

Kulstofbalancer og CO₂ afgang i danske søer og vandløb

Vandløb og søer modtager meget kulstof fra landjorden. Danske data viser, at den årlige gennemsnitlige CO₂ afgang fra søer og især fra vandløb (1335 gigagram kulstof) er tre gange større end transporten gennem vandløbene (558 gigagram). Det samlede ferskvandsbidrag udgør 6.7% af primærproduktionen. Minimumsbidraget fra ferskvand svarer til 14% af Danmarks samlede CO₂ emission i 2015. Vandløb og søer er således vigtige i den nationale kulstofbalance, men budgettet endnu ikke komplet.

KENNETH THORØ MARTINSEN, KAJ SAND-JENSEN & THEIS KRAGH

Oplandet påvirker ferskvand

De ferske vande er tæt forbundne med oplandet og transporterer vand og stof til havet. Især vandløbenes fint forgrenede netværk har tæt kontakt med land, hvorfra nyt vand til stadhed tilføres som grundvand, markvand og overfladevand fra de omgivende jorde og som spildevand fra byer og spredte husstande. Da vandet blot opholder sig fra timer til nogle dage i vandløbene er oplandets aftryk på vandets kemi særlig stort sammenlignet med nedbørens og atmosfærens direkte påvirkning.

Også søer er kraftigt påvirket af oplandet. De fleste danske søer er lavvandede, og vandet udskiftes typisk i løbet af et par måneder. Både makroioner som kalcium og bikarbonat (HCO₃⁻) og vækstbegrænsende næringsstoffer som kvælstof og fosfor tilføres især fra oplandet og i mindre grad fra luften og med nedbøren. Visse større, dybe søer og søer med et meget lille opland får dog det meste vand med nedbøren, og har opholdstider på mange år. I disse søer er oplandets påvirkning af vandets sammensætning og processer relativt mindre.

Hydrologien kobler kulstofomsætningen på land og i vand sammen

Primærproduktion på land trækker til stadig-

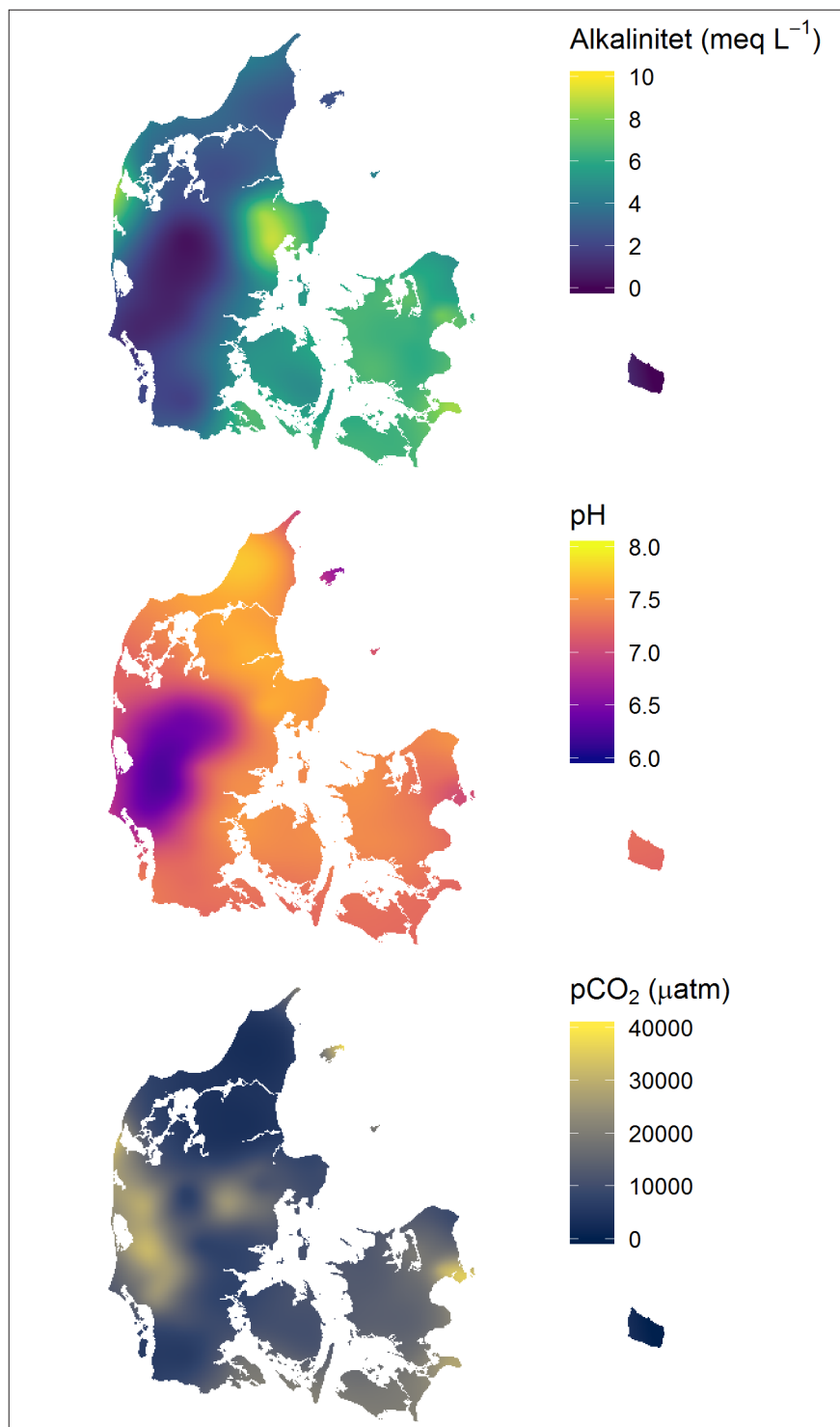
hed kuldioxid (CO₂) ud af atmosfæren ved opbygning af organisk stof. En del af denne CO₂ frigives i jorden ved røddernes respiration og ved bakteriers og svampes omsætning af organisk stof, som frigives fra levende rødder eller stammer fra nedbrydning af døde plantedele og humuslagret i jorden. Den dannede CO₂ i jorden indgår i landjordens omsætning, når CO₂ frigivelsen fra jorden måles. En betydelig del af kulstoffet indgår dog ikke i gasmålingerne, fordi kulstoffet udvaskes med jordvandet som CO₂, bikarbonat og opløst organisk stof, og dermed tilføres vandløb, søer og grundvand.

Dette kulstoftab har man sædvanligvis ikke målt i landjordens kulstofkredsløb, selvom mængden kan være betydelig. Påvirkning med opløste organiske humusstoffer fra jorden til ferskvand er massiv i eksempelvis arktiske tundraer og i skovklædte tempererede områder. Tabet af opløst organisk stof har været stærkt stigende i Skandinavien pga. afvanding af moser, skifte fra løv- til nåleskove og den aftagende forsuring af nedbøren, som opløser humusstoffer i jorden, der blev udfældet under den tidligere forsøringsperiode. Herhjemme er tilførslen af opløste humusstoffer til søer og vandløb massiv i skove og moser, og tiltagende brunfarvning kendes fra bække og søer i nåletræsplantager.

Bikarbonaten i jordvandet dannes ved kemisk forvitring af karbonater og aluminiumsilikater (feldspat) under påvirkning og forbrug af CO₂ og dermed kulsyre. Karbonater opløses

direkte af kulsyren, mens aluminiumsilikater opløses af organiske syrer (fx. oxalsyre), men processen viser sig til slut som forbrug af kulsyre og dermed CO₂/l. Dannes bikarbonat ved karbonatforvitring kommer lige store mængder fra karbonat og CO₂. Dannes bikarbonat fra aluminiumsilikat svarer bikarbonatdannelsen til CO₂ forbruget én til én. Det er muligt at opgøre fordelingen mellem karbonat- og silikatforvitring ved kendskab til koncentrationen af kalcium, magnesium, silikat og bikarbonat i vandet. Opgørelserne viser, at langt det meste bikarbonat stammer fra karbonatforvitring på Sjælland (ca. 80 %, Sand-Jensen, upublicerede data), mens en større andel sandsynligvis stammer fra forvitring af aluminiumsilikater i Midt- og Vestjylland.

Samtidigt er der store regionale forskelle i det absolutte bikarbonatindhold mellem Øst- og Vestdanmark, som det fremgår af grundvandet sammensætning (Figur 1). Bikarbonatkoncentrationen i nutidens grundvand følger i store træk gletsjernes fordeling over Danmark under sidste istid. De sandede jorde vest for Hovedopholdslinjen, som forløber fra Bovbjerg ved Vestkysten til Hald syd for Viborg og derfra stik syd til landegrænsen ved Kruså, er blevet udvasket over 150 tusinde år, og hedesletterne er blevet overlejret med smeltevandssand fra gletsjerne. Bikarbonatindholdet når maksimalt op på omkring 2 millimol per liter (= 2 mM) nogle få steder på bakkeøerne, mens det er lavere (mod 0) under hedesletterne og i klitterne. pH varierer



Figur 1. Alkalinitet, pH og CO_2 partialtryk i grundvandet. Bikarbonatindholdet ligger meget tæt på alkaliniteten. CO_2 partialtrykket er beregnet for en temperatur på 10 grader. Der er tydelige regionale forskelle i grundvandets kemi, som især i Jylland følger beliggenheden af hovedopholdslinjen for gletsjerne under den seneste istid.

fra 5 til 7. Som kontrast er grundvandets bikarbonatindhold i Østdanmark typisk mellem 1 og 8 mM og pH mellem 7 og 8. I visse egne i Østdanmark med sand eller grus (fx. hedesletten ved Tirstrup på Djursland og i dele af Gribskov) er bikarbonatindholdet lavest, mens det er højest i de kalkrige områder på Midsjælland og Møn.

Koncentrationen af CO_2 i grundvandet varierer gennemgående fra 5000 til 50000

mikro-atmosfære nogenlunde svarende til mellem 10 til 100 ganges overmætning i forhold til atmosfærens indhold på 410 mikro-atmosfære (eller 410 ppm) i 2020. Grundvandet rummer derfor et meget stort potentiale for CO_2 -afgasning på steder, hvor vandet bryder frem og kommer i kontakt med luften. Lokalt i de 8 grader varme kildefelter vokser mosser heftigt under udnyttelse af overmættet CO_2 . Før jordene blev drænede, kom grund-

vandet oftere til syne i kanten af søerne og dannede mosrige kildefelter her.

Det er vigtigt at bemærke, at der ikke er en tydelig sammenhæng mellem koncentrationerne af CO_2 og bikarbonat. Høje CO_2 værdier optræder både i Vestjylland ved lavt bikarbonatindhold og på Sjælland ved højt bikarbonatindhold.

Mod et nationalt CO_2 budget for ferskvand

De ferske vande afgasser CO_2 til luften. CO_2 er enten opløst i det tilførte vand fra oplandet eller produceres ved nedbrydningen af det tilførte organiske stof fra oplandet. Endvidere transporterer de ferske vande større mængder af uorganiske kulstof (DIC), hovedsageligt som bikarbonat fra landjorden til havet ($\text{DIC} = \text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$). Også organisk kulstof transporteres til havet, men en betydelig del nedbrydes undervejs i søer og vandløb til CO_2 , og en anden betydelig del aflejres i søernes bundsedynter og i vandløbenes deltaer. Størrelsen af sedimentaflejringer kendes i udvalgte søer, men er ukendt for hele Danmark. En anden ukendt størrelse er metanafgivelsen til atmosfæren. Men de øvrige størrelser kan vi beregne, dog med betydelige usikkerheder, og uden sedimentation og metanafgasning repræsenterer de således et minimumsestimater for den samlede tilførsel af kulstof fra landjorden til afgasning fra ferskvand og vandløbenes videre transport til havet.

Afgasningen fra vandet til luften kan beregnes som forskellen i CO_2 koncentration, eller mere præcist forskellen i CO_2 partialtryk, mellem vand og luft ganget med gasudvekslingshastigheden, k . Vi har brugt eksisterende data for bikarbonat, pH og temperatur i overfladevand til at bestemme CO_2 koncentrationen og fysiske modeller til at vurdere k 's størrelse i søer og vandløb (Boks 1).

I søer er det primært vindhastigheden over søen og den resulterende turbulens i overfladen, som bestemmer k . Vi har benyttet gennemsnittet af 5 forskellige empiriske modeller til at beregne k ved anvendelse af vinddata fra Danmark Meteorologiske Institut (DMI). I vandløb er det primært vandhastigheden og vandspejlets hældning, som bestemmer overfladeturbulensen og dermed k . Vandhastigheden har vi beregnet på baggrund af vandførings- og hydraulisk geometri. Derefter bestemmes k med kendte empiriske modeller som funktion af vandhastighed og vandløbets hældning.

Vores budget bygger på et gennemsnitligt scenarie over årets måneder og tyve år (1990-2010), da både CO_2 koncentration og gasud-

vekslingskoefficienten i søer og vandløb varierer med tiden. Også søers areal varierer over tid, men vandløbenes areal endnu mere; tænk bare på oversvømmelserne i februar 2020. For at inddrage disse usikkerheder i vores opskalering fra de lokale observationer til det nationale niveau, har vi simuleret den totale kulstoffrigivelse et stort antal gange (1000) ud fra de observerede fordelinger for hver størrelseskategori af søer og vandløb. Dette giver en indikation af usikkerhedens størrelse, som dog kan være overestimeret, da ikke alle fordelingerne er normale, men har positiv skævhed.

Beregningerne viser, at vandløbene samlet set afgasser omkring tre gange så meget CO₂ som søerne (Tabel 1). Det er forventeligt, da CO₂-overmættet vand fra landjorden til stadighed tilføres vandløbene og vandets opholdstid er meget kortere end i søerne. De små bække øverst i oplandene er i tæt kontakt til de omgivende jorde og har da også både højere CO₂ koncentration og afgassing per overfladeareal end de nedre åløb (Figur 2). Små søer har også tættere kontakt med oplandet end store søer, idet kontaktgraden, givet ved søens bredzone i forhold til søarealet, falder med kvadratroden til diameteren af vandfladen for samme form. De små søer har højere CO₂ koncentration, og de afgasser, på trods af lavere k-værdi, mere CO₂ til luften per overfladeareal end de større søer (Figur 2) /2/.

Et foreløbigt nationalt budget

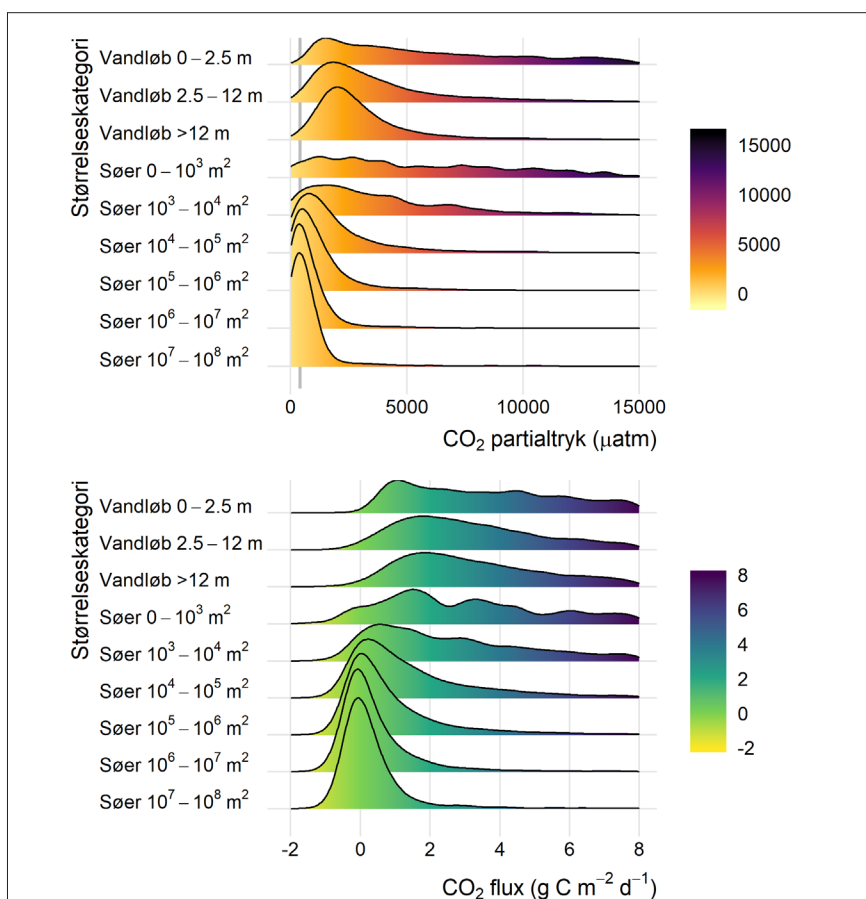
Samlet frigør vandløb og søer årligt 1335 gigagram C til luften som CO₂. Andre poster i budgettet er dog også af betydning. Vi har forsøgt at estimere transporten af kulstof (både uorganisk og organisk), som ender i havet. Ved at benytte en gennemsnits afstrømning på 328 mm og middelværdier for total organisk kulstof (TOC) samt opløst uorganisk kulstof (DIC) på henholdsvis 7,8 og 32,7 mg C per L beregner vi årlige transporter på 108 og 450 gigagram C (i alt 558). En betydelig del af den organisk kulstof, som tilføres havet, vil senere blive omsat og frigjort som CO₂ til atmosfæren.

Tidligere anvendte man en lukket rørmodel til at beskrive sammenhængen mellem landjorden og havet. Ferskvand var røret, som stoffet røg uomsat igennem og derfor ikke indgik i den samlede globale balance. Det fremgår nu af vores beregninger, at afgangningen fra vandløb og søer er markant større end transporten gennem ferskvand til havet.

Den samlede afgassing plus transport af kulstof i vandløb og søer beløber sig til 1893 gigagram C per år (Tabel 2). Estimatet svarer til 6,7 % af primærproduktionen på landjor-

Tabel 1. Den årlige middel afgassing af CO₂ fra Danmarks søer og vandløb opdelt i forskellige størrelseskategorier. Alle tal er angivet som gigagram kulstof (109 gram C = tusinde tons) per år. Usikkerheden er vurderet ved Monte-Carlo simulationer. De opsummerende statistiske tal dækker 50 % af de målte midterste værdier fra 1. til 3. kvartil værdier angivet i tabellen. De samlede usikkerheder er meget betydelige. De forstærkes muligvis af, at data ved Monte-Carlo simulation antages at være normalfordelte, mens de ofte er positivt skæve (fx. CO₂ fluxe i Figur 2).

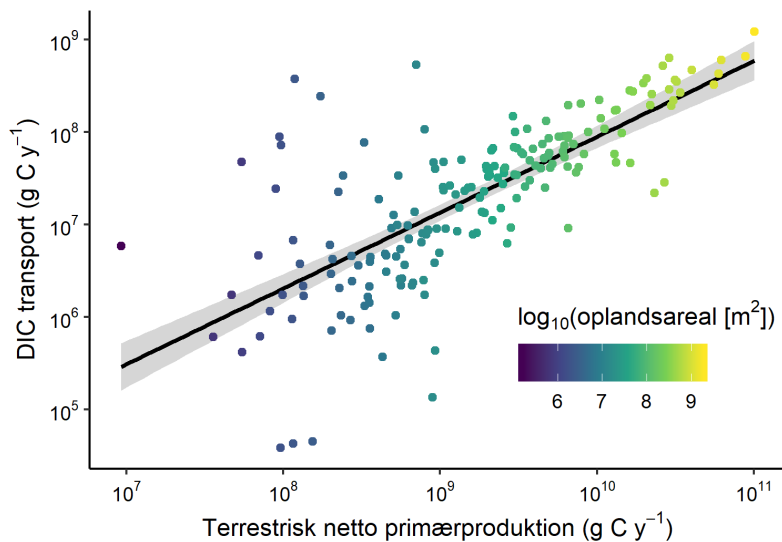
Størrelseskategori	Middel (1. - 3. kvartil)	Sites/samples
Søer 0-103 m ²	160.7 (28.8 - 294.4)	243/305
Søer 103-104 m ²	196.4 (25.4 - 371.2)	383/1175
Søer 104-105 m ²	72.4 (-24.1 - 165.3)	517/6327
Søer 105-106 m ²	45.4 (-23.8 - 119.4)	273/12848
Søer 106-107 m ²	69.5 (-91.7 - 235.8)	100/7206
Søer 107-108 m ²	22 (-33.2 - 77.6)	8/951
Søer total	566.5 (248.7 - 873)	1524/28812
Vandløb 0-2,5 m	229.6 (94.4 - 368.6)	37/2248
Vandløb 2,5-12 m	404 (-269.9 - 1119.9)	194/13945
Vandløb >12 m	135.7 (-46 - 327.6)	95/8795
Vandløb total	769.4 (66.6 - 1470.2)	326/24988
Ferskvand total	1335	1850/53800



Figur 2. Øverst: CO₂ partialtryk i søer og vandløb af forskellig størrelse, den lodrette grå linje markerer atmosfærens indhold. Nederst: CO₂ flux i søer og vandløb af forskellig størrelse, positive værdier betyder frigivelse af CO₂ til atmosfæren. Frigivelsen per areal er især stor i vandløb og små søer.

den i Danmark, som er vurderet fra satellitdata /3/. Estimatet medtager som nævnt ikke stofsedimentation og metanafgassing i vandløb og søer undervejs og er således et mindst estimat for de ferske vandes rolle i kulstofkredsløbet. Ved inddragelse af lavbundslande i

ådalene, som en del af vandløbenes naturlige hydrologi, vil vandløbenes bidrage stige. Men stigningen vil være mindre end den afgassing, der sker lige nu fra de tørlagte jorde /4/. Nettoeffekten af inddragelse af lavbundsjordene som vådområder vil derfor være mindre CO₂



Figur 3. Transporten af opløst uorganisk kulstof (DIC) som funktion af primærproduktionen på land. Både x- og y-akserne er log-10 transformerede. Vandløbsstationerne er farvet efter størrelse af deres opland. Jo større den samlede produktion er i vandløbsoplandet desto større bliver transporten af uorganisk kulstof også. Variationen omkring linjen er større i små oplande, men mindskes med øget areal, når de små vandløb samles til større åer for til sidst at havne i havet.

afgasning til atmosfæren, fordi organisk kulstof vil ophobes i jorden og i vegetationen på lavbundsgrunde.

Perspektiv

Vores budget inddrager centrale poster af hidtil ukendt størrelse i den danske kulstofbalance. Afgasningen af CO₂ fra søer og vandløb er markant, og udgør 4,7 % og 14 % af henholdsvis primærproduktionen på land og den samlede CO₂ udledning fra Danmark i 2015 /5/. Det er dog også tydeligt, at usikkerheden på estimatet er enorm, hvilket skyldes flere ting. Antallet af målinger er lavt, og det gælder især for små vandløb og søer, som er de vigtigste. Endvidere viser svenske undersøgelser, at et akkurat vandløbsareal er essentielt for at opstille et korrekt budget. Vi har dækket afgasningen af CO₂, men afgasningen af metan kan især fra søer og vådområder,

Tabel 2. Primærproduktionen på landjorden og CO₂ afgasning fra søer og vandløb i Danmark samt transport af uorganisk kulstof (DIC) og organisk kulstof (TOC) gennem søer og vandløb til havet. Metan-afgasning og kulstofdeponering i søer og vådområder er ikke kendte. Alle værdier i gigagram C per år.

	Gigagram C per år
Primærproduktion på land	28140
CO ₂ afgivelse fra søer og vandløb	1335
Uorganisk kulstoftransport i vandløb	450
Uorganisk kulstoftransport i søer	108

men også vandløb, udgøre en markant post i kulstofbudgettet, og metan er en mere potent drivhusgas end CO₂. Vi kender ikke denne størrelse, da målingerne er få.

Målinger viser dog, at vandløb og søer er vigtige i den nationale kulstofbalance, at CO₂ afgasninger er betydelige og især fra små vandløb og søer. Ferskvands rolle er reelt markant større, da vi ikke har kunnet fastlægge kulstofftabene til sedimentation og til metan afgasning. Det er faktisk lidt overraskende, at regnskabet ikke har kunnet gøres helt op i betragtning af tidens store fokus på drivhusgasser og klima. Vi arbejder på at gøre budgettet mere komplet og mere præcist og kunne dække hele Norden.

Boks 1:

Udveksling af gas (F) mellem vand og atmosfære afhænger af gasudvekslingshastigheden (k, m dag⁻¹) og koncentrationen (mg L⁻¹) i vand (G_{vand}) og luft (ligevægtskoncentrationen, G_{luft}):

$$F = k \cdot (G_{\text{vand}} - G_{\text{luft}})$$

k₆₀₀ som er k normaliseret, bestemmes fra empiriske modeller. For søerne har vi brugt et gennemsnit af fem forskellige modeller; en af dem beskriver k₆₀₀ som funktion af vindhastighed (W, m s⁻¹) og søareal (A, m²) /6/:

$$k_{600} = (2.51 + 1.48 \cdot W + 0.39 \cdot W \cdot \log_{10}(A)) \cdot 0.24$$

For vandløbene benyttes en formulering hvor k₆₀₀ afhænger af vandløbets hældning (S, m m⁻¹) og vandhastighed (V, m s⁻¹) /7/:

$$k_{600} = 2841 \cdot S \cdot V + 2.02$$

Vandhastigheden er bestemt ved hydraulisk geometri, som beskriver sammenhængen for vandhastighed, dybde (D, m) og bredde (B, m) som funktion af vandføring (Q, m³ s⁻¹) /7/. Et af de mest kritiske elementer i beregningen er det samlede danske vandløbsareal, som jo kan variere meget over året. Her har vi brugt tidligere anvendte tal /8/. Vandløbets hældning og søernes areal er bestemt ud fra GeoDanmark data.

Referencer

- /1/ Berner, E. K. & Berner, R. A. 1996. Global Environment. Water, air, and geochemical cycles. Prentice Hall Inc.
- /2/ Martinsen, K. T., Kragh, T., & Sand-Jensen, K. (2020). Carbon dioxide efflux and ecosystem metabolism of small forest lakes. *Aquatic Sciences*, 82(1), 9.
- /3/ Zhao, M., Heinsch, F. A., Nemani, R. R., & Running, S. W. (2005). Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set. *Remote sensing of Environment*, 95(2), 164-176.
- /4/ Martinsen, K. T., Kragh, T., & Sand-Jensen, K. (2019). Carbon dioxide fluxes of air-exposed sediments and desiccating ponds. *Biogeochemistry*, 144(2), 165-180.
- /5/ Energi- og olieforum. Rapport: Energistatistik 2017.
- /6/ Vachon, D., & Prairie, Y. T. (2013). The ecosystem size and shape dependence of gas transfer velocity versus wind speed relationships in lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 70(12), 1757-1764.
- /7/ Raymond, P. A., Zappa, C. J., Butman, D., Bott, T. L., Potter, J., Mulholland, P., ... & Newbold, D. (2012). Scaling the gas transfer velocity and hydraulic geometry in streams and small rivers. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 2(1), 41-53.
- /8/ Thodsen, H., Tornbjerg, H., Windolf, J., Bogestrand, J., Larsen, S.E., Ovesen, N.B. & Kjeldgaard, A. (2018): Vandløb 2016 - Kemisk vandkvalitet og stoftransport. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE.

KENNETH THORØ MARTINSEN (kenneth.martinsen@bio.ku.dk) er videnskabelig assistent og forsker i stofomsætning og CO₂ udveksling i søer og vandløb. KAJ SAND-JENSEN (ksandjensen@bio.ku.dk) er professor og forsker i økosystemprocesser og biodiversitet i søer og vandløb samt biodiversitet i havet og på landjorden. THEIS KRAGH (tkragh@biology.sdu.dk) er lektor på Syddansk Universitet og forsker i kulstof- og næringsomsætning samt fiskebiologi i søer. Studiet er udført på Ferskvandsbiologisk Laboratorium, Biologisk Institut, Københavns Universitet med støtte fra COWIfonden til KSJ og KTM.