

Målinger i felten er også lavet i forsøgsområder, hvor vi som her eksperimenterer med en varmere sommer ved hjælp af små drivhuse. Vi ser, at optaget af metan stiger som forventet, når det er varmere. Det er overraskende, at det også er tilfældet i selv meget tørre jorder som her på billedet.

Foto: Bo Elberling

Forfatterne



Bo Elberling er professor ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Han forsker i processer i jordmiljøet og samspillet mellem planter og mikroorganismer.

be@ign.ku.dk



Ludovica D'Imperio er forsker og centerkoordinator ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Hun arbejder nu primært med drivhusgasser og skovrejsning.

ldi@ign.ku.dk



Jesper Riis Christiansen er lektor ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, Københavns Universitet. Han forsker i processer i jorden koblet til ændringer i arealanvendelsen.

jrc@ign.ku.dk

# MIKRO-ORGANISMER I JORDEN VENDER OP OG NED PÅ METHANREGNSKABET

**Feltmålinger i Grønland kombineret med laboratorieforsøg og modelstudier viser, at de udbredte tørre egne af Grønland optager mere metan, end der frigives fra vådområder. Dette optag vil formentlig blot stige under fremtidige klimaændringer.**

**M**ålinger i felten er afgørende for at bestemme optaget af metan i jorden. Udviklingen af nye metoder til automatiske målinger af metan i feltet har de seneste 15 år bidraget til mere detaljerede målinger på både frigivelse og optag af metan i jorden. Målingerne foregår ved, at der først presses en cylinder ned i jorden. Når der måles, lægges et låg på cylinderen. Et instrument, der kan måle metan, er koblet til låget, og i de følgende op til 20 minutter bestemmes ændringer i koncentrationen af metan i cylinderens top, der stikker op af jorden. Stiger koncentrationen i toppen under målingerne betyder det, at der

frigives metan fra jorden. Omvendt så falder koncentrationen, når jorden optager metan.

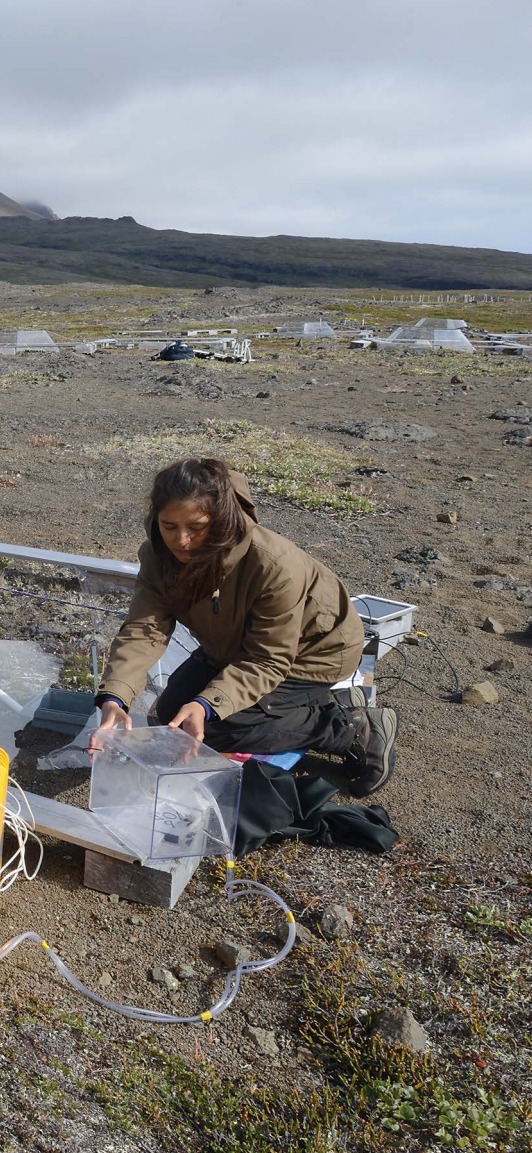
Det lyder enkelt, men gode målinger forudsætter, at man kan måle på svært tilgængelige steder, at man kan måle præcist ved lave koncentrationer, og at systemet er helt tæt. Dertil kommer, at der skal måles på mange forskellige jordtyper og på alle tider af året. Arktis og herunder Grønland er i fokus, fordi man på de breddegrader har konstateret de mest markante ændringer i klimaet og samtidig er bekymret for en øget frigivelse af metan i takt med, at permafrosten tør. Nye detaljerede data for methanopta-

get er nu tilgængelig fra både Syd-, Nord-, Øst- og Vestgrønland. Feltmålingerne er efterfølgende brugt i et større modelarbejde for at beregne et samlet regnskab for metan for den isfrie del af Grønland.

## Feltmålinger koblet til forsøg i laboratoriet

Det er ikke ny viden, at jorder kan optage metan fra atmosfæren. Det nye er, at optaget for Grønland er så stort i forhold til frigivelsen af metan og en ny erkendelse af, hvilke miljøforhold der er styrende for methanoptaget. Det er svært at få et samlet regnskab for metan for et helt år, og det er selvsagt særligt udfordrende i Arktisk. Målinger fra



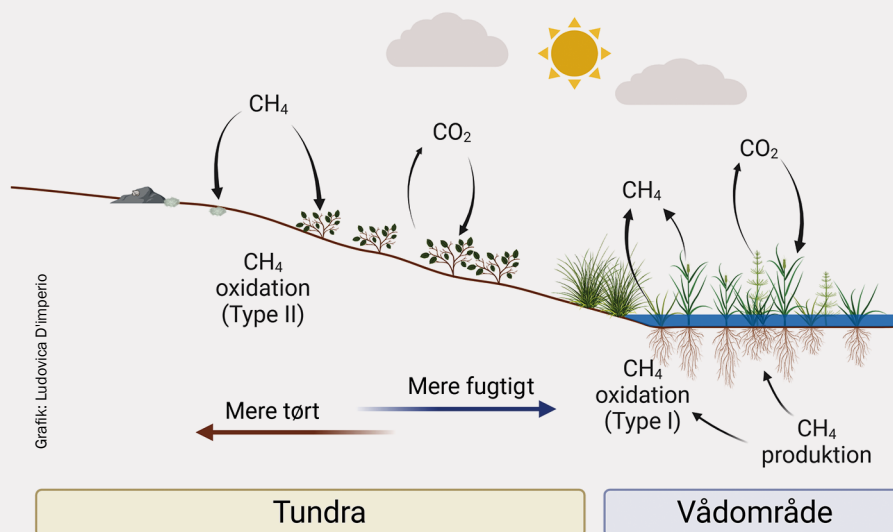


forskellige årstider viser, at særligt temperaturen og jordens fugtighed er afgørende for variationer i optaget af metan over året.

Mikroorganismernes aktivitet afhænger af temperaturen, og aktiviteten kan mere end fordobles ved en temperaturstigning på 10 grader. Det ved vi fra detaljerede laboratorieforsøg, hvor alt andet end temperaturen er holdt konstant.

Laboratorieforsøg viser også, at jordens fugtighed er afgørende. Ud over temperaturen er både oxygen og metan en forudsætning for den mikrobielle omdannelse af metan. Når det regner, stiger

## Methan som drivhusgas



Methan ( $\text{CH}_4$ ) er som carbondioxid ( $\text{CO}_2$ ) og vanddamp vigtige drivhusgasser i atmosfæren. Methan er dog en langt mere effektiv drivhusgas end  $\text{CO}_2$ , fordi gassen absorberer relativt mere varmestråling fra jorden: På tyve år er den opvarmende effekt af metan 84 gange så høj som  $\text{CO}_2$  ifølge FN's klimapanel IPCC, men reduceres med tiden på grund af fjernelse fra atmosfæren. Over en 100-årig periode vil den opvarmende effekt af en given mængde metan "kun" være 34 gange større end drivhuseffekten af en tilsvarende mængde  $\text{CO}_2$ .

Når man laver et metan-budget, regnes atmosfæren oftest som et reservoir af metan, som modtager metan fra våde jorder, prutter og bøvser fra husdyr, fra lossepladser og mange andre kilder. Hvis man derimod tager udgangspunkt i jordbunden, er historien en anden. Der findes to grupper af mikroorganismer, der kan nedbryde metan i jorden, og i begge tilfælde oxideres  $\text{CH}_4$  til  $\text{CO}_2$  ved tilstedeværelsen af oxygen, når mikroorganismene udnytter processen til at få energi og carbon.

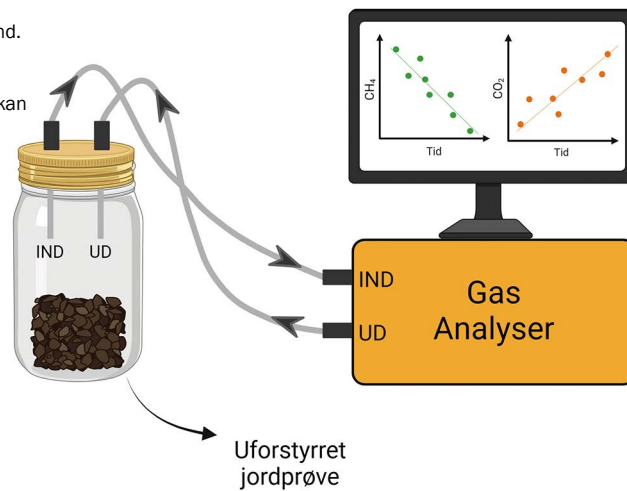
En gruppe af mikroorganismer (type I) kan nedbryde metan ved høje koncentrationer af metan, og de er den primære årsag til nedbrydning af metan, som produceres i våde jorde. Det nedsætter på afgørende vis den mængde af metan, som kan frigives i vådområder, bare der er lidt oxygen i jordens øverste lag (se tegning). Undersøgelser peger på, at mere end 90 % af det metan, der produceres i vådområder, nedbrydes af mikroorganismer, før det kan undslippe til atmosfæren.

Den anden gruppe af mikroorganismer (type II), som vi primært har arbejdet med, findes i tørre jorde, hvor der ikke forekommer produktion af metan. Denne gruppe mikroorganismer, som kan nedbryde metan ved lave koncentrationer, optager metan direkte fra atmosfæren. Denne proces er ansvarlig for 5-10 % af fjernelsen af metan fra atmosfæren globalt set.

I Grønland udgør vådområder mindre end 5 % af det isfrie areal. Nye målinger og modelstudier viser, at frigivelsen af metan fra områderne samlet set er mindre end optaget af metan fra mere eller mindre tørre dele af landskabet. Et groft  $\text{CO}_2$ -regnskab for Grønland viser, at den isfrie del af Grønland er tæt på at være i balance – dog med et mindre nettooptag af carbon i vådområderne.

I laboratoriet måles på intakte prøver fra Grønland. En konstant luftstrøm sendes mellem glas med prøve og et apparat, der kan analysere koncentrationen af metan og carbondioxid (CO<sub>2</sub>). Her måles udviklingen af gaskoncentrationerne over tid, som kan omregnes til dels en produktion af carbondioxid (CO<sub>2</sub>) og dels et optag af metan (CH<sub>4</sub>) i prøven.

Illustration:  
Ludovica D'imperio



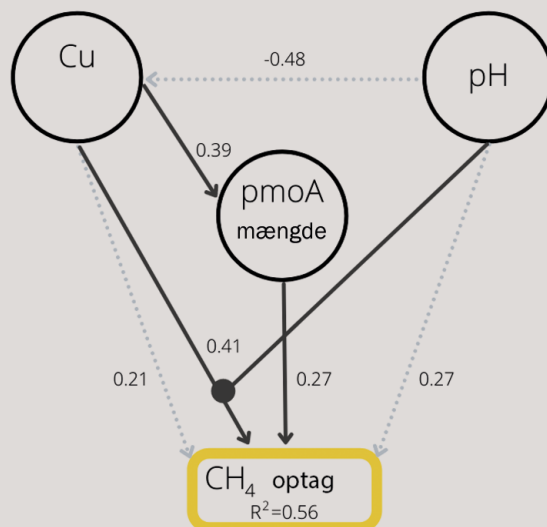
vandindholdet i jorden, og transporten af både oxygen og metan ned i jorden formindskes, og dette reducerer den mikrobielle omdannelse (oxidation) af metan. En tør jord med et vandindhold på kun 5-10% er optimal for methanoptaget. Hvis det bliver for tørt, stopper processen; det skyldes, at mikroorganismerne skal bruge vand for at være aktive.

Samlet set betyder det, at optaget af metan alt andet lige stiger markant om sommeren i den tørre og varmere jord og falder hurtigt igen til nær nul først på vinteren.

Når metan omdannes, er slutproduktet CO<sub>2</sub>, som også er en drivhusgas (se faktaboks). Det er interessant, at de metan-oxiderende mikroorganismer får hovedparten af deres carbon til celleopbygning fra metanen og ikke fra jordens pulje af organisk stof eller CO<sub>2</sub> fra atmosfæren. Det betyder, at et plantedække ikke er afgørende for optaget af metan, og i Grønland ses et stort optag af metan på netop de tørre og vegetationsfattige områder.

## Analyse af strukturelle sammenhænge

Når man vil analysere strukturelle sammenhænge mellem flere forskellige variable på én gang, kan man bruge en analyseteknik kaldet Structural equation modeling (SEM). Teknikken er en kombination af såkaldt faktoranalyse og multipel regressionsanalyse, og i vores tilfælde har vi brugt teknikken til at analysere det strukturelle forhold mellem en række målte variable og optaget af metan. Figuren viser resultatet af en SEM-model på baggrund af målinger af methanoptaget fra jordprøver, der efterfølgende er målt for en lang række parametre.



Parameteren *pmoA* (particulate methane monooxygenase) er et udtryk for mængden af et funktionelt gen, som er karakteristisk for den gruppe af mikroorganismer, der nedbryder metan. Cu (kobber) er den biologisk tilgængelige mængde målt i jorden, og pH er jordens surhedsgrad. For CH<sub>4</sub>-optag angiver R<sup>2</sup>-værdien, hvor godt optaget af metan er forklaret ved en kombination af målte værdier af Cu, *pmoA* og pH. Hvor 0 er ingen forklaringsgrad og 1 er 100 % forklaringsgrad.

De strukturelle sammenhænge mellem modellens faktorer er indikeret ved pile. Ved hver pil står et nummer, som er en standardiseret regressionskoefficient, som repræsenterer den relative betydning af strukturen mellem to variable, for eksempel kobberindholdet og methanoxidationen. Som det ses, er den kombinerede struktur af kobber og pH stærkest i forhold til at forklare variationen i målt methanoptag. Så kobber og pH er vigtig, men andre parametre, som ikke indgår i modellen, er også vigtige. Fuldt optrukne pile viser en signifikant sammenhæng, hvilket betyder at der er mere end 95 % chance for, at der er en sammenhæng (P<0,05), mens en stipletpil viser en tendens med en sandsynlighed på mere end 90 %.

## Variationer i methan-optaget betinget af geologien

Vi har også målt optaget af metan i laboratoriet ved samme temperatur og ensartet indhold af jordvand på en lang række jordtyper på tværs af hele Grønland siden 2012. Disse jorder varierer betydeligt i hydrologi, surhedsgrad og næringsstofindhold. Vores målinger giver derfor et robust bud på en variation i methanoptaget i forhold til variationer i landskabet. Denne viden kan bruges til at beregne et samlet methanoptag fra større områder, for eksempel Grønland.

Når variationer i optaget af metan måles på prøver indsamlet på tværs af Grønland, kan vi relatere det til en lang række målinger af geokemiske og geologiske forskelle i jordbunden. Ved hjælp af en statistisk model har vi derefter undersøgt, hvilke parametre der bedst forklarer de observerede forskelle





Målinger af methanoptaget for Grønland er også målt på svært tilgængelige steder – for eksempel i prøver indsamlet fra den nordligste spids af Grønland (Kap Morris Jesup) og fra nunatakker (bjergtoppe, der rager op over Indlandsisen). Billederne viser indsamling af prøver fra Westfal-Larsen Nunatak på den Grønlandske Østkyst. Også i disse ekstreme miljøer er der målt methanoptag i samme størrelsesorden som andre steder i Grønland.

Fotos: Elise Biersma / Bo Elberling (th).



i methanoptaget på tværs af Grønland. Vi har benyttet en såkaldt SEM-model (se faktaboks), som giver os en mulighed for at kvantificere både direkte og indirekte effekter af de mange parametre på methanoptaget. Vi ser, at særligt to jordbundskemiske forhold skiller sig ud og bidrager til højere methanoptag, når effekten af jordens vandindhold og temperatur ikke inkluderes. Det er jordens surhedsgrad (pH) og tilgængeligheden af kobber. Begge parametre har en direkte effekt, men sammen er de helt afgørende. Jo mere sur jorden er (lavt pH), jo mere er kobber

biologisk tilgængelig for mikroorganismene. Kobber er et velkendt mikronæringsstof, som er særlig vigtigt i processen for at nedbryde methan, da kobber er den aktive del af det mikrobielle enzym, der reagerer med methan i jorden.

### Et nyt methan-regnskab for Arktis

Når de vigtigste forudsætninger for produktion og optag af methan er bestemt, kan der opstilles et methan-regnskab. Balancen mellem produktion og optag er vigtig, fordi de klimaændringer, vi er vidne til i Arktis i dag, kan påvirke balancen

på flere måder. Dels ved at permafrosten tør, og nye carbonpuljer under vand kan frigive yderligere methan. Dels ved at nye områder bliver vådere og dermed bliver mere fattige på oxygen end hidtil. En fremskrivning af disse to ændringer tyder på, at methanproduktionen fra Arktisk vil øges.

Omvendt forventes, at vækstsæsonen mange steder i Arktis kan blive både mere tør og i særdeleshed varmere. Desuden viser undersøgelser fra Sverige, at når permafrosten tør, kan det medføre øget dræning, udtørring og øget

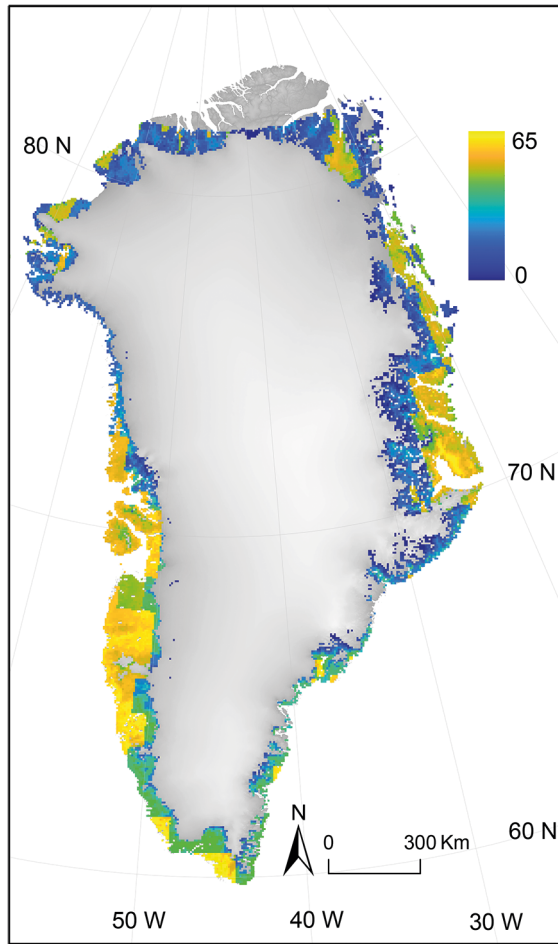
### Videre læsning

D'Imperio, L., Nielsen, C.S., Westergaard-Nielsen, A., Michelsen, A. & Elberling, B. (2016) Methane oxidation in contrasting soil types: responses to experimental warming with implication for landscape-integrated CH<sub>4</sub> budget. *Global Change Biology* 23, 966–976.

Jørgensen, C.J., Johansen K.M.L., Westergaard-Nielsen, A. & Elberling, B. (2015) Net regional methane sink in High Arctic soils. *Nature Geoscience* 8, 20–23.

Oh, Y., Zhuang, Q., Liu, L., Welp, L.R., Lau, M.C.Y., Onstott, T.C., Medvigy, D., Bruhwiler, L., Dlugokencky, E.J., Hugelius, G., D'Imperio, L. & Elberling, B. (2020) Reduced net methane emissions due to microbial methane oxidation in a warmer Arctic. *Nature Climate Change* 10, 317–321.

Ny forskningsartikel: D'Imperio, L., Li, B., Wang, P., Christiansen, J.R., Rojas, S.K., Westergaard-Nielsen, A., Holm, P.E., Oh, Y., Ambus, P., Brandt, K.K., Tiedje, T. & Elberling, B. (2023) Spatial controls of methane uptake in Arctic upland soils across climatic and geological regions. *Nature Communications Earth & Environment* 4, 461.



Kortet over Grønland viser med farver det gennemsnitlige methanoptag for den isfrie del af Grønland for perioden 2000-2016 med enheden mg CH<sub>4</sub> per m<sup>2</sup> per måned. Modellen inkluderer ikke den nordligste del af Grønland (nord for den 82. grader nordlige breddegrad), fordi der her mangler en klassifikation af overfladen.

forhold til kendte kilder af methan både i Arktis og på globalt plan. Men vores forskning øger forståelsen af de komplekse processer, der er afgørende for det globale regnskab af methan og som skal bruges nu og i fremtiden til at udvikle modeller, der giver et mere retvisende billede af betydningen af optaget af methan.

Der er naturligvis en række usikkerheder, når man beregner ét samlet methan-regnskab for Grønland. En af de vigtigste usikkerheder er en mulig ekstra frigivelse af methan fra Indlandsisen, idet der stedvis er blevet påvist methan, som slipper ud omkring fronten af Indlandsisen. Så methan-regnskabet for Grønland kan og skal fortsat forfines.

methanoptag fra atmosfæren. Det betyder, at tørre jorder formentlig kommer til at spille en større rolle i fremtiden, og at methan fra atmosfæren vil kunne nå længere ned i jorden og endelig, at de mikroorganismer, der optager methan, kan øge deres kapacitet. Det gode spørgsmål er, hvad alle disse nye forhold betyder for balancen mellem produktion og optag på tværs af landskabet.

Et nyt modelstudie inkluderer alle disse elementer i et nutidigt og fremtidigt methan-regnskab for hele Arktis. Her har vi med udgangspunkt i feltobservationer, laboratorieforsøg og matematiske modeller forsøgt at integrere den eksisterende viden i et revideret bud på et methan-regnskab for Arktis. Resultaterne er overraskende, fordi det modellerede optag af atmosfærisk methan i de halvtørre til nærmest ørkenagtige landskaber i Arktis er større end hidtil antaget.

Modellen er siden blevet optimeret med høj detaljeringsgrad for Grønland med hensyn til både variationer i klima, vegetation og jordbundstyper med en detaljeringsgrad på 5 x 5 km fra syd til nord (se kort).

### Methanoptaget i Grønland og andre steder i Verden

Konklusionen på vores arbejde viser, at Grønland på årsbasis optager mere end 65.000 ton methan fra atmosfæren i de tørre landskaber i Grønland og tilsvarende, at de våde områder frigiver 9.000 ton methan. Regnskabet viser altså, at Grønland bidrager med et lille netto-optag af methan under nutidige forhold, som højst sandsynligt vil øges i et fremtidigt varmere Grønland. Konklusionen er ikke, at Grønland kommer til at påvirke det globale indhold af methan i atmosfæren eller være en afgørende del af det Arktiske methan-regnskab. Optaget af methan i Grønland er simpelthen for lille i

Grønland er et relativt ungt landskab, som kun har været isfrit siden isen fra seneste istid smeltede for cirka 14.000 år siden. Det betyder, at de konklusioner, vi præsenterer her, ikke nødvendigvis gælder for andre større landområder – og formentlig slet ikke Sibirien med en hel anden og længere historik. Store dele af Sibirien var ikke dækket af is under den seneste istid. Landskaberne er derfor ældre og har ophobet mere carbon i jorden og udviser stedvis en betydelig større frigivelse af methan end Grønland. Det forrykker methan-balancen, og fremtidige målinger er vigtige for at kunne udtale sig mere præcist om methan-regnskabet her.

Vi har også været involveret i tilsvarende målinger og modelarbejde for eksempelvis Tibet og det nordlige Canada, og her er konklusionen den samme som for Grønland: Optaget af methan er overraskende stort og overstiger methanfrigivelsen fra vådområder. ■