

Kontinentalt støv i den grønlandske Indlandsis

Anders Svensson og Katrine Krogh Andersen, *Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik*

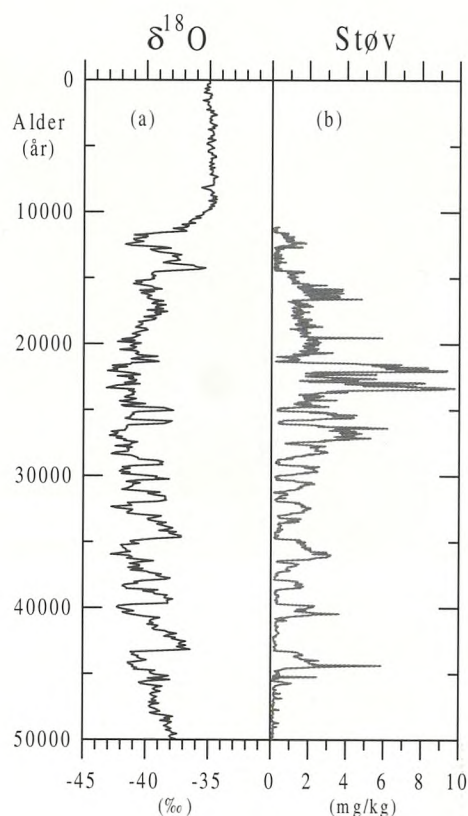
Indledning

Hvert år falder et nyt lag sne på den grønlandske Indlandsis. Med tiden sammenpresses sneen til is, og de mange kronologiske årlag som Indlandsisen er opbygget af rummer et væld af informationer om fortidens klima. I to andre indlæg i dette nummer af Kvant er beskrevet hvordan studier af isen selv, af kemiske urenheder i isen, og af atmosfærisk luft som er indkapslet i isen kan afsløre klimatiske begivenheder flere hundrede tusinde år tilbage i tiden. En anden interessant størrelse som kan studeres i iskerner udgøres af mineralogisk støv som er blevet transporteret i atmosfæren og som stammer fra ørkener og tørre områder på kontinenterne. I denne artikel vil vi diskutere hvordan dette støv er relateret til klimaændringer og til den atmosfæriske cirkulation på den nordlige halvkugle under den sidste istidscyklus.

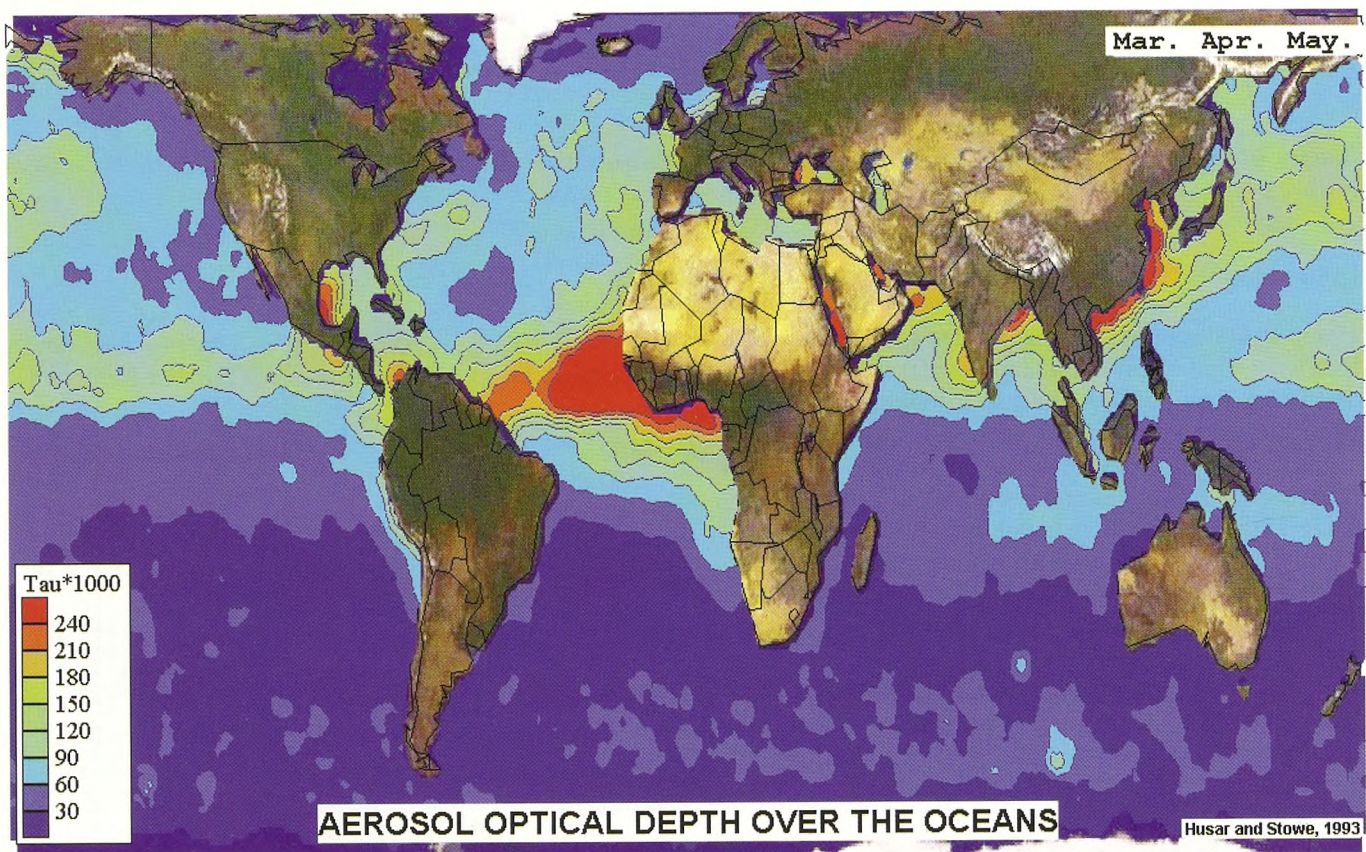
Klima- og støvsignalet i Indlandsisen

Figur 1a viser en del af klimasignalet fra den europæisk finansierede GRIP (GREENland Ice Core Project) iskerne som blev boret midt på den Grønlandske Indlandsis i årene 1989-92 [1]. Iskernen, som er lidt over 3 km lang, går hele vejen gennem iskappen ned til den underliggende klippegrund og indeholder is der er faldet som sne gennem de sidste 200.000 år eller mere. Ved GRIP borestedet falder der i dag sne svarende til ca. 23 cm is om året og i historisk tid er det muligt at følge klimaet år for år. Desto dybere man kommer ned i isen desto mere udtyndede bliver årlagene og desto lavere er den tidslige opløsning, men længerevarende klimaforandringer kan ses. Blandt andet ses overgangen fra den sidste istid til den nuværende mellemistid tydeligt at ske for omkring 11.000 år siden, og der ses at have været voldsomme klimavariationer under istiden.

Til trods for at Indlandsisen består af noget at det reneste vand i verden så er der alligevel masser af information gemt i urenheder i isen. Ud over vandmolekyler indeholder den sne som er deponeret i Grønland bl.a. lave koncentrationer af støv, dvs. uopløseligt mineralogisk materiale. Dette støv har flere forskellige kilder. Dels findes der små mængder af materiale af vulkansk oprindelse. Ved voldsomme vulkanudbrud kastes store mængder vulkansk materiale højt op i tropos- og stratosfæren, hvor det kan blive transporteret over lange afstande, og noget af det kan ende op i Grønland. Særligt vulkaner på den nordlige halvkugle og især islandske vulkaner sætter deres aftryk i den grønlandske



Figur 1. Klimasignal ($\delta^{18}O$) og støv koncentrationer i de øverste 2400 m af GRIP iskernen. (a) $\delta^{18}O$ profilen for den nuværende mellemistid, Holocæn, som har varet ca. 11.000 år, samt for den yngste del af den forrige istid, Wisconsin/Würm. $\delta^{18}O$ angiver den relative forekomst af den tunge iltisotop ^{18}O som udgør en indikator for temperaturen i Grønland dengang sneen faldt. Desto lavere $\delta^{18}O$ værdier desto koldere klima. Gennemsnitstemperaturen i Holocæn er omkring $-32^{\circ}C$, medens det under de koldeste perioder i istiden kan have været ned til $20^{\circ}C$ koldere. Som det ses har klimaet i Grønland været relativt stabilt i Holocæn, medens det kolde istidsklima var afbrudt af en række mildere klimatiske perioder. For omkring 22.000 år siden var der de laveste temperaturer under hele sidste istid, denne periode kaldes Last Glacial Maximum. (b) Koncentrationen af mineralogisk støv i iskernen (i enheden mg støv per kg is). Bidraget af vulkansk og kosmisk støv er for lille til at have nogen indflydelse. Det ses at støvkoncentrationen udviser voldsomme variationer som er relateret til klimaet. Generelt er der høje koncentrationer når klimaet er koldt og lavere koncentrationer under varmere og mildere klimatiske perioder. I Holocæn er koncentrationen ikke målt kontinuert, men niveauet vides at være lavt (< 0.1 mg/kg). Under Last Glacial Maximum når støvkoncentrationen værdier som er næsten 100 gange højere end i dag. Man må uvilkårligt spørge: Hvad forgår der her?



Figur 2. Den optiske dybde, som er et mål for støvmængden i en luftstøje, over verdenshavene i forårsmånederne midlet over to år [2]. Billedet er 'optaget' fra satellit ved at måle refleksion over havene. Over landområder kan denne teknik ikke benyttes. Da også andre aerosoler end støv kan influere den optiske dybde ved den benyttede bølgelængde kan en mindre del af de farvede områder være forårsaget af disse. Man bemærker den kraftige støvfane fra Sahara over Atlanten og støvet fra de asiatiske kilder ud for Kinas kyst.

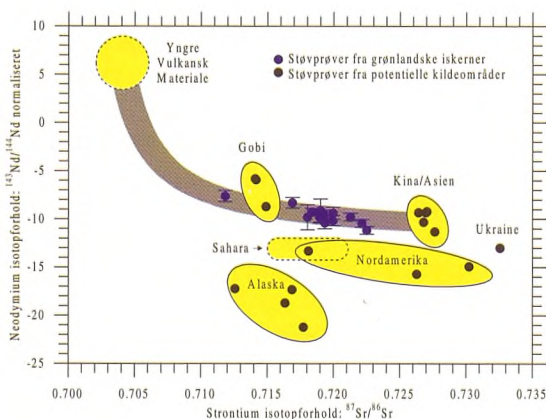
Indlandsis. Det samlede vulkanske bidrag er dog ganske lille og er koncentreret i årlag deponeret under og få år efter vulkanudbrud. I isen findes også små mængder af materiale fra det ydre rum, hovedsageligt i form af mikrometeoritter. Indlandsisen indeholder så få andre urenheder at det kosmiske materiale kan identificeres, men samlet udgør det mindre end 1 % af støvmængden i isen. Langt størstedelen af isstøvet er såkaldt kontinentalt støv som har sin oprindelse i ørkener og tørre områder på den nordlige halvkugle. Ved kraftige stormvejr kan store mængder af støv løftes fra disse landområder. Hæves støvet tilstrækkeligt højt op i atmosfæren, til ca. 3-8 km højde, kan det fine støv blive transporteret tusindvis af kilometer med de fremherskende vinde og noget af det vil deponeres i Grønland.

Det kom som en overraskelse for forskerne som studerede de Grønlandske iskerner i halvfjerds- og firserne at klimasignalet i isen viser så store variationer under den sidste istid (Figur 1a). Man bliver ikke mindre overrasket når man ser profilen for støvkonzentrationer som er vist i Figur 1b. Den varierer med næsten to størrelsesordener igennem den sidste istid. I den nuværende mellemistid, Holocæn,

hvor klimaet har været relativt varmt og stabilt, har støvkonzentrationen været konstant lav. Derimod udviser den voldsomme variationer i løbet af istiden, og disse variationer er relateret til klimaet. Generelt er støvkonzentrationen høj når der er meget koldt og lavere når klimaet er mildere. Under Last Glacial Maximum, for ca. 22.000 år siden, er støvkonzentrationen i isen helt ekstrem høj.

Noget af variationen i støvkonzentrationen kan forklares med varierende nedbørsmængde under istiden. Generelt, jo koldere klimaet er, desto mindre vanddamp er der i atmosfæren og jo mindre nedbør falder der. Hvis det antages at den samme mængde støv blev transporteret ind over Grønland under istiden som i dag, så kunne en lavere nedbør under istiden betyde en 2-4 gange højere støvkonzentration i isen. Den lavere nedbør under istiden kan dog ikke alene forklare de store variationer i støvkonzentration som ses i iskernen. Disse må simpelthen skyldes at der har været meget mere støv i atmosfæren dengang sneen faldt, mindst 10 gange mere end i dag.

Der er flere mulige forklaringer på hvorfor der var meget mere støv i atmosfæren under istiden. For det første har det generelt koldere istidsklima betydet en ge-

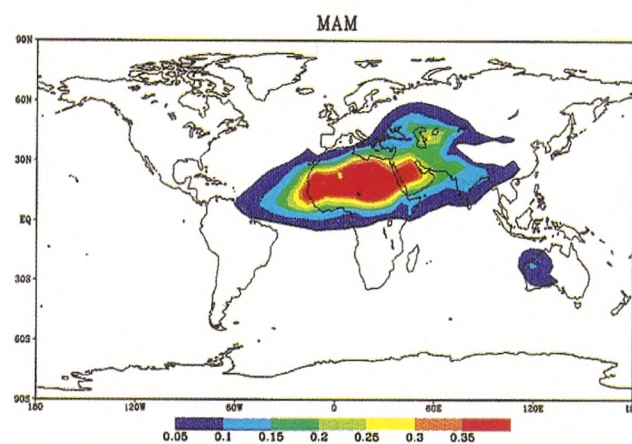


Figur 3. Sr og Nd isotopforhold anvendt til kildebestemmelse af kontinentalt støv i Indlandsisen. Som diskuteret i teksten giver isotopsammensætningen af Sr og Nd i støv en slags fingeraftryk af støvets geografiske oprindelse. I figuren sammenholdes Sr og Nd isotopforhold for støvprøver fra grønlandske iskerner med støvprøver fra potentielle kildeområder. Iskernepøverne er taget fra forskellige klimatiske perioder gennem de sidste 44.000 år, og de kontinentale prøver er opsamlet fra ørkener og tørre områder på kontinenterne på den nordlige halvkugle. De gule områder er indtegnet for at markere områder af nær geografisk beliggenhed. Området med 'Yngre vulkansk materiale' giver den typiske sammensætning af vulkansk materiale, og den grå parabel er en blandings kurve, som angiver isotopsammensætningen af støv som er sammensat af vulkansk og kontinentalt støv fra Asien/Kina. Sammenholdt med andre målinger på støvet er fortolkningen af figuren at iskernestøvet har sin oprindelse i Asien/Kina. Selvom f.eks. støv fra Sahara har en isotopisk sammensætning som ikke er væsentlig forskellig fra iskernestøvet, så viser målinger af støvets mineralogiske sammensætning at Sahara ikke kan være kildeområdet.

nerel lavere luftfugtighed som kan have medført mindre nedbør over kontinenterne. Derfor kan flere og/eller større ørkenområder på kontinenterne have fungeret som støvkilder. Desuden har den lavere luftfugtighed medført mindre udvaskning af støvet under transporten i atmosfæren. Dernæst var klimaet under istiden meget koldere ved polerne medens det sandsynligvis var relativt mindre koldt omkring ækvator. Af den grund var der en kraftig nord-syd temperaturgradient i atmosfæren, som var særlig udtalt ved fronterne af de store kontinentale iskapper. Dette har betydet at der var voldsomme vinde, som kan have bevirket en mere effektiv transport af støv i atmosfæren. Endelig gjorde de store mængder af is, som var indeholdt i de kontinentale iskapper under istiden, at havniveauet under den koldeste periode af istiden var mere end 100 m lavere end i dag. Derfor var store arealer på de kontinentale sokler og nuværende lavtvandsområder blotlagt. Hvis disse områder var tørre kan de evt. have fungeret som støvkilder.

Det kontinentale støvs oprindelse

Det kontinentale støv i Grønland har flere potentielle kildeområder. Støvet's kornstørrelse på omkring 0,1-10 μm er typisk for støv som er blevet transporteret over afstande på flere tusinde kilometer i atmosfæren, hvorimod støv af mere lokal oprindelse typisk vil indeholde flere større partikler. Derfor antages bidraget fra mindre lokale grønlandske kilder at være forsvindende. I dag er Sahara i Nordafrika samt ørkenområderne i Mellemøsten verdens mest aktive støvkildeområder, og det er samtidigt de ørkener vi ved mest om. Støv fra Sahara bringes undertiden med støvstorme til Europa, hvor det kan ses som et fint støvlag på overflader og farver sneen i Alperne og Pyrenæerne rød. Ved særligt kraftige storme kan det fine støv også blæse hele vejen over Atlanterhavet til Caribien. Derudover findes der også kæmpe ørkenområder i Øst- og Centralasien, f.eks. Gobi ørkenen i Mongoliet og Kina, og store dele af Nordamerika, særligt i det centrale og vestlige USA, har også potentielle kilder. De nutidige kilders betydning kan vurderes ud fra satellitbilleder som vist i Figur 2. Over den sidste istidscyklus kan de potentielle kildeområder naturligvis have ændret sig.



Figur 4. Den optiske dybde af støvet i atmosfæren er beregnet ud fra resultaterne af en GCM simulering. Denne figur viser den optiske dybde af støvet i forårsperioden midlet over en simulering som dækker 5 år. Transporten af støv fra Nordafrika over Atlanterhavet ses ved sammenligning med figur 2 at være vel reproduceret. Støvtransporten fra de asiatiske kilder er derimod mindre end forventet ud fra satellitoptagelserne.

For eksperimentelt at bestemme oprindelsesstedet for støvet i Indlandsisen sammenlignes støvprøver fra grønlandske iskerner med prøver fra de potentielle kildeområder. Dels bestemmes støvets mineralogiske sammensætning. Det viser sig at både iskernestøvet og støvet fra de fleste kildeområder hovedsageligt består af de samme mineraler, nemlig kvarts, feldspat, kalk, chlorit, illit, kaolinit og smectit. Dog udviser den relative forekomst af nogle af mineralerne en variation med kildeområderne som til en hvis grad kan bruges til at

adskille disse. F.eks. har støv fra Sahara langt højere indhold af kaolinit og smectit end støvet i Indlandsisen. Dernæst bestemmes støvets isotopsammensætning af elementerne Sr (strontium) og Nd (neodymium). På grund af de naturlige radioaktive henfald $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$ og $^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$, hvor halveringstiderne er millioner af år, varierer isotopsammensætningen af Sr og Nd i kildeområderne med kontinenternes alder og grundstofmæssige sammensætning. Også det klima og de forvittringsprocesser som kildeområderne har gennemlevet påvirker isotopsammensætningen. I Figur 3 er vist hvordan Sr og Nd isotopforhold udnyttes til kildebestemmelse af det grønlandske støv. Endelig udgør koncentrationerne af sjældne jordarter i støvet et fingeraftryk af støvets oprindelse.

Tilsammen viser analyserne af is- og kildestøvprøver at langt størsteparten af det støv som blev deponeret i Grønland under istiden stammer fra det centrale og østlige Asien [3]. Det var lidt af en overraskelse at der tilsyneladende ikke er noget støv af afrikansk oprindelse, på trods af at Sahara i dag er den kraftigste støvkilde, og ligeledes at der ikke var noget nævneværdigt bidrag fra det nordamerikanske kontinent, som ligger langt tættere på Grønland. Indtil videre er kun iskernestøv fra istiden blevet analyseret med tilstrækkelig stor nøjagtighed til at kilden kan bestemmes. De lave koncentrationer af støv i isen gennem den nuværende mellemistid gør det vanskeligt at samle materiale nok til at gennemføre målingerne.

En anden vigtig konklusion er at støvet fra forskellige klimatiske perioder under istiden, de kolde og de mindre kolde begivenheder (se figur 1b), har næsten samme mineralogiske og isotopiske sammensætning. Det betyder at selvom både klimaet og mængden af støv i atmosfæren (over Grønland) udviste store variationer under istiden, så var støvkilden næsten uændret gennem mere end 30.000 år. Heller ikke de kraftige støvtoppe under Last Glacial Maximum har en sammensætning som er forskellig fra det øvrige glacielle støv. Hovedårsagen til de kraftige variationer i støv er altså ikke at nye kildeområder er opstået under istiden.

Modellering af atmosfærisk støvtransport

Simuleringer af støvtransporten i atmosfæren er interessante af flere forskellige årsager. For det første er parametriseringen af støvtransporten forholdsvis "simpel". Støvet betragtes som uopløselige partikler, der ikke deltager i kemiske reaktioner, og som udfældes fra atmosfæren enten ved hjælp af tyngdekraften eller som del af nedbøren. Dermed kan simuleringer af støvtransporten fungere som test af en parametrisering der kan udvides til at dække f.eks. kemisk aktive partikler. Da støvtransporten i atmosfæren er en funktion af mange forskellige faktorer, såsom vindstyrken over ørkenområderne, nedbørsfordelinger og vindsystemer, er den aflejlrede støvkoncentration i af-sidesliggende iskapper en meget følsom, omend kom-

pliceret klimaindikator. Simuleringer af transporten kan forhåbentlig være med til at give en øget forståelse af indflydelsen af de forskellige faktorer. En succesfuld simulering af støvpartiklerne i atmosfæren er desuden interessant med henblik på at vurdere støvpartiklernes indflydelse på jordens strålingsbalance. Det har i de senere år vist sig, at høje støvkoncentrationer lokalt kan have en væsentlig indflydelse på strålingsbalancen.

I sammenhæng med iskerner arbejder man hovedsageligt med to typer af modeller for den atmosfæriske støvtransport. Disse er: 1) Generelle cirkulationsmodeller (GCM'er) som blandt andet simulerer atmosfærens bevægelser og nedbørsprocesser tredimensionelt og med global udstrækning. Nogle få GCM'er er i de senere år blevet udvidet til også at simulere opløftningen, transporten og udfældningen af støvpartikler. Desværre kræver disse modeller meget stor regnekraft og de integreres derfor som regel kun over nogle få år. 2) Simplere modeller. Der er udviklet forskellige modeller af lavere dimension, som fokuserer på forskellige karakteristika ved støvproduktionen, transporten og/eller depositionen. De lavere dimensionale modeller kræver selvagt mindre regnekraft, og kan derfor i højere grad benyttes til længere integrationer samt mere omfattende følsomhedsstudier.

Resultaterne af de generelle cirkulationsmodeller for støvtransporten i nyere tid er globalt set tilfredsstillende [4], hvilket også kan ses ved sammenligning af figur 2 med figur 4. Resultaterne for specielle områder, som ligger fjernt fra store kildeområder, såsom den grønlandske Indlandsis kan vurderes ved sammenligning med iskerneundersøgelser. Som vi har set kan iskernerne give informationer om støvkoncentrationer, om årstidsvariationer, samt om kildeområder for støvet. Generelt må man sige, at støvkoncentrationen i årsmiddel og til dels årstidsvariationen kan simuleres nogenlunde rimeligt i en GCM, men foreløbige isotopiske og mineralogiske undersøgelser af nutidigt støv tyder på at modellerne overvurderer indflydelsen af støvet fra de nordafrikanske ørkener i forhold til de asiatiske ørkener.

Når man undersøger tidligere tiders klima kan man ved hjælp af GCM'er forsøge at simulere atmosfærens tilstand under givne randbetingelser. Disse randbetingelser vil som regel være solindstrålingen, CO_2 -koncentrationen i atmosfæren, udbredelsen af iskapper og havis, og til tider havtemperaturer. Resultater af en sådan simulering skal derefter verificeres ved sammenligning med kendte klimaindikatorer. Typiske øjebliksbilleder, som simuleres med GCM'er er nutidens klima, samt klimaet under det klimatiske optimum, for ca. 6.000 år siden, og Last Glacial Maximum for ca. 22.000 år siden. Disse tidsrum vælges, da de er forholdsvis nemme at identificere i de forskellige tidsserier, og man derfor har kunnet opstille de nødvendige randbetingelser for simuleringerne med en relativt stor sikkerhed og rumlig dækning. I store træk giver de fleste GCM'er i dag det samme billede af at-

mosfæren under Last Glacial Maximum.

Ud fra modellerne er det endnu ikke klart, om de meget høje støvkonzentrationer i isen under Last Glacial Maximum skyldes udvidede ørkenområder, nye ørkenområder, ændrede vindsystemer, eller lavere nedbør. Det er dog højst sandsynligt en blanding af disse faktorer. For den grønlandske Indlandsis er det ikke helt simpelt at vurdere indflydelsen af disse faktorer. Dels er atmosfærecirkulationen omkring Grønland relativt kompliceret på grund af fordelingen af hav, land, bjerge og iskapper, og dels ligger der mange mulige støvkilder på den nordlige halvkugle. Da Grønland ligger fjernt fra de store ørkenområder kan man forestille sig, at mængden af støv, som bliver transporteret fra de store ørkenområder sagtens kan være af samme størrelsesorden som mængden af støv transporteret fra mindre kildeområder tættere på Indlandsisen. Mineralogiske og isotopiske undersøgelser af iskernestøvet giver dermed meget vigtige informationer om støvkilderne.

Indtil videre har det ikke været muligt at reproducere de meget høje støvkonzentrationer under Last Glacial Maximum i GCM simuleringer. Et noget øget støvniveau simuleres dog med støv fra områder omkring polarhavet, som blotlægges under istidens lave havniveau. Simuleringer med en én-dimensionel model for støvtransporten fra lave til høje breddegrader har vist, at de kraftigere vindsystemer og den generelt lave luftfugtighed under istiden i sig selv burde påvirke en væsentlig øgning i støvkonzentration. Dette fremgår ikke nær så tydeligt af GCM simuleringer, idet de simulerede klimaændringer i GCM'en ikke er så kraftige, som i den én-dimensionale model.

Generelt kan man sige, at selvom GCM'er kan give et rimeligt billede af atmosfæren under nuværende og ændrede klimasituationer er støvtransporten til et fjerntliggende område som Grønland en så følsom funktion af mange klimatiske faktorer, at den endnu ikke simuleres på tilfredsstillende vis. Derudover kan man nok ikke forvente, at modeller nødvendigvis vil kunne reproducere de ekstremt høje støvværdier, som man finder for Last Glacial Maximum for støvkurven i figur 1.

Konklusion

Mængden af støv aflejret i den grønlandske Indlandsis er en meget følsom klimaindikator. Man kan prøve at forstå mekanismerne bag denne indikator ved at sammenholde resultaterne af forskellige målinger med forsøg på simuleringer af støvtransporten. Ved hjælp af mineralogiske og isotopiske analyser af iskernestøv er det lykkedes at påvise at istidsstøvet hovedsageligt stammer fra Asien, samt at kilderne ser ud til at være stort set uændrede gennem den sidste del af istiden. Desværre er målingerne problematiske at gennemføre for de lave støvkonzentrationer under Holocæn. Modeller af støvtransporten kan udvide forståelsen af mekanismerne bag støvprofilen, men

GCM simuleringerne kan desværre kun levere øjebliksbilleder af få, nøje definerede perioder. Selvom vores forståelse af den atmosfæriske støvtransport er blevet væsentligt bedre i de senere år er der endnu væsentlige uoverensstemmelser mellem målinger og modeller og mange åbne spørgsmål.

Referencer:

- [1] GRIP medlemmer (1993) Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core, *Nature*, bind 364, side 203-207.
- [2] R.B. Husar, J. M. Prospero og L. L. Stowe (1997) Characterization of tropospheric aerosols over the oceans with the NOAA advanced very high resolution radiometer optical thickness operational product, *Journal of Geophysical Research*, bind 102, nr. D14, side 16889-16909.
- [3] P. E. Biscaye, F. E. Grousset, M. Revel, S. Gaast, Van der, G. A. Zielinski, A. Vaars og G. Kukla (1997) Asian provenance of glacial dust (stage 2) in the Greenland Ice Sheet Project 2 Ice Core, Summit, Greenland, *Journal of Geophysical Research*, bind 102, nr. C12, side 26765-26781.
- [4] K. K. Andersen, A. Armengaud og C. Genhron 1998. Atmospheric dust under glacial and interglacial conditions. *Geophysical Research Letters*, bind 25, nr. 13, side 2281-2284.



Anders Svensson (her fotograferet på Indlandsisen) er Ph.d. fra Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik og deltager i den nye NorthGRIP dybdeboring i Grønland.



Katrine Krogh Andersen er Ph.d. fra Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik og Post Doc. ved Geofysisk Afdeling, Københavns Universitet (p.t. på barselsorlov).