

Om forfatterne



Jonas Stage Sø er postdoc ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet. I sin forskning undersøger han methan og CO₂-frigivelse fra ferske vande samt deres lagring af kulstof ved sedimentation. Jonas er fokuseret på kulstofbudgetter i søer og damme, og hvordan de spiller en aktiv rolle i klimadebatten.

jonassoe@biology.sdu.dk



Kaj Sand-Jensen er professor i ferskvandsøkologi ved Biologisk Institut, Københavns Universitet. Forfatter til bøger om biodiversitet, Danmarks natur, planters evolution, almen økologi og ferskvandsøkologi.

ksandjensen@bio.ku.dk



Theis Kragh er lektor i ferskvandsøkologi ved Biologisk Institut, Syddansk Universitet. Han forsker i kulstof- og fosforomsætning i søer samt fiskeøkologi.

tkragh@biology.sdu.dk

Forskningen er støttet af bevillinger fra Det Frie Forskningsråd og Aage V. Jensens Natufond.

Ny teknologi sætter tal på SØENS METHAN-BOBLER

Ved hjælp af nyudviklet måleudstyr kan vi nu sætte tal på en vigtig proces i naturen, nemlig hvor meget methan der tabes fra søer og damme til atmosfæren.

Vi kan endda skelne mellem, om dette tab foregår som bobler af methan eller ved diffusion.

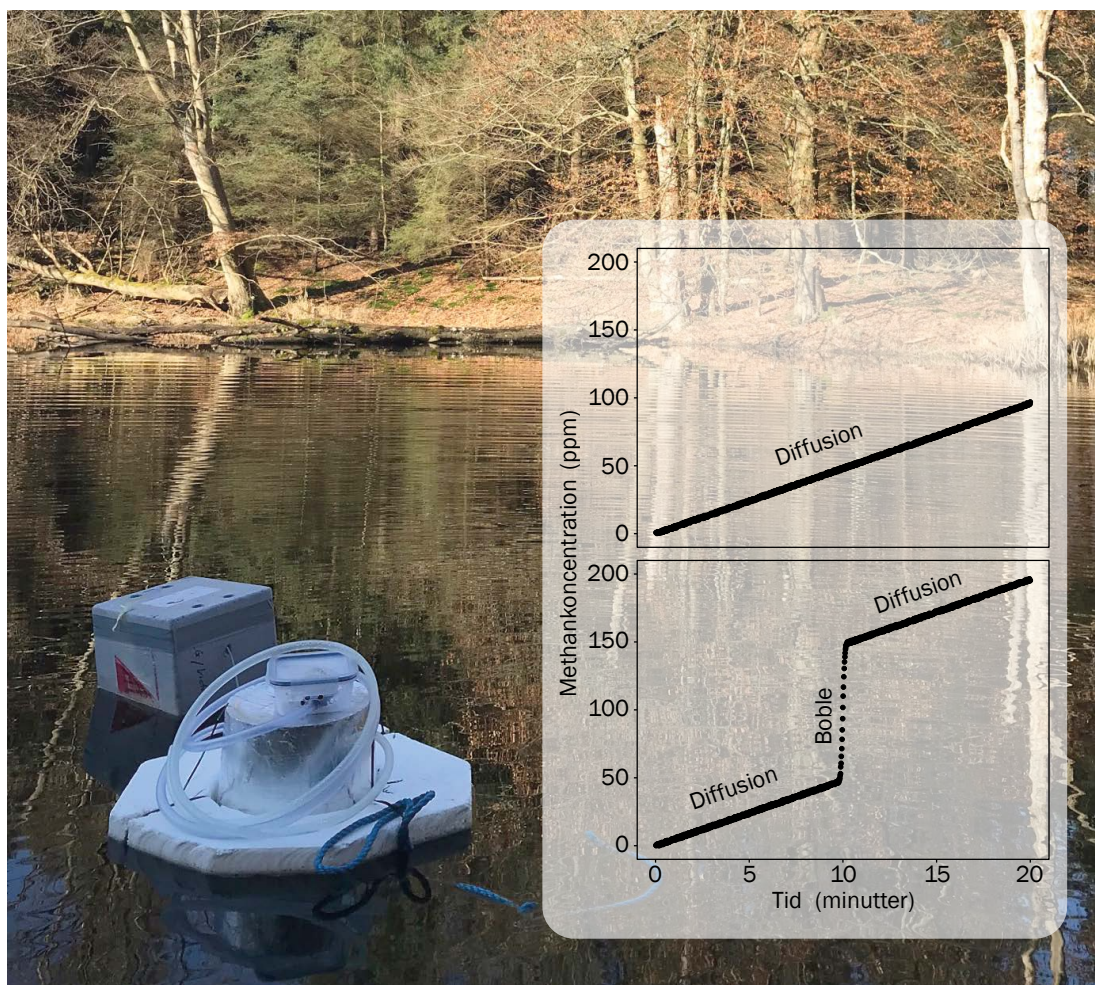
Methan (CH₄) dannes under iltfrie forhold i sedimentet på bunden af søer og damme, hvorefter det stiger op til overfladen og tabes til atmosfæren fra overfladen. Da methan er en kraftig drivhusgas, er det vigtigt at vide, hvor stor dette tab af methan til atmosfæren er for at kunne vurdere effekten på klimaet. Hidtil har det dog været vanskeligt at måle methantabet direkte. Men nu har vi udviklet udstyr, som hurtigt og billigt kan klare opgaven.

Tabet af methan til atmosfæren sker som methan opløst i vandet, der "diffunderer" fra vandover-

fladen assisteret af turbulens i overfladen. Men methan tabes også som bobler, der frigives fra sedimentet og hurtigt stiger op gennem vandsøjlen og undviger til luften. Mens den turbulente diffusion af molekyler fra overfladen ikke kan ses, kan methanbobler ofte observeres som en vedvarende strøm af bobler fra sedimentet på bestemte steder. Med en tændt lighter lige over vandet i et lokalt område med store bobler, kan methangassen endog påvises, fordi flammen blusser op. Om vinteren fanges methanboblerne i isen, og i takt med, at isen bliver tykkere, fanges stadigt flere bobler, igen på bestemte steder.

Nyt udstyr måler både bobler og diffusion

Længe har det været svært at måle methantabet både ved diffusion og som bobler. Det udstyr, vi nu har udviklet, består af flydekamre, der placeres på vandoverfladen. De er udstyret med en automatisk methansensor – og tillige med sensorer til at måle temperatur og vanddamp for at kunne udføre beregningerne – så vi løbende hvert andet sekund kan beregne methanindholdet i luften inde i flydekammeret. Kammeret er desuden udstyret med en pumpe, så vi med valgte intervaller (for eksempel hver time i døgnet) kan udskifte luften i kammeret med ny atmosfærisk



1. På billedet ses udstyret i form af et flydekammer fyldt med atmosfærisk luft; i luften findes en methansensor. (Se også figuren på næste side.) Kassen ved siden af indeholder batteri. Figuren viser målinger af methanfrigivelsen fra en dam. Graferne viser henholdsvis methantab ved diffusion (øverst) og methantab ved diffusion og en boble (nederst). Enheden ppm angiver antal methanmolekyler per million luftmolekyler i kammerluften. Til tiden 0 er kammerluften netop blevet udskiftet med atmosfærisk luft, som har et meget lavt methanindhold. Foto/Illustration: Jonas Stage Sø

luft fra omgivelserne. Målingerne kan således startes på ny med det naturlige udgangspunkt af methan i kammerluften som i atmosfæren.

Nu ses den diffusive frigivelse af methan fra vandet som en lineær stigning i koncentrationen i kammerluften. Ankommer en methanboble, stiger kammerets koncentration pludseligt (se figur 1). Forløbet registreres løbende, og efterfølgende kan de to typer af methantab beregnes ved hjælp af programmer, vi har udviklet til formålet og som kan tilgås via internettet.

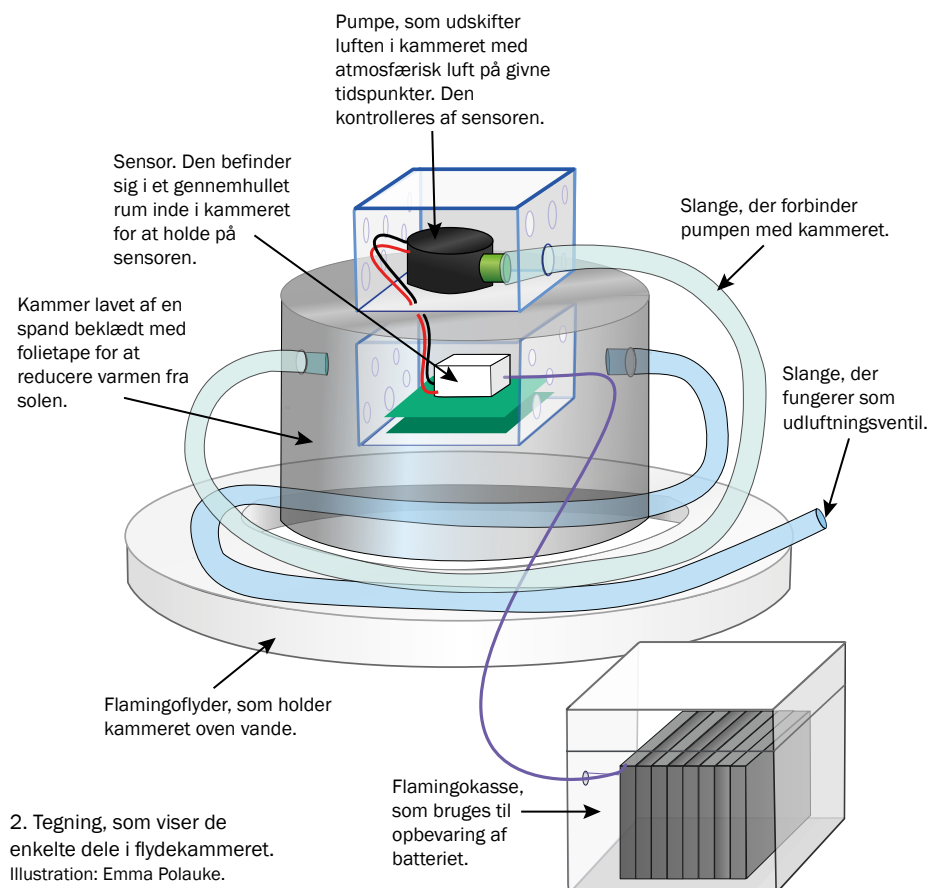
Det er vigtigt, at luften i kammeret kan udskiftes løbende (som den

netop kan i vores udstyr), for ellers opstår der med tiden ligevægt mellem koncentrationen af methan i vandet og luften i kammeret. Og så stopper udvekslingen og muligheden for at beregne den naturlige afgasning. Kamre uden udluftning kan således ikke måle methanafgasning med mindre, man manuelt løfter og lægger kammeret på vandet igen med korte mellemrum dag og nat.

Udstyret måler methantabet både ved diffusion og som bobler. Metoden er både meget hurtigere, har høj tidsopløsning og er uden de problemer, som hidtidigt udstyr til måling af methanbobler, såkaldte boblefælder, har.

Methanens veje fra sedimentet til atmosfæren

Transporten og omsætningen af methan undervejs fra sedimentet gennem vandet til atmosfæren er forskellig, afhængig af om methan findes i opløst form i vandet eller som bobler. Ved lav methanproduktion i sedimentet kan den langsomme molekylære transport ved diffusion fra sediment til bundvandet følge med produktionen i sedimentet, uden der dannes bobler. Men ved høj methanproduktion kan tabet ved molekylær diffusion ud af sedimentet ikke følge med, hvorfor der dannes bobler. Tab af methan via bobler er derfor knyttet til høj produktion af de methandannende

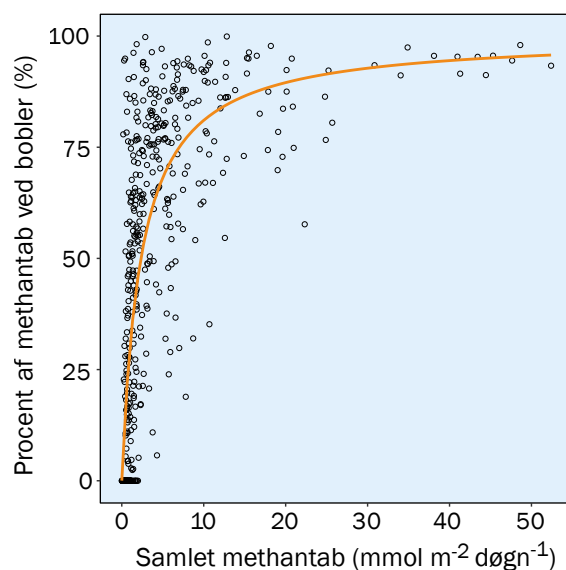


2. Tegning, som viser de enkelte dele i flydekammeret.
Illustration: Emma Polauke.

3. Figuren viser procentdelen af det samlede methantab, som sker ved bobler. Den orange linje beskriver en hyperbolsk sammenhæng mellem disse.

Det fremgår af grafen, at methantabet som bobler udgør en stadig større andel, jo større det samlede tab er, og nærmer sig 100% for de største værdier.

Methantabet er angivet i mmol per kvadratmeter per døgn. Da methan (CH_4) har molekylvægten 16, svarer 1 mmol til 16 mg methan.



bakterier. Og bakteriernes aktivitet og produktion fremmes af let omsætteligt organisk stof i sedimentet og høje temperaturer.

Når methanen frigives fra sedimentet ved diffusion til vandet, er der både mulighed for, at det oxideres af bakterier til CO_2 i sedimentets overflade og i selve vandet; eventuelt på overfladen af vandplanter. Methanbobler vokser sig til gen-

gæld store i sedimentet, indtil deres opdrift overvinder den fysiske modstand i sedimentet. Herefter stiger boblerne hurtigt op gennem vandet. På lavt vand (< 10 m), opløses blot en mindre del af boblen under opstigningen – mindst for store bobler med lille overflade i forhold til volumen, mest for små bobler med stor overflade i forhold til volumen.

Vi kan derfor logisk forvente, at

bobletabets andel af det samlede methantab fra vandoverfladen til atmosfæren stiger med øget methanproduktion. Og det er netop, hvad vi ser i vores målinger.

Når bobletabet tager over

Så længe det samlede methantab til luften er lavt, sker tabet som nævnt især ved diffusion fra vandoverfladen assisteret af turbulente hvirvler i overfladen (se figur 3). Ved et samlet dagligt methantab på 1,5–1,6 mmol methan per kvadratmeter er tabene ved diffusion og som bobler lige store, men ved et dagligt tab på 5–6 mmol methan per kvadratmeter udgør boblerne 75% af det samlede tab. Ved endnu højere methantab stiger boblernes andel til 90% eller mere.

Størrelsesfordelingen af de målte methantab afspejler den øgede betydning af methantab fra bobler. Det indebærer, at de samlede bobletab fra de undersøgte danske søer og damme på årsbasis markant overstiger tabene ved diffusion. De samme markante forskelle finder vi ved at inddrage alle udenlandske målinger, der findes i litteraturen. I de næsten 1000 målinger, vi har samlet fra Danmark og resten af verden, udgør methan som bobler 75–83% af det samlede tab.

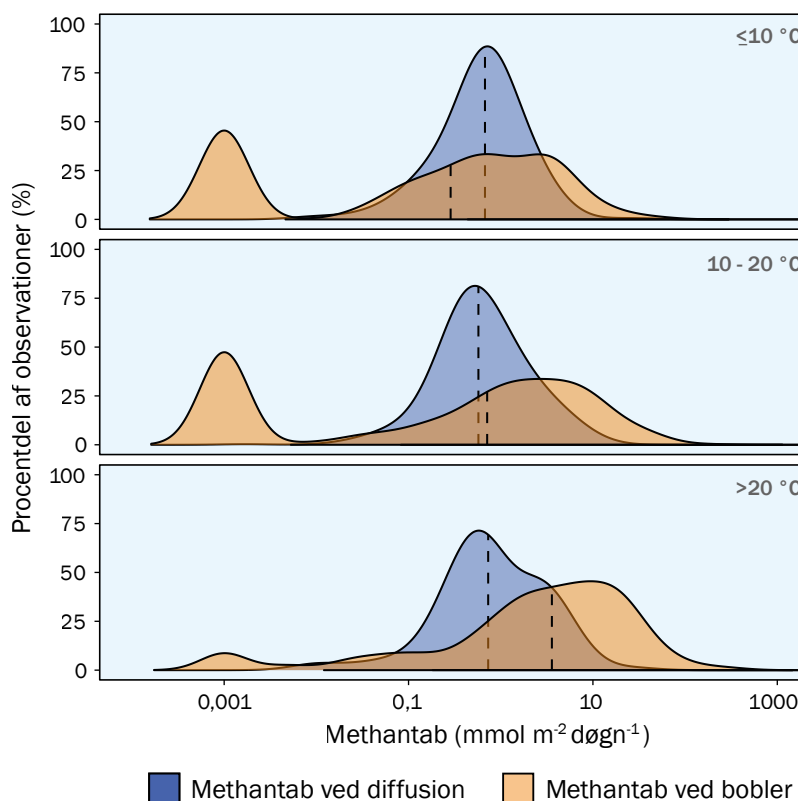
Fra Danmark til troperne

Højere temperaturer øger markant nedbrydningen af organisk stof i sedimentet, og methandannelsen stiger forholdsvis mere end CO_2 -dannelsen ved øgede temperaturer. Typisk stiger methandannelsen 4–5 gange og CO_2 -dannelsen 2 gange, når temperaturen øges med 10 grader (se figur 4). Om sommeren herhjemme udgør methantabet derfor en samlet større andel af gastabet end om vinteren. Men methan tabes fortsat om vinteren og fortsat også som bobler, især i næringsrige damme, der dækkes af is, hvor bundvandet overalt bliver iltfrit.

Ser vi fra Danmark og andre tempererede områder mod troperne, foregår langt det største tab i de varme

4. Fordeling af methantabet ved diffusion og som bobler ved tre forskellige temperaturintervaller. Methantabet er vist på logaritmiske akser for at kunne vise hele spændvidden på 1 million fra laveste til højeste værdier. Men da logaritmen kun er defineret for positive tal, har vi lagt 0,001 til, for at nul-værdier kan komme med. Toppen, der ses ved 0,001, betegner derfor procentdelen af observationer, hvor der ingen bobletab er observeret. De lodrette stiplede linjer viser medianen med 50% af værdierne under og 50% over.

Under 10 °C ligger medianen for bobletabet lavere end medianen for diffusionstabet, men omvendt over 20 °C ligger medianen for bobletabet markant over diffusionstabet. Medianen for diffusionstabet varierer meget lidt med øget temperatur, mens medianen for bobletabet stiger særdeles meget (mere end 12 gange) med øget temperatur. Bemærk også, at bobletab nær nul stort set forsvinder ved høje temperaturer.



lande som bobler, fordi methanproduktionen fremmes så kraftigt af de øgede temperaturer. Målingerne er fortsat ret få i tropenerne. De er derfor de områder på Kloden, hvor det er særlig vigtigt at få flere målinger af methantabene for derved mere præcist at kunne angive størrelsen af de samlede globale methantab.

CO₂-udvekslingen måles med

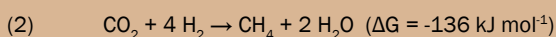
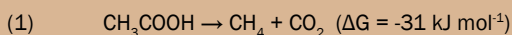
Vores flydekamre er også udstyrede med CO₂-sensorer, som måler koncentrationen i kammerluften, så udvekslingen mellem vandet og luften kan beregnes. Da CO₂ i modsætning til methan er meget opløseligt i vand, dannes der ikke CO₂-bobler i sedimentet. Udvekslingen mellem vandet og luften sker udelukkende ved diffusion.

Mens methan altid frigøres fra vandet til luften, kan CO₂ gå begge veje. På forårs- og sommerdage med intensiv fotosyntese er vandet i søer og damme ofte undermættet med CO₂, som derfor optages fra luften. Men det meste af året og om natten med overvejende respiration, CO₂-dannelse og overmætning, tabes CO₂ fra vandet til luften. På denne vis kan flydekamrene sætte

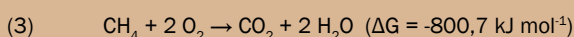
Processer der danner og fjerner methan

Methan både dannes og fjernes i søer og damme. Methandannelsen skyldes methandannende bakterier, som nedbryder dødt organisk stof for at skaffe sig energi til vækst. Methandannelsen sker især under iltfrie forhold nede i bunden. Endvidere må andre elektron-acceptorer såsom nitrat, sulfat og jernoxid ikke være til stede, da de foretrækkes af andre bakterier, fordi de leverer mere energi ved nedbrydning af det organiske stof, end methandannelsen gør. Først når oxygen, nitrat, sulfat mv. er opbrugt, vil methandannelsen begynde. Energiudbyttet for mikroorganismerne ved methandannelse er blot mellem 1 og 5% af den energi, der opnås ved nedbrydning med oxygen af et molekyle glukose.

I ferskvand er de to vigtigste methandannende processer den acetoclastiske (1) og den hydrogenotrofiske (2). Den acetoclastiske udnytter acetat (eddikesyre) og står sandsynligvis for størstedelen af methandannelsen, mens den hydrogenotrofiske udnytter hydrogen. Forholdet mellem de to processer varierer alt efter tilgængeligheden af acetat og hydrogen.



ΔG , Gibbs frie energi, angiver energiudbyttet per mol af substratet. Methan, der dannes i søer og damme, vil med tiden enten tabes til atmosfæren eller, hvis det kommer i kontakt med oxygen, nitrat eller sulfat i vandet, vil det kunne nedbrydes (3; oxideres) til CO₂. Som navnet siger, kræver det et oxidationsmiddel, i eksemplet er benyttet oxygen (3). Når methan brændes af i et gasfyr, udnytter man den store varmeenergi, der frigøres.



Der findes op mod 200 substrater, som enten kan eller menes at kunne være med til at danne methan, men de to nævnte processer er de vigtigste.

På billedet ses et udsnit af den tilfrosne Bøllemosen. I isen opsamles der i bestemte områder methanbobler fra sedimentet umiddelbart under. Når isen vokser, fanges boblerne på nogenlunde de samme steder over tid. Så selv om de lave temperaturer om vinteren dæmper methanproduktionen, stopper den ikke fuldstændigt. Foto: Søren Jessen

Videre læsning:

Resultaterne fra denne artikel er fra en nyligt udgivet artikel i Biogeochemistry: Sø, J.S., Martinsen, K.T., Kragh, T. et al. Ebullition dominates high methane emissions globally across all lake sizes. Biogeochemistry 168, 43 (2025). doi.org/10.1007/s10533-025-01233-8

Læs mere om de processer, der producerer methan i søbunden i artiklen: På jagt efter methan-ventilen i verdens søer. Aktuell Naturvidenskab nr. 6/2023, side 30-35.



tal på den samlede gasudveksling for de to vigtigste klimagasser.

Da udstyret bygger på egenproduktion af kamre, samling af elektronik, pumpe, batterier mv. for en samlet pris på omkring 3000 kr. per kammer, har vi kunnet bygge mange kamre. Antallet er en anden forudsætning for at få gode opgørelser, da det er nødvendigt at kunne dække både de rumlige og tidslige variationer i udvekslingen af

methan og CO_2 . Det bliver derimod alt for dyrt, hvis det skal ske med kommercielt måleudstyr, der koster 300.000 kr. per kammer.

Methantabet er vigtigt, men kun en del af debatten

Vi er interesseret i at kende methantabet, fordi varmeeffekten af methan per vægt er 28 gange større end for CO_2 . Selv om atmosfærens methanindhold er meget lavere end indholdet af CO_2 , så udgør methans varmeeffekt 26% af CO_2 's varmeeffekt. Vores særlige interesse for søer og damme skyldes – udover, at vi er ferskvandsbiologer – at methantabet fra søer og damme skønsmæssigt udgør 15–19% af det samlede globale tab til atmosfæren, selv om det globale areal af søer og damme kun udgør 3% af det samlede landareal. Det forholdsvis store tab fra søer og damme skyldes, at de modtager meget organisk stof med vandet fra landjorden, og deres sedimenter er ofte iltfrie, så methan kan dannes.

Derimod er det et forkert at opfatte søer og damme som "skurke" i

klimadebatten – et synspunkt, vi har mødt. Det er helt naturligt, at de modtager meget organisk stof med vandet fra hele deres opland, der ved nedbrydning frigør CO_2 og eventuelt methan. Men samtidig tilbageholder de også permanent meget organisk stof med nitrogen og fosfor, som indbygges i et stadigt tykkere sediment. Sedimentationen forhindrer, at stofferne transporteres videre til kystvandene og der skaber iltvind og danner methan og svovlbrinte (dihydrogensulfid, H_2S).

Samtidigt opmagasinerer søer og damme vand ved kraftig nedbør og mindsker risikoen for oversvømmelser og kostbare tab længere nede i vandsystemerne. Endelig beriger vandet i landskabet naturen samtidig med, at biodiversiteten er høj og arterne ofte forskellige mellem de enkelte søer og damme. Så ved at omdanne dyrkede lavbundarealer til moser, søer og damme i forbindelse med Trepartsaftalen, mindsker man det samlede tab af drivhusgasser, skaber natur og biodiversitet og mindsker belastningen af de hårdt trængte kystvande. ■

Bliv studerende for en dag

Som **Studerende for en dag** følger du undervisningen på den uddannelse, du er interesseret i. Du spiser frokost med en studerende, som viser dig rundt - og du bliver klogere på, om uddannelsen er den rigtige for dig.

Besøg **Anvendt matematik, Biokemi og molekylær biologi, Biologi, Biomedicin, Datalogi, Farmaci, Fysik, Kemi, Medicinalkemi, Matematik, Matematik-økonomi** eller **Kunstig intelligens** på SDU i Odense.

Tilmeld dig på sdu.dk/nat/studerendeforendag