

Jordbund og klima på Grønland

Af Bo Elberling

Jordbunden er en vigtig del af et økosystem, som repræsenterer et lager af næringsstoffer og vand, der er helt afgørende for liv i og på jorden. Næringsstofferne frigives primært ved nedbrydning af jordens mineraler og organisk stof og er bestemt af en række faktorer bl.a. udgangsmaterialet, vegetationen og klimaet. Disse faktorer vekselvirker; fx bidrager en øget nedbør til en øget udvaskning af næringsstoffer fra jorden og ændrer dermed vækstbetingelser for fx planter og i sidste ende stofkredsløbene. Ved jordbundsundersøgelser beskrives jordens stofkredsløb i form af puljer og omsætning. Dette bruges i det følgende til at diskutere ændringer i jordmiljøet koblet til klimaet i dag og de sidste 10.000 år i Grønland.

Grønlands jorder

Når man langsomt nærmer sig den grønlandske østkyst fra luften over Danmark Strædet (figur 1) kan man undre sig over navnet Grønland. Området der adskiller havet og Indlandsisen domineres nemlig af stejle og nøgne fjelde samt gletschere. Flyet svinger rundt og ligger an til landing på en typisk landingsstribe af grus. Lige inden man lander ved Zackenberg (se artikel af Morten Rasch i dette nummer) opleves det arktiske landskab pludseligt mosaikagtig (figur 2); bestående af både lavtliggende og fugtige enge, store ensartede tundrafletter og helt vegetationsfrie afblæsningsflader. Denne rumlige variation afspejler landskabets form og alder, jordmiljøets udgangsmateriale, klimaet herunder eksponering af solen, sne og vand, og ikke mindst erosion og pålejring (fysisk omlejring). Dette samspil af faktorer betyder, at jord-klima-plant systemerne er snævert koblet til hinanden. I disse jorder akkumuleres kulstof fra planterne samtidig med der til stadighed sker en nedbrydning af både jordens pulje af organisk

stof samt en forvitring af jordens øvrige faste bestanddele. I det følgende omtales undersøgelser af jordmiljøet fra både Zackenberg i Østgrønland og Flakkerhuk i Vestgrønland, se kort (figur 3).

Figur 1. Mødet med den grønlandske østkyst set fra 3 km's højde.

Figur 2. Indflyvningen til Zackenberg på Grønlands Østkyst. Zackenbergdalen ses omgivet af bjerge. Centralt i billedet skimtes Zackenberg Stationen.

Figur 3. Grønland med angivelsen af Flakkerhuk på Disko og Zackenberg Stationen. Højt oppe på Zackenberg Fjeldet er planterne stort set fraværende og jordbundsudviklingen tilsvarende begrænset. Det samme gør sig gældende på afblæsningsfladerne (figur 4). Begge steder er puljen af kulstof og andre næringsstoffer i jorden lille betinget af et lille input af organisk stof. På den flade tundra dominerer dryas (også kaldet grønlands fjeldsimmer) på de tørre dele (figur 5 og 6) og kantlyng på de mere fugtige dele (figur 7). Kontrasten til disse jorder er lavninger i land-

skabet eller områder nedstrøms fra for permanente snefaner (figur 8). Disse områder er våde store dele af sommeren, og her er det bl.a. kæruld (figur 9) som dominerer. Kombinationen af et højt vandindhold og højtliggende permafrost betyder, at der ofte opstår iltfattige forhold i jordmiljøet. Organisk stof i denne iltfattige zone omsættes kun langsomt og ufuldstændigt. I alle dele fra landskabet frigives der kuldioxid (CO₂) fra jorden og i de våde områder desuden metan (CH₄). Både kuldioxid og metan er drivhusgasser, som dog har meget forskellig effekt (se tekstboks 1).

Figur 4. Udsigten fra en vegetationsfattig afblæsningsflade med Zackenberg Stationen i baggrunden og moskusokser i forgrunden.

Figur 5. Nærbillede af grønlandsk fjeldsimmer (Dryas integrifolia).

Figur 6. Jordbundsprofil under dryas midt på sommeren hvor permafrosten ligger i en dybde af mere end 50 cm.

Figur 7. Sammenhængende kantlyngheder som dominerer på den halvfugtige tundra.



1



2



3



4



5



6



7



8

Figur 8. Våde lavninger domineret af græsser og kæruld kan være næsten vandmættet det meste af året.

Figur 9. I juli/august pryder kærulden kærområderne.

Jordens pulje af organisk stof

Undersøgelser af jordmiljøet består ofte af dels en karakteristik af jordmiljøet med udgangspunkt i jordbundsanalyser og dels øjebliksmålinger af transporten af stof fra eller til jordmiljøet; fx frigivelsen af CO_2 fra jordoverfladen eller nedsivningen af vand. Resultaterne af jordbunds-karakteristikken skal ses som et nettoresultat af en jordbunds-dannelse i ofte flere 1000 år, hvor det kan være svært at skelne mellem nutidige processer, og processer

som har virket gennem tiderne. Men ved at foretage målinger af hvor meget kulstof der frigives til atmosfæren, kan nutidige omsætnings-processer i jorden beskrives i lyset af dels kulstof-puljerne i jorden og en fremtidig potentiale til at miste eller optage kulstof. I det følgende gives der et eksempel på dette.

Ved Zackenberg er der blevet udtaget prøver med konstant volumen fra karakteristiske lag ned til permafrostens overflade i de dominerende vegetationstyper. Resultatet af kulstofanalyserne (figur 10) vidner om stor variation i indholdet af kulstof betinget af et samspil mellem jordtype, landskabsform, vegetationstype samt dræningstilstand. Ved at sam-

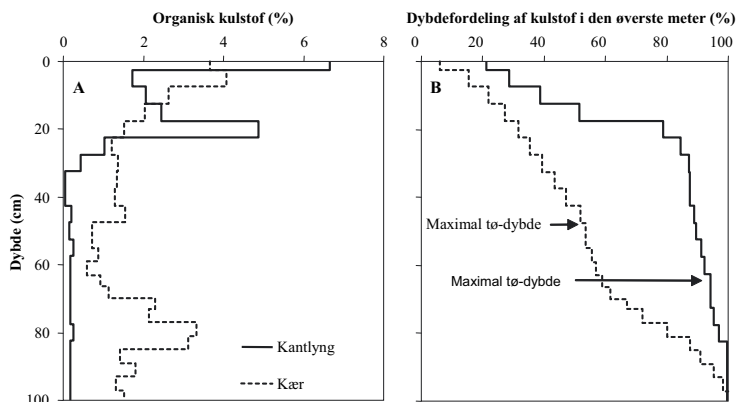


9

Tekstboks 1. Omsætning i jorden og frigivelsen af drivhusgasser.

Ved Zackenberg dominerer de fugtige og tørre jorder, og de bliver mere og mere dominerende jo længere nord i Grønland man kommer. I disse jorder er tilgængeligheden af ilt stor, optøningsdybden er betydelig (ofte mere end 50 cm sidst på sommeren). Hovedparten af kulstof som tilføres bliver derfor omsat under frigivelse af CO_2 . I modsætning hertil betinger et højt vandindhold i de våde jorder dels at atmosfærisk ilt kun langsomt trænger ned, og dels at det tager længere tid at varme jorden op. Det betyder alt i alt, at omsætningen sker langsommere, og at en væsentlig del af omsætningen foregår uden ilt (anaerobt). Derfor dannes der CH_4 , som frigives på samme måde som CO_2 til atmosfæren. I jorden kan CH_4 dog med hjælp af bakterier omdannes til CO_2 . Men når CH_4 først har forladt jordmiljøet, sker omdannelsen kun langsomt.

Som drivhusgas er CH_4 betydelig værre end CO_2 . Et stofs virkning som drivhusgas afhænger af dets egenskaber over for stråling med forskellige bølgelængder og dets levetid i atmosfæren. Sammenligner man den samme mængde kulstof bundet som CH_4 og som CO_2 i 100 år, er CH_4 mere end 21 gange værre end CO_2 . Man beregner et såkaldt "Globalt opvarmnings potentiale" (GWP), der udtrykker hvor effektivt udslippet af en vægtenhed af et givet stof er, sammenlignet med den samme mængde CO_2 . Det betyder, at selvom omsætningen i de våde jorder er mindre end de tørre så kan den miljømæssige effekt godt være større. I dag er det et åbent og vigtigt spørgsmål for den arktiske forskning hvad den fremtidige andel af CO_2 bliver i forhold til CH_4 .



Figur 10. Koncentrationen og fordelingen af organisk kulstof i jorden under kantlyng og kær.

menligne kantlyng med kæruld (figur 10) ses at hovedparten af kulstofpuljen under kantlyng ligger i overfladen (de øverste 30 cm), mens kulstofpuljen er mere jævnt fordelt under kær. Koncentrationer af kulstof på en given flade kan omregnes til en pulje af kulstof, når jordens massefylde og horisonternes tykkelse kendes. Omregnet til kg kulstof i de øverste 50 cm viser det sig, at de fugtige kærømråder og nærliggende områder med pil indeholder i gennemsnit omkring 15 kg C per m^2 , mens dryas- og kantlynghederne kun indeholder omkring 7 kg C per m^2 . Som gennemsnit findes der mere end 100 ton organisk kulstof i de øverste 50 cm per 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. Der er naturligvis også bundet kulstof i vegetationen, i rødderne og i nedfaldne blade mv. Men disse puljer udgør samlet mindre end 6 % af den samlede pulje i Zackenberg. Disse små puljer er omvendt desto mere vigtige i relation til økosystemets nuværende stabilitet fx som fødegrundlag for dyr og fugle.

I Zackenberg-området findes "begravede" jordbundstyper, så-

kaldte fossile jorde, som er gamle jordtyper, der er begravet under fx vind- eller vandaflejrede sedimentter (Cristiansen med flere 2002). 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 og stærkt udvasket og næringsfattig jordtype (en såkaldt podzol). På figur 11 ses et mørkebrunt/rødt lag, som er den gamle udfældningshorisont i podzolen. 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 tilstand ved overfladen, hvor der er dannet stærke organiske syrer under omsætningen af det organiske stof. Disse syrer har medvirket til forsurening (lavere pH-værdier) og en opløsning af jern og aluminium, som med nedrivningsvandet har kunnet bevæge sig ned og er blevet udfældet længere nede i jorden. En tilsvarende men aktuell jordbundsudvikling kendes i dag fra sydligere breddegrader, fx Sydgrønland. Der er meget, der tyder på, at der ved Zackenberg har været både en del varmere og mere fugtigt, end der er i dag. Det organiske indhold, som findes i de begravede horisonter, er blevet ^{14}C -dateret, og

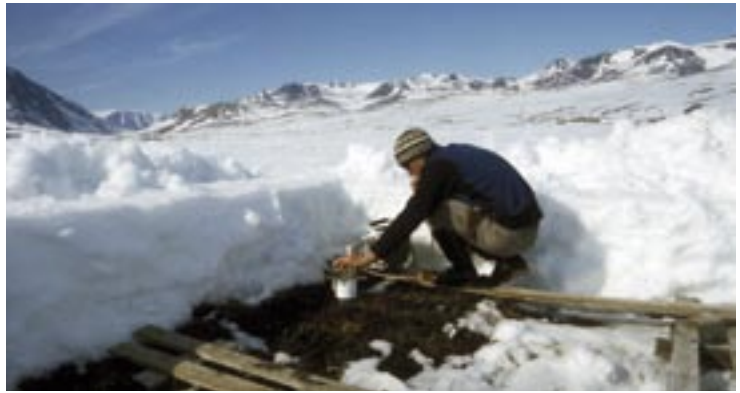


Figur 11. Jordbundsprofil under kantlyng. Her ses to forskellige jordtyper, øverst et gråt flyvesandslag som har begravet en podzoleret jord med et humus-beriget lag og underliggende et rødt jern-beriget lag.

det viser sig, at denne varmere og fugtigere periode i Zackenberg optrådte for mere end 4000 år siden. Dette stemmer overens med dels studier af indlandsisen ved Disko Bugten, som tyder på en maksimal tilbage-smeltning i samme periode samt med ilt-isotopundersøgelser fra iskerneboringer fra Indlandsisen. Det betyder omvendt, at den pulje af kulstof som findes på stor dybde ikke nødvendigvis afspejler en ligevægtstilstand mellem det nutidige klima og jordbundsmiljøet. Det betyder, at der er en væsentlig usikkerhed forbundet med at modellere jordmiljøets rolle i forbindelse med frigivelsen af drivhusgasser i fremtiden, idet klimamodeller forudsætter en ligevægt. Det høje kulstofindhold ses tydeligt af figur 10A, som høje koncentrationer i 20-25 cms dybde i kantlyngprofilen.

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



Figur 12. Feltmålinger af jordens frigivelse af CO_2 (målt som $\mu\text{mol C per m}^2 \text{ per sekund}$) i det tidlige forår, hvor der nogle år måles en uventet "bøvs" af CO_2 . Denne bøvs er formentlig CO_2 , som er produceret i løbet af den lange vinter, men som frigives når jorden begynder at tø.

akkumuleres (primært ved fotosyntese) og frigives (primært ved planterespitation og nedbrydning af organisk stof i jorden). Det giver ophav til to store tal for henholdsvis input og output til jordens pulje af kulstof, men som kun giver 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 foretaget ved Zackenberg tyder på, at input og output af kulstof over et årti stort set er i balance (Søgaard med flere 2004). Der hersker dog stor usikkerhed om, hvad der sker om vinteren, hvor meget tyder på, at respirationsprocesserne hidtil er blevet underestimeret. Tilsvarende medregnes sjældent tabet af kulstof fra jordmiljøet i form af opløste organiske og uorganiske forbindelser. Det helt store spørgsmål er hvordan balancen mellem input og output bliver i fremtiden. Der er ikke meget tvivl om at begge rater forøges ved en opvarmning, men nettoresultatet er, afgørende. Formentlig kommer mange andre forhold til at spille en lige så stor rolle som den direkte effekt af en temperaturstigning, fx

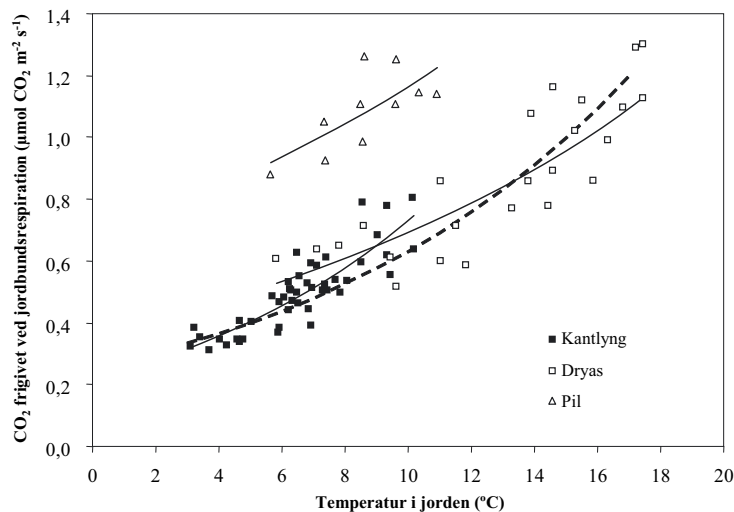
ændret sneforhold, skydække og nedbør. Den del af jorden som i dag er nedfrosset (permafrosten) er en anden jøker. I dag ved vi, at jordlag i permafrosten indeholder store mængder af kulstof, at denne pulje er meget uensartet fordelt i landskabet, og at den vil blive delvist omsat ved en optøning (Elberling med flere 2005). For bedre at kunne forudsige hvordan et arktisk økosystem som ved Zackenberg kunne påvirkes af fremtidige klimaforandringer, bliver flere jordbundsprocesser undersøgt med hensyn til deres følsomhed overfor miljøforhold, fx temperatur.

Figur 12 viser feltmålinger, hvor jordens frigivelse af CO_2 bestemmes ved at måle koncentrationsstigningen af CO_2 i en cylinder, som er presset ned i jorden. Under målingerne er cylinderen lukket, så atmosfærens indhold af CO_2 ikke påvirker målingerne. De målte koncentrationsstigninger omregnes til en flux med enheden $\mu\text{mol C per m}^2 \text{ per sekund}$, som repræsenterer hele jordprofillets CO_2 produktion. Langt hovedparten af produktionen sker i de overfladenære lag, hvilket for Zackenberg er bestemt ved at analysere variationer i CO_2 kon-

centrationer i jordprofilen (Elberling 2003). Resultatet af CO₂ produktionen foretaget i løbet af en sommer i Zackenberg ses på figur 13. Data er plottet som funktion af temperaturen målt i jorden i en dybde af 5 cm. Grafen viser, at temperaturen i jorden er afgørende for den tidlige variation i CO₂ produktionen i jorden, hvilket ikke er overraskende, idet det er bakterier og andre levende organismer, der betinger en omsætning og dermed en CO₂ produktion. Men figuren viser også, hvor følsom CO₂ produktionen er overfor variationer i temperaturen, hvilket betegnes Q10. Denne faktor beskriver hvor meget CO₂ produktionen stiger som følge af en temperaturstigning på 10 grader. I Zackenberg varierer Q10 mellem 2-4 alt afhængig af vegetationstypen. Figur 13 viser desuden, at der er forskel på de enkelte vegetationstyper. CO₂ produktionen i jorden under kantlyng og dryas ligger på tæt på den samme linje (angivet med en stiplet linje), mens CO₂ produktionen i jorden under pil er markant højere. Forskellen på kantlyng og dryas skyldes, at jorden under dryas indeholder mindre vand og om sommeren derfor er generelt varmere. CO₂ produktionen i jorden under pil ligger derimod forskudt i forhold til kantlyng og dryas. Temperaturen for pil minder mest om kantlyng, men alligevel er CO₂ produktionen markant højere, hvilket skyldes at plantedele fra pil er lettere omsættelig (indeholder mere kvælstof og nemmere at nedbryde) end det er tilfældet for kantlyng.

Jordbundsforuring – en aktual proces

Kun en del af af den CO₂ som produceres i jorden frigives til atmosfæren. En mindre del opløses i jordvandet og danner kulsyre. Denne kulsyre angriber jordens mineraler, som derved delvist går i opløsning (forvitrer). Denne så-

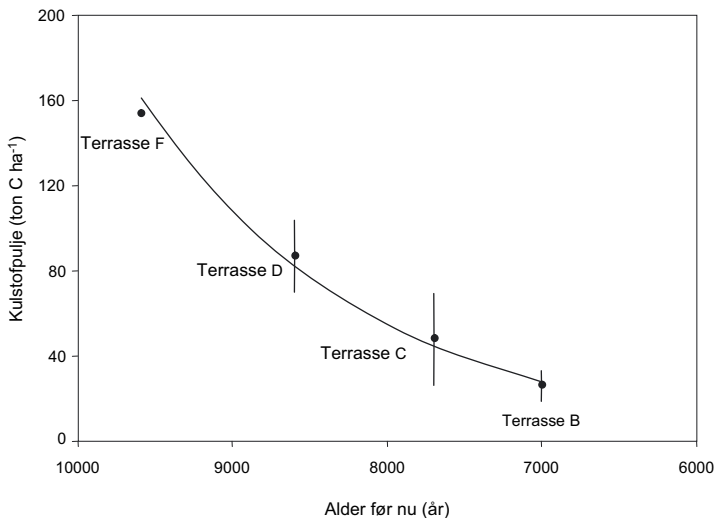


Figur 13. Sommermålinger af CO₂ frigivelsen som funktion af temperaturen fra 3 udbredte vegetationstyper ved Zackenberg.

kaldte kemiske forvitring i jorden er afgørende for frigivelsen af næringsstoffer til planterne, men betinger samtidig en gradvis forsuring af de øverste jordlag. Der findes ikke meget kalk i jorden omkring Zackenberg, som kan neutralisere denne naturlige forsuring, så det er den noget langsommere forvitring af jordens øvrige mineraler, bl.a. silikater, samt ombytning af ioner adsorberet på partikeloverflader, som er de vigtigste processer i jorden til at modvirke forsuring. Forvitringen og forsuringen er blevet undersøgt nærmere ved Zackenberg ved at indsamle jordvand ved hjælp af sugeceller – små cigar-formede celler, der via en slange til overfladen gør det muligt at suge vand ud af jorden og indsamle vandet i flasker på jordoverfladen (Elberling og Jakobsen 2000). Ved at analysere jordvandet og undersøge ændringer i vandets sammensætning er det blevet muligt at karakterisere de aktuelle processer i jorden. Denne overvågning fortsættes nu som en del af GeoBasis-programmet ved Zackenberg (se <http://www.zackenberg.dk>)

Variationer i kulstofpuljer ved Flakkerhuk

Flakkerhuk ligger som det østligste område på Disko (figur 3) og domineres af plantesamfund som på mange måde minder om Zackenberg. Området har desuden været påvirket af havspejlsvariationer siden den sidste istid. Resultatet ses i form af marine terrasser, hvis cirka alder kendes fra 14C-dateringer på organisk stof med marin herkomst på de enkelte terrasser. Jordbundsudviklingen på disse terrasser er forskellig og afspejler forskellige tidsperioder og giver derved et indblik i jordbundsudviklingen de sidste 10.000 år. I 2003 blev der gravet en række jordbundsprofiler i kantlyng på de forskellige terrasser for at belyse variationer i kulstofakkumuleringen. De ældste jorder, som findes højest i terrænet er ca. 9.600 år gamle. Ved at sammenligne kulstofpuljerne mellem de enkelte terrasser under kantlyng (figur 14) kan det beregnes, at der gennemsnitligt er akkumuleret 3,1 g C per m² per år fra år 7.000 - 7.700 før nu, 4,3 g C per m² per år fra år 7.700 - 8.600 før nu og 6,7 g C per m² per år i perioden år 8.600-9.600



Figur 14. Beregnede puljer af organisk kulstof på marine terrasser af forskellige aldre ved Flakkerhuk på Disko. Puljerne er beregnet på baggrund af målte kulstofkoncentrationer og densiteter på de enkelte jordlag på hver af terrasserne. De vertikale pinde angiver den rumlige variation i puljer på de enkelte terrasser bestemt på baggrund af flere jordprofiler på hver terrasse.

før nu. Altså en langsom akkumulering af kulstof, som desuden er aftaget med tiden. Det er velkendt, at når et landskab for første gang dækkes af planter efter at havet har trukket sig tilbage, så sker det i en succession, hvor nogle planter (pionerplanter) kommer først for siden at blive fulgt af andre. Det betyder, at ovenstående variationer i kulstofakkumulering ikke umiddelbart kan fortolkes som værende et resultat af tid og klima alene. Der har nemlig ikke nødvendigvis altid været kantlyng de steder, hvor kantlyngen dominerer i dag. Men tallene vidner om, at der kan have været klimaforhold i de sidste 10.000 år, som har betinget en hurtigere jordbundsudvikling og akkumulering af kulstof end i dag. Dette bekræftes af andre studier på Grønland, bl.a. de begravede jorder ved Zackenberg.

Sammenfatning

Jordmiljøet er en ganske uensartet størrelse med store variationer i både puljer og omsætning. Det betyder, at forsøg på at bestemme jordens rolle i relation til ophobning af fx kulstof og frigivelse af drivhusgasser fordrer en analyse af såvel landskabets dannelse samt viden om det snævre samspil mellem klima, jord og vegetation. Desuden er det forventeligt, at en given vekselvirkning mellem jord og klimaforandringer på landskabsskala vil være en nettoeffekt af en række landskabselementer, som responderer på forskellig vis på en given forandring – og at nettoeffekten netop derfor er vanskelig at forudsige. Helt centralt står en forsat udbygning af vidensgrundlaget omkring puljer og omsætning i Arktis; det gælder både en kortlægning af jordbundstyper samt landskabets alder og udvikling, og dels ved tværgående studier, som i højere grad inkluderer kobledede studier af både vegetation, jord og klimaforhold.

Tak til kolleger og studerende ved Geografisk Institut (Københavns Universitet) for bidrag til dataindsamling og til Statens naturvidenskabelig Forskningsråd (SNF) for økonomisk støtte.

Bo Elberling er Ph.D og lektor i naturgeograf ved Geografisk Institut, Københavns Universitet

Her kan du læse mere

Christiansen, H.H., Bennike, O., Böcher, J., Elberling, B., Humlum, O. & Jakobsen B.H. (2002) Holocene environmental reconstruction from deltaic deposits in northeast Greenland. *Journal of Quaternary Science* 17, 145-160.

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

Elberling, B. & Jakobsen, B.H. (2000) Jordbundsudvikling: før og nu. *Kasketot*, 24-27.

Elberling, B., Jakobsen B.H., Berg, P., Søndergaard, J. & Sigsgaard, C., (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.

Elberling, B. & Jakobsen, B.H. (2000) Soil solution pH measurements using in-line chambers with tension lysimeters. *Canadian Journal of Soil Science* 80(2), 283-288.

<http://www.zackenberg.dk>

Søgaard, H., Sørensen, L., Rysgaard, S., Grøndahl, L., Elberling, B., Friberg, T., Larsen, S.E. and Bendtsen, J. (2004) High Arctic Carbon Sink Identification – A Systems Approach. *Global Change NewsLetter* 59, 11-14.