

ZACKENBERG – JORD, PERMAFROST OG KULSTOF



Det er en flot oplevelse at nærme sig den grønlandske østkyst fra luften. Området der adskiller havet og Indlandsisen domineres af stejle og nøgne fjelde samt gletschere. Først lige inden man lander ved Zackenberg dukker et mosaikagtigt landskab op bestående af lavtliggende og fugtige kær, store ensartede tundraflader og helt vegetationsfrie afblæsningsflader (*fig. 1*). Denne rumlige variation afspejler

Af Bo Elberling,
Charlotte Sigsgaard
& Torben R. Christensen

landskabets morfologi og alder, jordmiljøets udgangsmateriale, klimaet, herunder eksponering af sol, sne og

vand, og ikke mindst planternes tilpasning til de givne miljøbetingelser.

I Zackenberg kan man skelne mellem mindst 20 forskellige vegetationstyper hvoraf mindst 10 kan erkendes på satellitbilleder. I det følgende vil vi fokusere på tre kontrastfyldte og dominerende typer med hver deres karakteristiske jordbundsudvikling, hydrologi og kulstofomsætning. Samtidig repræsenterer disse tre vege-



1. Zackenbergdalen har en mosaik af vegetationstyper og plantesamfund rækkende fra våde kær med kæruld til tørre grus- og stenmoræner med dryas samt fjeldskrånninger. (L.A. Kyhn)



Der er ikke de samme udstrakte kærømråder i højarktisk Grønland som i andre dele af Arktis. Ved Zackenberg dominerer de tørre og fugtige (i modsætning til våde) jorder, og de bliver mere og mere dominerende jo længere nordpå i Grønland man kommer. I disse jorder er tilgængeligheden af ilt stor, og optøningsdybden er betydelig (ofte mere end 60 cm sidst på sommeren). Hovedparten af det kulstof som tilføres, bliver derfor omsat under frigivelse af CO₂. I modsætning hertil betinger et højt vandindhold i de våde jorder at atmosfærisk ilt kun langsomt trænger ned, og at det tager længere tid at varme jorden op. Det betyder at omsætningen sker langsommere og at en væsentlig del af omsætningen foregår uden ilt (anaerobt). Derfor dannes der metan (CH₄) som frigives på samme måde som CO₂ til atmosfæren. I jorden kan CH₄ dog med hjælp af bakterier omdannes til CO₂. Når



Overfladestruktur på tør polygonjord ved Zackenberg fremhævet ved sneaflejring. (C. Sigsgaard)

CH₄ først har forladt jordmiljøet og befinder sig i atmosfæren, sker nedbrydningen gennem kemiske reak-

tioner med iltholdige stoffer som tager mange år.

Som drivhusgas er CH₄ betydelig stærkere end CO₂. Et stofs virkning som drivhusgas afhænger af dets egenskaber til at absorbere varme-stråling og dets levetid i atmosfæren. Sammenligner man udslip af den samme masse af CH₄ og CO₂ over 100 år, er CH₄ mere end 23 gange stærkere end CO₂. Man beregner et såkaldt *Globalt opvarmningspotentiale* (GWP) der udtrykker hvor effektivt udslippet af en vægtenhed af et givet stof er, sammenlignet med den samme mængde CO₂. Det betyder at selvom omsætningen i våde jorder er mindre end i de tørre jorder, så kan den miljømæssige effekt godt være størst fra de våde jorder pga. den i klimasammenhæng stærkere effekt af CH₄. I dag er det et åbent og vigtigt spørgsmål for den arktiske forskning hvordan den fremtidige CO₂- og CH₄-balance bliver for de arktiske økosystemer.

BOKS 1: OMSÆTNING I JORDEN OG UDVEKSLING AF DRIVHUSGASSER

tationstyper spændvidden i de forskellige måder enkelte landskabelementer forventes at respondere på fremtidige klimaændringer. I det følgende vil de tre vegetationstyper blive betegnet henholdsvis dryas-, kantlyng- og kærømråder.

Højt oppe på Zackenbergfjeldet er planterne stort set fraværende og jordbundsudviklingen tilsvarende begræn-

set. Puljen af kulstof og andre næringsstoffer i jorden er alene betinget af et lille input af organisk stof. På den mere jævne tundra dominerer dryas (grønlandsk fjeldsimmer) på de tørre og eksponerede dele, de såkaldte afblæsningsflader, mens kantlyng dominerer i de mere fugtige områder med et beskyttende snelag om vinteren. I lavninger og områder nedstrøms for

permanente snefaner vil der være mere vådt store dele af sommeren, og her dominerer bl.a. kæruld. Kombinationen af et højt vandindhold og højtliggende permafrost betyder at der her ofte opstår iltfattige forhold i jordmiljøet. Organisk stof i denne iltfattige zone omsættes derfor kun langsomt og ufuldstændigt så der dannes tørv. I alle dele af landskabet udveksles





2. Jordbundsprofil og underliggende permafrost (ca. 2 m) ses eksponeret som resultat af naturlig erosion langs Zackenbergelven. (C. Sigsgaard)

der kuldioxid (CO_2) mellem vegetation/jord og atmosfære, og i de våde områder frigives desuden metan (CH_4 , boks 1).

PERMAFROST OG PULJER AF KULSTOF

Undersøgelser af jordmiljøet tager ofte udgangspunkt i en karakteristisk base-ret på jordbundsanalyser af prøver udtaget med kendt volumen i de karakteristiske lag som jordbunden består af. Hvor kysten eller en elv eroderer sig ind i jordlagene og den underliggende permafrost, bliver jordlagene bedst eksponeret (fig. 2). Jordbundsprøver er dog primært blevet udtaget fra gravede profiler. Resultatet af mere end 2.000 kulstofanalyser på jordprøver fra Zackenberg

viser at der er stor variation i indholdet af kulstof betinget af et samspil mellem jordtype, landskabsform, vegetationstype samt dræningstilstand. I områder med dryas og kantlyng findes hovedparten af kulstofpuljen i de øverste 30 cm, mens kulstofpuljen er mere jævnt fordelt i kærommeråderne.

Koncentrationer af kulstof på en given flade kan omregnes til en pulje af kulstof, når massefylden og tykkelsen af de enkelte jordlag kendes. Omregnet til kg kulstof i de øverste 50 cm viser det sig at de fugtige kærommeråder og nærliggende områder med pil indeholder i gennemsnit omkring 15 kg C pr. m^2 , mens dryas- og kantlyngområderne kun indeholder omkring det halve. Som gennemsnit findes der mere end 100 ton organisk kulstof i de øverste 50 cm pr. hektar. Dette er

langt den største pulje af kulstof som indgår i kulstofkredsløbet i det arktiske økosystem. Det betyder også at selv små ændringer med tiden kan få stor betydning. Sådanne ændringer er snævert koblet til udvekslingen af kulstof i vegetationen, i rødderne og i omsætningen af nedfaldne blade m.v. Disse puljer der udgør mindre end 6% af den samlede pulje organisk stof i Zackenberg, men giver os mulighed for at forudsige fremtidige ændringer i jordens lager af kulstof. De er også vigtige for økosystemets nuværende stabilitet, fx som fødegrundlag for pattedyr og fugle.

I Zackenberg-området findes "be-gravede" jordbundstyper, såkaldte fossile jorder, der er gamle jordtyper begravet under fx vind- eller vandaflejrede sedimente. Sådanne fossile jorder vidner om tidligere tiders klima- og vegetationsforhold. Begravet under mere end 30 cm flyvesand findes flere steder i Zackenberg resterne af en gammel, stærkt udvasket og næringsfattig jordbundstype. På fig. 3 ses et mørkebrunt/rødt lag som er den gamle udfældningshorisont i en såkaldt podzol. I den zone er organisk stof samt jern- og aluminiumforbindelser udfældet. En sådan transport af organisk stof og metaller fra overliggende lag har forudsat en biologisk aktivitet ved overfladen, hvor der er dannet stærke organiske syrer under omsætningen af det organiske stof. Disse syrer har medvirket til forsurening (lave pH-værdier) og en opløsning af jern og aluminium, som med nedsvinningsvandet har kunnet bevæge sig ned og er blevet udfældet længere nede i jorden. En tilsvarende men aktuel jordbundsudvikling kendes i dag fra sydligere breddegrader i Grønland.





3. Jordbundsprofil under kantlyng. Øverst ses et gråt flyvesandslag med ringe jordbundsudvikling og nedenunder en begravet podzoleret jord med et humusholdigt lag og underliggende et rødt jernholdigt lag. (B.H. Jakobsen)



4. Landskabsmålinger med anvendelse af såkaldt eddy-korrelationsteknik hvor nettoresultatet af planternes CO_2 -optagelse og planternes såvel som jordens frigivelse af CO_2 måles. Om vinteren og i det tidlige forår dominerer frigivelsen, og landskabet som helhed virker som en CO_2 -kilde til atmosfæren. I planternes vækstsæson er det modsatte tilfældet. (C. Sigsgaard)

Alt tyder på at der ved Zackenberg har været både en del varmere og mere fugtig end der er i dag. Desuden har en helt anden vegetation været dominerende, nemlig birk hvis pollen findes i de begravede lag. Det organiske indhold som findes i de begravede horisonter, er blevet kulstof-14-dateret. Det viser sig at denne varmere og fugtigere periode i Zackenberg op-

trådte for mere end 4.000 år siden. Det betyder at den pulje af kulstof som findes i den øverste del af jorden, ikke nødvendigvis afspejler en ligevægtstilstand mellem det nutidige klima og jordbundsmiljøet. Der er således en væsentlig usikkerhed forbundet med at modellere jordmiljøets rolle i forbindelse med frigivelsen af drivhusgasser i fremtiden.

OMSÆTNING AF ORGANISK
STOF OG FRIGIVELSE AF
DRIVHUSGASSER

I dag foretages en del studier i arktiske områder som forsøger at forudsige hvilken rolle de arktiske økosystemer kommer til at spille ved en klimaforandring. De fleste af disse studier måler den hastighed hvormed kulstof



5. Jordens frigivelse af CO₂ bestemmes ved at måle koncentrationsstigningen af CO₂ i en cylinder med låg på som er presset ned i jorden. Her måles i det tidlige forår hvor der nogle år måles en uventet "bøvs" af CO₂. (B. Elberling)

akkumuleres (primært ved fotosyntese) og frigives (primært ved planterespiration og nedbrydning af organisk stof i jorden). Det giver to store tal for henholdsvis input og output til jordens pulje af kulstof, men giver kun et usikkert bud på om jordmiljøet bliver rigere eller fattigere på kulstof, og dermed om jorden virker positivt eller negativt på det globale kulstofbudget i atmosfæren. Målinger af landskabets udveksling af CO₂ ved Zackenberg ty-

der på at input og output af kulstof over et årti stort set er i balance på den tørre tundra (fig. 4). Der hersker dog en hvis usikkerhed om hvad der sker om vinteren i Zackenberg. Tilsvarende medregnes sjældent tabet af kulstof fra jordmiljøet i form af opløste organiske og uorganiske forbindelser. Et stort spørgsmål er hvordan balancen mellem input og output bliver i fremtiden.

For at kunne forudsige hvordan et arktisk økosystem som ved Zacken-

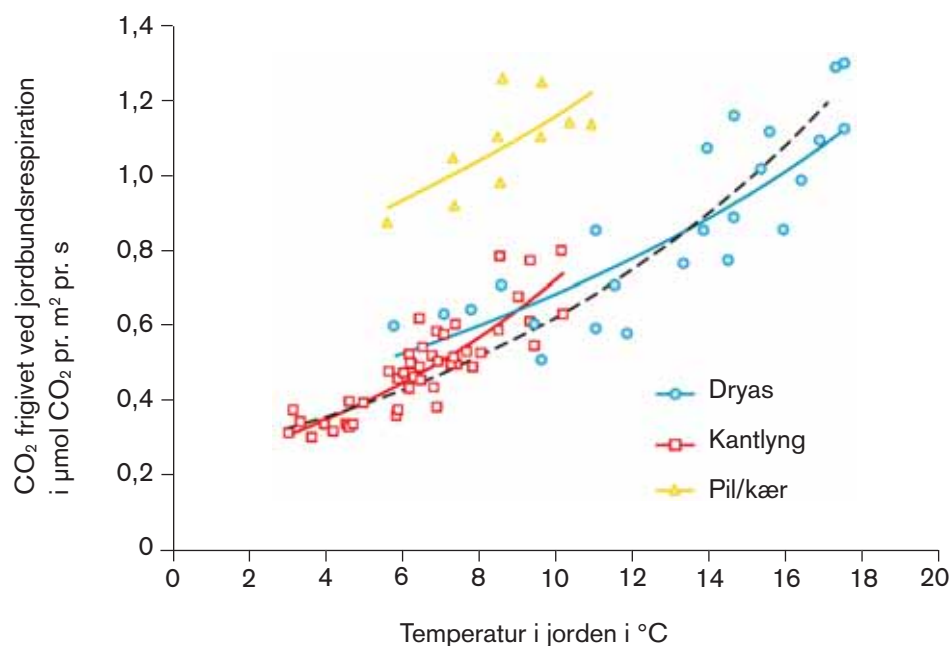
berg påvirkes af fremtidige klimaforandringer, er omsætningsprocesserne blevet undersøgt nærmere. Både planternes fotosyntese og respiration samt nedbrydning af organisk stof i jorden forøges ved en opvarmning. Ved Zackenberg har der været gennemført opvarmningsforsøg hvor temperaturen i jordoverfladen er blevet øget med 2-3 °C. Det har medført at frigivelsen af CO₂ er forøget med op til 33%. Men på trods af det øgede kul-



stoffab viser et samlet kulstofregnskab at økosystemet netto optager kulstof i planternes vækstsæson. Andre forsøg viser at vanding af nogle vegetations typer kan forøge frigivelsen af CO₂ uden at det påvirker kulstofbindingen. Dermed kan en ændring i nedbørsforholdene alt andet lige også påvirke kulstofregnskabet. Formentlig kommer mange andre forhold til at spille en lige så stor rolle som den direkte effekt af en temperaturstigning, fx ændrede sneforhold, skydække og nedbør.

Målinger af jordens frigivelse af CO₂, der bestemmes ved at måle koncentrationsstigningen af CO₂, viser at langt hovedparten af CO₂-produktionen sker i de overfladenære lag (fig. 5). Hvilket for Zackenberg er bestemt ved at analysere variationer i CO₂-koncentrationer i jordprofilen. Ikke overraskende er temperaturen i jorden afgørende for variationen i CO₂-produktionen i jorden over tid (fig. 6), idet det er bakterier og andre levende organismer der betinger en omsætning og dermed en CO₂-produktion. Udover temperaturen, er der tydelig forskel på CO₂-produktionen mellem de enkelte vegetationstyper (fig. 6). Forskellen på kantlyng og dryas skyldes at jorden under dryas indeholder mindre vand og derfor er varmere om sommeren. CO₂-produktionen i jorden under pil og kær ligger forskudt i forhold til kantlyng og dryas. For pil er CO₂-produktionen markant højere hvilket skyldes at plantedele fra pil er lettere omsættelige (indeholder mere kvælstof) og nemmere at nedbryde end det er tilfældet for kantlyng.

Lige efter tøbrud måles ofte en overraskende høj frigivelse af CO₂. Baggrunden for denne høje frigivelse



6. Sommermålinger af CO₂-frigivelsen fra tre udbredte vegetationstyper som funktion af temperaturen målt i jorden i en dybde af 5 cm. CO₂-produktionen i jorden under kantlyng og dryas ligger tæt på den samme linie (stiplet), mens CO₂-produktionen i jorden under pile/kær er markant højere. (Academic Press)

er undersøgt detaljeret i Zackenberg, dels i form af kontrollerede feltforsøg hvor sneen er fjernet og frigivelsen af CO₂ fra den frosne jord er blevet kvantificeret, og dels i fryserforsøg i laboratoriet. Det viser sig at denne "bøvs" af CO₂ primært er blevet produceret i løbet af den lange vinter, fanget i den frosne jord og først frigivet når jorden begynder at tø. Dette er i overensstemmelse med at de mikroorganismer som er ansvarlig for CO₂-produktionen i kolde egne, er tilpasset lave temperaturer. Fryserforsøg med mikroorganismer fra Zackenberg viser at deres aktivitet omkring frysepunktet er omkring 20% af deres fulde kapacitet, og at de er aktive ned til mindst -18 °C.

METANPRODUKTION

I den centrale del af Zackenbergdalen findes et større kærrområde hvor produktionen og frigivelsen af metan er blevet undersøgt. Det blev tidligt klart at kærområdet i Zackenberg er meget produktivt i form af plantevækst og har et højt udslip af metan i vækstsæsonen. Frigivelsen af metan er af samme størrelsesorden som tilsvarende økosystemer i fx det nordlige Skandinavien hvilket tyder på at kærerne repræsenterer "hot-spots" for udveksling af kulstof med atmosfæren. Dette er i kontrast til den relativt beskedne udveksling af kulstof i de arealmæssige mere dominerende heder og de mere vegetationsfattige områder.





7. Våde lavninger domineret af græsser og kæruld er næsten vandmattede det meste af året. Her måles frigivelsen af metan i automatiske kamre. A: i det tidligere forår når området er oversvømmet, B: midt om sommeren hvor området er sumpet og C: i den tidlige vinter (se næste side). (A,B: J.M. Falk, C: C. Sigsgaard)

I kærene ved Zackenberg blev den direkte kobling mellem vegetations-sammensætningen og størrelsen af metanfrigivelsen for første gang dokumenteret for et højarktisk økosystem. Det viser sig, at visse plantearter (bl.a. polarkæruld og smalbladet kæruld) direkte stimulerer frigivelsen af metan. Det betyder at ændringer i hydrologi, næringsstofforhold eller temperatur som betinger en ændring i sammensætningen af plantearter, alene kan medføre ændringer i frigivelsen af metan. Dermed er der sat fokus på samspillet mellem artssammensætning og klimaforandringer, og hvordan et økosystem som Zackenbergs vil bidrage til atmosfærens indhold af drivhusgasser.

Siden 2006 har målinger af metanfrigivelsen fra kærene i Zackenberg været en del af basisprogrammet (fig. 7). Dette er bemærkelsesværdigt i relation til det øvrige Arktis hvor langt de fleste tilsvarende metanmålinger sker i tidsbegrænsede forskningsprojekter. De to års data som er indsamlet, vidner om værdien af langtidsmonitoring, og at netop variationer i snemængder og tidspunktet for tøbrud først på vækstsæsonen er afgørende for den samlede frigivelse af metan.

PERMAFROST OG KLIMAÆNDRINGER

Den del af jorden som i dag er permanent frossen (permafrosten), kan blive en helt afgørende faktor for kulstofregnskabet i Zackenberg. Man ved at permafrosten indeholder store mængder kulstof, at denne pulje er meget uensartet fordelt i landskabet og at den kan blive delvist omsat ved en



optøning. Laboratoriemålinger viser at nedbrydningen af organisk stof ved en opvarmning af permafrost kan forløbe lige så effektivt som i lag nær overfladen efter blot nogle få dage eller uger. Dette skyldes at de nedbrydende mikroorganismer allerede findes i jorden og hurtigt formerer sig ved en opvarmning.

Ofte høres argumentet at Arktis er blandt de områder på kloden hvor de største temperaturstigninger i fremtiden vil finde sted, og hvor netop den meget store pulje af kulstof i permafrostlag er blandt de helt afgørende ubekendte kilder til en fremtidig frigivelse af drivhusgasser til atmosfæren og dermed en potentiel accelereret op-



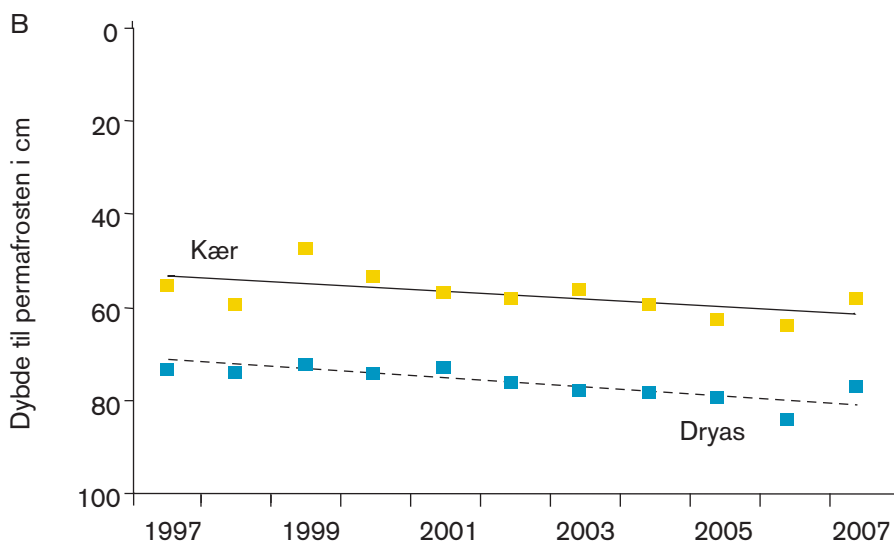
I Arktis er det velkendt at is over årtier kan ophobes i jordmiljøet som næsten ren is. Normalt er den frosne is og jord beskyttet af overliggende jord og vegetation, men forstyrres denne balance af ændringer i klimaet, større udsving i temperaturer, ændringer i plantedække eller vandgennemstrømning, kan det føre til eksponering af den frosne jord hvorved der dannes termokarstområder med sammensynkninger og afløbsløse lavninger. Hvis klimaet bliver varmere vil ophobet is nemmere blive eksponeret og danne områder med termokarst. I Zackenberg er antallet af disse områder stigende og vidner således om øget destabilisering af landskabet.



*Termokarstområde præget af hurtig optøning og et landskab der kolliderer.
(B. Elberling)*

BOKS 2: TERMOKARST





8. A: Et CALM felt hvor GeoBasis hvert år måler den maksimale dybde til permafrosten sidst på sommeren. Der stikkes med en jernpind ned til den hårde permafrost og afstanden fra overfladen måles i cm. B: viser udviklingen af den maksimale dybde til permafrosten de sidste 10 år for henholdsvis en våd og en tør del af feltet. Dybden til permafrosten er størst i de tørre dele af landskabet, og det er samtidig også her den største ændring over tid ses (omkring 9 cm på 10 år). (A: C. Sigsgaard)

varmning af kloden. Undersøgelserne i Zackenberg viser tydeligt at landskabet er under forandring. Der kan konstateres øget optøning, mindre sne i landskabet, længere vækstsæson, øget termokarst-aktivitet (boks 2) og de første tegn på at dominerende vegetationstyper er i tilbagegang, mens andre vinder frem. Hele økosystemet er under forandring. Det man ikke kender, er det sæt af feedback-mekanismer som måske får afgørende betydning for en evt. opbremsning eller accelerering af ændringerne.

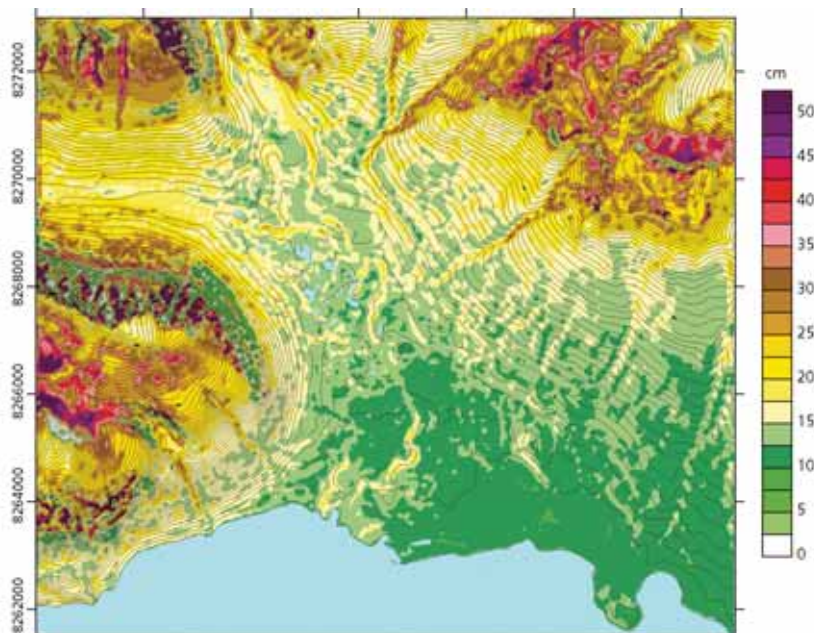
Man kan konstatere at det er de mest eksponerede områder med dryas som i dag varmer hurtigst op (permafrosten er forsvundet med ca. 9 cm de sidste 10 år, fig. 8). Men det er samtidig de områder hvor der er mindst kulstof begravet og hvor en omsætning sker med fuld tilgang af ilt og dermed ikke en nævneværdig metanproduktion. At den øverste del af permafrosten vil smelte yderligere er et sandsynligt scenarium. Med de gængse klimamodeller kan vi give et bud på hvor meget tykkere aktivlaget bliver de næste 100 år (fig. 9). Det ses at det netop er i Zackenbergdalens bund, hvor man finder kærrområderne, at de mindste stigninger i aktivlagets tykkelse kan forventes. Men alligevel forventer vi at det bliver den lidt langsommere opsmeltning af kærrområderne (omkring 8 cm de sidste 10 år) som bliver den afgørende faktor for landskabets netto-drivhusgasbudget.

Sker opsmeltningen i kærerne samtidig med at det bliver mere vådt, må man forvente en stigning i frigivelsen af metan til atmosfæren. Hvis det derimod bliver mere tørt, er det sandsynligt at en større andel af den metan som bliver produceret, vil blive iltet til



kuldioxid i de mere tørre og iltholdige jordlag ved overfladen. Dermed stiger måske nok den samlede mængde af kulstof som frigives til atmosfæren, men drivhuseffekten i atmosfæren kan blive mindre fordi andelen af metan falder. De foreløbige resultater fra Zackenberg tyder desuden på at vandstanden i kærømråderne er faldende.

9. *Modelforudsigtelse af optøning af permafrost målt som den maksimale tykkelse af aktivlaget sidst på sommeren i de næste 100 år under forudsætning af de forventede klimaændringer. Modellens opløsningsgrad er 50 m, og den topografiske model har en ækvidistance på 20 m. (H. Christiansen, © Academic Press)*



YDERLIGERE OPLYSNINGER

Christensen, T.R. m. fl., 2000: Trace gas exchange in a high arctic valley 1: Variations in CO₂ and CH₄ flux between tundra vegetation types. Global Biogeochemical Cycles 14: 701-714.

Elberling, B., 2003: Seasonal trends of soil CO₂ dynamics in a soil subject to freezing. Journal of Hydrology 276: 159-175.

Elberling, B. m. fl., 2005: Influence of vegetation and water content on soil carbon distribution and mineralization in four high Arctic soils. Arctic, Antarctic and Alpine Research 36(4): 509-519.

Ström, L. m.fl., 2003: Species-specific effects of vascular plants on carbon turnover and methane emissions from a tundra wetland. Global Change Biology, 9:1185-1192.

<http://www.zackenberg.dk>

