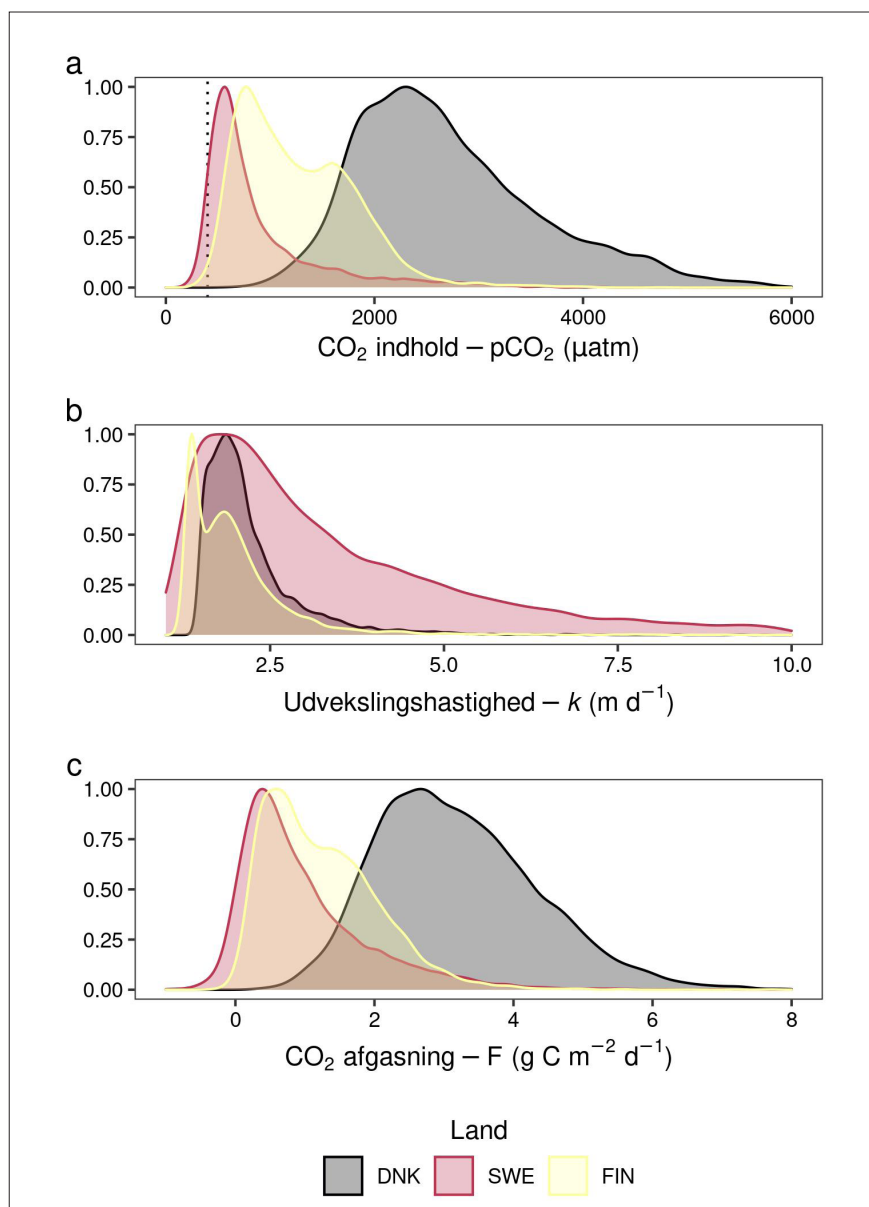
Biologer, der studerer molekyler, celler og fysiologiske processer, kan udføre eksperimenter under velkontrollerede forhold i laboratoriet med få faktorer i spil ad gangen. Er man økolog, må man nødvendigvis ud i den komplekse natur, hvor forholdene ændrer sig med landskabet, jordbunden og vandforholdene samt mellem dag og nat, sommer og vinter og fra år til år. Nogen gange er det muligt med god sikkerhed at udpege få forhold i



Figur 1. Kort over CO₂ indhold udtrykt som partialtryk (μatm) i vandløb i Danmark, Sverige og Finland. Baseret på data fra /2/.



Figur 2. Variation og median (vertikal linje) for forklaringskraft (x-akse) af 8 modeller sammenlignet ved 5-fold krydsvalidering gentaget 5 gange.



Figur 3. Fordelinger af CO₂ indhold forudsagt fra den bedste model (a) samt estimerede udvekslingshastigheder (b) og CO₂ afgang (c) normaliseret til intervallet 0-1.

omgivelserne, der styrer de undersøgte arter, biologiske samfund og processer. Andre gange er reguleringer voldsomt komplekse og det er svært eller næsten umuligt at forstå og forudsige sammenhængene. Regulering af CO₂ indhold og afgang fra vandløb til atmosfæren hører til i den komplekse kategori. Komplexiteten stiger yderligere, når studier i få vandløb skal dække variationen i hele nationens eller Skandinaviens vandløb.

Udgangspunkt lyder ellers simpelt. CO₂ indhold i vandløbet bestemmes af balancen mellem løbende tilførsler og tab. Men så kommer kompleksiteten. Tilførsler sker med overflade- og grundvand fra land, med vandløbsvand fra opstrøms strækninger og ved alle organismers CO₂ frigivelse ved respiration i selve vandløbet. Tab sker ved afgang til atmosfæren, vandtransport til nedstrøms strækninger og ved vandplanters CO₂ optagelse ved fotosyntese [3]. Vandet fra land er altid rigt på CO₂, dog i vekslende grad. Kommer der meget vand rigt på CO₂ fra den omgivende jord, bliver CO₂ indholdet nødvendigvis højt, med mindre tabene er tilsvarende høje. CO₂ afgang til luften bestemmes af vandets turbulens, og øges med hvirvler i vandet og krusninger på vandoverfladen og dermed med hurtig strøm, stort fald på vandløbet og en uregelmæssig stenbund; langsom strøm og en glat mudderbund har den modsatte effekt. Vandløbets egen CO₂ dannelse er størst, hvis det modtager meget omsætteligt organisk stof udefra, der nedbrydes af bakterier og frigør CO₂ i vandløbet, mens CO₂ forbrug ved fotosyntese kræver lys og vandplanter til stede.

Derfor! Vil man kunne forudsige vandløbenes CO₂ indhold og afgang, må man have en overordnet tilgang, hvor man finder alle de data, hvorfra man kan beregne CO₂ indholdet og desuden finde frem til de træk ved vandløbets fysik og omgivelser, der beskriver den hastighed, hvormed CO₂ afgases ved en given overmætning i forhold til atmosfærens ret konstante indhold i det enkelte år (boks 1).

Man kan beregne vandets CO₂ indhold ved målinger af vandets alkalinitet, pH og temperatur, og sådanne målinger er der mange af i databaser i Skandinavien (boks 1). Gasudvekslingskonstanten (k) for CO₂ mellem vandløbet og atmosfæren kan estimeres ud fra vandløbets fysik – især terrænets fald og strømhastigheden – og derfra kan CO₂ afgang til atmosfæren estimeres (boks 1).

Maskinlæring som værktøj

Sædvanligvis har man benyttet traditionelle statistiske teknikker såsom lineær regression til at beskrive sammenhænge mellem den af-

Boks 1. Vandløbenes CO₂ indhold og afgangning

Vi har beregnet vandløbenes CO₂ indhold og afgangning (F) ud fra kemiske og fysiske målinger i 2298 vandløb i perioden 2000–2018. For et vandløb kan indgå, skal der være mindst 3 målinger per måned og der må ikke være mere end tre måneder mellem måneder, der opfylder dette krav. Indholdet af CO₂ beregnes ud fra alkalinitet, pH og temperatur i vandet. Alkalinitet danner grundlag for at beregne summen af bikarbonat (HCO₃⁻) og karbonat (CO₃²⁻), som CO₂ udgør en fast andel af ved en given pH og temperatur. Denne beregning er præcis, så længe alkalinitet og pH ikke er for lave. Alkalinitet og pH er høje i langt de fleste danske vandløb, hvilket giver præcise CO₂ beregninger, mens usikkerheden for såvel alkalinitet og pH er større i egne i Finland og Sverige, hvor alkaliniteten er tæt på nul og pH nærmer sig 5,5 /2/. Vandløb med de mest usikre beregninger er udeladt.

For at beregne den fysiske udvekslingshastighed (k) for CO₂ mellem vandet og atmosfæren har vi benyttet empiriske sammenhænge til vandløbets strømhastighed, fald og temperatur. Der findes allerede mange større oversigter i litteraturen, der muliggør sådanne beregninger. Efterfølgende kan CO₂ afgangningen estimeres. Et forhold forsimpler beregning af CO₂ afgangning til atmosfæren. CO₂ indholdet i atmosfæren er tilnærmelsesvist konstant, dog langsomt stigende år for år; lige nu er indholdet omkring 400 µatm (= 400 ppm, dvs. 400 CO₂ molekyler per million luftmolekyler). CO₂ afgangning til atmosfæren over vandoverfladen stiger lineært med produktet af den fysiske udvekslingshastighed (k) og med graden af overmætning af CO₂ i vandet i forhold til luften (CO₂vand-CO₂atm) ifølge udtrykket:

$$F = k * (CO_{2\text{-vand}} - CO_{2\text{-atmosfære}})$$

CO₂ afgangningen er et estimat, som vi endnu ikke kan forudsige med maskinlæring på grund af mangel på direkte målinger. Så fremtiden skal bringe direkte målinger ude i vandløbene af såvel CO₂ indhold, udvekslingshastighed og afgangning. Udvikling af prisbillige og præcise CO₂ sensorer gør det muligt at udføre sådanne målinger i de kommende år og dermed kvalitetssikre modeller, der opskaleres vandløbenes CO₂ indhold og afgangning til Skandinavien og endnu videre ud i verden.

hængige variable (response) – her vandløbets CO₂ indhold – og valgte uafhængige variable (predictors) – her oplandskarakteristika. Ved maskinlæring er sammenhængen mellem respons og forudsigelsesvariable ikke defineret på forhånd, men den ”læres” på baggrund af de faktiske data /4/. Flexibiliteten i modellerne tunes ind på baggrund af deres evne til at generalisere ud fra nye observationer. Denne metode til at fintune modellerne, hvor data som bruges til træning og validering er adskilt, skaber mere akkurate forudsigelser.

Der findes mange forskellige maskinlæringsmodeller; vi har sammenlignet otte med varierende fleksibilitet /2/. De uafhængige variable består bl.a. af oplandsstørrelse, højde over havet, terrænfald, arealanvendelse, permanent vanddække, med mere. Endvidere indgår klimadata såsom årlig gennemsnitstemperatur og nedbør. Høj rumlig opløsning er vigtig. Vores analyse er lavet som et regulært grid med en opløsning på 25 m gange 25 m. Der indgår vandløb bredere end ca. 2,5 m med en samlet længde på 270.000 km i de tre skandinaviske lande, Danmark, Sverige og Finland. Danmark er en lilleput med 35.000 km vandløb.

Data til træning og sammenligning af modellerne udgjorde 80% af de 2298 observationer, mens 20% blev anvendt til at bestemme ydeevnen for den bedste model på nye, usete observationer. Sammenligningen mellem de otte modeller viser, at de komplekse modeller, der kan håndtere interaktioner og ikke lineære sammenhænge, klarede sig bedst (fig. 2). ”Random Forest” modellen klarede sig

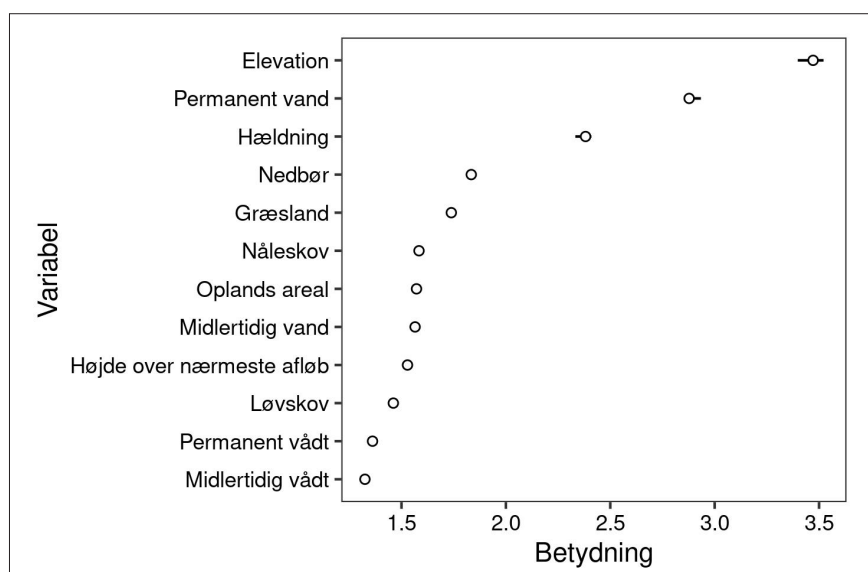
allerbedst, og havde på test datasættet en usikkerhed på 0,22 ”root-mean-squared-error” og en forklaringskraft (R²) på 66% ved forudsigelse af variationen i CO₂ indholdet (logaritme transformeret) i vandløb over alle egne i Skandinavien.

CO₂ i Skandinavien vandløb

Fordelingen af CO₂ indhold samt estimerede udvekslingshastigheder og afgangninger er udtrakt til hele vandløbsnetværket i Danmark, Sverige og Finland. Opskalering er en afgørende styrke ved modelleringen. Helt som forventet er spredningen på værdierne stor mellem de enkelte lokaliteter i alle lande.

Men samtidig er gennemsnit og toppunkter i fordelingerne markant forskellige mellem landene (fig. 3). Vi ved fra tidligere direkte målinger, at både indhold, udvekslingshastigheder og afgangning er meget høje i vandløb, som fødes af grundvand overmættet med CO₂ /1/. Omvendt er alle tre karakteristika meget lave i langsomt flydende afløb fra søer, hvor CO₂ er blevet brugt ved planteplanktonets fotosyntese. I grundvandet herhjemme kan CO₂ sagtens være overmættet 30 gange i forhold til atmosfæren, mens CO₂ i søafløb er tæt på ligevægt med atmosfæren og derfor ikke afgasser CO₂ /3/.

CO₂ indholdet var overmættet i næsten alle



Figur 4. Den relative betydning (x) af 12 variable (y), som karakteriserer oplandet ved vandløbsstationerne.

vandløb, som således afgasser CO₂ til atmosfæren. Det er helt som forventet, da vand fra oplandet altid er overmættet med CO₂ og tillige tilfører organisk stof, som nedbrydes til CO₂ i vandløbet. Det gennemsnitlige forudsagte CO₂ indhold var størst i danske vandløb (2721 μatm) og således omkring 7 gange overmættet i forhold til atmosfærens indhold (ca. 400 μatm). Det var markant lavere i finske (1274 μatm) og svenske vandløb (896 μatm). Det er en forventet forskel, da danske jorde er mere næringsrige, intensivt dyrkede og ligger i et varmere klima med større CO₂ dannelse sammenlignet med finske og svenske vandløb. Især nordsvenske vandløb udspringer på fattig, tynd jord i fjeldene og oplever lange vintre, hvor omsætningen næsten går i stå.

De danske og finske vandløb har gennemgående et lavt fald og derfor markant lavere udvekslingshastigheder mellem vandløbet og atmosfæren end de svenske. Så en vigtig grund til det lavere CO₂ indhold i svenske vandløb er faktisk, at afgangningen af de enkelte CO₂ molekyler går hurtigere her. Konsekvensen bliver derfor, at de daglige gennemsnitlige CO₂ afgasninger per m² af vandløbsoverfladen er næsten de samme i finske og svenske vandløb (henholdsvis 1,2 og 1,0 g C i CO₂), mens de er tre gange højere i Danmark (3,2 g C) pga. den langt højere overmætning med CO₂.

Drister man sig på at regne videre på de danske estimater, og endog medtager de mindste vandløb smallere end ca. 2,5 m, ender vi med et vandløbsareal på omkring 80 km², der årligt afgasser 934 tusinde tons kulstof som CO₂. Tidligere studies tyder på, at dette er et konservativt estimat, da CO₂ koncentrationerne ofte er højere i små vandløb /5/. Denne CO₂ stammer oprindeligt fra bakteriers, svampes og planterødders respiration i de omgivende jorde, og den får et yderligere tilskud ude i vandløbene af den større respiration i forhold til fotosyntese.

Hvad regulerer vandløbenes CO₂ indhold?

Modellerne fortæller os også, hvilke forhold i oplandet, som især regulerer vandløbenes CO₂ indhold (fig. 4). De vigtigste variable i oplandet for CO₂ indholdet i skandinaviske vandløb var højden over havet og terrænets hældning, tilstedeværelse af temporært eller permanent vand i oplandet og nedbør. CO₂ indholdet i vandløbet faldt især med øget højde af oplandet over havet og tillige med øget hældning af terrænet. Omvendt var CO₂ indholdet størst i lavlandsvandløb i fladt terræn, hvor vandet siver langsomt frem til vandløbet gennem tykke jorde og derfor modtager meget CO₂ undervejs fra jordbundsorganismernes respiration. Dette forhold bidrager også til det højere CO₂ indhold i danske vandløb, som altovervejende er lavlandsvandløb omgivet af tykke jorde. Højere nedbør reducerede CO₂ indholdet, sandsynligvis gennem fortynding og hurtigere transport af vand gennem oplandet frem til vandløbet. Temporære og permanente vand-samlinger (fx. søer) i oplandet er også vinduer for CO₂ afgasning til atmosfæren og deres tilstedeværelse gav anledning til lavere CO₂ indhold i vandløbene.

Forskning er altid undervejs

I denne undersøgelse har vi trukket på de mange vandløbs- og landskabsdata, som er tilgængelige i åbne databaser. Vi anvendte moderne maskinlærings metoder med henblik på at skabe overblik og forudsigelse af skandinaviske vandløbs CO₂ indhold fulgt op af estimater for deres CO₂ afgasning. Som nødvendig opfølgning gør udvikling af prisbillige CO₂ sensorer i flydekamre det muligt direkte at måle vandløbenes CO₂ indhold og afgasning mange steder med henblik på den nødvendige kvalitetssikring og kalibrering af nationale og regionale modeller. For få år siden havde vi hverken computer- og måleteknik til at sikre disse fremskridt.

Vi finder det oplagt at nyttiggøre de mange databaser og udnytte de nye måle- og beregningsteknikker, der gør det muligt at flytte vurderinger fra en eller få lokaliteter til hele Skandinavien og videre ud i verden. Undervejs vil man også opleve, at lokaliteter og lande er forskellige og de faktorer, der driver processerne (fx. CO₂ afgasningen), også ændrer sig, mens forståelsen og forudsigelsen bliver mere komplet og samfundsrelevant. Det er optimalt, at forståelsen af sammenhænge og anvendelsen af resultaterne begge vokser.

Litteratur

- /1/ Sand-Jensen, K., & Staehr, P. A. (2012). CO₂ dynamics along Danish lowland streams: water-air gradients, piston velocities and evasion rates. *Biogeochemistry*, 111(1), 615-628.
- /2/ Martinsen, K. T., Kragh, T., & Sand-Jensen, K. (2020). Carbon dioxide partial pressure and emission throughout the Scandinavian stream network. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(12), e2020GB006703.
- /3/ Sand-Jensen, K., Riis, T., Kjær, J. E. & Martinsen, K. T. (2022). Stream-lake connectivity is an important control of fluvial CO₂ concentrations and emissions in catchments. *Earth and Space Science* (i trykken).
- /4/ Jensen, M. B., Bahnsen, C. H., Nasrollahi, K. & Moeslund, T. B. (2018). Deep learning – et gennembrud inden for kunstig intelligens. *Aktuel Naturvidenskab*, 2, 8-13.
- /5/ Martinsen, K. T., Sand-Jensen K. & Kragh, T. (2020). Kulstofbalancer og CO₂ afgasning i danske søer og vandløb. *Vand & Jord*, 1, 37-40.

Post Doc KENNETH THORØ MARTINSEN (kenneth.martinsen@bio.ku.dk) og Professor KAJ SAND-JENSEN er ved Ferskvandsbiologisk Sektion, Biologisk Sektion, Københavns Universitet. De forsker i kulstofomsætning og klimagasser i søer og vandløb støttet af Danmarks Frie Forskningsråd (0217-00112B). Nærværende projekt var støttet af COWIfonden.