

PÅ JAGT EFTER METHAN-VENTILEN I VERDENS SØER

Ørnsø ved Silkeborg
Foto: Jens Cederskjold/
CC BY 3.0 Deed

Om forfatteren
Af Kristian Sjøgren,
videnskabsjournalist.
ksjoegren@gmail.com



**DANMARKS FRIE
FORSKNINGSFOND**
INDEPENDENT RESEARCH
FUND DENMARK

Artiklen er sponsoreret af Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers.

Danmarks Frie Forskningsfond dækker alle videnskabelige hovedområder og uddeler hvert år godt 1 mia. kr. til forskningsprojekter baseret på forskernes egne ideer. Danmarks Frie Forskningsfond består af 84 anerkendte forskere udpeget på baggrund af deres høje faglige kompetence. Formand for Danmarks Frie Forskningsfond | Natur og Univers er professor ved Københavns Universitet, Henrik Grum Kjærgaard. Læs mere på www.dff.dk

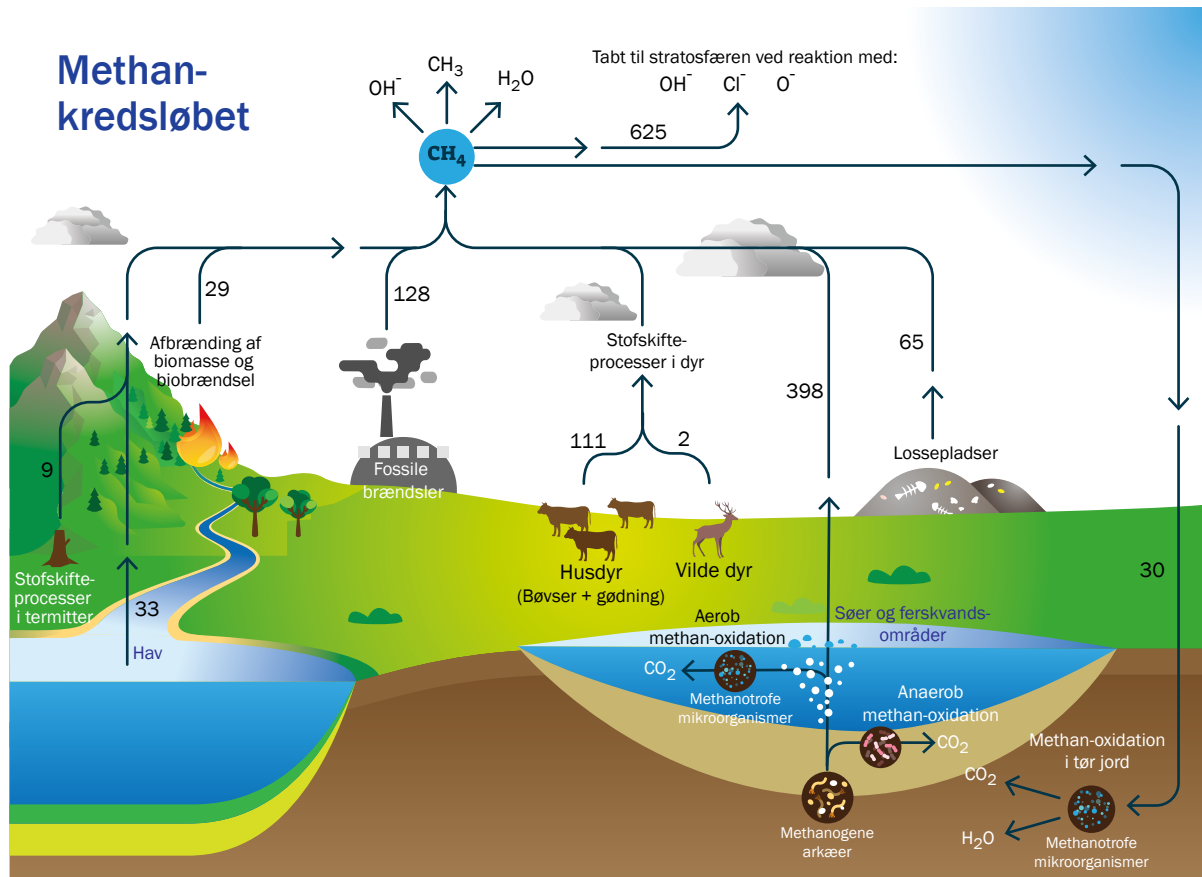
Ferskvandssøer og vådområder er de største bidragydere til drivhusgassen metan i atmosfæren, men det er endnu uklart, hvad der egentlig styrer, hvor meget metan der sendes fra søbunden mod himlen. Det skal danske forskere nu finde ud af, og forskningen kan få betydning for de modeller, der skal forudsige fremtidens klima.

Alle, der har dristet sig til at gå på bare fødder ud i en dansk sø, ved, at det bobler op fra søbunden med noget, der ligner luftbobler. Disse bobler består dog ikke af ilt, men af blandt andet drivhusgassen metan (CH₄), som bliver dannet i søbunden, bobler op mellem tærerne på den, der vover sig ud i søen, inden de rammer vandoverfladen og stiger mod himlen. I atmosfæren bidrager metan til global opvarmning, hvor metan er 25 gange mere potent som drivhusgas sammenlignet med CO₂.

Nuvel, at en dansker træder et par skridt ud i Arresø kommer ikke til at vælte den globale klimabalance, men Arresø er heller ikke den eneste ferskvandssø, hvorfra der bobler metan op. Det gælder alle verdens 117 millioner ferskvandssøer, og det gør dem og andre ferskvandssystemer til den samlede største bidragyder af metan til atmosfæren. Når køer tygger drøv og bøvser metan, eller når der bliver trukket naturgas op fra undergrunden, kommer det ikke i nærheden af at skabe lige så stor en klimaeffekt.

Atmosfærens indhold af metan er tredoblet siden industrialiseringen, og det har resulteret i et ikke ubetydeligt bidrag til de klimaforandringer, som vi fornemmer i dag, og som vi kommer til at mærke den fulde effekt af i de kommende år. I modsætning til CO₂, som vi efterhånden har ret godt styr på, er verdens klimaforskere dog stadig i tvivl om, hvad der har drevet stigningen i koncentrationen af metan i atmosfæren, og om det kommer til at stige yderligere i fremtiden, samt hvad det vil betyde for klima, biologi og mennesker.

Methan-kredsløbet



Figur modificeret efter forlæg fra Shutterstock. Tal efter Rosentreter, J.A. et al: 2021 og Saunols, M. et al: 2020.

Figuren viser de væsentligste kendte kilder til udledning af metan til atmosfæren. Tallene angiver den omtrentlige årlige udledning i millioner tons (bemærk, at der er store usikkerheder på disse tal). Methan forsvinder fra atmosfæren ved reaktioner i stratosfæren, mens methanotrofe mikroorganismer i jorden omsætter en del metan i deres stofskifteprocesser. I søen kan man se, hvordan en del af den producerede metan forsvinder igen ved anaerob oxidation af mikroorganismer i søbunden. Det er denne proces, Bo Thamdrup er særligt interesseret i.

Dette hul i forskningsverdenens kollektive viden har danske forskere nu tænkt sig af fylde ud.

»Når nu ferskvandssystemer er den største bidrager til metan i atmosfæren, og vi kan se, at koncentrationen af metan ændrer sig, gør det os interesseret i at finde ud af, hvad der sker på det mekanistiske niveau i søerne, når de frigiver metan. Det vil fortælle os noget om, hvad vi kan forvente i fremtiden, og om vi kan gøre noget ved det,« fortæller professor Bo Thamdrup fra Biologisk Institut ved Syddansk Universitet. Bo Thamdrup har modtaget en millionbevilling fra Det Frie Forskningsråd til at blottlægge ferskvandssystemernes metan-hemmelighed.

Ferskvandssøer vælter metan ud i atmosfæren

Der kan være mange forklaringer på, at verdens ferskvandssystemer muligvis har afgivet mere metan

til atmosfæren de seneste 150 år end de foregående 10.000. Mange af disse forklaringer kan skyldes menneskers aktiviteter, når vi for eksempel gøder vores marker, og det leder til større kvælstofbelastning i søerne, eller når vi i forbindelse med dæmninger laver store kunstige søer. Rismarker er også ferskvandssystemer, som formentlig bidrager en hel del til udledning af metan. I alt står ferskvandssystemer for godt halvdelen af verdens metanudledning.

Forskere har rent faktisk godt styr på, hvordan metan bliver dannet i søerne. Det sker, når nogle mikroorganismer kaldet methanogener omsætter organisk stof i sedimenterne. I processen med at lave flere mikroorganismer ud af organisk materiale i sedimenterne bliver der som biprodukt dannet metan, der starter med at ligge som lommer af sumpgas i sedimentet, indtil en



Foto: Jesper Fried Vive

Om Bo Thamdrup

Bo Thamdrup er uddannet biolog fra Aarhus Universitet, hvor han også skrev sin ph.d., inden han drog til Tyskland for at forske ved Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie. I dag er han professor ved Biologisk Institut på Syddansk Universitet, hvor han særligt interesserer sig for mikrobiel økologi og globale stofkredsløb.

Sådan bliver methan dannet i søbunden

Methanogenesen er den biokemiske proces, hvor methan (CH_4) dannes som et slutprodukt ved nedbrydning af organisk materiale. Denne komplekse proces udføres af methanproducerende arkæer og involverer flere trin.

Figuren viser overordnet den komplicerede reaktionsvej, der danner methan ud fra CO_2 og hydrogen (H).

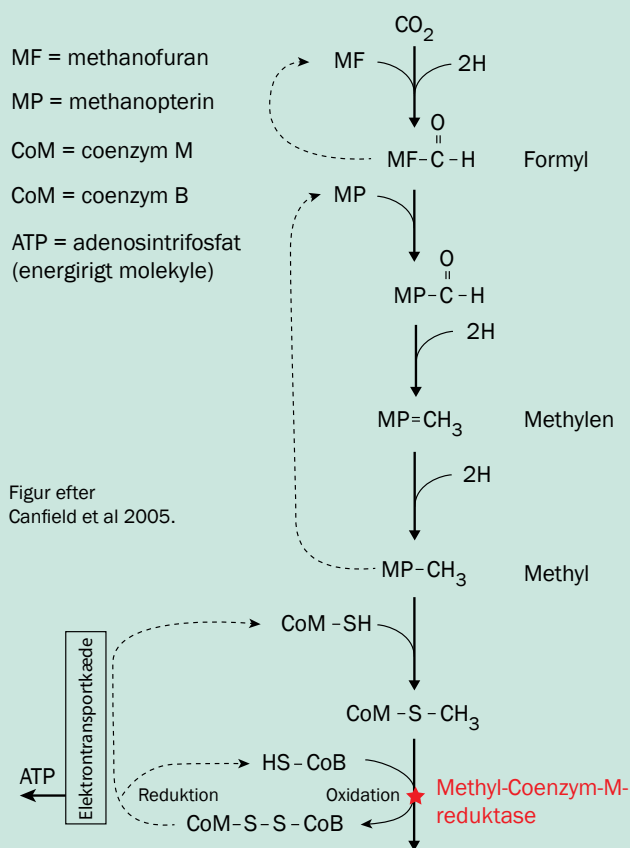
Det første trin i denne proces involverer reduktionen af CO_2 til en forløber kaldet formylmethanofuran. Dette trin er et afgørende skridt, da det skaber en reaktiv mellem-liggende forbindelse, der kan omdannes til methan. Derefter bliver formylmethanofuran omdannet til methan ved hjælp af hydrogen som en elektron- og protonkilde. Dette sker gennem flere mellemtrin, hvor forskellige enzymer og coenzymer ("hjælpeforbindelser") er involveret, inklusive coenzym M (CoM) og coenzym B (CoB), der fungerer som transportører af elektroner og protoner.

Det sidste trin i reaktionen (markeret med en rød stjerne) er katalyseret af et enzym kaldet methyl-CoM-reduktase, der er et nøgleenzym i methanproducerende arkæer.

Methanogenesen kan også involvere omdannelsen af acetat (CH_3COO^-) til methan og CO_2 . Også denne såkaldt "acetoklastiske methanogenese" udføres af methanproducerende arkæer og involverer flere enzymer og komplekse biokemiske processer.

Arkæernes udbytte af methanogenesen er hverken methan eller vand, men derimod energi, som de kan bruge til vækst.

Methanogenesen er en strengt anaerob proces, hvilket betyder, at den kun finder sted i miljøer uden oxygen. Derudover er det en del af den naturlige cyklus for carbon i akvatiske økosystemer og spiller en vigtig rolle i



nedbrydningen af organisk materiale og methanproduktionen i vådområder som søer, sumpe og moser.

I drøvtyggers fordøjelsessystemer, for eksempel hos køer, hjælper methanproducerende arkæer med at fjerne H_2 i nedbrydningen af komplekse planterester, udvinde energi fra processen og bidrage til, at processerne forløber. Denne symbiotiske relation mellem dyr og mikroorganismer er afgørende for dyrenes fordøjelsesprocesser og har en indirekte indvirkning på methankoncentrationen i atmosfæren.

fod, en klov eller en pote slipper det fri.

At der bliver dannet methan i ferskvand og ikke saltvand skyldes meget simpelt, at der faktisk ikke er så mange andre muligheder for organisk materiale i søer at blive nedbrudt på. I saltvand findes der meget sulfat, og her står sulfatbakterier for at nedbryde organisk stof. Sulfatbakterier producerer ikke methan. Det gør til gengæld methanogenerne, som i deres livs-

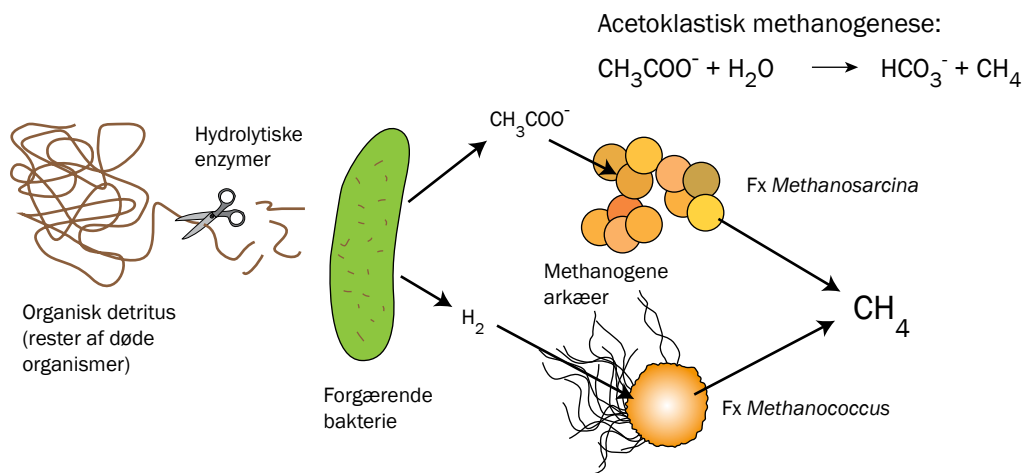
cyklus nedbryder organisk materiale og undervejs danner gasserne methan og CO_2 . Gasserne bliver frigivet til atmosfæren.

»Denne proces, hvor organisk materiale bliver omdannet til methan og CO_2 , foregår overalt, hvor forholdene er til det. Selve processen foregår også i biogasanlæg, så den er rimelig velundersøgt, og det samme er arkæernes (bakteriernes) aktiviteter. Derfor ved vi også, at jo varmere det bliver, des mere aktive bliver disse

mikroorganismer, og jo mere methan vil de producere. Det er en ond cirkel, som vi ikke rigtig kan gøre noget ved, og det bliver kun værre, i takt med at temperaturerne på kloden stiger,« forklarer Bo Thamdrup.

Mikroorganismer æder 90 % af det producerede methan

Methanogenerne er kun en del af den ligning, som er afgørende for den samlede udledning af methan fra ferskvandssystemer. En anden del af ligningen er en type af



Figuren viser, hvordan methandannelsen foregår ud fra rester af organismer (detritus) i søbunden. Selve methandannelsen foregår i methanogene arkæer i et iltfrit (anaerobt miljø), men disse arkæer er afhængige af hydrogen eller acetat til processen. Disse leveres af forgærende bakterier, der først har nedbrudt plantematerialet.

bakterier, som rent faktisk lever af methan og er i stand til at trække energi ud af gasarten, ligesom man kan trække energi ud af biogas. Man har kendt til disse bakterier i 100 år og studeret dem intenst. Denne forskning viser blandt andet, at bakterierne skal bruge ilt for at omdanne methan til noget andet, og her opstår problemet. Der findes nemlig ikke ilt i søbunden, hvor metanogenerne lever, og hvor methanen bliver produceret. Derfor spiller de bakterier, som lever af methan, nok ikke den store rolle i det samlede methanregnskab. Her kommer der dog et "men"...

»Vi har fundet ud af, at der dybere i sedimentet også findes andre mikroorganismer, som kan omsætte methan uden brug af ilt. Det er disse mikroorganismer, som er fokus i vores projekt, fordi de rent faktisk kan have betydning for, hvor meget methan der bliver frigivet fra søbunden,« siger Bo Thamdrup.

Forskernes indledende undersøgelser i Ørnsø ved Silkeborg viser, at disse mikroorganismer er i stand til at fjerne op imod 90 procent af den methan, som methanogenerne producerer. De kan med andre ord være essentielle for, at verden ikke

bliver gasset til af methan med den dertilhørende uoverskuelige påvirkning af atmosfæren, klimaet og livet på Jorden.

»Disse indledende undersøgelser rejser en masse spørgsmål, som vi er nødt til at få besvaret, hvilket er sigtet med dette forskningsarbejde. Er det normalt, at disse mikroorganismer fjerner så meget methan fra sedimentet, og foregår det også på samme måde i andre søer og i andre lande? Vi er også nødt til at vide, hvilke betingelser der understøtter fjernelsen af methan fra søbunden, og om disse betingelser ser ud til at ændre sig i fremtiden,« forklarer Bo Thamdrup.

Måske skal unikke forhold være til stede for at fjerne methan

I forskningsarbejdet skal Bo Thamdrup med sine kollegaer angribe problemstillingen fra alle tænkelige vinkler. Første mål er naturligvis at undersøge, om de methanospisende mikroorganismer også fjerner op imod 90 procent af methanen i andre danske søer. Forskellige søer har forskellige kemiske og fysiske forhold, som muligvis kan påvirke vilkårene for de mikroorganismer, som lever i søbunden. For eksempel kan vandets surhedsgrad

være anderledes, der kan være forskel på tilførslen af næringsstoffer som nitrogen og fosfor og deraf følgende algevækst (eutrofiering), søens dybde, mængden af organisk materiale, og så kan indholdet af jernforbindelser eller sulfat være forskelligt med betydning for de mikrobiologiske processer i søbunden. For eksempel er Ørnsø kendetegnet ved et højt indhold af jern, idet Funder Å, der løber ud i Ørnsø, leder en masse okker ud i søen, og når det bundfælder sig, bliver sedimentet fyldt med jernforbindelser.

»Vi har en idé om, at det kan spille ind i mikroorganismernes liv, men det skal vi undersøge i både søerne og i laboratoriet,« fortæller Bo Thamdrup.

Forskerne vil blandt andet indsamle prøver fra søerne for både at undersøge det mikrobielle samfund i søbunden og dets kapacitet for at danne methan og omdanne det til biomasse og CO_2 , hvilket sammenlignet med methan er en svagere drivhusgas. Det gør forskerne i laboratoriet ved at tilføre isotopmærket methan til sedimentprøverne og følge, hvad der bliver af methanen, og hvordan det bliver omsat. Bliver det i store mængder indarbejdet i det

Søer, søer og atter søer

Der findes i verden flere end 117 millioner søer, som samlet set dækker 3,7 procent af klodens landoverflade. De fleste af søerne er dog relativt små og ikke større end et par fodboldbaner. Det gælder 90 millioner af dem, hvor man på en god dag kan kaste en sten fra den ene bred til den anden. Langt de fleste søer ligger også relativt tæt på havets overflade, idet 85 procent findes i en højde på under 500 meter. De kan dog også findes meget højere oppe i landskabet. Den højest placerede sø er Ojos del Sadado på grænsen mellem Chile og Argentina 6.290 meter over havets overflade. Der vokser ingen planter i søen, men forskere har identificeret mikroorganismer, som kan tåle både salt, kulde og syre i det gamle vulkankrater.

Verdens største sø er Bajkalsøen i Rusland, som indeholder 20 procent af verdens ferskvand og rummer næsten 23.000 km³ vand. Søen er samtidig 1.741 meter dyb og dermed verdens dybeste. Samlet rummer Great Lakes på grænsen mellem USA og Canada cirka 20 procent af verdens ferskvand, men fordelt på flere søer. Den næst dybeste sø i verden er Tanganyikasøen, som samtidig er verdens længste med en længde på hele 660 kilometer. Finland kaldes i folkemunde for de tusinde søers land, og det er meget passende med 187.000 søer i landet. Det blegner dog i forhold til Canadas to millioner søer.

Den store variation i verdens søer kommer også med en stor variation i fysiske forhold, kemi, biologi og mikrobiologi. Om disse forhold er nok til at have betydning for udledning af metan fra søerne, skal Bo Thamdrups forskningsarbejde vise.



Great lakes på grænsen mellem USA og Canada rummer ca. 20 % af verdens ferskvand.

Foto: NASA

Variationen er knap så stor blandt Danmarks 120.000 søer, hvoraf de fleste er ganske små. Danmarks største søer er Arresø og Esrum Sø, der begge ligger i Nordsjælland. Fælles for de fleste danske søer er, at de blev dannet i forbindelse med, at isen fra den seneste istid trak sig tilbage og efterlod store isklumper i landskabet. Isklumperne trykkede ikke bare landskabet ned og lavede fordybninger, men fyldte efterfølgende også hullerne op med smeltevand.

Der kan være stor forskel på de kemiske forhold i de danske søer. For eksempel indeholder søer i Jylland generelt mere sulfat, da Jylland i større udstrækning består af gammel havbund, der har et naturligt højere niveau af sulfat end andre former for jordbund. Søer, som ligger nær landbrug, har også ofte et højere indhold af kvælstof. Søer, der får vand fra åer og vandløb, har generelt højere koncentrationer af det, som kommer opstrøms fra vandløbet, om det så er jern eller andre mineraler.

mikrobielle miljø, er det et tegn på, at der er godt gang i de methanel-skende mikroorganismer, men hvis det derimod bare stiger til vejrs, er aktiviteten af de methanspisende bakterier ikke så høj.

Forskerne undersøger også, hvilken dybde processerne foregår i. Det gør de ved at undersøge methan-omsætningen i forskellige lag af deres sedimentprøver.

En del af forskningsarbejdet går også ud på at karakterisere de mikroorganismer, som står for

methanbalancen. Til det formål benytter forskerne genetiske sekventeringsmetoder, hvormed de kan karakterisere alle relevante mikroorganismer. Disse sekventeringsundersøgelser giver også forskerne et indblik i de gener, som er ansvarlige for omdannelsen af metan til noget andet.

»Når vi har fået kortlagt alt det, skal vi også undersøge, hvad der sker, når vi ændrer på de kemiske og fysiske forhold i prøverne. Hvad sker der, når vi ændrer ved surhedsgraden eller mængden af jern i vandet? Hvad har det af betydning

for omsætningen af metan? Det vil også her være interessant at se, hvad vi kan gøre for at stimulere processen yderligere. Her kan vi få indsigt i, hvad vi muligvis kan gøre i søer for at øge omsætningen af metan og dermed mindske frigivelsen af drivhusgassen til atmosfæren,« siger Bo Thamdrup.

Muligt samarbejde mellem mikroorganismer

Endelig er det sigtet med forskningsarbejdet, at forskerne skal kortlægge den enzymatiske processer, som mikroorganismer-

ne benytter sig af, når de skal omdanne methan. Bo Thamdrup fortæller, at methan helt generelt er et svært molekyle at splitte ad, men at der er energi i det for de mikroorganismer, som kan finde ud af det. Det kræver dog, at der først tilføres energi for at sætte gang i processen.

Fra bakterier i havbunden ved forskere, hvordan det er muligt for mikroorganismer at udnytte energien i methan, men det kan ikke nødvendigvis overføres til ferskvandsmiljøet. Faktisk er det muligt, at processen ikke kan udføres af én art alene, men at den kun kan udføres af typer mikroorganismer i fællesskab.

Kortlægningen af de enzymatiske processer i omdannelsen af methan kan give forskerne en fornemmelse af, om nogle miljøændringer i fremtiden kan bremse processen og dermed lede til større udledning af methan fra søer, eller om miljøændringer måske i stedet kan fremme processen. Det kan dreje sig om højere temperaturer

eller større udledning af forskellige stoffer til søer som følge af øget nedbør.

»Vi vil med dette projekt skabe indsigt i, hvordan dette filter for methanudslip responderer på for eksempel klimaforandringer. Noget kan påvirke filteret negativt, mens andet kan være positivt. Man kunne forestille sig, at øget nitratudledning fra landbrug kan være med til at holde methanudledningen i skak, da nogle af disse organismer i søbunden bruger nitrat som elektronreceptor, men vores foreløbige resultater tyder dog på, at det ikke er tilfældet,« forklarer Bo Thamdrup.

Skal med i avancerede klimamodeller

Bo Thamdrup mener, at de opdagelser, som bliver gjort i forskningsarbejdet, kan komme til at påvirke den måde, som vi forvalter ferskvandsområder på. Opdager forskerne, at forvaltningspraksis ændrer på nogle af de processer, som viser sig at være vigtige for methanudledningen, kan det give anledning til at

se på, om praksis skal justeres for ikke at lede til øget methanudledning. Det omvendte kan også være tilfældet.

Efter forskerne har fået kortlagt de danske søer og omdannelsen af methan i dem, er det også målet at bekræfte fundene i søer rundt om i verden, hvor forholdene muligvis er anderledes, men hvor de samme processer formentlig styrer både de mikroorganismer, som producerer methan, og dem, der spiser det igen, inden det bliver frigivet til atmosfæren.

»Ultimativt skal vores resultater indgå som en lille brik i de store matematiske modeller, der prøver at komme med så præcise bud på fremtidens klima som muligt. I den sammenhæng spiller methan en rolle, og derfor gør både de methanproducerende og de methanspi-sende mikroorganismer det også. Forståelsen af dem og det, som de laver, er en lille brik i det store puslespil, men det er en vigtig brik at få på plads for at få et fuldstændigt billede,« siger Bo Thamdrup. ■

Videre læsning:
Canfield, D.E., E. Kristensen, and B. Thamdrup (2005): *Aquatic Geomicrobiology*. Elsevier Academic Press

Saunio, M. et al: 2020: *The Global Methane Budget 2000–2017*. Earth System Science Data. Vol. 12, iss. 3 ESD, 12, pp 1561–1623.

Rosentreter, J.A. et al: 2021: *Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources*. Nature Geoscience, 14, pp 225-230.

KOM I LABORATORIET PÅ ROSKILDE UNIVERSITET OG FÅ RESULTATER MED HJEM TIL DIN SRP/SOP

Hvis du skriver dit studieretningsprojekt inden for **Biologi, Bioteknologi, Fysik, Kemi** eller **Matematik**, så har du mulighed for at komme i laboratoriet på Institut for Naturvidenskab og Miljø på Roskilde Universitet og få resultater med hjem til dit projekt

Vores øvelser lægger op til, at du arbejder med din egen faglige vinkel, men du vil sammen med andre gymnasieelever fra hele landet lave eksperimenterne i laboratoriet med undervisning af Roskilde Universitets forskere på dagen.

Med øvelserne får du:

Adgang til den nyeste forskning på området
Adgang til vores professionelle udstyr og laboratorier
Sparring med en forsker fra Roskilde Universitet på dagen
Inspiration til litteratur, hvor du kan benytte Roskilde universitetsbibliotek.

SRP/SOP-øvelserne ligger i uge 9 og i uge 44 2024
Læs mere og tilmeld dig via QR-koden.
Næste tilmeldingsfrist er den 16. februar.

RUC

