

# Vandløbenes CO<sub>2</sub>-overmætning og biodiversitet

De danske vandløb er kraftigt overmættede med opløst CO<sub>2</sub> tilført med grund- og drænvand fra oplandet. Det CO<sub>2</sub>-rige vand stimulerer plantevæksten, da overmætningen er en forudsætning for fotosyntese og god vækst under vand blandt 120 plantearter, der lever i overgangszonen mellem land og vand. Vandløbenes naturlige CO<sub>2</sub>-overmætning medfører også en betydelig CO<sub>2</sub>-afgasning til luften, men dog sandsynligvis lavere end afgasningen fra dyrkede lavbundslande.

KAJ SAND-JENSEN, KENNETH THORØ  
MARTINSEN, JOHAN EMIL KJÆR, JONAS  
STAGE SØ, MARTA BAUMANE, THEIS  
KRAGH, LARS BÅSTRUP-SPOHR, HANS  
HENRIK BRUUN & TENNA RIIS

## Naturlige vandløb

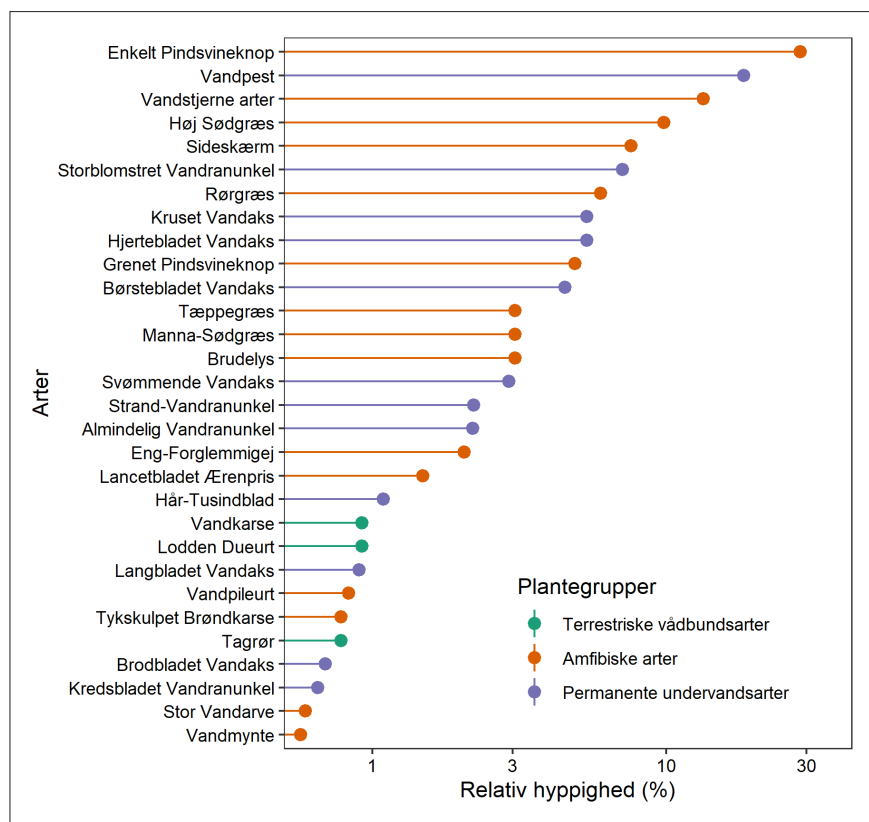
Nogle få steder løber rene kildebække klukkende gennem grønne enge med blå, gule og røde blomster. Store ørreder svømmer herop for at gyde og lægge æg i gruset. De bugter sig frem på siden gennem få centimeter vand for at komme op til det eftertragtede kolde vand og de mange smådyr, som er føde for ynglen i de første måneder.

Biodiversiteten er høj på engen og i kildebækken. Engens planter omfatter op mod hundrede arter, hvoriblandt Eng-Forglemmigej, Vandmynte, Sideskærm og arter af Vandstjerne og Ærenpris vokser ud over bækkens lave bredder og ud i det CO<sub>2</sub>-rige vand. Om vinteren, når planterne på land fryser ned, står planterne grønne i kildevandet, som aldrig fryser til. Smådyrene er i fuld aktivitet året rundt og rummer hele udtrækket fra biller, dansemyg, døgnfluer, slørvinger til vøfluer. Lægger vi muslinger, snegle og fladorme, rundorme og ledorme oven i, summer artsrigdommen sig op til flere hundrede.

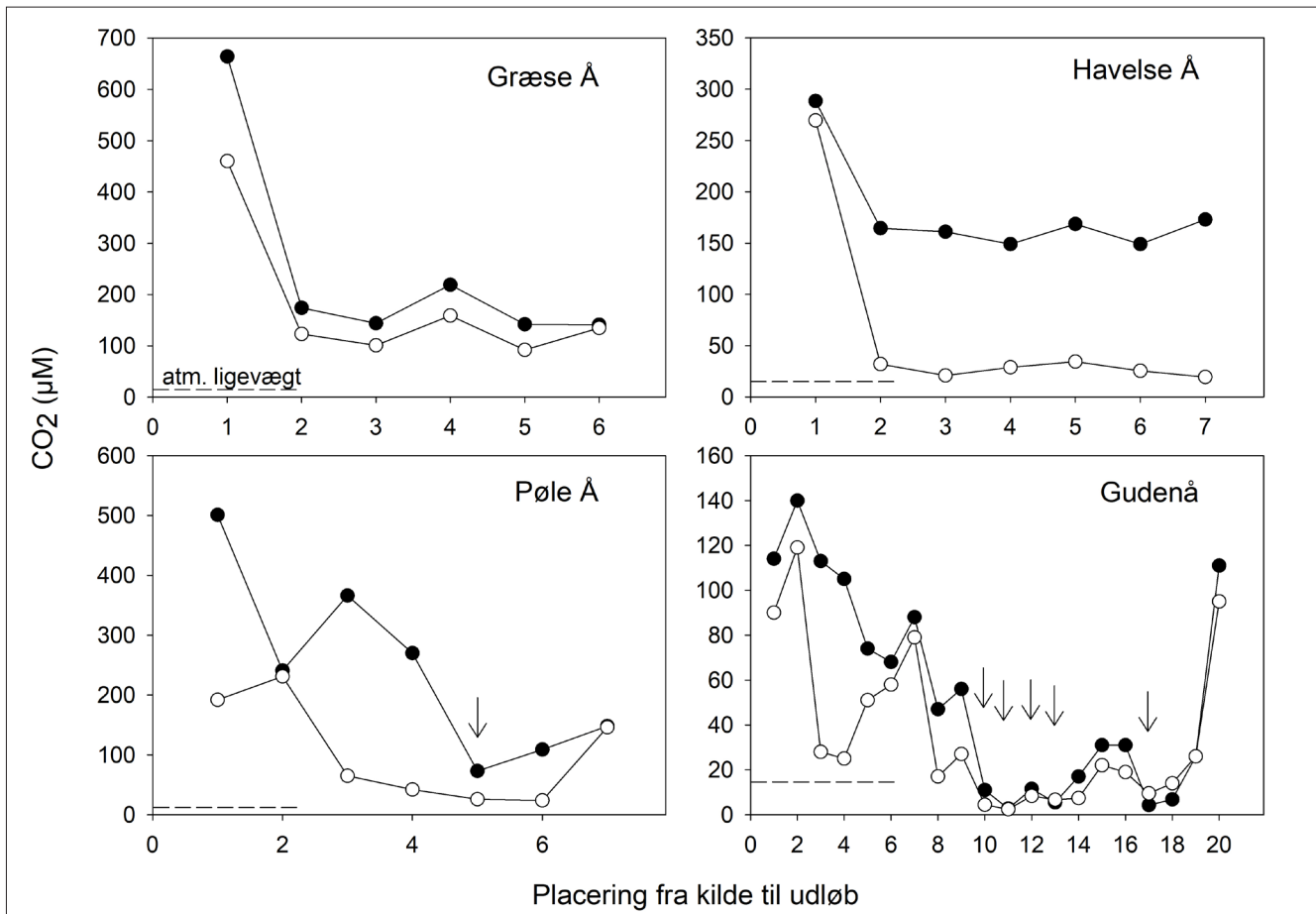
Kildevandet vælder frem som grundvand ved foden af bakkerne og risler ned over mospuder og fugtig jord til bækken, eller det strømmer op gennem bækkens grus. Det er

gammelt vand, der faldt som regn for mange år siden. Vandet har opholdt sig i jorden, men har nu indledt en få dages lang rejse ned gennem bækken og åen til havet. I jorden er grundvandet blevet kraftigt beriget med CO<sub>2</sub> fra planterødders respiration og bakteriers nedbrydning af plantemateriale. Meget CO<sub>2</sub> er

blevet forbrugt til at opløse kalk og lerminerale i jorden under frigivelse af bikarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), calcium og andre opløste stoffer, men grundvandet er fortsat kraftigt overmættet med CO<sub>2</sub> i forhold til ligevægten med luften; typisk 25-50 gange overmættet, som i en doven dansk vand.



Figur 1. Relativ hyppighed af planter i danske vandløb. Grøn er terrestriske vådbundsarter, orange er amfibiske arter og lilla er permanente undervandsarter.



Figur 2. Kraftig overmætning med CO<sub>2</sub> ned gennem hovedløbet i fire danske vandløb om sommeren målt morgen (udfyldte cirkler) og eftermiddag (åbne cirkler). CO<sub>2</sub> koncentrationen falder ned gennem vandløbene, fra morgen til eftermiddag og ved passage af opstemninger eller søer (ved pile). Stiplede linje angiver CO<sub>2</sub> koncentrationen ved ligevægt med luften (stationsnumre på x-akserne). Sand-Jensen og Riis (original).

Mens grundvandet strømmer ned over engen og videre gennem bækken og åen, frigøres CO<sub>2</sub> til luften. Er vanddybden lille, og strømmer vandet friskt, taber det hurtigt CO<sub>2</sub> til luften, men nyt vand med CO<sub>2</sub> kommer hele tiden til fra omgivelserne. Hvert sekund passerer måske 10 liter gennem det øverste af bækken, men længere nede ad åen passerer måske mere end 1000 liter. Derved forbliver vandet overmættet i hele sit forløb og frigør til stadighed CO<sub>2</sub> til luften.

### Regulerede vandløb

Ingen større danske vandløb løber uforstyrrede gennem landskabet i hele deres længde. De allerfleste steder er jorderne langs vandløbene opdyrkede og dræned, mens vandløbene er udrettede og uddybede. Ofte er vandløbene gravet ned i en kanal flere meter under terræn, hvor vandet løber langsomt frem uden at give lyd fra sig. Høje brændenælder, dueurter og græsser på kanalsiderne skygger for vandplanterne, hvor kanalen er smal. Dyrelivet er fattigt.

Åens bugter er rettet ud og én eller flere gange om året sejler en grødeskæringsbåd

forbi og slår vandplanterne for at forhindre, at de bremser vandet. Dermed opnås maksimal afvanding af ådalens dyrkede jorde. Vandplanterne i åen reagerer på tilbagevendende skæringer ved at fremme de mest klipningstål-somme arter. De ligner plænegræsser ved at vokse videre fra overskårne stængler og ved at sætte nye blade fra et intakt vækstpunkt på en jordstængel i vandløbsbunden. Efter et par uger står undervandsplænen derfor lige så frodig som før skæringen. Således er Enkelt Pindsvineknop med de lange båndblade blevet den dominerende vandplante i vores vandløb (Fig. 1).

Lavbundsjordenes dræn sænker vandstanden og mindsker nedsvivningen til grundvandet, og dermed senere udsivning af grundvand andre steder. I de regulerede vandløb er drænvandet derfor den vigtigste vandtilførsel. Ligesom grundvandet er drænvandet kraftigt overmættet med CO<sub>2</sub> fra dyrkningsjorden. Omsætningen i jorden er intens, fordi den gødes og jordbehandles, og dræningen øger tilgangen til ilt, der fremmer røddernes og bakteriernes respiration og vækst. Mens den våde natureng kan ophobe organisk stof år

efter år, så nedbrydes det organiske indhold i de drænedede jorde, og den dannede CO<sub>2</sub> frigives direkte til luften eller føres bort med drænvandet.

### CO<sub>2</sub>-overmætning og afgang

Fra kilden til åens udløb i havet falder CO<sub>2</sub>-overmætningen, da vandet er i kontakt med luften i længere tid (Fig. 2). På lavvandede stryg med sten eller grus strømmer vandet hurtigt og med mange hvirvler, hvorved CO<sub>2</sub>-afgasningen bliver særligt høj. Den stiger nemlig i takt med CO<sub>2</sub>-overmætningen og turbulensen ved vandoverfladen. På dybe strækninger flyder vandet langsommere, hvorved hvirveldannelsen og afgangningen bliver lavere. Om sommeren kan tæt plantevækst forbruge CO<sub>2</sub> ved fotosyntesen. Derfor falder indholdet fra morgen til sen eftermiddag, mens det stiger i mørke om aftenen og natten ved organismernes respiration.

Passerer vandløbet en indskudt sø, kan vandets CO<sub>2</sub>-indhold falde til under luftmætning pga. søvandets langvarige kontakt med luften og planteplanktonets fotosyntese. Derfor varierer CO<sub>2</sub>-indholdet og afgangningen markant



Foto 1. Gennem engen slynger bækken sig. Sideskærm krydser ind over bækkens bredder og ned under vand. På bredden vokser Brudelys, Vandkarse, ranunkler og mange andre urter. Foto Bjarne Moeslund.

mellem forskellige vandløb, mellem forskellige steder i det enkelte vandløb og tillige ovenfor versus nedenfor stryg og indskudte søer. Årstiden og tiden på døgnet påvirker endvidere. Derimod har de seneste 40 års stigning i luftens  $\text{CO}_2$ -indhold med 20%, og den tilsvarende 20% stigning i vandets luftligevægt fra omkring 15 til 18  $\mu\text{M}$  over perioden, ikke i væsentlig grad påvirket vandløbenes høje  $\text{CO}_2$ -indhold på i gennemsnit 147  $\mu\text{M}$ .

Vi har bestemt  $\text{CO}_2$ -indhold og afgang på 236 strækninger ned gennem 50 danske vandløb fordelt over det meste af landet. På de samme strækninger har vi analyseret plantesamfundene /1-3/.

### $\text{CO}_2$ -indhold og afgang

På 203 strækninger upåvirket af søer var  $\text{CO}_2$ -indholdet i gennemsnit overmættet 9 gange. Graden af  $\text{CO}_2$ -overmætning var størst i de

øverste bække og faldt fra i gennemsnit 13,1 til 6,4 gange ned gennem vandløbene til udløbet i havet.

Ved passage gennem 33 indskudte søer faldt vandets  $\text{CO}_2$ -indhold til tæt på luftmætning om sommeren (Fig. 3). I afløb fra næringsrige søer med meget planteplankton var  $\text{CO}_2$ -indholdet allerlavest.

Om vinteren var  $\text{CO}_2$ -indholdet i vandløbene en smule højere end om sommeren, især i afløb fra søer, fordi planter og planteplankton forbruger mindre  $\text{CO}_2$  ved fotosyntesen af mangel på lys, mens frigivelsen af  $\text{CO}_2$  ved nedbrydning af organisk stof fortsætter.

Som nævnt stammer  $\text{CO}_2$  i grundvand og drænvand fra rodrespiration og nedbrydning af plantemateriale. Plantematerialet på land blev oprindeligt produceret ved, at landplanter optog  $\text{CO}_2$  fra luften til fotosyntese, men nu frigøres  $\text{CO}_2$  igen fra plantematerialet til luften med mindre, det opmagasineres i tørv langs

vandløbet eller eksporteres til et lager af organisk stof på bunden af søer og havet.

Den daglige  $\text{CO}_2$ -afgassing til atmosfæren varierede betydeligt indenfor og imellem de undersøgte vandløbsnetværk. Gennemsnittet om sommeren fra mange vandløb og mere end 200 strækninger lå på 2,1 g  $\text{CO}_2$ -C per kvadratmeter af vandløbenes overflade. Regner vi videre med det tal for hele året og alle danske vandløb med et estimeret samlet areal på 185,6  $\text{km}^2$  /4/, havner det samlede årlige  $\text{CO}_2$ -tab fra danske vandløb på 142.000 tons  $\text{CO}_2$ -C som kulstof. Vi har tidligere estimeret danske vandløbs årlige afgassing til 769.000 tons  $\text{CO}_2$  fra landsdækkende miljødata for pH, alkalinitet mv. for små, middel og store vandløb /5/. Det højere estimat skyldes sandsynligvis, at det dels inddrager hele året og bedre repræsenterer de små vandløb med højere afgassing. Men under alle omstændigheder er opskalering af  $\text{CO}_2$ -afgassing til hele året og alle danske vandløb præget af betydelig usikkerhed.

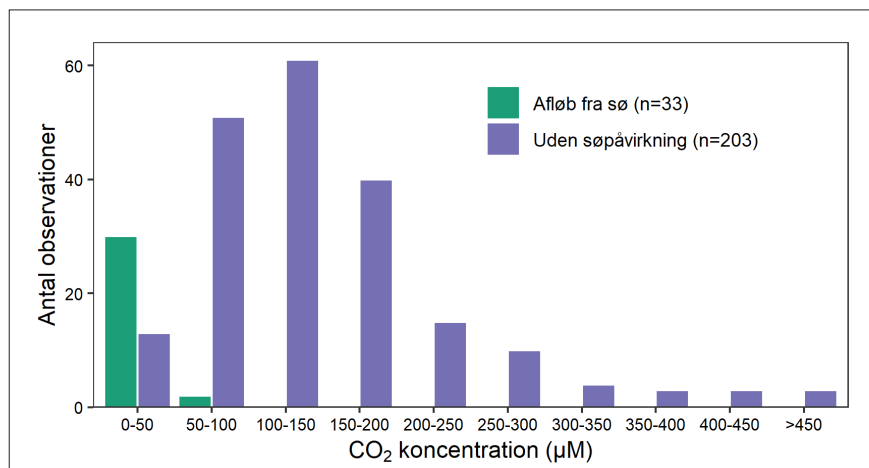
Tabet af  $\text{CO}_2$  fra vandløbene til luften er lavere end det anslåede tab fra 100.000 hektar dyrkede og drænedes kulstofrige lavbunds-jorde langs vandløbene. Det samlede årlige tab fra de 100.000 hektar lavbund kan estimeres til 930.000 tons  $\text{CO}_2$ -C /6/. Derfor! Opdyrking og dræning af 100.000 hektar kulstofrige lavbunds-jorde langs vandløbene, som tidligere ophobede kulstof, frigør skønsomt lige nu mere  $\text{CO}_2$  end det "naturlige" tab fra hele vandløbsnetværket.

I virkeligheden er tabet fra drænedes lavbunds-jorde endnu højere, da mindst 171.000 hektar dyrkede lavbunds-jorde har et højt indhold af organisk kulstof. Samtidigt er tabet af kvælstof via afstrømning fra drænedes lavbunds-jorde meget højt, så det vil mindske forureningen af kystvandene markant at tage lavbunds-jorderne ud af drift og genetablere enge, moser og søer i stedet.

### Vandløbsplanter biodiversitet

Omkring 170 arter af karplanter blev fundet på de mange undersøgte strækninger i vandløbene. Det samlede artsantal svarer til omkring 10% af den nationale artspulje /3/. Mest bemærkelsesværdige er 75 terrestriske vådbundsarter, der lejlighedsvis træffes under vand. De er hyppigst i bækkene og mere sparsomt til stede i de brede og dybe åer. Tilsammen står de for 13% af den samlede plantedækning i vandløbene.

Amfibiske planter, der under deres naturlige udvikling både vokser under vand og med luftkontakt, omfatter 45 arter. De vokser ofte under vand om vinteren eller ved høj vandstand, men har bladene i luft om sommeren



Figur 3. Frekvensfordeling af  $\text{CO}_2$  koncentrationen i afløb fra søer og på strækninger i danske vandløb uden påvirkning fra søer. Sommermålinger /2/.



og i perioder med lav vandstand. De forekommer hyppigst på de smalle, lavvandede strækninger, hvor der er kort afstand til land og skuddene lettest opnår luftkontakt. Tilsammen for alle vandløb svarede de for 36% af den samlede plantedækning. De er altså næsten lige så hyppige som permanente undervandsplanter.

De permanente undervandsplanter omfatter omkring 50 arter med en samlet dækning på 51%, hvis Enkelt Pindsvineknop med en score på 17% indgår, idet den langt overvejende vokser under vand. I modsætning til de terrestriske og amfibiske arter, er permanente undervandsplanter hyppigst på de nederste brede og dybe strækninger i vandløbene. Planterne er tilpasset til den stærkere strøm henede og strækker sig helt op i lyset ved overfladen. Deres tilstedeværelse begrænses af mangel på lys på store dybder. Men hvis vandet er klart, som det i dag er tilfældet i de nedre dele af Gudenå, vokser de største undervandsplanter helt ned til 3 meters dybde. På de enkelte 100 meter lange strækninger voksede i gennemsnit 10 arter af alle vandplantetyper i bækkene og 12–13 arter i de større åer.

### CO<sub>2</sub> til fotosyntese og vækst

Terrestriske og amfibiske arter udnytter CO<sub>2</sub> enten fra luften eller vandet. Permanente undervandsplanter kan ud over CO<sub>2</sub> udnytte bikarbonat i vandet, hvilket sikrer dem god fotosyntese både ved lave og høje CO<sub>2</sub>-koncentrationer, blot bikarbonatindholdet er over 500 μM. I de undersøgte vandløb, upåvirkede af søer, var bikarbonatindholdet i gennemsnit 2400 μM og dermed 16 gange højere end CO<sub>2</sub>-overmætningen på 147 μM.

I afløb fra søer ligger CO<sub>2</sub>-indholdet tæt på luftligevægt om sommeren (ca. 18 μM). Terrestriske og amfibiske arters fotosyntese og vækst under vand er derfor nær nul, hvorimod de permanente undervandsplanter opnår 30–40% af deres maksimale fotosyntese og vokser udmærket ved alene at udnytte bikarbonat i vandet (Fig. 4). Imidlertid er langt de fleste strækninger i vandløbene markant overmættede med CO<sub>2</sub>, og her har alle planter højere fotosyntese og vækst. Terrestriske og amfibiske arters gennemsnitlige fotosyntese under vand er dog fortsat markant lavere (henholdsvis 1,8 og 4,3) end de permanente vandplanters (15,0 mg O<sub>2</sub> per time per mg blad-tørvægt; Fig. 4). Væksthastigheden følger samme mønster.

Situationen ændrer sig, når de terrestriske og amfibiske arters blade har kontakt til luften. Herved øges deres fotosyntese og væksthastighed markant og når på niveau med eller

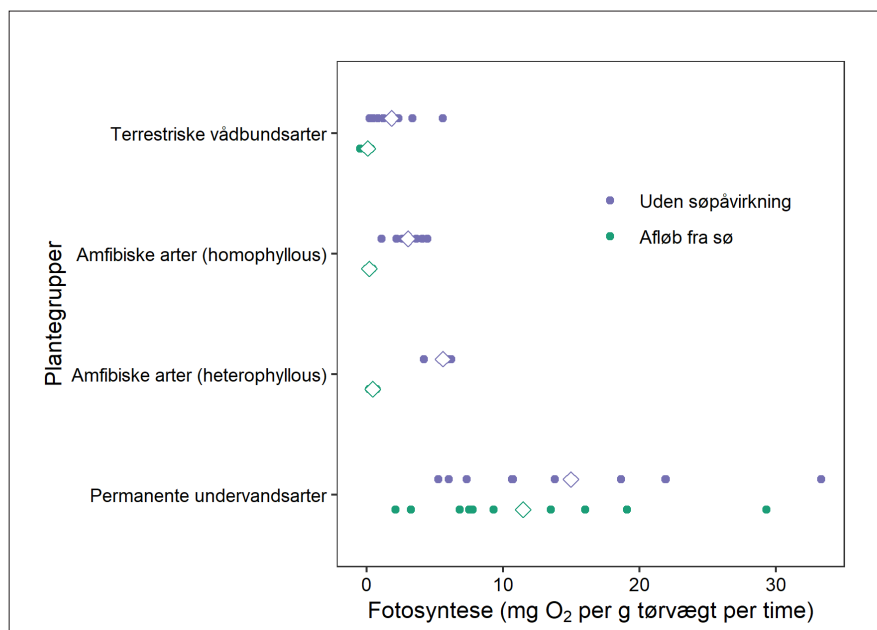


Foto 2. Bækken er kanaliseret og uddybet og har en monokultur af Enkelt Pindsvineknop. På de stejle velgødede bredder vokser Rørgæs meterhøjt. Foto Bjarne Moeslund.

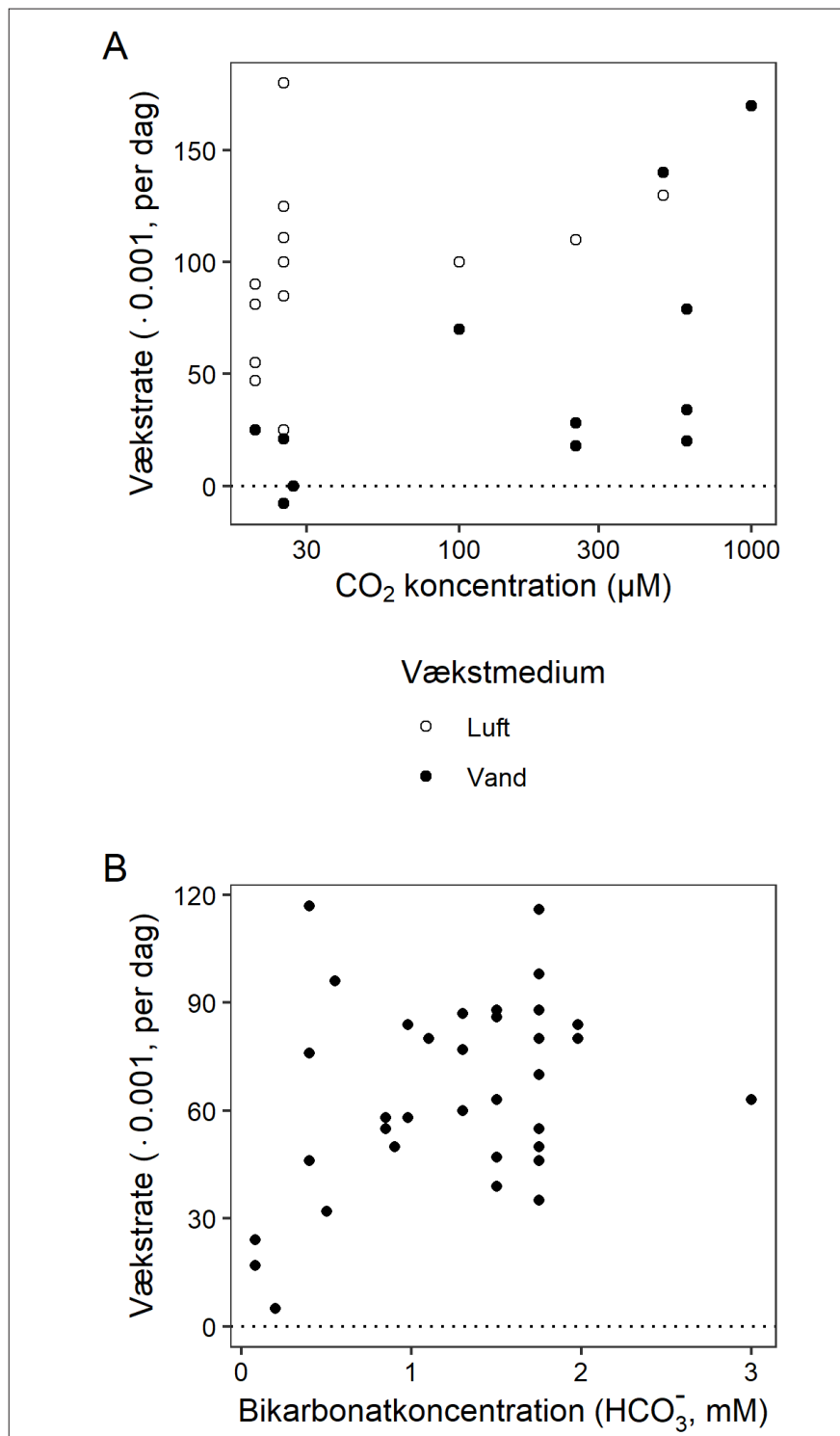
overstiger de permanente undervandsplanter (Fig. 5). Luftkontaktens store positive effekt skyldes, at CO<sub>2</sub>-molekylerens egen bevægelse ved diffusion er 10.000 gange hurtigere i luft end i vand, og det stimulerer fotosyntesen og væksten. Amfibiske planter opnår typisk fire gange højere skudtæthed og skudmasse i bestande med luftkontakt sammenlignet med neddykkede nabobestande. Bestandene i luft nyder også fordel af at kunne blomstre, blive bestøvet og sætte frø, hvilket ikke sker for artsfællerne under vand. Men ved at vokse under vand har de amfibiske arter udvidet deres livsrum, og de overlever vinteren uden at fryse ned og kan brede sig op på land og strække

sig op i luft om foråret og sommeren. Under vand spredes planterne ganske effektivt med løsvævne skud, som flyder med strømmen, fanges af sten og grene på bunden og slår rod.

Der er en glidende overgang mellem opdelingen af arter som terrestriske og amfibiske vådbundplanter. Begge grupper tilpasser deres blade til livet i luft eller under vand, men tilpasningen er blot størst hos de amfibiske arter. Luftblade er beklædt med en vandafvisende tynd hinde (kutikula) og et vokslag, som nedsætter fordampningen, mens spalteåbninger på bladoverfladen kan åbne for at optage CO<sub>2</sub> om dagen til fotosyntesen og lukke om natten for at mindske fordampning-



Figur 4. Beregnet fotosyntese blandt terrestriske vådbundsarter, amfibiske arter og permanente undervandsarter i CO<sub>2</sub>-fattigt vand i søafløb og i CO<sub>2</sub>-rigt vand uden påvirkning fra søer /2/.



Figur 5. Væksthastighed per dag i eksperimenter med mange forskellige arter af vandløbsplanter. Panel A: Væksthastigheden af amfibiske CO<sub>2</sub> brugere som funktion af vandets CO<sub>2</sub> koncentration, planterne enten helt neddykkede (lukkede symboler) eller med luftkontakt (åbne symboler). Panel B: Væksthastigheden af permanente undervandsarter som funktion af vandets bikarbonatkoncentration /2/.

gen. Vandbladene mangler spalteåbninger og har tyndere kutikula og vokslag, hvorved CO<sub>2</sub> lettere optages fra vandet. Men for at optage tilstrækkeligt med CO<sub>2</sub> fra vandet er det fortsat afgørende, at vandet er overmættet med CO<sub>2</sub>. Nogle amfibiske arter danner vandblade opdelt i tynde filamenter med en stor overflade, som bedre optager CO<sub>2</sub>.

### CO<sub>2</sub> – positivt for biodiversiteten, negativt for klimaet

Uden CO<sub>2</sub>-overmætning ville mange amfibiske planter ikke kunne vokse i vandløbene. Vandløbenes CO<sub>2</sub> er altså med til at øge vandløbenes plantediversitet, men skaber afgasning til luften. Det høje CO<sub>2</sub>-indhold fremmer fotosyntese og vækst af alle planter under

vand. For arter, begrænset til udelukkende at anvende CO<sub>2</sub>, er overmætning i vandet eller forbindelse til CO<sub>2</sub> i luften en forudsætning for deres vækst og overlevelse. Derfor opnår vådbundsplanter generelt høj biodiversitet i vandløbene, som naturligt er rige på CO<sub>2</sub> og rummer gode muligheder for luftkontakt på det lave vand.

CO<sub>2</sub>-afgasning fra vandløbene er både naturlig og uundgåelig. Lægges vandløbene i rør, frigøres CO<sub>2</sub> bare nedenfor rørene under vandets videre transport til havet. Man kan imidlertid stoppe en intensiv CO<sub>2</sub>-kilde til luften fra jorderne langs vandløbene ved at vådlægge lavbundsarealerne og herved fremme genopbygningen af tørven i jorden. Vådlægningen åbner også mulighed for at genvinde noget af den biodiversitet i vådområder langs vandløbet, der forsvandt, da lavbundsstederne blev opdyrkede.

Forfatterne forsker i biodiversitet og klimagasser støttet af Det Frie Forskningsråd og Villum Fonden. Professor KAJ SAND-JENSEN (ksandjensen@bio.ku.dk), adjunkt LARS BÅSTRUP-SPOHR, postdoc KENNETH THORØ MARTINSEN, ph.d.-studerende MARTA BAUMANE og JOHAN EMIL KJÆR er ved Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Københavns Universitet, lektor HANS HENRIK BRUUN er ved Økologi & Evolution, Københavns Universitet, lektor THEIS KRAGH og ph.d.-studerende JONAS STAGE SØ er ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet og professor TENNA RIIS er ved Institut for Biologi, Aarhus Universitet.

### Referencer

- /1/ Sand-Jensen K., T. Riis, J. E. Kjær & K.T. Martinsen 2022. High levels and variable carbon dioxide concentrations and emissions in lowland streams. Submitted.
- /2/ Sand-Jensen K., T. Riis & K.T. Martinsen 2022. Photosynthesis, growth and distribution of plants in lowland streams — a synthesis and new data analyses of 40 years research. Freshwater Biology, under trykning.
- /3/ Riis T., K. Sand-Jensen & S.E. Larsen 2001. Plant distribution and abundance in relation to physical conditions and location within stream systems. Hydrobiologia 448: 217-228.
- /4/ Højberg A.L. et al. 2015. National kvælstof model. Metode rapport, revideret september 2016. GEUS, DCE & DCA.
- /5/ Martinsen, K.T., K. Sand-Jensen & T. Kragh 2020. Kulstofbalancer og CO<sub>2</sub> afgasning i danske søer og vandløb. Vand & Jord 1: 37-40.
- /6/ Tiemeyer B. et al. 2020. A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. Ecological Indicators 109: 105838.