



FIGUR 1. Stor-skala iskile-polygoner dannet ved frys-tø-processer nær Brønlund Hus i Peary Land i Nordgrønland. Her er årets middeltemperatur i luften under minus 10 grader, og permafrosten findes overalt (kontinuert permafrost) og har en tykkelse på flere hundrede meter.

FIGUR 2. Her ses kantlyng (*Cassiope*), der vokser mellem tuerne, og pil (*Salix*) i → efterårsfarver, som dominerer på tuerne. I virkeligheden er der tale om polygoner i lille skala. Tuedannelse har stor betydning for sneaflejring, overfladens energibalance og stabiliteten af den underliggende permafrost. Polygonerne er cirka 70 cm i diameter og er dannet som resultat af gentagne frys-tø-processer nær Zackenberg i Nordøstgrønland.

# Det smukke og overraskende ved permafrost

AF BO ELBERLING

*Permafrost kan være smukt, ufattelig gammelt og ganske uforudsigeligt. Det er en skjult og ukendt verden for de fleste, men den er kommet på de flestes læber. Det skyldes, at vi frygter, at »kæmpen vågner«.*

Permafrost er jord eller sedimenter, der har været frosset i mindst to år i træk, og den findes i Grønland udelukkende de i isfrie områder. Næsten 25% af landområdet på den nordlige halvkugle er påvirket af permafrost og rummer samtidig næsten halvdelen af Jordens jordbundne, organiske kulstofpulje. Denne pulje er dannet over meget lang tid. I dag er det vigtigt at afklare, hvor hurtigt puljen kan nedbrydes i lyset af de fremtidige klimaændringer. Hvis blot en mindre del af denne pulje af organisk stof nedbrydes af mikroorganismer og frigives som en drivhusgas (kuldioxid eller metan), kan det få konsekvenser for det globale drivhusgasbudget. Omvendt ved vi, at den øverste del af permafrosten indeholder gammelt kulstof, som ikke er blevet omsat i tidligere varmeperioder, fx for omkring

5000 år siden, hvor Arktis i mere end 1000 år menes at have været varmere end i dag.

Permafrost virker stabiliserende på en lang række processer. Men når de øverste lag af permafrosten tør, løber smeltevandet væk, dele af landskabet kolliderer, risikoen for erosion stiger, og omsætningen af organisk stof i jordmiljøet forøges. Den fysiske nedbrydning af landskabet har mange steder haft betydelige konsekvenser for infrastrukturen, når fx bygninger, rørledninger, veje og affaldspladser destabiliseres eller ødelægges.

I Grønland findes stort set alle former for permafrost. I Nordgrønland er permafrosten karakteriseret ved at være et sammenhængende ganske tykt lag (såkaldt kontinuert permafrost), som også i fremtiden vil være sammenhængende på trods af en eventuel markant global opvarmning og en optøning af toppen af permafrosten. I Sydgrønland er der omvendt for varmt til, at der eksisterer sammenhængende permafrost. Her findes kun såkaldt sporadisk permafrost i bjergområder. Variationer i både type og udbredelse





FIGUR 3. Et permafrost-landskab med palse, som stedvis er blottet pga. naturlig optøning, så man kan se kernen af is. Isen fremstår som næsten ren is og er dannet adskilt fra jorden (såkaldt segregeret is). Billederne er fra Mudderbugten på Disko i Vestgrønland.

af permafrost betyder, at det er vanskeligt at udtale sig generelt om permafrostens stabilitet og fremtidige optøning.

### Permafrosten gør landskaberne levende

Permafrosten spiller en stor rolle for landskabets former. Dette ses bedst fra luften, hvorfra man kan registrere et landskab præget af frys-tø-processer. De øverste lag af landskabet tør hver sommer og genfryser hvert efterår. Det kaldes aktivlaget. Under aktivlaget findes permafrosten. Fra luften kan man blandt andet

se iskile-polygoner i stor skala. Polygonerne dannes, fordi jorden sprækker op ved frysning. I sprækkerne samler der sig vand, som om efteråret fryser til is. Dermed vokser iskilen fra år til år (figur 1).

Selv om permafrosten ligger et stykke under jordoverfladen, er landskabets overflade og former præget af permafrosten. Is fylder omkring 9% mere end flydende vand, og iskrystaller vokser mod den retning, som kulden kommer fra. Det betyder, at isdannelsen medfører en transport af vand, og at en linse af is kan vokse sig større og større. De kræfter, der er i spil, kan



FIGUR 4 og 5. Skrænt med blottet permafrostlag nær Zackenberg i Nordøstgrønland. Her ses tydeligt den øverste del af jorden (ca. 50 cm) som lys og delvis udtørret – det såkaldte aktivlag. Den underliggende del er mørk og frosset og er den underliggende permafrost. Prøvetagningen blev udført i august, som er det tidspunkt på året, hvor aktivlaget er tykkest på den nordlige halvkugle. Nærbillede viser permafrostkerne udtaget fra skrænten. Efterfølgende er kernen langsomt tøet op i laboratoriet og produktionen af drivhusgasser målt gentagne gange.



FIGUR 6. Håndboringer i Nordøstgrønland. Prøverne registreres og lægges med det samme på frys. Den håndholdte boremaskine er brugt mange steder i Grønland, og den er velegnet til at tage kerneprøver i de øverste 2-4 m af permafrosten.

løfte jordlag, vælte træer, flytte veje og skabe imponerende ændringer i landskabet (figur 2).

I lavlandet samles vand fra omgivelserne, og ved frysning kan der dannes små lave forhøjninger, som kaldes palse. De har en permanent kerne af is og findes typisk i områder med diskontinuert permafrost og især i lavbundsområder med meget vand. En palse vil typisk vokse i højden i takt med, at kernen af is vokser. Kernen er beskyttet mod smeltning af den jord og tørv, som ligger oven på. På et tidspunkt kan vegetationen oven på ikke holde sammen længere, og kernen af permafrost blottes. Så smelter kernen hurtigt, og palsen falder sammen. Det er grunden til de mange huller i landskabet, og det viser, hvor foranderligt landskabet er (figur 3).

Der er ikke mange steder, hvor permafrost er direkte tilgængelig. Hovedparten ligger begravet under aktivlaget. En undtagelse er områder langs større floder og kyster, hvor der sker en optøning, ikke kun fra oven,

men også horisontalt ind i skrænterne. Det betyder, at netop her er det muligt at grave permafrosten fri uden at skulle bore igennem aktivlaget. Permafrostboringer er ellers den primære metode til at få prøver fra permafrosten og dermed indblik i variationen i permafrostens karakteristika (figur 4 og 5).

### 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 vil udtage. Prøverne, der omtales her, er i de fleste tilfælde udtaget fra de øverste 2-4 meter af permafrosten, som er mest udsat for svingninger i klimaet (figur 6).

Det er vigtigt, at prøverne forbliver frosne og intakte lige fra indsamlingen, til de skal analyseres i laboratoriet. Derfor undlader man at bruge vand og kemikalier ved borearbejdet, da disse kan optø eller ødelægge



FIGUR 7. I Nordgrønland dominerer sne, is og sedimenter. Under overfladen i de isfrie områder gemmer der sig store mængder af is – særligt i toppen af permafrosten. For at forstå, hvor følsom permafrosten er for klimasvingninger, er det nødvendigt med borer. Der findes i dag ikke nogen metode til fx fra satellitbilleder at forudsige mængderne af kulstof, næringsstoffer eller is, der er bundet i permafrosten.

prøverne. 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 sørger for, at borehovedet ikke fryser fast (figur 7).

### Permafrosten overrasker

Permafrostkerner er overraskende varierede i indhold og struktur. Det skyldes, at permafrost dannes i forskellige typer af sedimenter og under forskellige betingelser. Derfor er det spændende, hver gang en borekerne kommer op i dagens lys. I felten pakkes kernerne dog hurtigt væk. Først i fryselaboratoriet undersøges og beskrives kernerne detaljeret. Mange kerner skæres op på langs for, at man kan få et overblik over fx isindholdet og se, hvordan is og sedimenter er fordelt mellem hinanden. Arbejdet med kernerne er fyldt med overraskelser. Prøverne kan lugte mere eller min-

dre godt; pludselig kan der dukke perler op fra tidligere eskimo-kulturer, planterester eller en lille rest af en insektvinge. Det skyldes, at hovedparten af det, som i dag er det øverste lag af permafrosten, er tidligere jordoverflader, der nu er begravet i sedimentet (figur 8).

Alle kerner fotograferes for at registrere det gennemsnitlige isindhold og fordelingen af is. Cryostratigrafi er den videnskab, der tager udgangspunkt i fordelingen af is i permafrosten med henblik på at beskrive permafrostens dannelse. Såfremt områder bliver isfrie, hvilket er sket mange steder i Grønland, sker der en frysning fra oven, og permafrosten »vokser« nedad (såkaldt epigenetisk permafrost). I områder, hvor der sker en pålejring af sedimenter (vand- eller vindaflejret eller tørvedannelse), vil permafrosten følge med og »vokse« opad i ny-aflejrrede sedimenter (såkaldt syn-genetisk permafrost) (figur 9).



FIGUR 8. Borearbejde ved Brønlund Hus i Nordgrønland. I forgrunden ses en 4 cm tyk permafrostkerne fyldt med en massiv islinse og et stort indhold af luftbobler.

Skal man undersøge strukturen i permafrosten mere detaljeret, kan man ikke nøjes med at bruge det blotte øje. Det er nødvendigt at anvende udstyr, hvor permafrosten ikke tør under arbejdet. Til det formål kan man bruge et særligt scanning-elektronmikroskop (CryoSEM), hvor det er muligt at arbejde med prøver i et kontrolleret temperaturmiljø under minus 15°C. I et mikroskop opleves den ellers tilsyneladende homogene permafrostprøve som et frossent bjerglandskab. Den uensartede fordeling af is kan være med til at for-



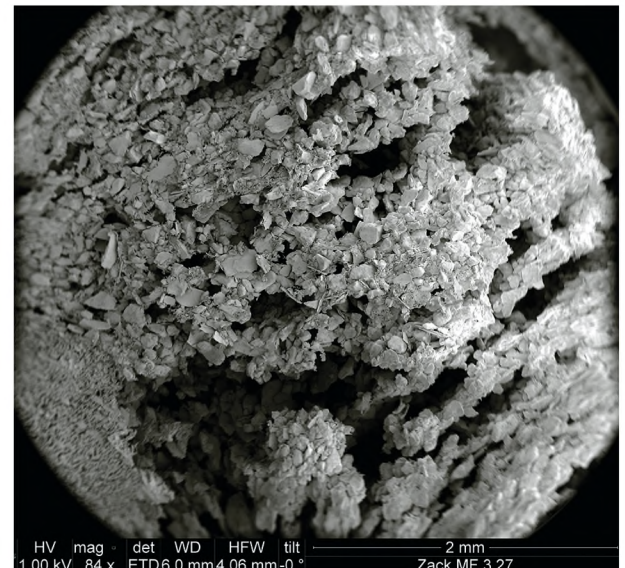
FIGUR 9. Her ses en knap 10 cm lang permafrostkerne skåret op i fryselaboratoriet i felten, hvorefter permafrostens struktur er blevet beskrevet. På den baggrund er det muligt umiddelbart at bestemme permafrostens dannelse. Denne kerne er udtaget i en pals, og prøven viser et højt indhold af organisk stof (tørvt) og en stor gennemgående linse af is fyldt med luftbobler.

klare, hvorfor permafrost kan have meget forskellige egenskaber afhængigt af isdannelsen, hvilket har betydning for fx transportegenskaber af luft og forekomsten af lommer, hvor mikroorganismer vil kunne overleve (figur 10).

### Når permafrosten bliver levende

Permafrost er som en dybfryser. Temperaturen er ret konstant, og det har vist sig, at frø fra planter og mikroorganismer faktisk kan overleve og bevare deres egenskaber mange år i permafrosten. Frosne frø er blevet optøet og er begyndt at spire. Tilsvarende viser det sig, at kerner af permafrost, der er indsamlet og efterfølgende optøet, oftest begynder at producere kuldi-oxid (CO<sub>2</sub>) i løbet af ganske få dage. Det skyldes, at mikroorganismer fra permafrosten igen bliver aktive og er i stand til at nedbryde fx rester af organisk stof i permafrosten.

Mikroorganismene omfatter både, hvad man traditionelt kalder bakterier, og svampe og archaea. Archaea er en interessant gruppe af encellede mikroorganismer, der blandt andet er kendt for at kunne producere metan. Kombinationen af bakterier og svampe er vigtig, fordi bakterier typisk nedbryder de let nedbrydelige kulstofforbindelser i organisk stof, mens svampe nedbryder de mere svært nedbrydelige kulstofforbindelser.



FIGUR 10. Permafrostprøve set igennem et CryoSEM-mikroskop. Her ses isens uensartede og fragmenterede fordeling i forhold til sandkornene. Den hvide bar angiver 2 mm.

Et gram permafrost indeholder typisk mere end en million bakterier og en overraskende mangfoldighed af mikroorganismer. På mange måder minder diversiteten om sammensætningen af mikroorganismer i jordlag fra fx Danmark. Den store mikrobiologiske diversitet betyder, at afhængigt af, under hvilke forhold permafrosten tør, vil visse grupper af mikroorganismer typisk drage nytte af de nye vilkår på bekostning af andre. Ny forskning viser, at permafrostens sammensætning af mikroorganismer ændres overraskende hurtigt efter en optøning (fra få dage til uger). Hvis permafrostkernen vandmættes, vil nogle typer af bakterier begynde at danne metan under fraværet af ilt, mens en dræning af smeltevandet fra samme prøve vil medføre, at ilt trænger ind i prøven, hvorved en optøning vil medføre, at andre typer af bakterier kommer til at dominere og producere fx mere kuldioxid.

Nogle mikroorganismer overlever bedre end andre. Når man kan finde fx *Firmicutes*-bakterier i permafrosten, er det ikke overraskende. Denne gruppe af

bakterier kan gå i dvale ved at indkapsle sig selv og på den måde overleve flere tusind år. Det er interessant, fordi det betyder, at meget gamle bakterier kan genaktiveres ved en optøning. I Nordgrønland er det muligt, at isfrie forhold har eksisteret lokalt, fx ved Kap København-formationen. Her blev sedimenter aflejret i et delta for mere end 2 millioner år siden og har med stor sandsynlighed været frosset lige siden. Fund af DNA viser rester fra en skov, der engang dækkede den del af Grønland. DNA ville næppe have overlevet den lange periode, hvis lagene havde været optøet. De samme lag fra Kap København-formationen viser sig at kunne producere kuldioxid – de er altså fulde af liv, der har overlevet. Disse prøver er taget under ekstreme og sterile forhold og kan altså rumme liv, som vil kunne rykke ved de kendte grænser for, hvor lang tid bakterier kan overleve i permafrost.

Et interessant spørgsmål er, om permafrostens mikroorganismer er i stand til at leve i den frosne jord. At leve i den forstand betyder at kunne vokse og at



FIGUR 11. Nær Indlandsisen ses flere steder en tilbagesmeltning af isen, og her dannes ny permafrost. Netop her indvandrer pionerplanter hurtigt og sætter gang i en jordbundsudvikling. Her er det moskusokser, der nyder godt af vegetationen og fraværet af myg nær isranden i Kangerlussuaq-området.



FIGUR 12. Skrænter under kraftig erosion. Permafrosten tør hurtigere i skrænter, hvor varmen kommer både fra oven og fra siden. Kombinationen af vandets erosion og permafrosten, som tør, giver anledning til en markant tilbageknytning af skrænten.

kunne reproducere sig selv. For eksempel er bakterien *Planococcus halocryophilus* blevet isoleret fra permafrost. I laboratoriet er det blevet påvist, at bakterien kan vokse og dele sig ved minus 15°C. Så svaret er entydigt ja – nogle mikroorganismer er i stand til at leve i den frosne jord. Det er sandsynligt, at disse bakteriers overlevelse og vækst knytter sig til små lommer i permafrosten. Størrelsesordenen på disse lommer kan være på nanometer-skala.

Når isen dannes i permafrosten, sker det overvejende som rene iskrystaller. De opløste ioner opkoncentreres derimod i den væske, som fryser til allersidst. Derved dannes små lommer med meget høje koncentrationer af salte. Det sænker frysepunktet betragteligt og gør det muligt for lommerne i permafrosten at indeholde flydende vand selv ved lave temperaturer. Sådanne lommer er et eksempel på et mikromiljø, som kan muliggøre mikrobielt liv i permafrosten. Dertil kommer, at mikroorganismer har mange forskellige måder at tilpasse sig livet i den frosne jord. Nogle er i



FIGUR 13. Et såkaldt tilbagegående optøningsskred ved Zackenberg i Nordøstgrønland. Den slags fænomener kan ikke forudsiges ved modelarbejde. De opstår tilfældigt, hvor landskabet er sårbart for erosion, hvor isholdig permafrost virker som glidebane, og hvor lag kan skride nedad. Ved erosion eksponeres ny permafrost, som så kan tørre. Processen starter typisk ved en nedbørsbegivenhed og kan være selvforstærkende. Det er en naturlig proces, som i fremtiden kan optræde hyppigere, hvis sommervejret bliver varmere, og ved mere intens nedbør om efteråret.



stand til at ændre cellemembranens gennemtrængelighed for derved at kunne vedligeholde aktivitet henover cellemembranen ved minusgrader. Andre kuldeaktive mikroorganismer producerer enzymer, der er specialdesignet til en lav temperatur, mens en tredje gruppe producerer antifrostproteiner, som hæmmer dannelsen af iskrystaller i deres celler.

### Hvor hurtigt dannes og tør permafrosten?

Indlandsisen i Grønland isolerer så godt mod vinterkulden, at Jordens egen varme sørger for, at der ikke findes permafrost under Indlandsisen. Permafrost findes altså kun i de isfrie områder og er derfor i Grønland blevet dannet, da isen langs kysten smeltede tilbage efter sidste istid for ca. 15.000 år siden. Kun enkelte steder, som fx ved Kap København, har områder formentlig været isfrie gennem meget lang tid, og følgelig er permafrosten ældre her.

Siden sidste istid er hovedparten af permafrosten i Grønland vokset i tykkelse og har nu mange steder en tykkelse på mellem 10 og helt ned til 400 m. På Diskoøen i Vestgrønland er permafrostens nedre grænse blevet målt til 350 m under jordoverfladen og ved Thule i Nordgrønland til 450 m. Den nedre grænse af permafrosten er i høj grad bestemt af geotermi, som er varmeenergi fra Jordens indre. Varmeenergien er en rest af den primære varme fra Jordens dannelse og henfald af radioaktive isotoper. Den varmeenergi, der når jordoverfladen, måles som produktet af den geotermiske gradient og varmeledningsevnen af bjergarterne på stedet (figur 11).

Det er vanskeligt at måle præcist, hvor hurtigt permafrosten tør. En indirekte metode er at måle aktivlagets tykkelse. Det gør man ved at presse et jernspyd ned gennem det optøede jordlag sidst på sommeren, ned til den øvre grænse for permafrosten. Denne måling sammenligner man med tidligere års målinger. Hvis den maksimale dybde øges år efter år, skyldes det, at toppen af permafrosten tør. Disse årlige sensommermålinger af den maksimale optøning samles i det internationale forskningsamarbejde CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring). Et CALM-måleprogram blev påbegyndt i Zackenberg (Nordøstgrønland) i 1996, og resultaterne viser, at den maksimale tykkelse af aktivlaget er øget med mere end 1 cm per år; hurtigst på den tørre tundra og langsommere i de våde kærømråder. Disse målinger foretages på forholdsvis stabile landskabsformer og vidner om en gradvis optøning år efter år. Desværre findes der ikke

målinger af aktivlagets tykkelse fra 1920'erne og 1930'erne, hvor Arktis sidst gennemgik en varm periode. Det ville ellers have været interessant at vide, om de lag, som tør nu, har været optøet en gang tidligere inden for de sidste 100 år.

Isindholdet i permafrostlaget er helt afgørende for, hvor hurtigt optøningen vil kunne ske i fremtiden, og hvilken effekt det vil have på det omgivende landskab. Frossent, tørt sand med lavt isindhold kræver mindre energi for at tømme og kan være stabilt både i frossen og optøet tilstand. Den isholdige permafrost, som ofte findes i toppen af permafrosten, kræver mere energi for at tømme, fordi varmekapaciteten for is er større end for luft. Smeltevand fra den meget isholdige permafrost fylder mindre end den oprindelige is, og en optøning medfører derfor en øjeblikkelig destabilisering af jordmiljøet, som forøges betydeligt, hvis smeltevandet drænes væk. Is kan udgøre mere end 50% af permafrosten og udgør i enkelte lag 100%, fordi segregeret is har samlet sig i store linser (figur 12).

### Kan modeller forudsige om permafrosten tør?

Ud over observationer og fysiske målinger bruges også matematisk modellering til at forudsige permafrostens optøning. Modelarbejdet er forbundet med en betydelig usikkerhed, idet modellerne kun i begrænset omfang tager højde for fx dræning, erosion, aflejringer og landskabets geomorfologi. Alligevel er modelarbejdet vigtigt for at kunne give et kvantitativt bud på, hvad fremtidens klimaændringer kan betyde for permafrosten. Det foreløbige modelarbejde tyder på, at permafrost-temperaturer i fx Zackenberg i Nordøstgrønland 10 m under jordoverfladen har været mellem minus 7 og minus 8°C inden for de sidste 100 år, og at temperaturerne i dag er steget til værdier på mellem minus 6 og minus 8°C og vil kunne stige til mellem minus 2 og minus 3°C allerede før år 2100 (figur 13).

Med udgangspunkt i aktivlagets og permafrostens termiske egenskaber og en fremskrivning af temperatur og nedbørsforhold er det muligt at udregne et vand- og energiregnskab. Den svenske model COUP er blevet kalibreret og derefter testet på kendte dataserier fra både Vest- og Østgrønland. Efter at modellen nu er valideret, kan den efterfølgende bruges i en følsomhedsanalyse, som er det bedste bud på, hvad fremtiden vil bringe. For mange steder i Grønland viser følsomhedsanalysen, at den maksimale aktivlagstykkelse vil øges, og at mellem 20 og 70 cm af den øverste del af permafrosten vil kunne tømme før 2100 (figur 14).



FIGUR 14. Den arktiske tundra er mange steder meget frodig og artsrig som her nær Arktisk Station på Disko i Vestgrønland. Her Grønlandsk post (*Ledum groenlandicum*) med hvide blomster i forgrunden. Den er også kendt som *Rhododendron groenlandicum*, en blomstrende busk med blade, der bruges til at lave bla. urtete.

### Permafrost og planter

I Arktis er nedbrydningen af plantemateriale langsommere end planteproduktionen i vækstsæsonen. Det er grunden til, at kolde arktiske jordsystemer er karakteriseret ved en ophobning af organisk stof i form af delvist omsatte planterester, tørv og rødder. Det betyder, at puljen af kulstof i jorden oprindeligt kommer fra planter, som via fotosyntese har trukket CO<sub>2</sub> ud af atmosfæren. Men det tager tid at ophobe kulstof. Da landskaberne i Grønland er forholdsvis unge, er mængderne af organisk stof og dermed kulstof dog begrænsede i forhold til meget ældre landskaber som i fx Sibirien. Disse puljer kan siden begravnes og ende som permafrost.

Når permafrosten tør, frigives både drivhusgasser til atmosfæren og næringsstoffer. Sidstnævnte kan være en forudsætning for, at planter kan vokse mere i et varmere klima. Det betyder, at plantevækst i Arktis

kan kobles direkte til permafrost, der tør, og at planterne således kan binde en andel af den mængde af kuldioxid, som frigives til atmosfæren, når permafrosten tør.

Et stort antal permafrostkerner fra Canada, Grønland, Svalbard og Sibirien viser sig at indeholde overraskende store mængder af uorganisk kvælstof – mange steder i højere koncentrationer end i de øvre jordlag, som er grundlaget for den nuværende vegetation. Kvælstof er et af de vigtigste næringsstoffer i Arktis og begrænser plantevæksten de fleste steder. En forudsætning for, at planterne kan udnytte en ekstra kvælstofpulje, er naturligvis, at deres rødder kan vokse ned mod permafrosten i takt med en optøning. Nyere undersøgelser viser, at de planter, der vokser i Grønland, fx græs og urter samt små træer som arktisk birk og pil, allerede har rødder helt ned til permafrosten, og at planterne i et varmere klima har tendens til at få både længere og tyndere rødder. Undersøgelser



FIGUR 15. Den arktiske vegetation er i Nordgrønland meget sparsom, vækstsæsonen er kort og tilgængeligheden af vand og næringsstoffer meget begrænset. Manglende nedbør betyder, at salt (der ses som hvide flager) ophobes i overfladen og stresser plantevæksten yderligere.

ne viser også, at hvis man tilføjer isotop-mærket kvælstof i forskellige dybder, så genfinder man en betydelig andel af det mærkede kvælstof i bladene på levende planter. Det viser entydigt, at en lang række planter har et effektivt rodnet på stor dybde, og at planter kan optage kvælstof fra permafrost, der tør.

Et centralt spørgsmål er kulstofbalancen i et varmere klima i Arktis. Med andre ord: hvor meget kulstof der frigives, når permafrosten tør, i forhold til, hvor meget mere kulstof planterne optager. Dette regnestykke kompliceres af flere forhold. Ét er, at kulstof fra optøende permafrost også kan frigives som metan, som er mindst 30 gange så stærk en drivhusgas som kuldioxid. Et andet problem er, at vi i dag ikke ved, hvor meget kvælstof (og andre næringsstoffer) der frigives fra permafrosten, og i hvilket omfang disse næringsstoffer bliver tilgængelige for en øget plantevækst. Det er for tidligt at slå fast, om der er en balance mellem kulstof, der frigives fra permafrosten, og

kulstof, der bindes i planter. Der skal flere målinger til, og undersøgelserne skal dække flere klimazoner, flere vegetationstyper og ikke mindst repræsentere flere år. Vi skal have flere variationer med, fx varme og kolde somre, inden vi med rimelig sikkerhed kan vurdere, om nettobalancen går i nul. Men de foreløbige undersøgelser tyder på, at kulstofbalancen er tæt på nul.

Ligger man på knæ i tundraen og indsamler jordprøver eller tæller blomsterknopper, opdager man hurtigt, at tundraen har sin egen duft, og at jorden lugter anderledes. VOC'er (Volatile Organic Compounds) er en fællesbetegnelse for den gruppe af flygtige organiske forbindelser, som frigives fra planter. Nogle af dem kender man, fx duften af kantlyng. Andre VOC'er kommer fra jorden og permafrosten, når den tør. Man ved, at planter frigiver disse duftstoffer bl.a. for at tiltrække insekter og holde skadegørende insekter på afstand. De reaktive stoffer påvirker imidlertid

også drivhusgassernes levetid i atmosfæren, samt dannelsen af små partikler (aerosoler) og skyer. VOC'ernes samlede betydning for klimaet er imidlertid ukendt, og derfor undersøges deres dannelse og frigivelse (figur 15).

Det viser sig, at når permafrosten tør, frigives der også VOC'er. Så VOC'er kommer både fra planter og fra mikroorganismer, der nedbryder organisk stof i jord og permafrost. Problemstillingen bliver kun mere interessant af, at undersøgelser tyder på, at de VOC'er, der frigives fra permafrosten, omdannes helt til CO<sub>2</sub> i aktivlaget og altså ikke i nævneværdig grad frigives til atmosfæren.

## Den grønlandske historie tør op

Borearbejdet forløber fint. Men just som man står med en borekerne i hænderne, breder der sig en meget speciel lugt. Det er løgn! Det er Grønlands frosne fortid i form af en mere end 4000 år gammel køkkenmødding – en frossen losseplads, som er ved at tør mellem hænderne på os. Fortidens lugt blander sig med de ellers så friske og kolde vinde fra Indlandsisen.

Der har levet mennesker i Grønland i mere end 4000 år, og lige så længe har kulde og udtørring sikret en enestående bevaring af kulturminde fra disse mennesker. Det gælder både menneskene selv, der er blevet fundet som mumier, og DNA, deres redskaber, deres boliger og deres køkkenmøddinger. Et generelt højt vandindhold i aktivlaget og den underliggende permafrost har sikret bevaringen af en række enestående arkæologiske lokaliteter. Qajaa nær Ilulissat i Vestgrønland er i dag en del af UNESCO-verdensarvsområdet Ilulissat Isfjord og en af de lokaliteter, hvorfra der er hentet megen ny viden om de første grønlandere.

De første mennesker i Qajaa var Saqqaq-folket. De fandt et område, hvor is, havstrømme og klima gav helt ideelle levevilkår året rundt. Qajaa ligger på et næs, hvor vinden om sommeren holder de fleste myg væk og om vinteren sikrer åbent vand samt mulighed for fiskeri og sælfangst. Det er derfor ikke så mærkeligt, at senere indvandring, Dorset- og Thule-folkene, bosatte sig i det samme område. Det betyder, at der i dag i et område på knapt 3000 m<sup>2</sup> findes en cirka tre meter tyk køkkenmødding. Den indeholder arkæologiske fund, der dokumenterer levevis og udviklingen af de tre vigtigste indvandringsbølger til Grønland. Heraf har de to ældste kulturlag formentlig været nedfrosset som permafrost lige siden dengang, de var i brug.

Under en større udgravning ved Qajaa i 1981-1982 blev der fundet store mængder af knogler fra fangst- dyr og talrige redskaber, herunder harpunhoveder, pilspidser og små økser af sten. De mange stenredskaber kendes fra adskillige andre lokaliteter, men de organiske genstande fra Qajaa regnes for kulturarv af verdensklasse. At de er blevet bevaret til i dag, skyldes i høj grad permafrosten og de iltfrie forhold i køkkenmøddingen. Det helt særlige ved Qajaa er de fine fund, fx et kastetræ af hvalknogle (der bruges til at slynge et spyd afsted) eller stenknive med bevaret træskæfte med kniven placeret i sin oprindelige position. Fundene viser, hvordan de mange stenredskaber er blevet brugt, og at Saqqaq-kulturens jægere har været fremragende til at arbejde i træ og udnytte forskellige materialer til redskaber. De mange træstykker og stenredskaber, der er bundet sammen med sener eller hvalbarde, ligger stadig godt i hånden og binder nutidens forskning nærmere til de mennesker, der levede i fortiden og deres levevilkår.

Når permafrosten tør, vil smeltevandet løbe væk og jordlagene falde sammen. Det er særlig uheldigt i forhold til kulturgenstande af træ, som er sårbare over for at blive mast sammen. Det betyder, at hvis lag i køkkenmøddingen tør, kan dræning på kort tid forvolde stor skade. På længere sigt vil genstandene desuden blive angrebet af svampe og langsomt rådne op for til sidst at forsvinde. Man kan gøre noget for at beskytte området ved fx at dække det med nye sedimenter. Man kan også sikre et højt vandindhold ved hjælp af snehegn, der fanger sneen i driver, og som leverer ekstra vand til særligt udsatte områder, når sneen smelter. Til gengæld betyder den slags indgriben, at man ændrer de naturlige rammer for området. Meningerne er delte om, hvad der er truet, og hvad det er bedst at gøre. Men ny viden er central for at træffe de rigtige beslutninger. Det gælder viden om klimaet, om forholdene på overfladen (sne og vegetation) og en karakteristik af møddingen i forskellige dybder (figur 16).

Analyserne fra laboratoriet viser, at så snart en prøve af køkkenmøddingen tør, så begynder der en nedbrydning, svarende til, hvad der sker i enhver anden prøve fra en almindelig jordoverflade. Bakterier og svampe kaster sig over det organiske materiale, hvorved der bruges ilt og produceres kuldioxid. Og det er vel at mærke mikroorganismer fra køkkenmøddingen, som står for nedbrydningen. Når nedbrydningen skal måles, ser man på iltforbruget og produktionen af kuldioxid. Det sker ved at måle, hvor hurtigt koncentrationen af ilt falder og koncentrationen af kuldioxid stiger



FIGUR I6. Qajaa - en særlig velbevaret køkkenmødding, som indeholder lag fra tre primære indvandningsbølger af mennesker til Grønland. Oversigtsbilledet viser en overvågningsstation, hvor temperaturen og vandindholdet samt klimadata indsamles. Det nederste billede viser detaljerne af køkkenmøddingen, som domineres af knogler, rester af redskaber mv.

i en lukket glasbeholder med en prøve af køkkenmøddingen. Ved at måle ved forskellige temperaturer og vandindhold viser den slags forsøg, hvor følsomt det organiske materiale er over for nedbrydning.

For at begrænse nedbrydningen skal møddingen gerne holdes kold og våd. Ved et højt vand- eller isindhold har ilten meget svært ved at trænge ned i jorden, og dermed bremses nedbrydningen effektivt. Derudover vil et højt vand- eller isindhold i møddingen forsinke opvarmningen om sommeren.

Når mikroorganismer nedbryder organisk stof, produceres der varme. Dette er gammel viden. Målinger af varmeproduktionen fra en række organiskholdige jorde fra Grønland, herunder lagene fra Qajaa, viser, at den organiskholdige køkkenmødding kan producere en ganske betydelig mængde varme, og at varmeproduktionen tilmed øges i takt med, at temperaturen stiger. Når først temperaturen i møddingen er kommet over frysepunktet, og varmeproduktionen er kommet i gang, kan der dannes så meget varme, at køkkenmøddingen varmer sig selv op, hvilket medfører en yderligere optøning. En kombination af målinger af varmeproduktionen og modelarbejde forudsiger, at en fuldstændig optøning af køkkenmøddingen ved Qajaa er sandsynlig inden år 2100 på trods af, at lufttemperaturen ikke stiger mere end måske fem grader. Det er en såkaldt feedback-effekt, der opstår i optøet permafrost, og som man indtil nu har manglet detaljerede målinger af.

### Center for Permafrost

Center for Permafrost (CENPERM) ved Københavns Universitet er rammen for det arbejde, som er beskrevet i ovenstående kapitel. CENPERM er et tværvidenskabeligt forskningscenter bestående af biologer, geografer og geologer, som med udgangspunkt i Grønland forsker i samspillet mellem permafrost, jordmiljø, planter og mikroorganismer samt ændringer i dette samspil i relation til klimaændringer. Arbejdet ved CENPERM startede i 2012, men vi er slet ikke færdige med at arbejde med permafrost. Vi forventer mange flere overraskelser fra klodens mere eller mindre permanente frosne lag – det er netop det smukke ved videnskaben.

En stor tak til Danmarks Grundforskningsfond som sammen med Københavns Universitet over ti år har sikret bevillingerne til CENPERM.

### Litteraturliste

- Blok, D., Faucherre, S., Banyasz, I., Rinnan, R., Michelsen, A. & Elberling, B. 2018: »Warming increases belowground permafrost and active layer soil carbon loss but reduces above-ground litter decomposition rates in High-Arctic tundra«, i: *Global Change Biology* 24, 2660–2672.
- Elberling, B., Christiansen, H.H., & Hansen, B.U. 2010: »High nitrous oxide production from thawing permafrost«, i: *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«, i: *Journal of Archaeological Sciences* 38, 1331–1339.
- Elberling, B., Michelsen, A., Schädel, C., Schuur, E.A.G., Christiansen, H.H., Berg, L. Tamstorf, M.P., Sigsgaard, C. 2013: »Long-term CO<sub>2</sub> production following permafrost thawing«, i: *Nature Climate Change* 3, 890–894.
- Faucherre, S., Jørgensen, C.J., Blok, D., Weiss, N., Siewert, M.B., Bang-Andreasen, T., Hugelius, G., Kuhry, P., Elberling, B. 2018: »Short and long-term controls on active layer and permafrost carbon turnover across the Arctic«, i: *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 123, 372–390.
- Fenger-Nielsen, R., Hollesen, J., Matthiesen, H., Andersen, E.A.S., Westergaard-Nielsen, A., Harmsen, H., Michelsen, A. & Elberling, B. 2019: »Footprints from the past: The influence of past human activities on vegetation and soil across five archaeological sites in Greenland«, i: *Science of the Total Environment* 654, 895–905.
- Hollesen, J., Matthiesen, H., Møller, A.B. & Elberling, B. 2015: »Permafrost thawing in organic Arctic soils accelerated by ground heat production«, i: *Nature Climate Change* 5, 574–578.
- Kramshøj, M., Holst, T., Albers, C.N., Holzinger, R., Elberling, B. & Rinnan, R. 2018: »Biogenic volatile release from permafrost thaw is determined by the soil microbial sink«, i: *Nature Communication* 9, 3412.