



Foto: Bo Elberling

Permafrost og lattergas

Lattergas (N_2O) er en ofte overset faktor i diskussionen om ozonlagets nedbrydning og atmosfærens indhold af drivhusgasser. Dugfriske forskningsresultater dokumenterer for første gang, at permafrost under optøning kan give anledning til en overraskende høj produktion og potentiel frigivelse af lattergas.

Af Bo Elberling

Nu er det slut med at trække på smilebåndet ved tanken om lattergas i Arktis. Nye studier med udgangspunkt i Forskningsstationen Zackenberg i Nordøstgrønland viser, at når permafrosten tør, så kan der produceres overraskende store mængder af lattergas, som kan få betydning for både ozonlagets nedbrydning og atmosfærens indhold

af drivhusgasser (se boks). Det har vist sig, at den øverste del af permafrosten er overraskende isholdig, og at indholdet af kvælstofforbindelsen ammonium ved optøning kan være 10-50 gange så højt som i den øverste del af jorden. Denne kvælstofpulje gemt i permafrosten kan omsættes hurtigt, når permafrosten tør fordi mikroorganismer allerede

er til stede i permafrosten, og fordi zonen er udsat for betydelige variationer i vandindhold og fryst-tø hvert år. Det er disse forhold som det nu viser sig kan accelerere den naturlige produktion af lattergas i jordmiljøet og potentielt give anledning til frigivelse af lattergas i en størrelsesorden, som hidtil kun er set fra tropiske jorder.

Permafrost og kvælstof

Permafrost er jordlag og sedimenter, som forbliver frosne mere end 2 år i træk, mens aktivlaget er den øverste del af jordmiljøet, som tør hver sommer. I arktiske områder med såkaldt kontinuert permafrost kan tykkelsen af permafrosten være flere hundrede meter. Permafrosten indeholder store

mængder af organisk stof, fordi puljen er opbygget over flere tusinde år. Puljen kan være særdeles stor hvor gamle overfladelag med organisk materiale er blevet begravet af vind- eller vandaflejrede sedimenter. På den måde kan overfladenære lag med tiden blive en del af permafrosten. Dertil kommer, at puljen af organisk stof kun langsomt omsættes under de generelt kolde forhold i Arktis. Når permafrostlag tør er det vel-dokumenteret, at kulstof i organisk stof kan omsættes, og at disse omsætningsprocesser kan bidrage til en markant frigivelse af både kuldioxid og metan – to velkendte og problematiske drivhusgasser. Men undersøgelser af kvælstof mangler, bl.a. fordi tidligere studier har vist, at kvælstofomsætningen er ganske ringe i aktivlaget – men hvad med i permafrosten?

I forbindelse med et større permafrostprojekt og et feltkursus for universitetsstuderende blev det muligt at indsamle permafrostprøver fra de øverste tre meter fra en række kontrastfyldte landskabstyper i Nordøstgrønland og Svalbard i august og september 2008. Der blev indsamlet prøver fra både aktivlaget samt underliggende permafrostlag. Det er disse prøver, som er blevet undersøgt detaljeret, og som nu viser sig grundlæggende at stille spørgsmålstegn ved den gængse opfattelse af kvælstofkredsløbet knyttet til en fremtidig optøning af permafrostlag i Arktis. Det er vigtigt – ikke mindst fordi kvælstof regnes for at være en begrænsende faktor for plantevækst i Arktis og dermed en vigtig komponent til at forstå, hvordan planter vil kunne respondere med vækst på et varmere klima og højere CO₂-koncentrationer i atmosfæren.

Permafrostens hemmeligheder

Mens vi stod i Zackenberg sommeren 2008 og hentede borekerner op fra den permafrosne jord, kom det som en stor overraskelse, at isindholdet i disse kerner var meget højt. Faktisk var isindholdet så højt, at man



Foto: Bo Elberling

Studerende på hårdt arbejde.

Undervisning og forskning

I forbindelse med et studenterkursus ved Zackenberg og på Svalbard sommeren 2008 blev der udtaget permafrostkerner til nærmere analyse. Det er disse kerner, som nu giver anledning til helt ny viden om permafrosten og lattergasproduktionen. Ideen bag et kombineret forskningsprojekt og universitetskursus er udviklet i samarbejde med Professor Hanne H. Christiansen fra UNIS, Universitetet på Svalbard. Projektet blev samfinansieret af Nordisk Ministerråds Arktiske Samarbejdsprogram 2006-2008, det norske og danske forskningsråd, UNIS samt Zackenberg Research Station.

Lattergas – skidt for atmosfæren

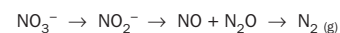
Ozonlagets nedbrydning diskuteres ofte i relation til udledning af klorholdige gasser (de såkaldte CFC-gasser) og atmosfærens drivhusgasser i relation til udledning af kuldioxid og metan. Men lattergas bidrager væsentligt til både nedbrydning af ozon i den øverste del af atmosfæren (stratosfæren) og virker som en mere end 300 gange værre drivhusgas end kuldioxid i atmosfærens nederste del (troposfæren <10 km).

Siden 1800 er atmosfærens indhold af lattergas steget 20 % og stiger nu med 0,25 % årligt. Heraf skyldes cirka 70 % naturlig frigivelse fra mikroorganismers nedbrydning af kvælstof i jorden, mens de 30 % skyldes menneskelig aktivitet, primært intensivning af landbrugsdriften – mere gødning og flere dyr.

Både naturlige og menneskeskabte kilder til N₂O knytter sig primært til jordmiljøet og den mikrobielle nedbrydning af kvælstofforbindelser (såkaldt nitrifikation og denitrifikation). I disse processer kan lattergas både produceres og forbruges, således at

jordens samlede lattergasproduktion ofte er væsentlig større end frigivelsen til atmosfæren.

Denitrifikationen består af en række processer, hvor mikroorganismer under nedbrydningen af organisk stof omsætter nitrat (NO₃⁻) til atmosfærisk kvælstof (N₂). Lattergas er i denne sammenhæng et mellemprodukt:

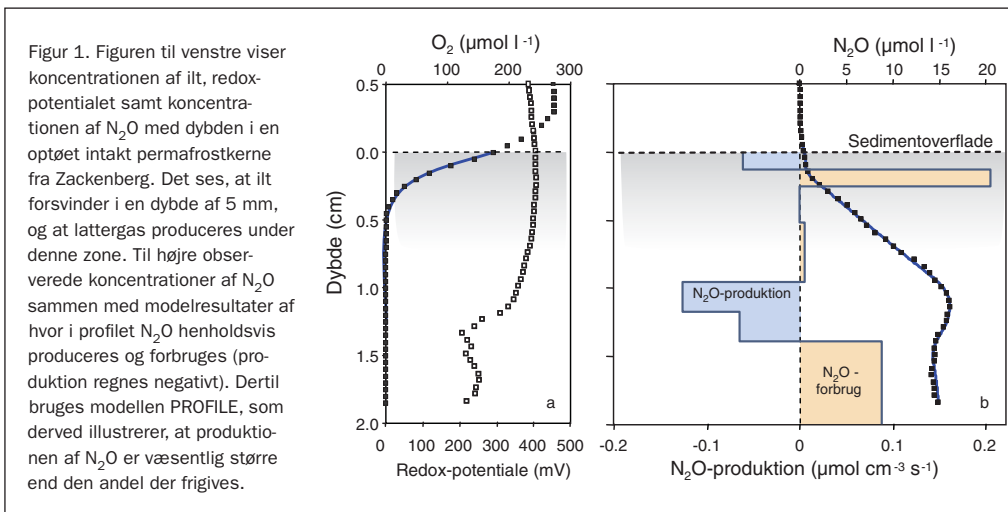


Processerne foregår i naturlige økosystemer, hvor ilt er fraværende, og mikroorganismene derfor bruger nitrat som iltningmiddel. Denitrifikation er formentlig den dominerende proces til produktion af lattergas, når permafrostkerner først drænes og derefter vandmættes. Det er velkendt, at en række faktorer er afgørende for, hvor meget lattergas der frigives, bl.a. ændringer i jordens vandindhold og dermed tilgængeligheden af ilt, tilgængeligheden af letomsætteligt kulstof og kvælstof, udtørring og frysning mv. Oftest ses de største N₂O-emissioner til atmosfæren fra tropiske landbrugssystemer og skove.



Fotos: Bo Eberling

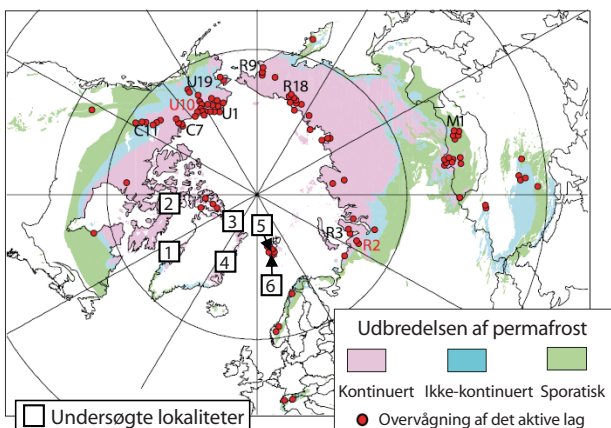
Hvor nutidig permafrostoptøning sker hurtig vil det oprindelig isindhold løbe væk og landskabet kollapse (en såkaldt termokarst). Hvor dette sker er det muligt at lave et profil af permafrosten og få et indtryk af begravede organiske lag i permafrosten.



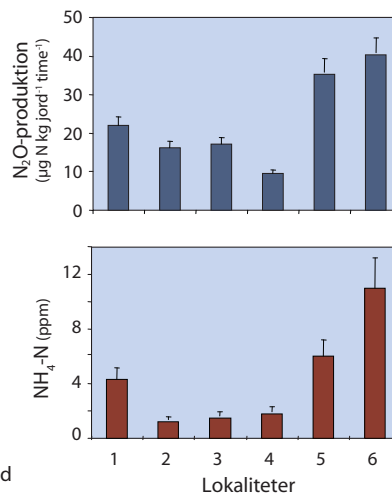
kunne kigge igennem kernerne og visse dele bestod af ren is.

Den næste overraskelse kom, da vi kunne konstatere, at smeltevandet fra permafrostlagene adskiller sig markant fra de jordvandsanalyser, som er blevet foretaget i aktivlaget i Zackenberg siden 1996. Især var der i smeltevandet et højt indhold af ammonium (NH_4^+), som ved iltning nedbrydes til nitrat, og som er en velkendt kilde til produktion af lattergas.

For at koble lattergasproduktion og potentiel frigivelse satte vi et manipuleringsforsøg i gang for at kvantificere hvad der sker, når permafrostlag tør, drænes (så ammonium kan omsættes til nitrat) og derefter vandmættes igen med det samme vand. Et sådant skift i vandindhold hvert år er i dele af det arktiske landskab ret sandsynlig, fordi jordlagene drænes hver sommer, men vandmættes igen når jorden tør, fordi smeltevand fra ovenliggende lag støver op lige over grænsen til den frosne bund.



- 1: Disko, Vestgrønland
- 2: Baffin Island, Canada
- 3: Citronen Fjord, Nordgrønland
- 4: Zackenberg, Nordøstgrønland
- 5: Adventdalen, Svalbard
- 6: Kapp Linné, Svalbard



Figur 2. Kortet viser placeringen af 6 undersøgelsesområder – alle græsdominerede vådområder inden for zonen af kontinuert permafrost. Til højre ses målinger af N_2O -frigivelse efter vådgøring samt NH_4-N koncentrationen i smeltevandet fra permafrostkernen.

Mikroskalaforsøg

Ved hjælp af tynde mikroelektroder er det muligt at måle den rumlige variation af koncentrationen af lattergas, pH, redox og ilt og omsætte dette til en lattergasproduktion i hidtil uhørt fin skalering (se figur 1). Undersøgelserne viser, at når en

permafrostprøve tør, så produceres der i størrelsesordenen 0,8 µg lattergas (N₂O) i timen per kilo jord. Når en sådan prøve måles over 150 dage ved 7 °C falder produktionen, men er stadig målbar. Men når kerne i stedet for drænes og efter en uge vandmættes igen med det samme vand, så stiger den samlede frigivelse af N₂O fra permafrostkernen med en faktor 20. Det bringer frigivelsen af N₂O op i samme størrelsesordenen, som er målt i mange ikke arktiske landbrugsjorder og er markant højere end tidligere målt i arktiske områder.

Fordi målinger udføres med mikroelektroder er det samtidig muligt at påvise, at selv en "lille permafrostprøve" udviser en stor rumlig variation i produktionen og forbrug af N₂O. Det betyder, at de målte frigivelsesrater faktisk er små i forhold til selve produktionen. Det skyldes, at små lommer i jorden, hvor N₂O henholdsvis produceres og nedbrydes, findes lige op og ned af hinanden. Så den rigtige N₂O-produktion i permafrosten er altså væsentlig højere end den samlede frigivelse. Det store spørgsmål er så hvor stor en andel af den lattergas, der produceres i tidligere permafrostlag, i virkeligheden når jordoverfladen og derved kan frigives til atmosfæren.

Et kontrolleret optøningsforsøg

For at belyse dette nærmere blev en kolonne på 70 cm fra kærområdet i Zackenberg tæt op. Først blev den øverste del (svarende til aktivlaget) tørt op, derefter de nederste 10 cm svarende til permafrosten tørt op. Derefter blev kolonnen drænet over en uge for til sidst at blive vandmættet i den nedre permafrostzone med det oprindelige jordvand. I hver trin blev frigivelsen af N₂O fra jordoverfladen målt.

Resultaterne viser, at N₂O frigivelsen fra overfladen stiger fra 0,4 mg N₂O m⁻² per dag til 3,8 efter permafrosten tør, men stiger yderligere til 34 mg N₂O m⁻² per dag efter vandmætning af permafrostlaget. Det kan

omregnes til, at 31 % af den N₂O, som produceres i den nylig optøede permafrost, kan frigives til atmosfæren. Eller med andre ord, at processer i aktivlaget kan nå at fjerne cirka 2/3 dele af den producerede lattergas inden den når jordoverfladen. Forsøget har sine begrænsninger, fordi effekten af en permafrostoptøning i 10 cm jo svarer til cirka 10 års optøning. Omvendt ses netop markante optøninger af permafrost i varme somre, så ovenstående forsøg er formentlig ikke urealistisk i en speciel varm sommer. Helt afgørende er det, at 34 mg N₂O m⁻² per dag er en rigtig højt frigivelsesrate svarende til, hvad man måler i tropiske økosystemer.

Lattergas Arktis rundt

Det har vist sig, at de overraskende resultater ikke bare gælder Zackenberg, men hele det arktiske område. Da jeg har gemt prøver fra tidligere undersøgelser, var det muligt at gå ned i fryseren og hente prøver fra top-permafrostlag på fem andre lokaliteter. Og det viste sig, at disse indeholdt tilsvarende høje koncentrationer af opløst N og ligeledes har et tilsvarende potentiale for at producere lattergas. Formentlig ligger lokaliteten Zackenberg slet ikke i den høje ende af skalaen (se figur 2).

Resultaterne rejser det væsentlige spørgsmål, om den begravede pulje af kvælstof i permafrostlag kan ende som lattergas i atmosfæren i takt med at permafrosten tør. Dette vil dels afhænge af med hvilken hastighed permafrosten tør og ikke mindst, hvordan forholdet mellem nedbør, fordampning og dræning vil kunne give anledning til variationer i vandindholdet i jorden, som er en forudsætning for, at kvælstofpuljen kan ende som lattergas i atmosfæren.

Et andet væsentligt spørgsmål er, hvilken rolle en øget kvælstofomsætning og nitratindhold i jordvandet vil få på vegetationsudvikling. Det er velkendt, at de fleste plantesamfund i Arktis er kvælstofbegrænset,



Foto: Bo Elberling

En 2 cm tyk permafrostkerne fra vådområdet i Zackenberg, som viser at is-indholdet i permafrosten kan være så højt at man kan se igennem kernen. Det er opløst kvælstof i denne fase, som ved optøning kan give anledning til en umiddelbar produktion af lattergas.



Foto: Bo Elberling

Mikroelektrode-profilering (Unisense) hvor målinger af opløst lattergas, ilt, pH og redox sker over tid efter permafrostkerne er optøet, derefter drænet og til sidst vandmættet igen. Profilering foretages typisk med en måling for hver 0,5 mm.

Måling af lattergas

Mikroskalamålinger er blevet udviklet ved Aarhus Universitet i samarbejde med forskningsvirksomheden Unisense AS over flere år og omfatter en række forskellige sensortyper. Grundprincippet i lattergaselektroden brugt i dette projekt er, at N₂O fra omgivelserne betinger en transport ind i sensoren, hvor N₂O bliver reduceret på en metalkatode og derved frembringer en strøm, som kan måles. Jo mere N₂O i omgivelserne, jo større transport og jo større strøm kan der måles. Det lyder simpelt, men at få et stabilt signal på kort tid i en skala på 0,5 mm har været en udfordring. Det er første gang at lattergaselektroden bruges i relation til permafrostlag, og tak til Lars H. Larsen fra Unisense for at lave de nødvendige tilpasninger.



Foto: Bo Elberling

En permafrostkerne udtages fra borehovedet ved Zackenberg sommeren 2008.

hvilket betyder at øget tilgængelighed af kvælstof kan betyde, at planterne gror hurtigere.

Hvor hurtig tør permafrosten?

Spørgsmålet om, hvor hurtigt permafrosten tør, kan vi vurdere ud fra observationer. Tykkelsen af aktivlaget er i Zackenberg blevet målt ved vækstsæsonens afslutning siden 1996, og disse

målinger viser, at aktivlaget tykkelse øges med ca. 0,9 cm per år eller 11-13 cm siden 1996. Denne forøgelse af aktivlagtes maksimale tykkelse er et bud på, hvor meget permafrosten som minimum er optøet.

Det er et minimumsbud, fordi et permafrostlag pga. dets indhold af is, typisk reduceres markant efter det er tøet og blevet en del aktivlaget.

Et bud på, hvor hurtigt permafrosten vil tø i fremtiden kan fås ved at nedskalere de modelforudsigelser omkring klimaudviklingen, som Danmark Meteorologiske Institut (DMI) har lavet for perioden frem til 2080 for hele Grønland til Zackenberg-området. Disse modelresultater forudsiger et fremtidigt klima med en årlig sommermiddeltemperatur på 2-3 grader varmere end i dag. Det vil alt andet lige betyde en øget optøning af permafrosten.

Birger Ulf Hansen (Institut for Geografi og Geologi) har brugt disse prognoser til at beregne, at det svarer til, at den maksimale tykkelse af aktivlaget i Zackenberg-området vil øges med 10-30 cm de næste 70 år. Variationen 10-30 cm knytter sig til, at en øget optøning er bestemt af jordtype derunder i særlig grad vandindholdet. Den maksimale optøning forventes i de tørre jordtyper. Tilsvarende canadiske undersøgelser tyder på, at disse beregnede optøningsdybder i virkeligheden er i den lave ende.

Tiden vil vise i hvilket omfang dette fremtidsscenario vitterlig vil give anledning til frigivelse af store mængder lattedgas til atmosfæren. De nye resultater har vist, at forudsætningerne i princippet er til stede. ■

Om forfatteren



Bo Elberling er dr. scient, ph.d. og professor i miljøgeokemi ved Institut for Geografi og Geologi, Københavns Universitet samt ved Universitetscentret på Svalbard.
E-mail: be@geo.ku.dk

Yderligere læsning

Schuur, E.A.G. et al. *The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra.* *Nature* 459, 556-559 (2009).

Elberling, B. et al. *Soil and Plant Community-Characteristics and Dynamics at Zackenberg.* *Advances in Ecological Research* 40, 223-248 (2008).

Elberling, B., Christiansen, H.H. & Hansen, B.U. (2010). *High nitrous oxide production from thawing permafrost.* *Nature Geoscience.*

Elberling, B, Sigsgaard, C. & Christensen, T.R. (2008) *Zackenberg – jord, permafrost og kulstof.* *Naturens Verden* 7-8, 52-61