

Bedre og billigere teknologi til studier af klimagasser

Ny teknologi skaber til stadighed mulighed for bedre målinger af miljøforhold og stofomsætning. Søer og vandløb er "hot spots" for CO₂-afgasning til atmosfæren af CO₂ og nedbrydeligt organisk stof tilført fra land. Men mangel på billigt og effektivt apparatur har begrænset storskala kvantificering af processerne, især i de talrige små vandsystemer. Her beskriver vi et akkurat, billigt og effektivt kammer til at måle CO₂-afgasningen fra vandoverflader to gange i timen dag og nat uden tilsyn. Kammeret kan forsynes med methansensor, så de ferske vandes rolle i budgetter for kulstof og klimagasser kan fastlægges på et sikrere grundlag i fremtiden.

KAJ SAND-JENSEN, KENNETH THORØ
MARTINSEN & THEIS KRAGH

Teknologien flytter grænser

Teknologiske fremskridt skaber til stadighed muligheder for at se ind i helt ny verden. Et oplagt eksempel er DNA-teknikken, der måler ligheder og forskelle i DNA-koden og derfor kan afsløre arters og bestandes udviklingshistorie, sygdommes arvelighed og identitet på den forbryder, der har efterladt sig spor på et gerningssted. Med et DNA-kartotek over hunde, kan man endog fastslå identiteten på den vovse, der har lagt en delingsfører midt på den røde løber på trappen til Fredensborg Slot, hvis det var noget.

I visse tilfælde dukker der bare nye muligheder op, når de teknologiske landvindinger ledages af et stort prisfald på måleudstyret ved en bredere kommerciel anvendelse. Sådan var det med de små temperaturlogger, som man lægger mellem fødevarer til eksport for at sikre, at kølekæden ikke bliver brudt under mange dages transport over landegrænser. Det gav os efterfølgende prisbillige præcise temperaturfølere til anvendelse i luft, jord eller vand med logning af signalet med selvvalgt hyppig-

hed over lange perioder (Tabel 1).

Det er lidt dyrere at indkøbe sensorer med indbyggede eller tilsluttede dataloggere til at måle vindhastighed, lysindstråling, lufttryk og luftfugtighed i luft samt ilt, dybde og opløst ilt, pH, ledningsevne og vandhøjde i vand med høj præcision over lange tidsrum. Men man når trods alt hele raden rundt i sortimentet for en almindelig månedsløn (Tabel 1). Hvis man har lyst og lidt fingersnilde kan flere ting også laves billigere, da der findes utallige vejledninger på nettet, om hvordan fx vejrstationer kan konstrueres. Der er altså ikke noget at betænke sig på ude på gymnasierne og i kommunernes og konsulentfirmaernes natur- og miljøafdelinger, hvis man vil have førstehåndstjek på forholdene i omgivelserne.

Skal man have pålidelige sensorer til at måle vandbevægelse og indholdet af opløste næringsstoffer og algeklorofyl i vandområderne må man til lommerne eller fondene, men også disse sensorer falder i pris.

Nye muligheder for CO₂ måling

Hidtil har vi skullet hoste op med 50.000 kr. for den billigste sensor til at måle CO₂ indholdet i luft. Og der har været alskens tekniske problemer med at anvende den. Men nu ser verden pludselig meget lysere ud. Kom-

merciel anvendelse af små infrarøde gasanalytatorer til måling af CO₂ i ventilationsanlæg har gjort præcise og velfungerende sensorer tilgængelige for omkring 1.000 kr. – inklusive dataopsamling /1 og 2/.

Vi har bygget CO₂-sensoren ind i et kammer, som flyder frit på overfladen af damme og søer, og kan måle CO₂-fluksen (udvekslingen) mellem vandet og luften (Figur 1). Kammeret kan være en lille plastik opvaskebalje, som flyder med åbningen ned mod vandet forsynet med flamingo eller skum langs kanten. Flydekammeret er forsynet med et luftindtag fra atmosfæren via en lille luftpumpe med justerbar timer, som kan udskifte kammerluften på nogle minutter. Kammerluften returneres til atmosfæren via en 2 meter lang impermeabel slange, men åben i enden. Det forhindrer trykopygning og sikrer ubetydelig diffusion pga. den lange vej fra atmosfæren gennem slangen til kammeret. Vi har tjekket, at kammeret trykdugner og CO₂-udvekslingen mellem kammeret og atmosfæren er ubetydelig /2/.

Med pumpen på pause måles CO₂-fluksen mellem vandet og kammerluften som ændringen i CO₂ partialtrykket over tid (Figur 2C). Når pumpen kører bringer den CO₂ indholdet i kammeret tilbage på samme niveau som i at-

mosfæren, så den naturlige CO₂ gradient mellem atmosfære og vand genetableres. Fluksen (F, mol CO₂/m²/h) er produktet af CO₂-gradienten (mol CO₂/m³) mellem vand og atmosfære og den fysiske gasudvekslingshastighed (K, m/h):

$$F = K * (CO_2\text{-vand} - CO_2\text{-atmosfære}) \quad (1)$$

K er især bestemt af turbulensen i selve vandoverfladen, som er reguleret af strømningen i vandet drevet af vindens træk i vandoverfladen (vinddrevet turbulens) eller ustabil trykfordeling i vandsøjlen. Sidstnævnte kan skyldes afkøling af overfladevandet om natten, som udløser konvektiv strømning af det nu tungere overfladevand mod bunden og returstrømning af varmere, lettere bundvand. At luften står nogenlunde stille inde i kammeret beskyttet mod vinden påvirker ikke fluksen nævneværdigt, da gasdiffusion er 10.000 gange hurtigere i luft end i vand, og den hastighedsbegrænsende proces er mikroturbulensen lige under vandoverfladen.

Når luften i flydekammeret er udskiftet med atmosfærisk luft vil CO₂-stigningen i kammerluften (hvis vandet er CO₂ overmættet) indledningsvis være lineær, men over tid vil CO₂-partialtrykket i luften efterhånden gradvist nærme sig vandets. Hvis man derfor benytter to flydekamre, ét til måling af CO₂-fluksen, hvor luften eksempelvis udskiftes 2-3 gange i timen, og et andet kammer til måling af vandets CO₂-partialtryk ved ligevægt, som man lader ligge tilstrækkeligt længe til at opnå ligevægt, kan man altså måle alle størrelser i ligning 1 på nær K, som derfor kan beregnes. For at afkorte tidsrummet for at nå ligevægt mellem vand og luft i det permanente kammer to, skal dets luftvolumen være lille i forhold til arealet af vandoverfladen, som kammeret dækker.

Nye målekamres fortrin

Hidtil har man måtte nøjes med ret få direkte

Tabel 1. Eksempler på kontinuerligt udstyr til at måle forskellige miljøforhold i luft og vand; med tilhørende 2017 cirka priser.

Sensor	Producent	Pris (kroner)
Vejr – vindhastighed	Onset HOBO	2200-2700
Vejr – indstråling	Onset HOBO	1500
Vejr – datalogger	Onset HOBO	1500
Vand – temperatur og lys	Onset HOBO	300-500
Vand – pH elektrode/datalogger	MadgeTech	1700/4100
Vand – ilt	PME Vista	9500
Luft – CO2 minilogger	SenseAir	1000-1200

fluksmålinger. Man har i stedet ofte beregnet CO₂-fluksen indirekte ved måling eller beregning af CO₂ indholdet i overfladevandet og modeller for K, som anvender vind som styrende variabel. CO₂ indholdet over vandoverfladen har man antaget lig det generelle atmosfæriske niveau, men i realiteten kan det svinge fra tæt på mætning til to gange atmosfære mætning (fx. Fig. 2A og /3/).

CO₂ indholdet i overfladevandet kan beregnes med god sikkerhed ud fra temperatur, pH og alkalinitet, men det kræver løbende målinger, helst kontinuerlige, af temperatur og pH. Modeller for K ud fra vindhastigheden er stedsspecifikke, idet vindens vejlængde over søen varierer og påvirker overfladens turbulens. Modellerne tager heller ikke lokale hensyn til dybde og vandplanter, og inddrager ikke konvektiv strømning, der alle påvirker K, især i små søer og damme. Det er endvidere en fordel at måle CO₂ indholdet i luften umiddelbart over vandoverfladen for ved svag vind, kan det som nævnt godt afvige markant fra atmosfærens pga. CO₂-udvekslingen med vandet.

De nye prisbillige flydekamre med automatisk luftudskiftning kan efterlades på damme og søer i flere dage og udføre måling af CO₂-fluks og K-værdier to gange i timen både nat og dag /2/. Det giver optimale muligheder for korrekte målinger af tidlige og rumlige varia-

tioner af CO₂-fluksen og K, og dermed af de biologiske-fysiske-kemiske processer, som styrer dem. Da kamrene koster omkring 1500-2000 kr, alt inklusive, er der råd til 25-30 kamre for det beløb, som tidligere rakte til en enkelt CO₂-måler. Med mange kamre kan man måle forskellige steder i samme sø og endog inddrage forskellige søer. Hermed kan der opnås direkte målinger af den daglige, månedlige og årlige CO₂-fluks for søer som helhed – en opgave som tidligere var meget mere tidskrævende og behæftet med større usikkerhed.

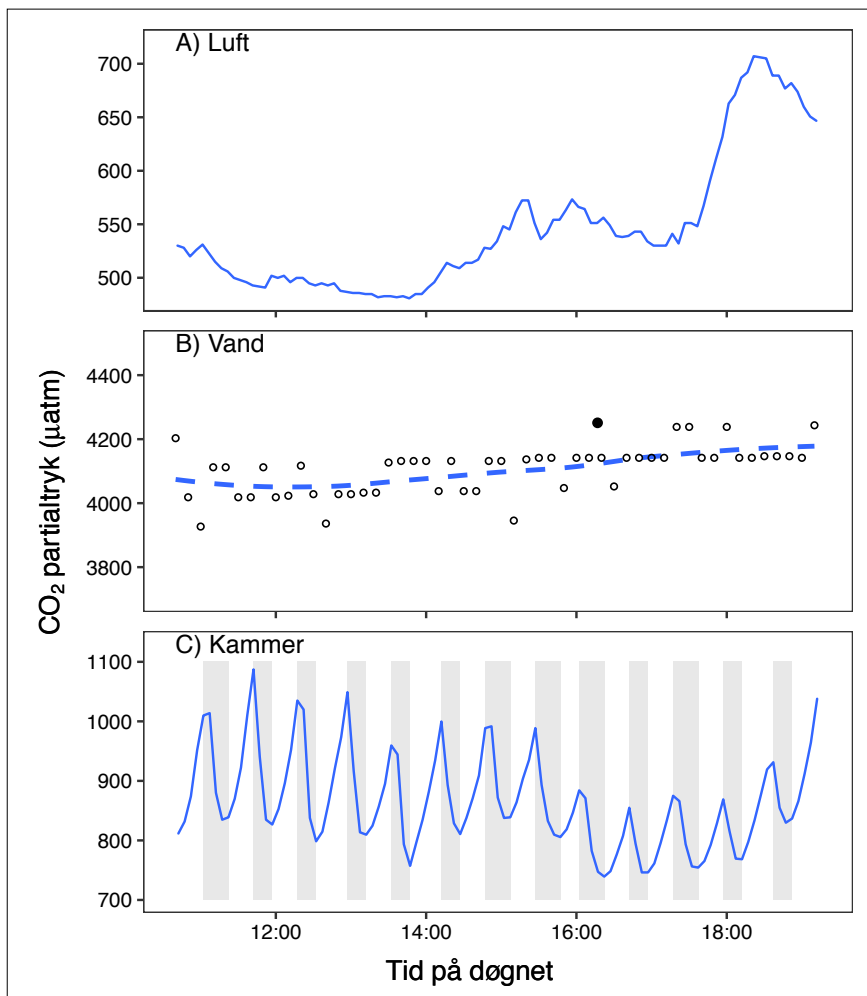
I vandløb kan man anvende en aflang kammerform – fx. et 1 m langt PVC-rør gennemskåret på langs, fast forankret, men lukket i enderne med gummiflapper, der flyder på vandoverfladen, og med langsiderne dykket under vand /3/.

CO₂-afgasning fra søer og vandløb

Søer og vandløb er et vindue for CO₂ frigivelse til atmosfæren /3/. Estimer af CO₂-afgasningen er blevet stadig højere gennem de sidste 20-30 år i takt med, at man har fået flere målinger og har erkendt, at kulstoffet ikke strømmer passivt fra landjorden til havet, men der tværtimod sker betydelig stofomsætning og udveksling med atmosfæren i søer og vandløb undervejs (Figur 3). En oversigt publiceret i 2007 angiver således et årligt globalt CO₂



Figur 1. Venstre: Måling af CO₂-udvekslingen på en skovdam i Gribskov med flydekamre i forskellige udformninger, til venstre i billedet ses boksen med datalogger som gemmer målinger af vandets pH hvert 10. minut. Højre: Automatisk flydekammer til måling af CO₂-udvekslingen på søer og damme /2/.



Figur 2. En lille dam i Gribskov i oktober. Eksempel på CO_2 indholdet (A) i luften 17 cm over overfladen og (B) i vandet (ti gange overmættet) beregnet ud fra pH, vandtemperatur og alkalinitet hvert 10. minut (åbne punkter) og fra et kammer hvor ligevægten er opnået (lukket punkt). Panel C viser CO_2 indholdet i flydekammeret under måling og under luftudskiftning (grå perioder) /2/.

tab fra ferskvand på 0.75 Pg C /4/, mens den seneste oversigt fra 2013 med bedre tal for ferskvandsarealet angiver tre gange større værdier, 2.1 Pg C /5/. Sidstnævnte værdi er sammenlignelig i størrelse med den årlige nettoudveksling af CO_2 fra landjorden eller havet til atmosfæren.

Når man tænker efter, er det ikke så mærkeligt, at vandløb og søer er "hot spots" for CO_2 afgang per arealenhed. De modtager

Tabel 2. Typiske gennemsnitlige årsværdier for CO_2 -afgasning (i g C/m²) fra små og større søer samt øvre og nedre vandløb i Nordsjælland /3 og 8/.

Søer:	Små søer	230
	Større søer	60
	Arresø	35
Vandløb:	Øvre Pøleå	3000
	Øvre Havelse Å	1300
	Nedre Pøleå	440
	Nedre Havelse Å	110

vand fra et landareal, som typisk er 20-100 gange større end deres eget areal. Både overfladevand, markvand og grundvand er CO_2 overmættet og rigt på nedbrydeligt organisk stof. Grundvandet er typisk overmættet 20-40 gange i forhold til atmosfæren, og denne mængde kan umiddelbart afgasses ude i vandløbene og søerne /3/.

Afgasningen er størst i vandløbene, hvor vandets opholdstid er langt kortere end i søerne. Afgasningen er også større i de øvre vandløb, som modtager vand med højere indhold af CO_2 og omsætteligt organisk stof, sammenlignet med de nedre vandløb (Tabel 2). På tilsvarende vis er CO_2 -afgasningen større i små vandløb øverst i vandsystemerne end i store vandløb længere nede (Tabel 2).

Nordsjællandske vandløb er i gennemsnit overmættet 9-18 gange og større søer 2 gange i forhold til atmosfæren /3/. Den gennemsnitlige overmætning globalt er estimeret til 8 gange for vandløb og 3 gange for søer /5/. Samtidigt er overfladeturbulensen og den fysi-

ske udvekslingshastighed, K gennemgående større i vandløb end søer. Det forklarer den større afgang fra vandløb end søer, både per arealenhed og samlet for de to systemer. Foreløbige grove danske estimater viser, at vandløbene står for 88% af ferskvands samlede CO_2 -afgasning, små søer (< 1 ha) for 8% og store søer (> 1 ha) for 4%. I et globalt estimat fra 2013 var den årlige CO_2 -afgasning fra vandløbene opgjort til 1,8 og søerne til 0,32 Pg C (Figur 3C), altså omtrent samme fordeling mellem vandløb og søer som i foreløbige estimater for Danmark.

Det seneste globale estimat fra 2016 har flere og bedre tal for især små søer. Her angives et dobbelt så højt estimat for søerne på 0,58 Pg C, som dog stadig er 3 gange mindre end afgangningen fra vandløbene /6/.

Organisk stof fra land respireres i ferskvand og frigives som CO_2 eller i mindre grad som methan. Stort set alle vandløb og langt de fleste søer har større nedbrydning af organisk stof end opbygning af nyt organisk stof, og den større nedbrydning frigør også CO_2 til atmosfæren. I et vist omfang frigives CO_2 også i biogeokemiske processer ved udfældning af kalk og silikat i søbunden /3/. Oprindeligt er kalk og silikatminerale blevet opløst af CO_2 fra jordrespirationen på land under dannelse af opløst bikarbonat, men nu frigives CO_2 så igen ved kalk- og silikatudfældning i ferskvand eller efter videre transport i havet. Disse biogeokemiske processer er vigtige, men sjældent kvantificeret, men den frigjorte CO_2 ved mineraldannelsen bidrager til den målte overmætning og afgangning fra ferskvand og havet.

Vores langsigtede mål er at få bedre tal og forståelse af regulerende faktorer for CO_2 -afgasningen fra vandløb og søer, og især de mindste af dem, som er meget talrige, har den tætteste kontakt med landjorden og derfor får tilført vand med de højeste koncentrationer af såvel CO_2 som letomsætteligt organisk stof. Vi ved allerede, at der sker meget høje afgangninger i små vandløb og søer og for at få bedre direkte målinger behøves de nye målekamre.

Vi forventer også højere methanafgasning i små, lavvandede søer end større, dybe søer, fordi den organiske belastning er større per areal i små søer, og methanen fra sedimentet i mindre grad når at blive iltet til CO_2 i den lavere vandsøjle. I overensstemmelse hermed angiver en nyere amerikansk undersøgelse en gennemsnitlig årlig afgangning per m² af vandoverfladen på 155 g CO_2 -C og 10 g methan-C i søer mindre end 1 ha og 100 g CO_2 -C og 0,4 g methan-C i større søer på 100-1000 ha /6/. Vores egne beregninger i Nordsjælland viser gennemsnitlige årlige afgangninger for meget små søer på 230 g C per m² og for Arresø på 35 g C

per m² i god samklang med de globale gennemsnit (Tabel 2)

Selvom methanafgasningen under alle omstændigheder er meget lavere end CO₂-afgasningen og derfor underordnet i kulstofkredsløbet, er den alligevel interessant i vurderingen af globale klimaeffekter, da methan-molekylets klimaeffekt ved absorption af varmestrålingen fra Jorden er 34 gange større end CO₂'s. Methans endelige effekt afhænger imidlertid af dens opholdstid i atmosfæren, da effekten falder tilsvarende, når metanen ender med at blive iltet til CO₂.

Flere anvendelser af kamre og automatisk udstyr

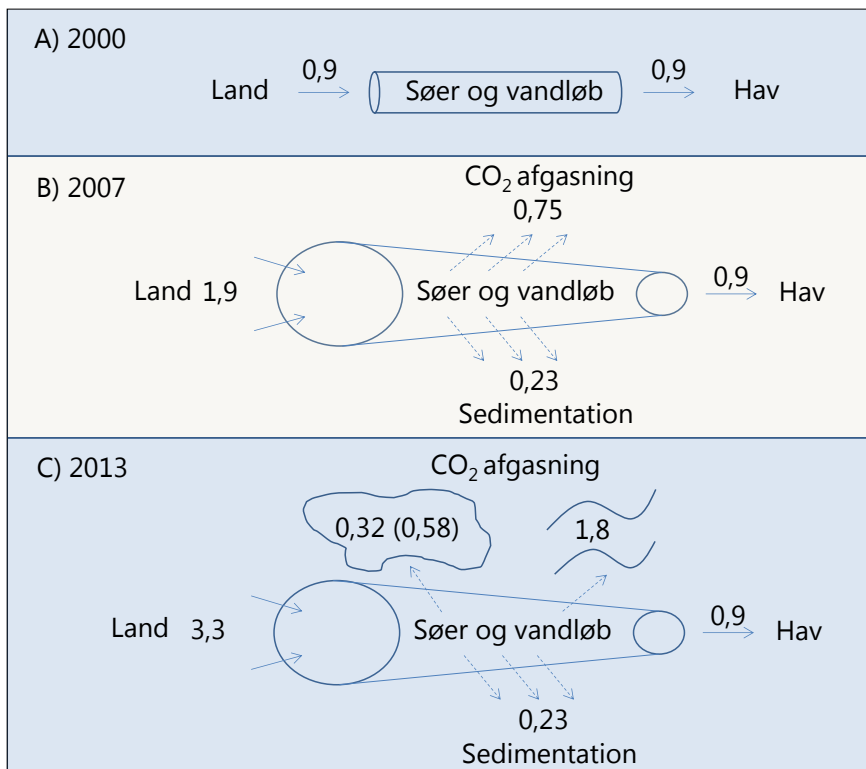
Med få modifikationer kan de beskrevne kamre også anvendes til at måle CO₂ frigivelsen fra jord, altså jordrespiration, som også er en vigtig variabel i det overordnede kulstofkredsløbet. Et kommercielt tilgængeligt kammer koster 50-100 gange mere end vores.

Erstattes opvaskebaljen af et klart Perspex-kammer kan der måles fotosyntese i lys og respiration i mørke over en plantebevoksning. Her skal man undgå kraftig opvarmning af kammerluften i lys enten ved at benytte korte måleperioder eller køling.

Her slutter mulighederne ikke. Der findes allerede en methan-sensor ^{7/}, som kan indbygges i kammeret og fungerer parallelt med CO₂-sensoren. Det taltaler os, at kunne måle methan kontinuerligt og parallelt med CO₂, så de to vigtigste drivhusgasser kvantificeres samtidigt. For methan er lange måleserier afgørende, da der både sker en langsom frigivelse af opløst methan fra søvandet og en pludselig og meget stor frigivelse af methanbobler fra sedimentet, som kan optræde dels om natten og dels ved ændring af lufttrykket over søen. Det gælder altså om at have lange måleperioder for at dække såvel diffusiv som boblefrigivelse af methan.

Miljø- og energivurdering

Vi ser endvidere muligheder i at anvende udstyret i undervisningen på gymnasierne og universiteternes studier i biologi, geologi, kemi og ingeniørvidenskab. Temperatur- og vindmålere med videre kan indkøbes klar til brug. Det er også ret enkelt at konstruere CO₂-kamrene og aflæse data, men kendskab til elektronik og computerteknologi er en klar fordel og derfor er udstyret velegnet til den tværfaglige naturvidenskabelige uddannelse i gymnasiet. Dataanalysen inddrager beregning af og statistik bag lineær regression og mætningsfunktioner. Og forståelse af gastransporten omfatter både de elementære gaslove, gassers opløselighed, molekyler diffusion og



Figur 3. Forskellige globale modeller for organisk transport og CO₂-afgasning fra søer og vandløb. A: Oprindelig model (før år 2000), hvor CO₂-afgasning ikke indgår ^{4/}. B: Model anno 2007, hvor såvel CO₂-afgasning og sedimentation af organisk stof indgår ^{4/}. C: Model anno 2013, hvor CO₂-afgasningen er opdelt på søer og vandløb ^{5/}. I parentes i C er angivet det seneste estimat for søer ^{6/}. Alle værdier er samlet transport i Petagram kulstof (Pg C) per år.

turbulent transport.

I dag har mange universitetsstuderende et fremmedartet forhold til almen fysik, elektronik og apparatur. Konstruktion og anvendelse af apparatur vil kunne gøre undervisningen mere konkret og oplevelsesrig og klæde studenterne bedre på til at løse selvstændige opgaver.

Miljømyndigheder og rådgivningsfirmaer tager i en vid udstrækning nyt udstyr til sig. Men vi ser oplagte muligheder i øget anvendelse af sensorer til længevarende måling af temperatur, lys, ilt, og algeklorofyl, med videre, uden at skulle besøge lokaliteterne. Hvis sensorerne forsynes med wipers, som fjerner påvækst kan de fungere i mange uger uden tilsyn.

Har man behovet, har vi nu gjort opmærksom på, at fluksmåling af drivhusgasser fra søer, staldanlæg og rensningsanlæg og til eller fra marker og naturarealer også kan indgå i aktiviteten for beskedne summer og ikke behøver at være begrænset til forskningsinstitutionerne.

Referencer

- ^{1/} Bastviken, D., et al. 2015: Technical Note: Cost-efficient approaches to measure carbon dioxide (CO₂) fluxes and concentrations in terrestrial and aquatic environments using mini loggers. *Biogeosciences* 12,

3849-3859.

- ^{2/} Martinsen, K. T., et al. 2018: A simple and cost-efficient automated floating chamber for continuous measurements of carbon dioxide gas flux on lakes. Submitted.
- ^{3/} Sand-Jensen, K. and P. A. Staehr 2012: CO₂ dynamics along Danish lowland streams: water-air gradients, piston velocities and evasion rates. *Biogeochemistry* 111, 615-628.
- ^{4/} Cole, J. J., et al. 2007: Plumbing the global carbon cycle: integrating inland waters into the terrestrial carbon budget. *Ecosystems* 10, 172-185.
- ^{5/} Raymond, P. A., et al. 2013: Global carbon dioxide emissions from inland waters. *Nature* 503, 355-359.
- ^{6/} Holgerson, M. A. and P. A. Raymond 2016: Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds. *Nature Geoscience* 9, 222-226.
- ^{7/} Duc, N. T., et al. 2012: Automated flux chamber for investigating gas flux at water-air interfaces. *Environmental Science & Technology* 47, 968-975.
- ^{8/} Sand-Jensen, K. and P. A. Staehr 2009: Net heterotrophy in small Danish lakes: a widespread feature over gradients in trophic status and land cover. *Ecosystems* 12, 336-348.

KTM er videnskabelig assistent, TK er lektor og KSJ (ksandjensen@bio.ku.dk) er professor på Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet. Studiet er støttet af COWIfonden.