





# PERMAFROSTEN OVERRASKER!

Af: Bo Elberling

Permafrost defineres som jord eller sedimenter med en temperatur under frysepunktet i mindst to år i træk. Dette er tilfældet for næsten 25 % af landarealet på den nordlige halvkugle, og det er her, næsten halvdelen af klodens organiske kulstof i jordbunden findes. Det betyder, at hvis blot en mindre andel af denne pulje af organisk stof omsættes og frigives som en drivhusgas, kan det få konsekvenser på sigt for det globale drivhusgasbudget og dermed ikke bare klimaet i Arktisk, men det globale klima. Omkring 82 % af Grønland er dækket af is. Kun nær kysterne og i de dybe fjordsystemer findes de isfrie områder, og det er her, man finder permafrost.

## Hvorfor er permafrost vigtig?

Permafrosten virker stabiliserende på en række processer i Arktis. Når permafrosten tør, vil smeltevand kunne drænes væk, dele af landskabet kollapse, erosionen øges og omsætningsprocesser i jordmiljøet accelerere. Den fysiske nedbrydning af landskabet har mange steder betydelige konsekvenser for infrastrukturen, f.eks. bygninger, rørledninger, veje, vedligeholdelse af affaldspladser mv. I Grønland er mange huse dog bygget på klipper, og de er derfor ikke så følsomme overfor disse udsving. Når permafrosten tør, sættes der også gang i en række geokemiske processer, og fra studier i Grønland ved vi, at der frigives både kuldioxid (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) og lattergas (N<sub>2</sub>O). Frigivelsen af gasser er et resultat af en nedbrydning af begravet organisk stof i permafrosten. Vandindholdet i de nyligt optøede permafrostlag er en vigtig faktor i frigivelsen af gasser. På de steder, hvor permafrostlagene tør og drænes, vil der blive produceret CO<sub>2</sub>, men hvis permafrostlagene er fyldt med vand, vil nedbrydningen ske langsommere. Frigivelsen af kulstof vil derfor ske i form af CH<sub>4</sub> og i visse tilfælde ledsaget af kvælstof i form af N<sub>2</sub>O. Hvordan denne frigivelse af gasser kan opvejes af andre processer i økosystemet, såsom plantevækst, er stadig et spørgsmål, som vi ikke kender svaret på.

Indlandsisen på Grønland isolerer så godt mod vinterkulden, at permafrosten kun findes i de isfrie områder. Det betyder, at permafrosten på Grønland blev dannet, da isen langs kysten smeltede tilbage efter sidste istid for ca. 10.000 år siden. I områder med permafrost vil de øverste lag (0,4 - 5 meter) af landskabet tøj hver sommer. Dette kaldes aktivlaget. Målinger viser, at den maksimale tykkelse af aktivlaget i sensommeren er øget med mere end 1 centimeter per år de sidste 15 år. Dette er et indirekte mål for den igangværende optøning af den øverste del af permafrosten. Permafrosten har mange steder en betydelig tykkelse på 10 meter til mere end 400 meter. På Disko i Vestgrønland er permafrostens nedre grænse blevet målt ved 350 meter og ved Thule i Nordgrønland ved 450 meter.

Næsten alle typer for permafrost findes på tværs af Grønland. I det sydlige Grønland findes sporadisk permafrost i små isolerede områder f.eks. i bjergene og i de fugtige dele af landskabet. Længere mod nord

dominerer såkaldt diskontinueret permafrost, hvor permafrostlagene ikke er sammenhængende og ofte mindre end 50 meter tykke. Nord for omkring 68°N findes kontinuerligt permafrost.

## Landskabets form

Selvom permafrosten ligger et stykke under jordoverfladen, er landskabets former præget af permafrosten og de tøj-frys processer, som konstant finder sted. Det skyldes til dels at is fylder omkring 9 % mere end vand, samt at iskrystaller vokser mod den retning, kulden kommer fra. Isdannelsen medfører en

## ” PERMAFROSTEN PÅ GRØNLAND BLEV DANNET, DA ISEN LANGS KYSTEN SMELTEDE TILBAGE EFTER SIDSTE ISTID FOR CA. 10.000 ÅR SIDEN ”

vandtransport fra omgivelserne, så islinsen kan vokse sig større og større. De kræfter, der er i spil, kan nemt løfte jordlag, vælte træer og flytte veje og dermed skabe imponerende ændringer i landskabet. Interessen og videnskaben indenfor dette felt er ikke ny. Den svenske geolog Urban Hjärner har tilbage i 1690'erne beskrevet nogle af disse processer. Som det ses på det store titelfoto, får landskabsdannelsen direkte betydning for f.eks., hvilke planter der findes hvor. Tuedannelse, som det ses her, får stor betydning for sneaflejringer, overfladens energibalance og stabiliteten af den underliggende permafrost.



Fig. 1. Den øverste isholdige permafrost er fritlagt og sammensætningen af sediment, vand og luftbobler ses tydeligt. Den sidste komponent, mikroorganismene, er ikke synlig, men helt afgørende for at forstå hvilken betydning det har, at permafrost tør (se artiklen "Den levende permafrost").



Fig. 2. Permafrostboringer. Den store borerig blev anvendt i Zackenberg i Nordøstgrønland i 2012. Den håndholdte borerig bruges på alle CENPERM sites og er velegnet til at tage kerneprøver i de øverste 3-4 meter.

## Permafrostboringer

Der er mange måder at udtage permafrostprøver på. Som regel anvendes boremaskiner eller en borerig afhængigt af, hvilken dybde man ønsker at bore til, og hvor intakte prøver man ønsker. De prøver, der primært anvendes i CENPERM, er udtaget fra de øverste 20 meter og i mange tilfælde i de øverste 3-4 meter. Det er den zone, som er mest udsat for klimaforandringer, og som ved optøning vil kunne bidrage mest til en frigivelse af drivhusgasser. Det er vigtigt, at prøverne forbliver frosne og intakte, når de indsamles og transporteres til laboratoriet. Derfor anvendes der ikke vand eller kemikalier ved borearbejdet. Det betyder omvendt, at det tager længere tid at bore. Borehovedet er besat med diamanter og kan bore i klipper om nødvendigt. Friktionsvarmen mellem borehovedet og permafrosten skaber en såkaldt boremudder, som sørger for at borehovedet ikke fryser fast – sker det, er det et stort problem - og i værste fald kan det betyde, at borehovedet og forlængerrør må efterlades på stedet. Boremudderet er en forudsætning for at kunne bore, men udgør samtidig en risiko for at forurene

kerneerne i op til 1 centimeter af det yderste lag af kernen.

## Permafrosten overrasker

Det er spændende, hver gang en borekerne kommer op i dagens lys. Her pakkes kernerne hurtigt ned efter, at informationer om kernen og boringen er noteret. Først i et fryserlaboratorium kan kernerne undersøges og beskrives detaljeret. Mange kerner skæres op på langs for at give et overblik over f.eks. is-indholdet og sedimentære strukturer. Arbejdet med kernerne er fyldt med overraskelser. Prøverne kan lugte mere eller mindre godt, og pludseligt kan der dukke perler op fra tidligere eskimo-kulturer (se afsnit om køkkenmøddinger) planterester eller en lille rest af en insektvinge. Det skyldes, at hovedparten af det, som i dag er det øverste lag af permafrosten, tidligere har været jordoverfladen, og siden har været begravet i sedimenter.

Alle kerner fotograferes for at registrere det gennemsnitlige is-indhold og fordelingen af is. Cryostratigrafi er en videnskab, som tager udgangspunkt

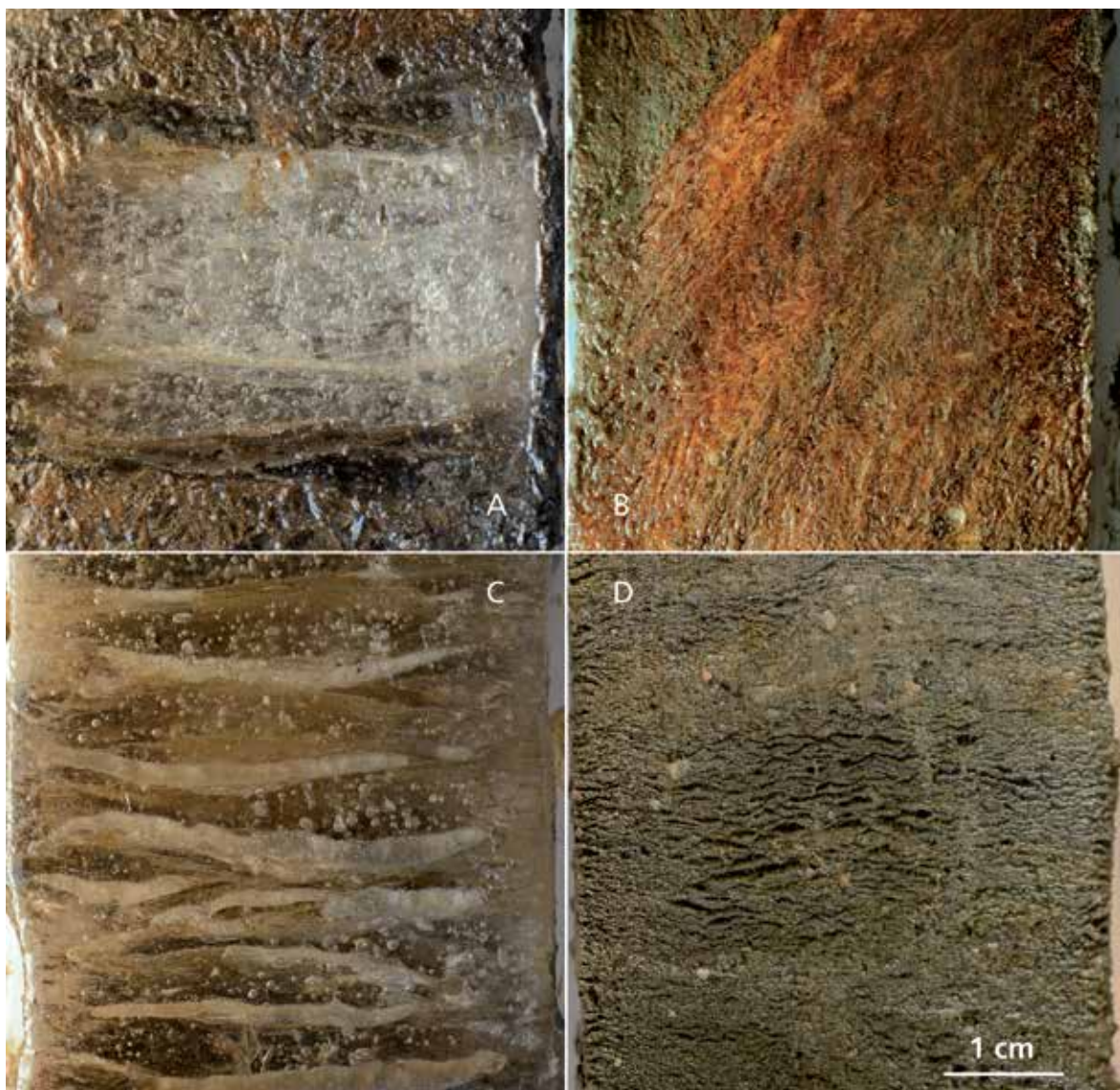


Fig.3. Permafrostkerner er overraskende forskellige, hvilket primært er betinget af, hvilke sedimenter og aflejringsmiljø, der er tale om samt selve dannelsen af permafrost. A: Massiv linse af is med stort indhold af luftbobler, B: Typisk organisk kerne med tydelig struktur af planterester, C: Meget ishoidig organisk lag, D: lentikular - små regulære islinser i finkornet sediment, som er typisk for syngenetisk permafrost.

i fordelingen af is i permafrosten med henblik på at beskrive permafrostens dannelse. Såfremt områder bliver isfrie, som det er sket mange steder på Grønland, sker frysning fra oven og permafrosten "vokser" nedad (såkaldt epigenetisk). I områder, hvor der til stadighed sker en pålejring af sedimenter (vandaflejring, vindaflejring eller tørvedannelse), vil permafrosten følge med og "vokse" op i nyaflejeede sedimenter (såkaldt syngenetisk). Figur 3 viser eksempler, på hvor forskelligartet is-indholdet kan være i permafrosten.

Is-indholdet er helt afgørende for, hvor hurtig permafrosten vil kunne tø, og hvilken effekt en optøning

har på det omgivende landskab. Tørt sand med lavt is-indhold, som er frossent, kræver mindre energi for at tø og kan være stabilt både i frossen og ikke-frossen tilstand. Den is-holdige permafrost, som ofte findes i toppen, kræver derimod mere energi for at tø, fordi varmekapaciteten for is er større end for luft. Smeltet vandet fra den is-holdige permafrost fylder mindre end den oprindelige is, og optøning medfører derfor en øjeblikkelig destabilisering af jordmiljøet, som kan forøges betydeligt, hvis smeltet vandet desuden kan drænes væk. Is-indholdet kan udgøre mere end 50 % af permafrosten og i enkelte lag udgøre 100 %, fordi segregeret is har samlet sig i store islinser (fig. 3).

## Hvor hurtigt tør permafrosten?

Det er vanskeligt at måle helt præcist, hvor hurtigt permafrosten tør. En indirekte måde at opgøre det på er ved at måle aktivlagets tykkelse. Disse målinger foretages ved, at et jernspyd presses ned til den øvre grænse for permafrosten, og derefter måles længden af den del af spyddet, som har været igennem jord- eller sedimentlaget. Når den maksimale dybde øges år efter år, skyldes det, at permafrosten tør. Målingerne giver dog kun et realistisk bud på optøningen, såfremt ændringer i overfladetopografien måles samtidigt. Forskerne, som arbejder på den nordlige halvkugle, samler i det fælles forskningsnetværk CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring

Network) målinger af den maksimale optøning målt sidst på sommeren hvert år. Et intensivt CALM måleprogram blev påbegyndt i Zackenberg (Nordøstgrønland) i 1996, og resultaterne af disse målinger viser en stigning af den maksimale tykkelse af aktivlaget på mere end 1 centimeter per år. Optøningen sker hurtigst på den tørre tundra og langsommere i våde kærømråder (se infoboks). Disse CALM målinger foretages på forholdsvis stabile landskabsformer og vidner her om en gradvis optøning år efter år. Desværre findes der ikke målinger af permafrostens dybde fra 1920-1930'erne, hvor Arktis sidst gennemgik en varm periode. Der er dog meget, som tyder på, at den permafrost som tør nu og i den nærmeste fremtid, ikke har været optøet inden for de sidste 100 år.

I 2013 opdagede ph.d.-studerende Stefanie Härtel et større område i Zackenberg, hvor store dele af aktivlaget har mistet taget i permafrosten og nu er på vej ned ad bjergskrånningen. Det betyder, at permafrosten frit eksponeres, tør hurtigt, og der dannes små floder af smeltevand, som blot forøger hele glideprocessen (se foto side 12). Processen er så kraftig, at hvis man står tæt nok på, kan man tydeligt høre og se permafrosten, der tør, for det rumler, bobler og drypper.

Den slags begivenheder er velkendte, men det er et åbent spørgsmål, om sådanne begivenheder optræder hyppigere eller i større omfang i dag, som et resultat af de seneste klimaændringer i Grønland.



Fig. 4. Frodig vegetation ses, hvor smeltevand fra permafrostoptøning bliver tilgængeligt for planter.

” PRØVERNE KAN LUGTE MERE ELLER MINDRE GODT, OG PLUDELIG KAN DER DUKKE PERLER OP FRA TIDLIGERE ESKIMO-KULTURER ”

Tilsvarende ser vi en hurtig optøningen af permafrost i lokale områder som eksempelvis langs kysten, hvor erosion og kollaps af jordlagene blotlægger lagene med permafrost, hvilket resulterer i hurtig optøning, afstrømning af smeltevand og hurtig stofomsætning

af næringsstoffer, se artikel om ”Den sårbare kyst”.

Studier fra Grønland viser, at hovedparten af permafrosten indeholder betydelig højere koncentrationer af opløst kvælstof, end der findes i aktivlaget.

Når det samtidig er vedkendt, at Arktiske plante-samfund i stor udstrækning er kvælstofbegrænset, betyder det, at permafrostens optøning kan have en positiv effekt på plantevæksten, som derved er i stand til vokse bedre og binde mere kulstof alt andet lige. På figur 4 ses tydeligt, at vand og de næringsstoffer, som f.eks. kvælstof, der frigives fra permafrosten, resulterer i en frodig vegetation.

## Modeller for permafrostens optøning

Ud over observationer og fysiske målinger bruges også matematisk modellering for at forudsige permafrostens optøning. Modelarbejdet har betydelige usikkerheder indbygget, idet modellerne kun i meget begrænset omfang tager højde for f.eks. dræning, erosion og landskabets geomorfologi. En model er aldrig sandheden, men kan bruges til at give et bud på, hvad fremtidens klimaændringer kan betyde for permafrosten. Modellering understøtter også formodningen om, at permafrost ikke bare tør, men også er ▶



## EN HURTIG OPTØNING AF PERMAFROSTEN FÅR HELE LANDSKABET TIL AT ÆNDRE SIG PÅ GANSKE KORT TID.

under opvarmning i både Vest-og Nordøstgrønland.

Foreløbigt modelarbejde tyder på, at permafrosttemperaturer i f.eks. Zackenberg i Nordøstgrønland 10 meter under overfladen har været mellem -7 og -8 °C inden for de sidste 100 år, og at temperaturerne er steget til nutidige værdier mellem -6 til -8 °C og kan stige til mellem -2 og -3 °C allerede før år 2100. Den dybeste boring med tilgængelige temperaturmålinger i højarktisk Grønland er fra Kim Fjelde i Peary Land (82 °N). Her svinger permafrostens temperaturer mellem 0 og -24 °C i 75 centimeters dybde og mellem -12.6 og -12.7 °C i 20 meters dybde .

Med udgangspunkt i data fra aktivlagets og permafrostens termiske egenskaber, og en fremskrivning af temperatur og nedbørsforhold, kan et vand- og energiregnskab udregnes ved hjælp af numeriske modeller. Modellen COUP er en svensk model blandt mange som i CENPERM regi er blevet kalibreret og

derefter testet på kendte dataserier fra Zackenbergområdet. Når modellen er accepteret som værende i stand til at simulere kendte variationer i jordens vandindhold og temperatur, kan modellen efterfølgende bruges i en følsomhedsanalyse, som er det bedste bud på hvad fremtiden må bringe. I tilfældet for Zackenberg viser følsomhedsanalysen, at den maksimale aktivlagstykkelse vil stige med yderligere 20-70 cm før 2100. Vores analyser viser desuden, at permafrostens indhold af is og de fremtidige snemængder og fordeling i landskabet er helt afgørende faktorer for at kunne give et mere robust bud på en fremtidig permafrostoptøning.

I dag er processer omkring permafrostens ikke inkluderet i de globale klimamodeller, som pt. regnes for at være de bedste bud på fremtiden og som er udgangspunktet for en række politiske diskussioner, prioriteringer og beslutninger. Ved at inddrage ny viden



## Kilder:

Elberling, B., Christiansen, H.H. & Hansen, B.U. (2010). High nitrous oxide production from thawing permafrost. *Nature Geoscience* 3, 332-335.

Elberling, B., Matthiesen, H., Jørgensen, C.J., Hansen, B.U., Meldgaard, M., Andreasen, C., Grønnow, B. & Hollesen, J. (2011) Paleo-Eskimo kitchen midden preservation in permafrost under future climate conditions at Qajaa, West Greenland. *Journal of Archaeological Sciences* 38, 1331-1339.

Elberling, B., Michelsen, A., Schädel, C., Schuur, E.A.G., Christiansen, H.H., Berg, L. Tamstorf, Sigsgaard, C. (2013) Long-term CO<sub>2</sub> production following permafrost thawing. *Nature Climate Change* 3, 890-894.

Hollesen, J., Elberling, B., and Jansson, P.E. (2011) Future active layer dynamics and carbon dioxide production from thawing permafrost layers in Northeast Greenland. *Global Change Biology* 17(2), 911-926.

Schädel, C., Schuur, E.A.G., Bracho, R., Elberling, B., Knoblauch, C., Lee, H., Luo, Y., Shaver, G.R., Turetsky, M.R. (2013) Circumpolar assessment of permafrost C quality and its vulnerability over time using long-term incubation data. *Global Change Biology* 20(2), 641-652.

## Fakta

### Definitionen på tundra?

Tundra er et gammelt russisk ord, som betyder skovløst fjeld, og som i dag bruges om en vegetationstype domineret af lavtvoksende buske og krat, der findes i Arktis. I områder med tundra er der en frostperiode på mere end 9 måneder og ofte underliggende permafrost. Der findes store områder i f.eks. Sibirien med permafrost, som er dækket af skov. Her bruges ordet skovtundra eller parktundra. I lavtliggende områder er der mere fugtigt, og her dominerer græsser. En sådan vegetationstype betegnes som kær eller mose. Se titelfoto side 6 – et typisk højarktisk tundralandskab fra Grønland.

om bl.a. processer i permafrost kan vi opnå en mere nuanceret forståelse og fremskrivning af fremtidens klima, som har betydning for os alle.

### Temaer til undervisningen:

For eksempel til gruppearbejde i 7.-9. kl. og på stx.

- Diskuter udbredelsen af permafrost i forhold til, hvor fremtidens klimaændringer vil blive mest udtalt.
- Hvilken rolle spiller indholdet af is i permafrosten for miljøeffekten ved en optøning?
- Hvor kommer CO<sub>2</sub> fra hvis permafrosten tør?

### Artikel og fotos af:

#### Bo Elberling

Professor og centerleder,  
Center for Permafrost (CEN-  
PERM), Institut for Geovidens-  
skab og Naturforvaltning,  
Københavns Universitet.

