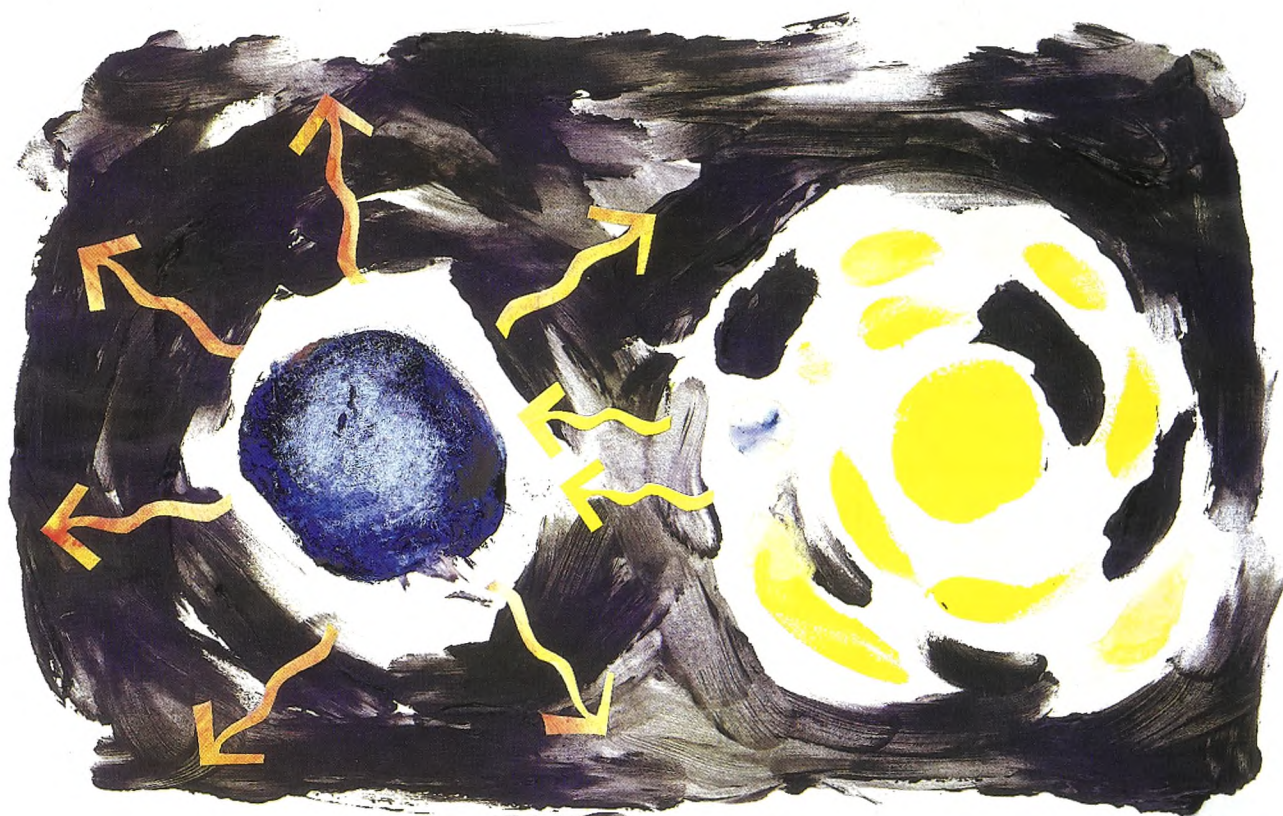


KVANT November 3 1998

Fysisk Tidsskrift

9. årgang



- STØV I INDLANDSISEN • KLIMAETS FYSIK • HAVETS CIRKULATION •
- BEGRÆNSET FORUDSIGELIGHED • ISKERNER FORTÆLLER KLIMAHISTORIE •
- HANS TAUSEN ISKERNE BOREPROJEKTET •

LØSSALGSPRIS: 35 KR

KVANT

Fysisk Tidsskrift

c/o Ørsted Laboratoriet
Niels Bohr Institutet
Universitetsparken 5
DK-2100 København Ø

Telefax : 35 32 05 76
E-mail : kvant@nbi.dk
Giro : 5 84 31 46

Udgives af

Dansk
Fysisk
Selskab

Selskabet for
Naturlærens
Udbredelse



Redaktion

Jens Olaf Pepke Pedersen (ansv.)
DCESS, NBIfAFG
Jørgen Friis Bak
Naturvidenskabeligt fakultet, ÅU
Jørn Christiansen
Britt Larsen
Forskningscenter Risø
Torsten Freltoft
NKT Research Centre
Mogens Esrom Larsen
Matematisk Institut, KU
Finn Berg Rasmussen
Ørsted Laboratoriet, KU
Ove Østergaard
Silkeborg Amtsgymnasium

Kvant udkommer 4 gange årligt og er medlemsblad for de udgivende selskaber.
Abonnementspris: 135 kr/år.

Annoncepriser

1/1 side	3000 kr
1/2 side	1600 kr
1/4 side	1000 kr
Farvetillæg	1800 kr

Priserne er excl. moms og gælder for reproklart materiale. Henvendelser om annoncer til Redaktøren, telefon 35 32 05 73, telefax 35 32 05 76.

Oplag: 2000

Tryk: P. J. Schmidt, Vojens
ISSN 0905-8893

Indhold:

Kontinentalt støv i den grønlandske Indlandsis <i>Anders Svensson og Katrine Krogh Andersen</i>	3
Støvet i Indlandsisen er en følsom klimaindikator, og meget af støvet kommer fra Asien!	
Klimaets fysik <i>Peter Ditlevsen</i>	9
Hvad er det for mekanismer, der styrer vores klima?	
Havets cirkulation og betydning for klimaet <i>Jørgen Bendtsen</i>	13
Oceanerne har stor betydning for Jordens klima - og havene husker klimaet i flere hundrede år!	
Nyt fra DFS <i>Medlemstilbud fra DFS</i>	17
50-året for Niels Bohrs artikel om "Penetration of Atomic Particles through Matter".	
Nyt fra SNU <i>Medlemstilbud fra SNU</i>	18
Opdagelser og teorier i elektromagnetismens historie.	
Vinterskole i fysik <i>Tilbud til ph.d. studerende</i>	19
Her kan du samle point til din ph.d.	
Kattegats vandkvalitet <i>Rettelsesblad til forrige nummer af Kvant</i>	20
Forsvundne matematiske tegn.	
Begrænset forudsigelighed <i>Aksel Wiin Nielsen</i>	21
Læs om et eksempel på begrænset forudsigelighed.	
Iskerner fortæller klimahistore <i>Claus Uffe Hammer</i>	26
Iskerneboringer fortæller om fortidens klima.	
Hans Tausen iskerne boreprojektet <i>Mia Stampe</i>	31
En beretning om et boreprojekt på Verdens nordligste iskappe.	

Forsiden:

Dette nummer af Kvant er et temanummer om Jordens Klima. Kvant's forside er tegnet af Peter Ditlevsen og viser, hvordan Jorden modtager al sin energi fra solens kortbølgede stråling. Jorden er i termisk balance så den afgiver den samme varme i form af langbølget stråling ud til verdensrummet. Læs artiklen side 9!

Kontinentalt støv i den grønlandske Indlandsis

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

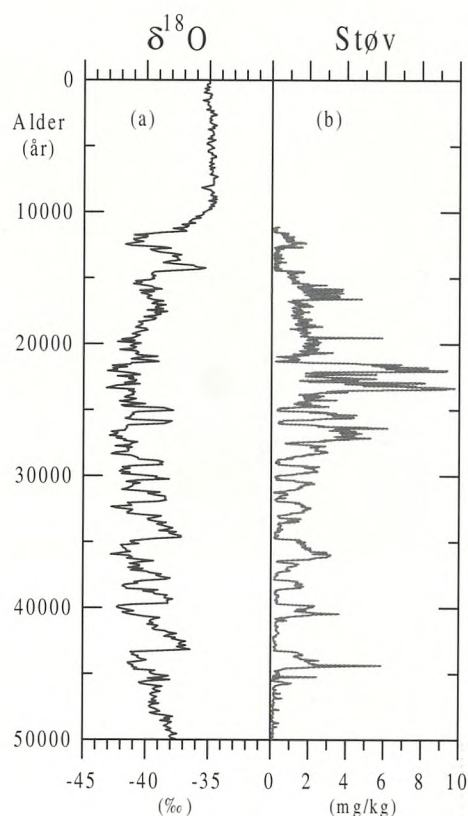
Indledning

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.

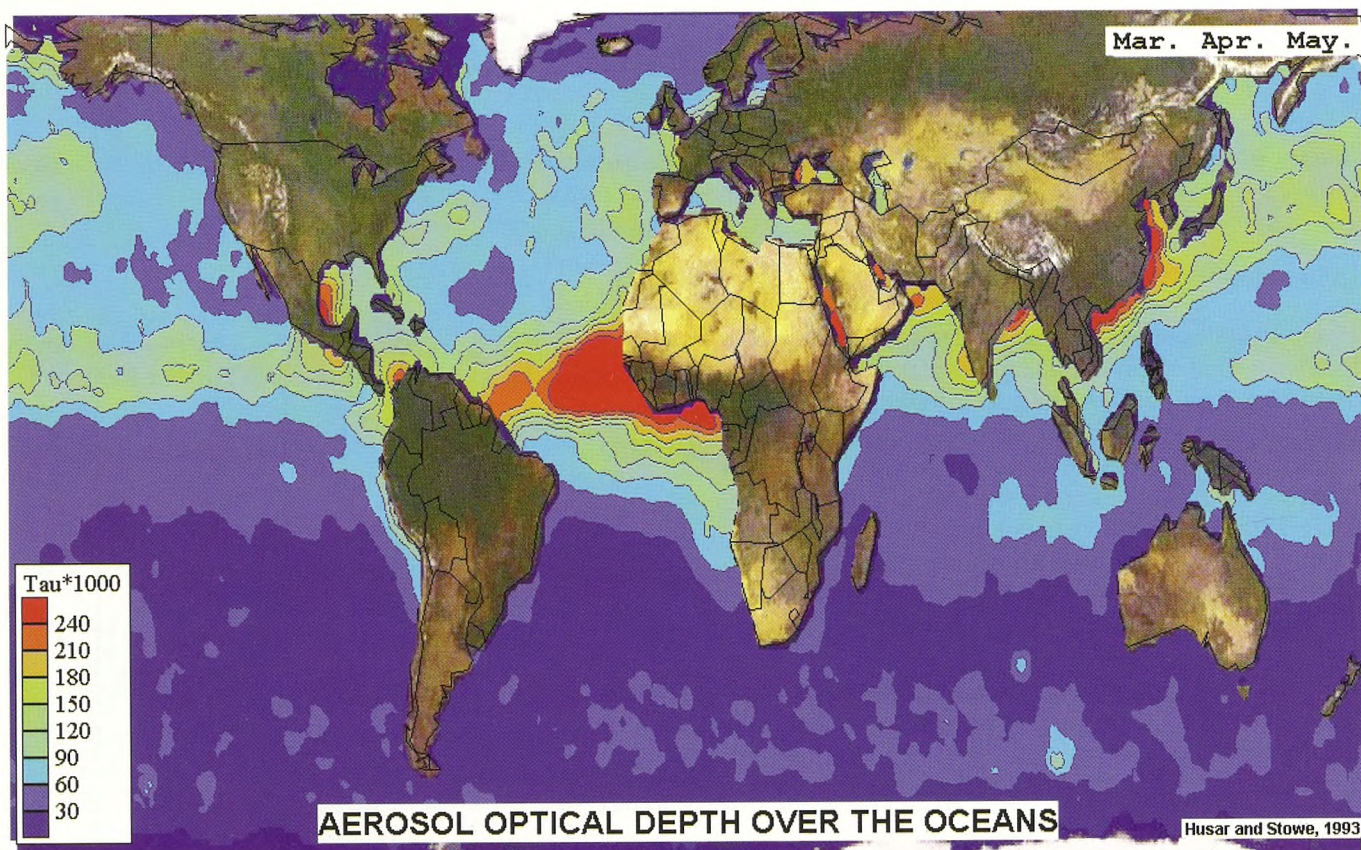
Klima- og støvsignalet i Indlandsisen

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 ($\delta^{18}\text{O}$) og støv koncentrationer i de øverste 2400 m af GRIP iskernen. (a) $\delta^{18}\text{O}$ profilen for den nuværende mellemistid, Holocæn, som har varet ca. 11.000 år, samt for den yngste del af den forrige istid, Wisconsin/Würm. $\delta^{18}\text{O}$ angiver den relative forekomst af den tunge iltisotop ^{18}O som udgør en indikator for temperaturen i Grønland dengang sneen faldt. Desto lavere $\delta^{18}\text{O}$ værdier desto koldere klima. Gennemsnitstemperaturen i Holocæn er omkring -32°C , medens det under de koldeste perioder i istiden kan have været ned til 20°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 støvkonzentrationen 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 støvkonzentrationen 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.

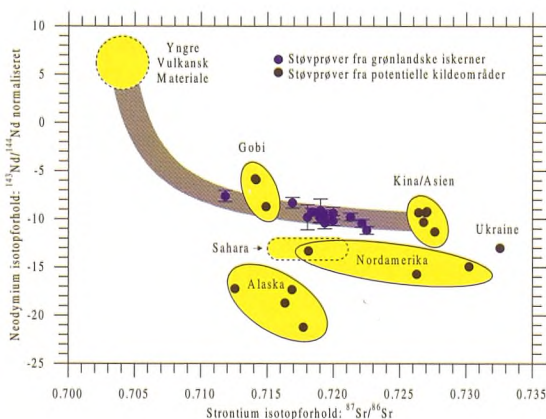
Indlandsis. Det samlede vulkanske bidrag er dog ganske lille og er koncentreret i årlag deponeret under og få år efter vulkanudbrud. I isen findes også små mængder af materiale fra det ydre rum, hovedsageligt i form af mikrometeoritter. Indlandsisen indeholder så få andre urenheder at det kosmiske materiale kan identificeres, men samlet udgør det mindre end 1 % af støvmængden i isen. Langt størstedelen af istøvet 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 støvkoncentrationer 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 støvkoncentrationen været konstant lav. Derimod udviser den voldsomme variationer i løbet af istiden, og disse variationer er relateret til klimaet. Generelt er støvkoncentrationen høj når der er meget koldt og lavere når klimaet er mildere. Under Last Glacial Maximum, for ca. 22.000 år siden, er støvkoncentrationen i isen helt ekstrem høj.

Noget af variationen i støvkoncentrationen 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 støvkoncentration i isen. Den lavere nedbør under istiden kan dog ikke alene forklare de store variationer i støvkoncentration 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-

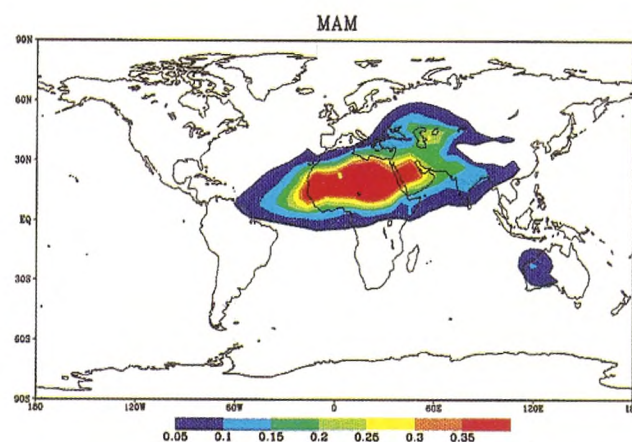


Figur 3. Sr og Nd isotopforhold anvendt til kildebestemmelse af kontinentalt støv i Indlandsisen. Som diskuteret i teksten giver isotopsammensætningen af Sr og Nd i støv en slags fingeraftryk af støvets geografiske oprindelse. I figuren sammenholdes Sr og Nd isotopforhold for støvprøver fra grønlandske 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).

Melles Griot makes OPTICS, OPTO-MECHANICS, LASERS, INSTRUMENTS, and FIBER OPTICS



Contact Melles Griot for a fast response to your photonics needs. Our vast product selection described in our detailed product literature will provide solutions for a successful product or experiment.

Whether you need a single lens, or thousands of laser assemblies, Melles Griot is ready to deliver. From a single prototype to full-scale production, we can ship to your schedule. Melles Griot has earned a 25 plus year reputation as a quality manufacturer of optics, opto-mechanics, lasers, instruments, and fiber optics.

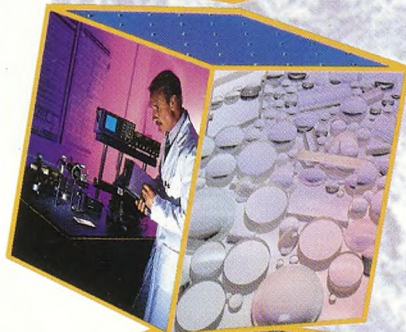
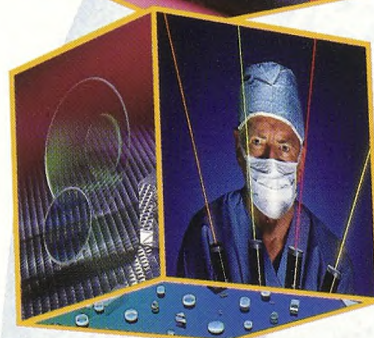
We have facilities in North America, Europe, and the Asia Pacific staffed with applications engineers ready to fulfill your requirements. You can reach us by phone, FAX, or the INTERNET.

From simple lenses to advanced fiber optics — Melles Griot is your *first choice* in photonics!

**Call, FAX, or E-mail us today
for your photonics solutions!**

Melles Griot Danmark

Stenagervej 13 • DK-4100 Ringsted
Phone: 53 61 50 49 • Fax: 53 61 60 49
E-mail: 101456.567@compuserve.com



■ OPTICS

- Beam Expanders
- Beamsplitters
- Coatings
- Custom OEM Optics
- Custom Optical Assemblies
- Cylindrical Optics
- Diode Laser Optics
- Filters
- Invaritar Lenses
- Lenses
- Micro Optics
- Mirrors
- Optical Design Software
- Polarizers
- Prisms
- Shutters & Irises
- YAG Lenses

■ OPTO-MECHANICS

- Breadboards
- Optical Tables & Isolators
- Opto-Mechanical Mounts
- Positioning Equipment
- Workstations

■ LASERS

- Diode Lasers & Assemblies
- Helium Neon Lasers

■ INSTRUMENTS

- Amplifiers
- Beam Position Measurement
- Beam Profilers
- Diode Laser Drivers
- Diode Laser Controllers
- Optical Spectrum Analyzers
- Power & Energy Meters
- Power Supplies
- Wavefront Analyzers

■ FIBER OPTICS

- Reflective Fiber Gratings
- Circulators
- Isolators
- Tree Couplers
- Attenuators
- Fiber Collimators

MELLES GRIOT

Klimaets Fysik

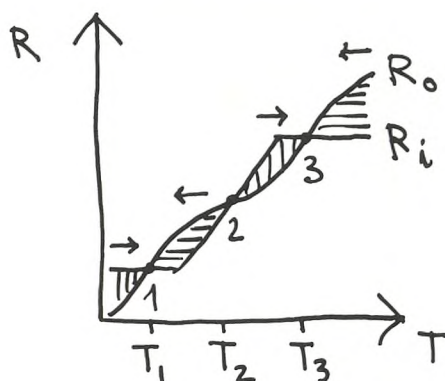
Peter Ditlevsen, *Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik*

Interessen for at forstå klimaet på vores planet har været stigende igennem de seneste år. Dette skyldes i høj grad frykten for mulige menneskeskabte klimaforandringer (til det værre, må man formode ...). Når vi taler om menneskeskabte klimaforandringer mener vi forandringer som følge af aktiviteter i det moderne samfund, specielt luftforurening og afbrænding af fossilt brændstof. Der er ingen tvivl om at vores aktiviteter på jorden påvirker klimaet, lige såvel som den øvrige del af biosfæren er en integreret del af klimaet. Dette er mest tydeligt formuleret af James Lovelock i hans teori om de kemiske forandringer i atmosfæresammensætningen og reguleringsmekanismerne som følger af det biologiske liv. Teorien er kaldt Gaia-teorien efter jordens gudinde i den græske mytologi, og har bidraget til den måde vi tænker på klimaet idag. Gaia-teorien er, efter sigende til Lovelocks fortrydelse, blevet ganske populær blandt holister, mystikere og økologister, men den historie skal ikke fortælles her.

I det følgende vil jeg beskrive et par meget simple modeller af klimaets dynamik som hver især bygger på enkle fysiske principper. Ved klimaet forstås de gennemsnitlige forhold som middeltemperatur og middelnedbør. Allerede de gamle grækere definerede begrebet klima. Det har den samme sproglige rod som ordet inklinasjon, og udtrykker det simple forhold at middeltemperaturen først og fremmest er bestemt af solens hældning (inklinasjon) i forhold til den geografiske lokalitet. Det er altså varmere ved ækvator end det er ved polerne. Klimaet afhænger dog også af andre faktorer. Danmark, Sydgrønland og Sibirien befinder sig på (næsten) sammen bredegrad, men klimaet er vidt forskelligt de 3 steder. Klimaet afhænger af havstrømme, bjerge, ismasser og så videre. Overordnet kan vi definere klimasystemet som bestående af atmosfæren, oceanerne, cryosfæren (ismasserne), hydrosfæren (søer, floder, grundvand), litosfære (fastlandet) og biosfæren. Alle disse delkomponenter udveksler masse og energi imellem hinanden og er hver især karakteriserede ved meget forskellige tidsskalaer for deres dynamik.

Hvis vi vil forstå og kvantificere klimaet og forandringer i dette er det naturligvis uoverskueligt at forsøge at inddrage alle tænkelige komponenter. Hvis vi forestiller os en næsten ubegrænset computer som vi fodrer med bevægelsesligningerne for atmosfæren og oceanerne samt en nogenlunde kvantitativ beskrivelse af alle de vekselvirkninger mellem delkomponenter vi kender kan vi måske regne os frem til en omtrentlig beskrivelse som stemmer nogenlunde overens med vores observationer. Det bruges der store

ressourcer på med stigende succes mange steder i verden i dag. Men man kan stille sig selv spørgsmålet om man overhovedet har lært noget om klimaet ved en perfekt eftergørelse i en computer. Er resultatet ikke mindst ligeså uoverskueligt som observationerne selv. For at forstå dynamikken må vi forsøge at give en slags hierarkisk beskrivelse af de mest betydende faktorer, således at vi forstår det væsentlige før detaljen. Det lyder banalt, det er banalt, men ikke desto mindre vigtigt at huske på når man ikke ser skoven for bar' træer.



Figur 1. Indstrålingen og udstrålingen som funktion af temperaturen. Der er 3 fikspunkter hvor ind- og udstråling balancerer. Pilene angiver retningen temperaturen vil bevæge sig i udenfor fikspunkterne. Punkterne 1 og 3 er stabile mens punkt 2 er et ustabil fikspunkt.

En simpel model for middeltemperaturen

Jorden modtager al sin energi fra solens kortbølgede stråling. Jorden er i termisk balance så den afgiver den samme varme i form af langbølget stråling ud til verdensrummet (se tegningen på Kvants forside). Da lyset er kvantiseret i fotoner med en energi som er omvendt proportional med bølgelængden afgiver jorden langt flere fotoner end den modtager fra solen. Da udstrålingen sker i alle retninger og med langt flere fotoner kan det ske på langt flere måder end indstrålingen af de færre kortbølgede fotoner. Udstrålingen har derfor en højere entropi end indstrålingen, så jorden eksporterer entropi. Dette forhold er essentielt for livet på jorden, men et sidespor i denne beretning.

Vi vil nu opstille en '0-dimensional' model, hvor vi udtrykker klimaet ved en enkelt variabel, T , som kunne være den globale middeltemperatur ved havoverfladen. Balanceligningen for strålingen kan så udtrykkes ved [1],

$$c \frac{dT}{dt} = R_i - R_o. \quad (1)$$

Her repræsenterer højresiden den indkommende stråling minus den udgående stråling. Hvis de ikke er i balance ændrer jordens temperatur sig. c er varmekapaciteten. Den indgående stråling er strålingen fra solen, S , minus den del som reflekteres tilbage til verdensrummet. Den del afhænger af jordens farve: Et hvidt legeme reflekterer meget mens et sort legeme absorberer meget. Den andel som reflekteres kaldes den planetare albedo, α , og afhænger blandt andet af hvor mange skyer og hvor meget is der er på planeten, α afhænger således af temperaturen, for eksempel igennem mængden af is og sne. Vi kan altså skrive den indgående stråling som $R_i = S(1 - \alpha(T))$. Den udgående stråling afhænger af jordens temperatur igennem Stefan-Boltzmann's lov, $R_o = g\sigma T^4$. Præfaktoren, g , kaldes 'greyness' og er et mål for i hvor høj grad planeten udstråler som et sort legeme. Det er igen denne faktor at atmosfærens drivhuseffekt skal ud-

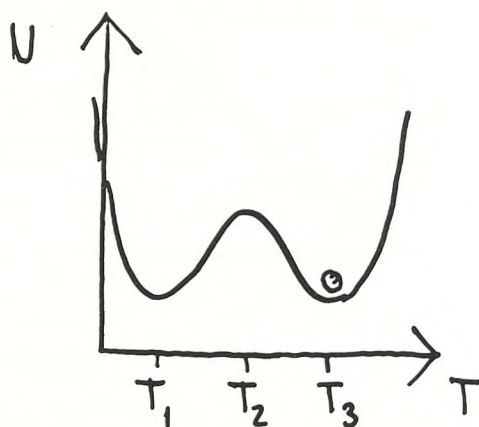


Figure 2. Dynamikken kan beskrives som bevægelse af en masseløs partikel med friktion i et pseudo-potential.

trykkes. Jeg vender tilbage til drivhuseffekten i næste afsnit. For at kunne løse vores ligning mangler vi nu kun at udtrykke funktionerne $\alpha(T)$ og $g(T)$. Albedoen vil vi lade afhænge af udbredelsen af is. Isens albedo, α_1 , er omkring 0,8 mens albedoen af hav og land, α_2 , er omkring 0,3. Hvis T er under omkring -10° Celsius vil hele planeten være isdækket og albedoen konstant, $\alpha(T) = \alpha_1$. Tilsvarende hvis T er større end omkring 20°C vil al isen være smeltet og $\alpha(T) = \alpha_2$ igen konstant. For $-10^\circ\text{C} < T < 20^\circ\text{C}$ interpolerer vi lineært imellem de to værdier α_1 og α_2 . 'Greyness'-faktoren vælger vi til følgende udtryk, $g(T) = 1 - m \tanh(T/T_0)^6$, hvor m og T_0 er konstanter. Jeg vil ikke komme nærmere ind på dette valg af $g(T)$, som er empirisk bestemt. Modellens principielle opførsel afhænger ikke af det specifikke valg. Det er jo et krav vi må stille til en hvilken som helst simpel model at dens opførsel er robust i forhold til de mere eller mindre realistiske og grove tilnærmelser som modellen in-

deholder. Ligning (1) bliver nu,

$$c \frac{dT}{dt} = S(1 - \alpha(T)) - g(T)\sigma T^4. \quad (2)$$

Denne ligning kan vi nemmest forstå ved grafisk løsning.

I Figur 1 er R_i og R_o afbildet som funktioner af T . Her kan vi se at der er 3 temperaturer for hvilke der er balance imellem indstråling og udstråling. Disse svarer til at højresiden i ligning (2) er nul og dermed at temperaturen er konstant. Sådanne punkter kaldes fikspunkter. Lad os se på punkt 1. Hvis temperaturen er lidt større end T_1 vil udstrålingen være større end indstrålingen hvormed temperaturen vil falde. Hvis temperaturen er lidt mindre end T_1 vil udstrålingen være mindre end indstrålingen hvorved temperaturen vil stige. Derfor hvis planeten har en temperatur i nærheden af T_1 vil den bevæge sig hen til T_1 hvor den vil forblive. T_1 er således et stabilt fikspunkt, indikeret ved pilene på figuren. Tilsvarende er det let at se at T_2 er ustabil og T_3 er stabil. Det er faktisk eneste mulighed. Antag nemlig at T_2 også var stabilt, så ville temperaturen nærme sig T_2 nedefra, da den også nærmer sig T_1 ovenfra må der være et punkt imellem T_1 og T_2 hvor den hverken bevæger sig op eller ned. Da der ikke er noget fikspunkt imellem T_1 og T_2 må T_2 nødvendigvis være et ustabil fikspunkt. Vi kan beskrive dynamikken ved at formulere højresiden som en kraft, som igen kan udtrykkes ved et potential. Så har vi, $c dT/dt = F = -dU/dT$. 'Pseudo-potentialet', U , er afbildet i Figur 2. Det overlades som en øvelse til læseren at indse at $U(T)$ er arealet (regnet med fortegn) imellem de to kurver R_i og R_o op til T . Af Figur 2 kan vi straks se at der er 2 stabile og et ustabil fikspunkt.

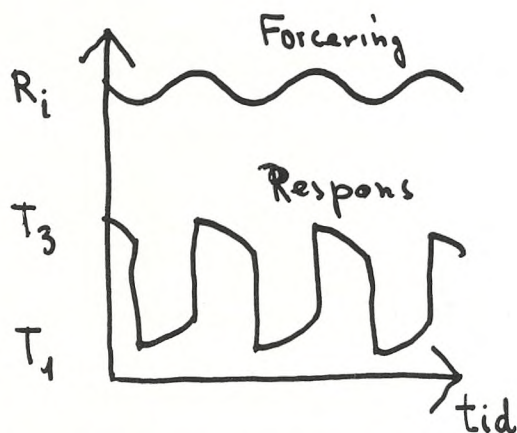
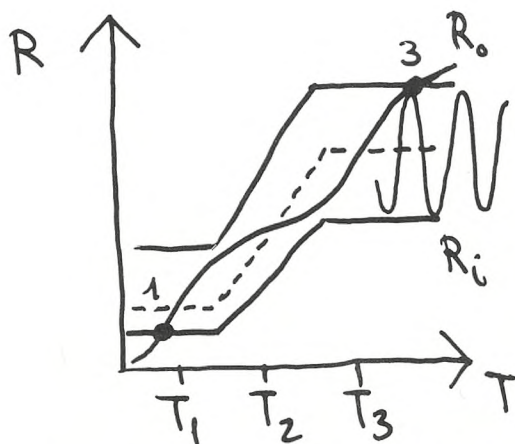


Figure 3. Indstrålingen ændrer sig periodisk som følge af ændringer i jordens bane omkring solen. Derved kan de stabile fikspunkter forsvinde.

Istider

Vi ved at klimaet igennem den sidste million år har svinget periodisk imellem istider og mellemistider med

ca. 100.000 års intervaller. Vi har endnu ikke nogen endelig teori der kan forklare dette. Den bedste kandidat til en forklaring er at det skyldes ændringerne i jordens astronomiske baneparametre, således at solindstrålingen varierer. Istiderne falder så når solindstrålingen er lav. Problemet med denne forklaring er at de ændringer som sker i solindstrålingen er minimale i forhold til de store klimatiske forandringer som observeres. Klimasystemet må respondere med en eller anden form for forstærkningsmekanisme. Lad os betragte modellen ovenfor og antage at solindstrålingen varierer periodisk, $S = S_0 \sin \omega t$. Dette påvirker indstrålingskurven i Figur 1, så den svinger imellem de to yderpositioner angivet som blå på Figur 3. Lad os antage at klimaet er beskrevet ved punkt 3 til at begynde med. Når indstrålingskurven falder bevæger dette punkt sig langsomt mod en koldere temperatur. Læg mærke til at det ustabile fixpunkt, 2, bevæger sig imod det stabile fixpunkt, 3. I det øjeblik de to kurver ikke længere skærer (og punkterne 2 og 3 møder hinanden) findes der kun et fixpunkt, 1. Temperaturen vil så hurtigt falde og klimaet ender i tilstanden beskrevet ved punkt 1. (Der er sket en 'saddle-node' bifurkation). Her befinder klimaet sig så indtil indstrålingskurven er steget så meget at punkt 1 ikke længere eksisterer som stabilt fixpunkt, hvorefter det vil bevæge sig tilbage til punkt 3. Vi har altså en hysteresecyklus med et stort respons til en lille ændring i forceringen, se Figur 4. Denne opførsel er i modellen en følge af albedofeedbacken, men den kan findes i andre feedbackmekanismer i klimaet. Læg mærke til at denne model ikke realistisk beskriver istidscyklusser på vores planet fordi en istid ikke svarer til en fuldstændig nedfrysning af jorden.



Figur 4. Klimaet kan svinge voldsomt imellem 2 tilstande som følge af en svag ændring i forceringen.

Drivhuseffekten

Drivhuseffekten er den effekt at atmosfæren virker isolerende i forhold til afkølingen. Jorden bevæger sig jo i et meget koldt univers. I modsætning til hvad

man måske umiddelbart ville tro opvarmes atmosfæren nedefra. Atmosfæren er (næsten) gennemsigtig for den kortbølgede stråling, så den kortbølgede stråling når jord og havoverfladen som opvarmes og afgiver varmen i form af langbølget stråling og fordampning til atmosfæren. Der er så, især i troperne, turbulent lodret bevægelse (konvektion) fordi den varme luft er let og derfor stiger op. I havet er det omvendt, der optages den kortbølgede stråling i overfladen så det varme vand er ovenpå det kolde. Havet er derfor mere stabilt med hensyn til turbulent lodret bevægelse end atmosfæren, men det er igen en anden historie. Vi kan opstille et strålingsbudget for jordoverfladen (O), atmosfæren (A) og atmosfærens top (T) hvor vi antager at atmosfæren og overfladen hver især udstråler langbølget stråling efter Stefan-Boltzmann's lov. Drivhuseffekten kan udtrykkes ved en parameter, β , som angiver hvor stor en del af den langbølgede stråling fra overfladen som absorberes i atmosfæren, se Figur 5. Vi får så 3 balanceligninger, hvoraf den ene er lineært afhængig af de to andre, til bestemmelse af temperaturerne af overfladen, T_O , og atmosfæren, T_A . Vi skriver opvarmningen på venstre side og afkølingen på højre side:

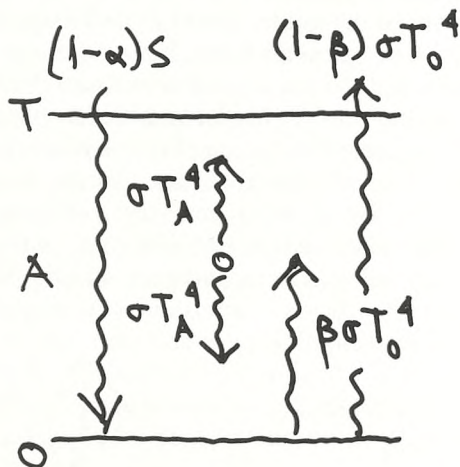
$$\begin{aligned} T : & (1 - \alpha)S = \sigma T_A^4 + (1 - \beta)\sigma T_O^4 \\ A : & \beta\sigma T_O^4 = 2\sigma T_A^4 \\ O : & (1 - \alpha)S + \sigma T_A^4 = \sigma T_O^4. \end{aligned} \quad (3)$$

Løsningen er $\sigma T_O^4 = (1 - \alpha)S / (1 - \beta/2)$ og $\sigma T_A^4 = (\beta/2)\sigma T_O^4$. Det overlades til læseren at beregne drivhuseffekten på jorden i forhold til hvis der ikke var en atmosfære. Vis at drivhuseffekten højst kan være på 18,9 % af temperaturen af overfladen uden drivhuseffekt i Kelvin (vink: $\sqrt[4]{2} = 1,189$). Udregn også opvarmningen af jorden som følge af en fordobling af CO_2 -koncentrationen i atmosfæren. Realistiske tal er,

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,3 \\ S &= 344 \text{ W/m}^2 \\ \sigma &= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{ K}^4) \\ \beta_{H_2O} / \beta_{CO_2} &= 98/2 \\ T_O &= 293 \text{ K} \\ T_A &= 237 \text{ K} \end{aligned} \quad (4)$$

Der er mange mulige konsekvenser af drivhuseffekten. Vanddamp er den dominerende drivhusgas på jorden. Når jorden opvarmes fordampes vand fra oceanerne til vanddamp i atmosfæren, dette forårsager yderligere opvarmning som giver mere fordampning og så videre. Der er altså en positiv feedback. Hvis ikke der var noget til at stoppe denne udvikling ville vi have en 'runaway' drivhuseffekt hvor oceanerne helt ville fordampe. Det er muligvis hvad der er sket på Venus. På jorden sker det ikke fordi vanddampen fortættes i

skyer, som virker afkølede, men det er en hel historie i sig selv. Ved en mere realistiske og nøjagtig beregning af strålingsbudgettet må der tages højde for at temperaturen ikke er konstant igennem atmosfæren og at absorption og emission er forskellige for forskellige bølgelængder og afhængig af atmosfærens kemiske sammensætning og forekomsten af skyer. Dette gøres i moderne numeriske vejrprognoser.



Figur 5. Strålingsbudgettet ved jordens overflade (O), atmosfæren (A) og atmosfærens top (T).

Epilog

Nu har jeg vist bredt mig tilstrækkeligt over Kvants begrænsede sideantal. Jeg har forsøgt at give eksempler på de mekanismer som styrer vores klima. Det er

nødvendigvis kun blevet til kradsen i overfladen hvor kun de mest skematiske modeller er beskrevet. Andre modeller som jeg burde have beskrevet er klimaoscillatorer, kaotisk - og stokastiske dynamik. Yderligere er en ganske vigtig komponent i klimaet oceanstrømningerne og varmetransporten fra ækvator mod polerne. Denne del har vi efterhånden en god forståelse af, men den beretning må komme en anden gang [2].

Referencer:

- [1] Denne type modeller kaldes Sellers-Bodyko modeller og blev introduceret uafhængigt af Sellers og Bodyko i 1967.
- [2] Referencer kan fås ved venlig henvendelse til forfatteren, pditlev@gfy.ku.dk.



Peter Ditlevsen er forskningslektor ved Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institut for Astronomi, Fysik og Geofysik.



Vacuum Generators

<http://www.vacgen.com>

Vacuum Generators NEW 'TRANSAX' bridges gap

Vacuum Generators has introduced the TRANSAX[®]XYZ translator to bridge the gap between their user friendly HPT and the very high stability Omniax. The Transax is a fully UHV compatible double bellows translator constructed following the principle of the Omniax but providing a more cost effective solution where large capacity and extreme stability are not necessary. The basic Transax combines a linear Z-slide with an XY-table joined by a rigid interface that eliminates strain from the mating flanges of the Z-slide.

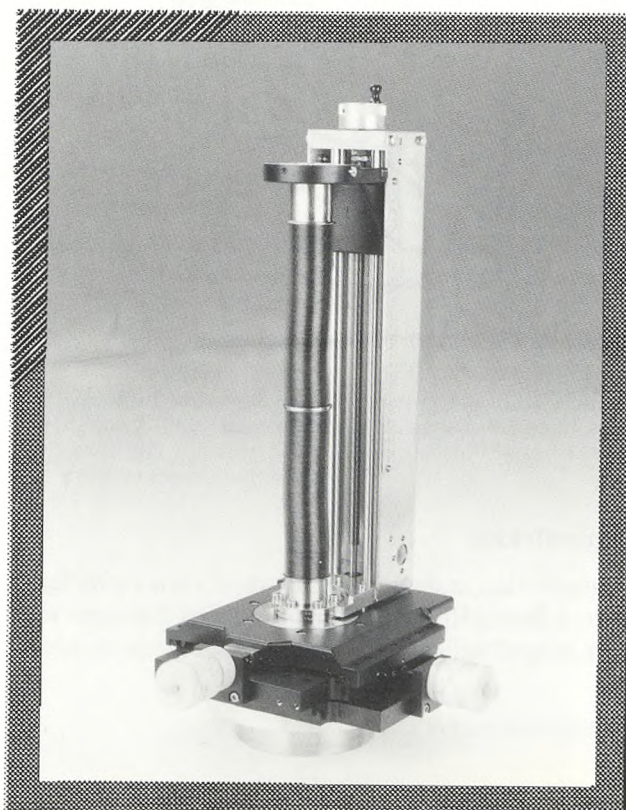
The design is thermally matched to allow repeated bakeout to 230°C in any orientation and has a support and guidance system that stabilises the sample and damps vibrations. Available with three standard Z travels with X and Y movements up to ± 25 mm the Transax is designed to accept the RD1 and RD2 rotary drives offered by Vacuum Generators and their range of sample handling equipment instrumentation and motorisation options.

For further information please contact Jonas Fång at

Thermo Instruments Nordic AB,

Gårdsfogdevägen 16, S-168 66 BROMMA, Sweden.

Tel. +46-8-629 24 00 Fax. +46-8-627 52 20, e-mail: jonasf@thinab.se



Havets cirkulation og betydning for klimaet

Jørgen Bendtsen, Danish Center for Earth System Science, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik

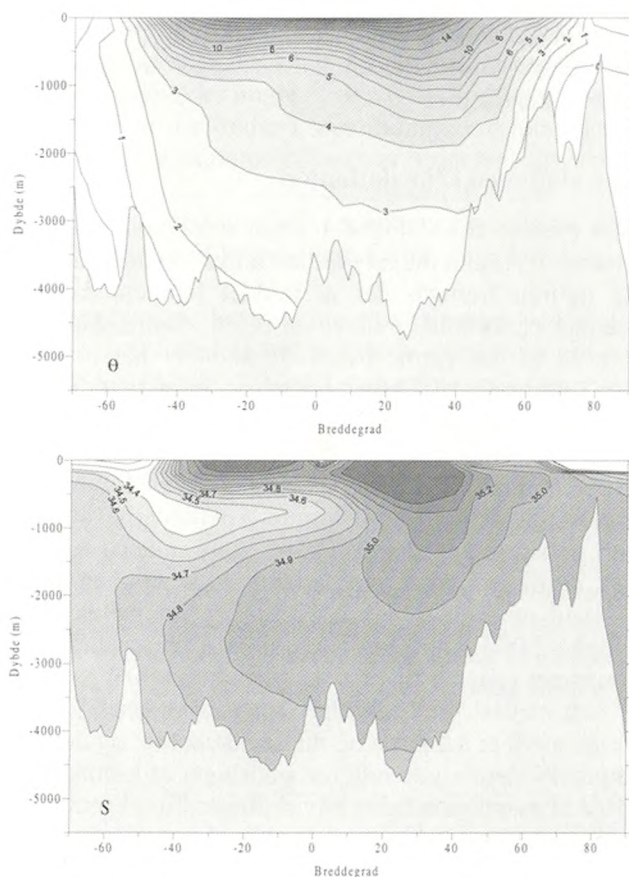
Klimaet på Jorden er først og fremmest bestemt af balancen mellem den kortbølgede solindstråling ($0,2\mu\text{m} < \lambda < 4\mu\text{m}$) der absorberes i oceanet og i atmosfæren, og den udgående langbølgede stråling ($4\mu\text{m} < \lambda < 100\mu\text{m}$) der forlader toppen af atmosfæren.

Den absorberede kortbølgede stråling er størst ved ækvator og mindst ved polerne. Denne fordeling skyldes den større indfaldsvinkel af den indkommende stråling på høje breddegrader, samt at der her er et generelt større skydække hvilket øger reflektionen af den kortbølgede stråling. Den langbølgede stråling der forlader Jorden har en mere ligelig fordeling, på grund af den lille temperaturforskel på ca. 30 K mellem mellem høje og lave breddegrader. Fordelingen mellem den kort- og langbølgede stråling medfører at Jorden netto har et energioverskud i troperne/subtropene, hvorimod der er et netto energiunderskud på høje breddegrader. Denne energi fordeling er forudsætningen for den generelle cirkulation i havet og i atmosfæren som vi kender den i dag. Disse to komponenter i Jordens klimasystem transporterer nogenlunde ligeligt den overskydende energi fra lave breddegrader mod polerne så klima systemet opretholdes i en ligevægtstilstand. Det vi opfatter som klimaet er middeltilstanden af denne generelle cirkulation.

Den termohaline cirkulation i verdenshavene

Den generelle cirkulation i havene drives af to forskellige processer, som beskrives ved den vinddrevne og den termohalint drevne cirkulation. Den vinddrevne cirkulation skyldes den direkte påvirkning fra vinden på havets overflade. Denne er medvirkende til dannelsen af de oceane gyser, dvs. den cirkulære bevægelse, der kendetegner cirkulationen i overfladen i alle de store have. Disse gyser udgøres af en vestgående strøm langs ækvator der følger passatvindene, og en kraftig polgående strøm langs de vestlige rande af havene. I Nordatlanten er den kraftige polgående strøm repræsenteret ved Golfstrømmen.

Udover den vinddrevne cirkulation er havet påvirket af tilførselen af energi og ferskvand ved havoverfladen. Da massefylden af havvand er en funktion af vandets temperatur og salinitet, således at massefylden øges ved lavere temperatur og ved højere salinitet, er fluxen af energi og ferskvand bestemmende for overfladevandets massefylde. Da både energi og ferskvandstilførselen varierer med breddegraden, medfører overflade påvirkningen variationer i massefylden langs niveauflader i havet. De deraf afledte trykgradienter driver den termohaline cirkulation i havet.



Figur 1. Den zonalt midlede fordeling af potentiel temperatur (θ) og salinitet (S) i Atlanterhavet. Enhederne er henholdsvis $^{\circ}\text{C}$ og ppt.

På høje breddegrader afkøles overfladevandet i vintermånederne, hvilket medfører at massefylden øges, der igen forårsager at vandsøjleens lagdeling bliver mindre stabil. Samtidig med at vandet afkøles ændres saliniteten. Her er to modsatrettede processer vigtige. Dels er der en netto atmosfærisk ferskvands tilførsel fra subtropene mod høje breddegrader. Dette medfører at saliniteten i overfladen generelt er lavere på høje breddegrader end på lave. Dels er der en lokal berigelse af overfladesaliniteten på grund af dannelsen af havis i vintermånederne. Den samlede effekt af alle disse påvirkninger forårsager dybvandsdannelse på grund af konvektion i visse områder af oceanerne. Dybvandsdannelse er betegnelsen for overfladevand der opnår en større massefylde end vandet i dybhavet, dvs. dybere end ca. 2.000 m, og som dermed forårsager en opblanding med denne dybe vandmasse. I den nordlige del af Nordatlanten er Grønlandshavet for eksempel et område hvor der findes en kraftig konvektion i vintermånederne. Det kan ses ved en næsten homogen ver-

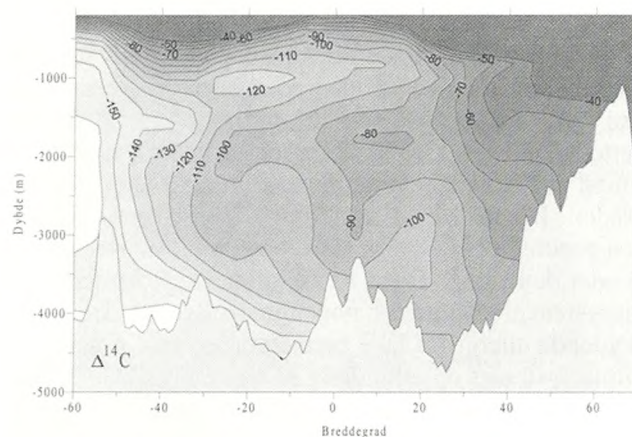
tikal fordeling af den potentielle temperatur og salinitet i vandsøjlen fra overfladen og ned til flere tusinde meters dybde. Disse konvektive områder ved polerne udgør en del af den termohaline cirkulation i havet. I dag findes der dannelse af dybvand i havene nord for Island, i Labrador havet mellem Grønland og Canada og i områder omkring Antarktis. Den nordlige del af det nordlige Stillehav er en bemærkelsesværdig undtagelse, idet der her kun findes en ganske svag konvektion sted i vintermånederne.

Cirkulationen i Nordatlanten

Den øverste del af Figur 1 viser den potentielle temperatur i Atlanterhavet midlet langs breddegraderne. Af figuren fremgår det at middel temperaturen for oceanet er forholdsvis lav, ca. 3,5°C. Dette skal ses i forhold til det varme overfladevand der når omkring 28°C i troperne. Denne fordeling viser betydningen af dybvandsdannelsen på høje breddegrader, da dette er det eneste sted hvor dybvandet kan opnå disse lave temperaturer. Den nederste del af Figur 1 viser den tilsvarende fordeling af salinitet i Atlanterhavet. Her kan den direkte påvirkning fra dybvandsdannelsen i den nordlige del af Nordatlanten ses som en tunge af vand med en relativ høj salinitet der bevæger sig sydpå i 2.000 - 3.000 meters dybde. Denne vandmasse benævnes som Nordatlantisk dybvand (NADW), og den er helt central for forståelsen af ændringer af Jordens klima mellem istiderne og mellemistiderne, og den kan muligvis være afgørende for ændringer af klimaet som følge af menneskeskabte påvirkninger, for eksempel en ændret strålingsbalance på Jorden på grund af en øget atmosfærisk koncentration af CO₂. I den dybeste del af Atlanten findes det tungeste vand, der er mindre salint men til gengæld væsentligt koldere. Dette vand er dannet ved Antarktis og udgør den dybeste del af den termohaline cirkulation i Atlanterhavet. Den intermediære vandmasse der ses som en nordgående tunge af relativt ferskt vand på ca. 1000 m dybde benævnes det Antarktiske Intermediære Vand, og denne vandmasse spiller en væsentlig rolle for cirkulationen i den øvre del af oceanet men vil ikke blive diskuteret her.

Ud fra Figur 1 kan der dannes et kvalitativt indtryk af den termohaline cirkulation, men hverken temperatur eller salinitet indeholder nogen tidslig information om cirkulationen. Her er ¹⁴C et vigtigt sporstof, da det afpejler det tidsrum, der er gået siden vandet sidst var i kontakt med atmosfæren. Der findes ikke interne kilder for ¹⁴C i havet, hvis man ser bort fra transporten af partikulært organisk materiale der er dannet i den øverste del af vandsøjlen af fytoplankton m.v. Atmosfærens indhold af ¹⁴C er relativt konstant og homogent fordelt, samtidig med at halveringstiden for ¹⁴C på 5.680 år gør den velegnet til at studere oceanernes cirkulation på stor skala. I Figur 2 er fordelingen af ¹⁴C i den vestlige del af Atlanterhavet vist. Mængden af ¹⁴C er vist i enheder af Δ¹⁴C. Størrelsen Δ¹⁴C

svarer til forskellen mellem vandets ¹⁴C/C forhold og det førindustrielle atmosfæriske ¹⁴C/C forhold udtrykt i promille (ppt). Det ældste vand har de laveste Δ¹⁴C værdier. Sammenholder man figuren med Figur 1b, ses NADW som en tunge med en relativ høj Δ¹⁴C værdi omkring -80 - -100 ppt. Ud fra fordelingen af Δ¹⁴C kan residenstiden for Atlanterhavs vand under 1.500 m dybde bestemmes til ca. 275 år. Dette skal ses i forhold til at middelværdien for det øvrige ocean under 1.500 m dybde er ca. 500 år. På grundlag af observationer af temperatur og salt kan man beregne den sydgående transport i dybhavet i Nordatlanten på 45°N til at være ca. 23 Sv (1 Sv = 1 Sverdrup = 10⁶ m³s⁻¹). Denne transport modsvares af en tilsvarende nordgående transport af varmt overfladevand, og medfører en betydelig energitransport mod den nordlige del af Nordatlanten.



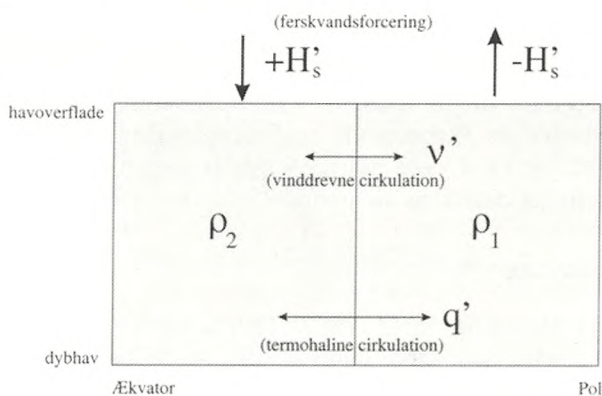
Figur 2. Fordeling af Δ¹⁴C i Atlanterhavet midlet langs breddegraderne. Enheden er ppt.

Stabiliteten af den termohaline cirkulation

Numeriske modeller af den generelle cirkulation i oceanet har vist at den termohaline cirkulation kan have flere mulige steady state (ligevægts) løsninger for et givent sæt af randbetingelser. Disse kan eksempelvis være en foreskrevet ferskvandsflux bestemt ud fra observationer, samt en relaxering af temperaturen hen imod den observerede overfladetemperatur. Forskellen mellem de forskellige steady state løsninger kan forstås som en omfordeling af den nordgående energitransport mellem atmosfæren og oceanet. Hvis denne egenskab med multiple løsninger også er karakteristisk for cirkulationen i virkelighedens verden, kan det medvirke til at forklare de dramatiske temperaturskift mellem istider og mellemistider. Denne hypotese støttes også af undersøgelser fra sediment prøver fra dybhavet, hvor der er indikatorer for at det Nordatlantiske Dybvand, der har en kerne på ca. 2.500 m dybde (se Figur 1 og 2), har cirkuleret på betydeligt mindre dybder under dele af istiden. Samtidig vil sensitiviteten af den termohaline cirkulation til ændringer i energi- og ferskvandsfluxene være væsentlige for at forstå klimaets respons

på naturlige og menneskeskabte variationer af disse. Sådanne sensitivitets studier er til en hvis grad blevet udført med komplekse klima modeller, men da disse stadig er temmelig beregningskrævende i forhold til selv de største edb-anlæg, er mange sensitivitets studier af klima systemet foretaget med simple modeller der kun indeholder få komponenter af det samlede klima system.

Den termohaline cirkulation i numeriske modeller er for eksempel følsom overfor ændringer i ferskvandsfluxene ved overfladen. Da denne er bestemt af forskellen mellem nedbør og fordampning, vil en ændring af denne svare til at den polgående atmosfæriske transport af vanddamp ændres. Dette kan illustreres ved en meget simpel model af den termohaline cirkulation, der er vist i Figur 3 [1] [3].



Figur 3. Boks model af den termohaline og den vindhævn cirkulation i Atlanten.

Her er oceanet mellem ækvator og nordpolen delt op i to homogene bokse med massefylde ρ_i , $i = 1, 2$. Den termohaline cirkulation q' er bestemt af forskellen i massefylde mellem de to bokse, hvorimod den vindhævn cirkulation er parameteriseret ved en konstant udveksling mellem de to bokse. Ferskvandsfluxen ved overfladen er her konverteret til en salinitetsflux, således at netto fordampningen på lave breddegrader er beskrevet ved en positiv salinitetsflux H'_s , og tilsvarende er netto nedbøren konverteret til en negativ salinitetsflux på høje breddegrader.

Massefylde beskrives ved en lineær tilstandsligning som: $\rho_i = \rho_0 (1 - \alpha T_i + \beta S_i)$ hvor ρ_0 er en reference massefylde, og α og β er henholdsvis den termale og den saline ekspansions koefficient for havvand. T_i og S_i er temperaturen og saliniteten i de to bokse. Bevarelseligningen for salt i de to bokse kan da skrives som:

$$V \dot{S}_1 = (|q'| + v') (S_2 - S_1) - H'_s \quad (1)$$

$$V \dot{S}_2 = -(|q'| + v') (S_2 - S_1) + H'_s \quad (2)$$

hvor $\dot{S}_i$ er den tidslige afledede af S_i , og V er volumenet af boksene som her er lige store.

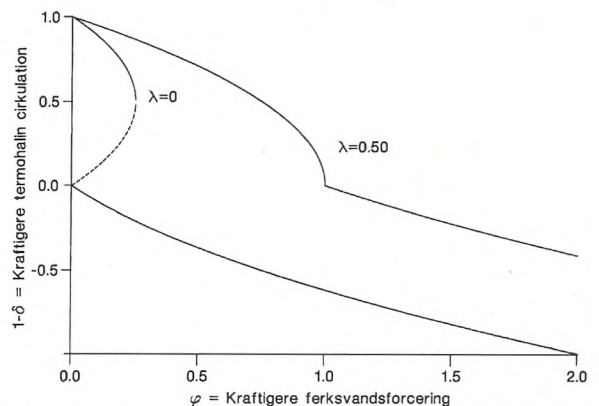
Ved at trække (1) fra (2) opnås det simple udtryk:

$$\dot{S} = -|q| S - v S + H_s \quad (3)$$

Her er udvekslingsleddene defineret ved $q = 2q'/V$, $v = 2v'/V$ og $H_s = 2\beta H'_s/V$, salinitets forskellen mellem høje og lave breddegrader er bestemt af $S = \beta(S_2 - S_1)$, og q er bestemt ved forskellen i massefylde $q = \frac{k}{\rho_0}(\rho_1 - \rho_2) = k(T - S)$ hvor $T = \alpha(T_2 - T_1)$, og k er en invers friktionsparameter. I denne simple boks-model er temperaturen konstant i de to bokse.

Denne simple model af den komplekse cirkulation i havet indeholder nogle af de vigtigste tilbagekoblings mekanismer der findes i mere komplekse modeller, og kan samtidig skaleres således at modellen har samme følsomhed overfor ferskvandsfluxen H_s som i disse. Dette gør denne type af modeller velegnede til sensitivitets studier af kritiske parametre, som for eksempel H_s [2].

Steady state løsningerne til (3) findes ved at løse for $\dot{S} = 0$. Ved at indføre de to variable $\delta = S/T$ og $\phi = H_s/(k T^2)$ er løsningerne givet ved $\delta = \lambda + \frac{1}{2} \pm \sqrt{(\lambda + \frac{1}{2})^2 - \phi}$ for $q \geq 0 \Leftrightarrow \delta \leq 1$ og $\delta = -(\lambda - \frac{1}{2}) + \sqrt{(\lambda - \frac{1}{2})^2 + \phi}$ for $q < 0 \Leftrightarrow \delta > 1$ hvor $\lambda = v/(2kT)$. Disse løsninger er vist i Figur 4. I tilfældet $v = 0 \Leftrightarrow \lambda = 0$ er der 3 mulige løsninger for $\phi < 0,25$, hvoraf 1 er ustabil. For $\phi > 0,25$ eksisterer der kun en stabil løsning, og denne er kendetegnet ved at massefylden på lave breddegrader er større end på høje - denne fordeling er i modsætning til den nuværende fordeling i havet, jvf. Figur 1.



Figur 4. Steady state løsningerne til ligning (3) er vist for henholdsvis $\lambda = 0$ og $\lambda = 0,5$. De stabile løsninger er vist med fuldt optrukne linier, hvorimod de ustabile løsninger er vist med en stiple linie.

For at forstå hvorfor 'cirkulationen' for $q > 0$ bliver ustabil når $\phi > 0,25$ kan man undersøge stabiliteten af denne løsning i forhold til en perturbation S' af salinitetsforskellen mellem de to bokse. Ved at substituere $S = \bar{S} + S'$ i (3), hvor $\bar{S}$ er salinitetsforskellen i steady state:

$$\dot{S}' = -(q + v) S' + k S' \bar{S} \quad (4)$$

Her er anden ordens led af S' negligeret. Heraf ses det at både q og v stabiliserer cirkulationen, idet de

medvirker til at udligne salinitetsforskellen. Omvendt virker det sidste led i (4) destabiliserende, således at $S' > 0$ svækker q og dermed udligningen af salinitetsforskellen mellem boksene. Da q svækkes når ϕ øges vil cirkulationen blive ustabil når q bliver tilstrækkelig svag. Denne positive tilbagekoblingsmekanisme er baggrunden for løsningerne i Figur 4, og denne tilbagekobling er også tilstede i mere komplekse modeller af cirkulationen i havet [4]. I denne simple model kan den vinddrevne cirkulation parameteriseres ved en konstant blanding mellem de to bokse, og effekten er vist i Figur 4 for $\lambda = 0, 5$. Her eksisterer løsningen for $q > 0$ i et større interval. Årsagen til dette kan også ses ud fra (4) idet v medvirker til at stabilisere cirkulationen.

Denne boks model illustrerer interne tilbagekoblinger i oceanet. Modellen viser hvordan en øget ferskvandstilførsel på høje breddegrader svækker styrken af den termohaline cirkulation (q). Hvis ferskvandstilførselen bliver for kraftig ($\phi > 0, 25$), vil løsningen hvor dybvandet bliver dannet på høje breddegrader ($\rho_1 > \rho_2$) ikke længere eksistere. Samtidig illustrerer modellen også hvordan den vinddrevne cirkulation kan medvirke til at stabilisere løsningen hvor $\rho_1 > \rho_2$, idet tærskelværdien for ferskvandsfluxen nu er væsentligt højere ($\phi > 1.0$). I virkeligheden vil der også være tilbagekoblinger fra atmosfæren. Disse vil påvirke ferskvandsfluxen (H_S) og temperatur fordelingen mellem høje og lave breddegrader, der så igen vil virke tilbage

på oceanet. Tilsvarende vil intensiteten af den vinddrevne cirkulation, der her er parameteriseret ved v , også afhænge af temperaturfordelingen, så der selv i en så enkel model som denne hurtigt kan etableres et meget komplekst samspil mellem de forskellige komponenter.

Et hierarki af klima modeller

Da residenstiden for dybhavet er omkring 500 år, sætter dette end nedre grænse for hvor lang tid en koblet atmosfære-ocean model skal integreres før systemet har opnået en veldefineret middeltilstand. Imellem de meget beregningskrævende modeller og de oversimplificerede enkle modeller findes der en række modeller som stadig muliggør lange tidsintegrationer, og som indeholder flere af de vigtige komponenter i klimasystemet [3], som for eksempel udbredelsen af havis og dennes betydning for strålingsbalancen og dannelsen af dybvand. I disse modeller kan vekselvirkningen mellem atmosfæren og oceanet undersøges, og resultaterne fra simple modeller kan bruges til at udvikle og forbedre de eksisterende tredimensionale cirkulations modeller samt være nyttige i fortolkningen af de store mængder data som disse modeller producerer.

Referencer:

- [1] Henry Stommel (1961) Thermohaline convection with two stable regimes of flow, Tellus, bind 13, side 224-230.
- [2] Gary Shaffer og Jørgen Bendtsen (1994) Role of the Bering Strait in controlling North Atlantic ocean circulation and climate, Nature, bind 367, side 352-357.
- [3] Jørgen Bendtsen (1998) Ocean processes maintaining the stability of the climate system, Ph.D. afhandling, Københavns Universitet.
- [4] Stefan Rahmstorf, Jochem Marotzke og Jürgen Willebrand (1996) Stability of the thermohaline circulation, i bogen "The warmwatersphere of the North Atlantic Ocean", red. af Wolfgang Krauss", Gebrüder Bornträger, Berlin Stuttgart, side 129-157.

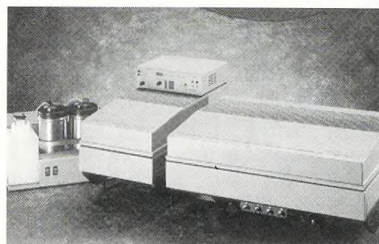


optilas

Optilas Danmark, den lokale internationale leverandør med specialer indenfor:

Optik og lasere til forskning og industri

Continuum, Inc. - Corion Corp. - CVI Laser Corp. - Ion Laser Technology, Inc. - Labsphere, Inc. - Laservision - Optical Surfaces



Ltd. - Physical Optics Corp. - Research Electro Optics - Santa Fe Laser Co. - Synrad, Inc. - m.fl.

Spektroskopisk udstyr

Chromex, Inc. - McPherson Milton Roy - Photek Ltd. m.fl.



Elektronik

Directed Energy, Inc. - Maxwell Laboratories, Inc. - Quantum Design, Inc. - Stanford Research Systems, Inc. - Trek, Inc. - m. fl.

Optilas Danmark

Billedvej 2

DK-2100 København Ø

Telefon: 3543 0133

Fax: 3543 8334

E-mail: optilas@inet.uni-c.dk



Jørgen Bendtsen er forskningsadjunkt ved Danish Center for Earth System Science, Niels Bohr Institutet for Fysik, Astronomi og Geofysik.

Nyt fra Dansk Fysisk Selskab

Dansk Fysisk Selskab

Jens Olaf Pepke Pedersen (formand)
DCESS, NBIfAFG
Juliane Maries Vej 30
2100 København Ø

E-mail: jopp@dcass.ku.dk
Telefon: 35 32 05 73

Dorthe Posselt (næstformand)
E-mail: dorthe@mmf.ruc.dk

Nis Bjerre (kasserer)
E-mail: nis@dfi.aau.dk

Preben Alstrøm
E-mail: alstrom@nbi.dk

Peter Bodin
E-mail: p-bodin@get2net.dk

Karsten W. Jacobsen
E-mail: Karsten.W.Jacobsen@fysik.dtu.dk

Ole Mouritsen
E-mail: ogm@fki.dtu.dk

Fællesmøde med Videnskabernes Selskab

Vi minder om at Dansk Fysisk Selskabs holder fællesmøde med Videnskabernes Selskab, **torsdag den 19. november kl. 19.15** i Selskabets gamle mødesal, H.C.Andersens Blvd. 35, 1.sal, København.

Anledningen til mødet er halvtredsåret for udgivelsen af Niels Bohrs afhandling om 'Penetration of Atomic Particles through Matter' i Selskabets Matematisk-Fysiske Meddelelser (bind 18, nr. 8, 1948). Afhandlingen sammenfatter Bohrs tanker og erfaringer inden for et emneområde, der interesserede ham gennem hele hans professionelle liv.

Ved fællesmødet vil afhandlingens tilblivelse og indflydelse blive beskrevet i tre indlæg ved

Jens Thorsen, Luxembourg: The penetration of charged particles through matter 1912-1948

Preben Hvelplund, Aarhus: Influence on research in experimental ion-atom collisions and particle penetration phenomena

Peter Sigmund, Odense: Particle stopping and radiation effects

Mødet afsluttes med en let anretning i den nye mødesal. Tilmelding sker ved henvendelse til Jørgen Maes, Videnskabernes Selskab, på email jm@royalacademy.dk senest den 16. november 1998.

Årsmødet 1999

Næste årsmøde afholdes den 3. og 4. juni 1999 på Hotel Nyborg Strand. Som plenarforelæsere har DFS besluttet at invitere tre foredragsholdere. Det er Richard E. Smalley fra University of Dallas med emnet "Nanotechnology and the next 50 Years", Steve Block fra Princeton University med emnet "Biological Motors" og Daniel Kleppner, MIT med emnet "Bose-Einstein Condensation of Atomic Hydrogen". Derudover kommer der et plenarforedrag med en taler inviteret af Instrumentcenter for Jordbaseret Astronomisk Forskning (IJAF).

Årsmødeprogrammet fastlægges af DFS's sektioner, og man kan sende forslag til foredragsholdere til Preben Alstrøm, alstrom@cats.nbi.dk, (faststoffysik), Jens Olaf Pepke Pedersen, jopp@dcass.ku.dk, (atomfysik og andre emner) og Dorthe Posselt, dorthe@mmf.ruc.dk (KIF).

I næste nummer af Kvant vil der være tilmeldingsblanketter til årsmødet.

Nye web-sider

DFS's hjemmesider er ved at få nyt design. Alle opfordres til at besøge siderne på adressen www.nbi.dk/dfs og sende deres kommentarer til Michael Linden-Vørnle (mykal@dsri.dk). Kvant arbejder også med at producere en internetudgave af bladet, som vi vil præsentere i næste nummer. Desuden har bestyrelsen besluttet at modernisere medlemsregisteret, således at vi bl.a. får mulighed for at kommunikere direkte med medlemmerne via e-mail. Medlemsregisterfører Bjarne Andresen og Per Hedegård arbejder på dette projekt.

Netværket for Kvinder i Fysik (KIF)

KIF har udsendt nyhedsbrev nr. 19 og opfordrer bl.a. alle medlemmer af netværket til at melde sig ind i DFS. Brug evt. kuponen her i bladet. Trine Møgelbjerg er udnævnt til Kvant-korrespondent for KIF og vil fremover rapportere her i bladet. Lige nu er hun imidlertid på barselsorlov.

European Physical Society (EPS)

EPS's 11. generelle konference "Trends in Physics", som afholdes hvert tredje år, holdes næste gang i London den 6.-10. september 1999. I foramtalen loves det at "Coming as it does, close to the start of the New Millenium, the meeting will deal with many of the exciting developments which will comprise the Physics of the 21st Century". For yderligere information se www.iop.org/IOP/Confs/EPS.

Nordisk-baltisk samarbejde

DFS deltager i arbejdet i en nordisk-baltisk kontakt-

gruppe (NBCG), som blev dannet på initiativ af Nordi-
tas direktør Paul Hoyer i 1995. Gruppen ønsker at
stimulere det nordisk-baltiske samarbejde, bl.a. ved
deltagelse i hinandens årsmøder, både som deltagere

og som foredragsholdere. De fysiske selskaber i de
baltiske lande har en vanskelig økonomisk situation, og
DFS betaler således i år en del af EPS-kontingentet for
de fysiske selskaber i Letland og Litauen.

Nyt fra Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Selskabet for Naturlærens Udbredelse

Dorte Olesen (formand)

UNI-C

Vermundsgade 5

2100 København Ø

Opdagelser og teorier i elektromagnetismens histo- rie

Foredrag ved professor Bent Elbek **den 9. decem-
ber 1998**. Nærmere oplysninger om arrangementet
fås hos Bente Egaa, tlf. 35 87 88 04 eller e-mail
Bente.Egaa@uni-c.dk. Selskabet minder om, at alle in-
teressererede er velkomne til selskabets foredrag. Det er
ingen forudsætning, at man er medlem.

Abonnement på KVANT / medlemsskab af DFS og SNU

Et årsabonnement på KVANT koster 135 kr. Nye abonnenter vil modtage eventuelle tidligere numre af den løbende
årgang. Medlemmer af Dansk Fysiks Selskab (DFS) og Selskabet for Naturlærens Udbredelse (SNU) vil modtage
Kvant som medlemsblad.

Unge under uddannelse kan blive ungdomsmedlem af et af de to selskaber og vil da modtage bladet som medlems-
blad, dækket af årskontingentet på 75 kr. Det ordinære kontingentet til DFS udgør 325 kr. pr. år (dog 75 kr. for
pensionister). Ordinært medlemsskab af SNU koster 150 kr. pr. år.

Hvis du mener, at du allerede har abonnement, men ikke får bladet, har du måske glemt at melde flytning (det
skal meddeles postvæsenet eksplicit!) eller glemt at betale for abonnementet. Du opfordres derfor til at kontakte
Lene Körner, Matematisk Institut, Universitetsparken 5, 2100 København Ø (koerner@math.ku.dk) for at få opklaret
sagen.

Navn: _____

Stilling: _____

Adresse: _____

Postnr. og by: _____

Telefon: _____

E-mail: _____

Jeg er ☐ under uddannelse ☐ pensionist

Jeg ønsker

☐

abonnement på Kvant

☐

medlemsskab af SNU

☐

medlemsskab af DFS

Ved DFS-medlemsskab: Angiv evt. ønske om tilknytning til
sektionerne for:

☐

atomfysik

☐

faststoffysik

☐

uddannelse og undervisning

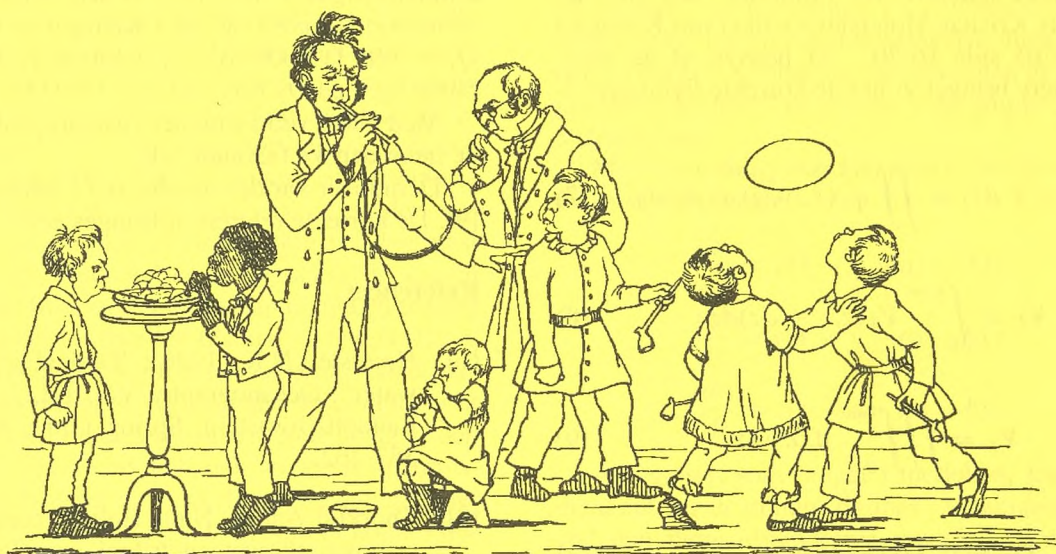
☐

netværk for kvinder i fysik

KVANT
Ørsted Laboratoriet
Universitetsparken 5
2100 København Ø

Vinterskole i Fysik for Ph.D.-studerende

Per Hedegård, Ørsted Laboratoriet



*Mannens er båret til Arbeid; en gammel Vidskabsmand
hør iøjeblik Linnæus Pinblinde. —*

For 7. år i træk afholdes der Vinterskole i Fysik for Ph.D.-studerende. I år bliver det

17. - 22. januar 1999

Formålet er mindst tofoldigt: Dels at sikre at man som Ph.D.-studerende får en vis faglig bredde. Det er naturligt og godt at man fordyber sig i sit projekt, men det er også vigtigt, at man har en generel forståelse for de problemer forskellige mennesker arbejder med i faget. Det andet formål er, at det vigtige at samle alle danske ph.d.'er på eet sted, så de lærer hinanden at kende, og at der derved etableres et fagligt netværk for den enkelte, der strækker sig ud over hjemminstituttet.

I år har vi været særligt heldige med valget af foredragsholdere. De er alle kendte som fremragende forskere og formidlere, hver på sit felt.

- Ole Mouritsen og Ling Miao. Ole er professor på DTU, hvor han er leder af MEMPHYS gruppen. Ling Miao er gæsteforsker på MEMPHYS. Deres hovedinteresse er de fysiske egenskaber af biologiske membraner.

- Jørgen Christensen-Dalsgaard er forskningsprofessor ved Institut for Fysik og Astronomi i Århus. Hans hovedinteresse er sol og stjerne-seismologi

- Henrik Bruus, David Cobden and Anders Kristensen, er faststoffysikere ved Ørsted Laboratory, NBIfAFG i København. De arbejder alle med nanostrukturer, og studerer såkaldt mesoskopisk kvantefysik.

Skolen er naturligvis ikke gratis, men ligesom tidligere år, regner vi med, at jeres hjeminstitutter betaler for jer. Ifølge reglerne for Ph.D.-studerende har institutterne et beløb, som det er meningen skal bruges på den enkelte studerende.

Tilmeldingen foregår på nettet på adressen <http://roemer.fys.ku.dk/vinter99>. Her kan I finde yderligere detaljer om skolens program.

Kattegats vandkvalitet - korrektion

Niels Kristian Højerslev, Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik

Ved en beklagelig fejl på Kvants trykkeri var der i det sidste nummer af bladet desværre forsvundet nogle af de matematiske symboler fra artiklerne. Det gik især ud over Niels Kristian Højerslevs artikel om Kattegats vandkvalitet på side 16-20. Af hensyn til de interesserede læsere bringer vi her de korrekte ligninger (7-9) og (12):

$$V_T(z, z + dz) = \iint q_T(x, y, z) dz dx dy \quad (7)$$

$$V_T = \int_0^{z_{\max}} V_T(z, z + dz) dz \quad (8)$$

$$V_K = \iiint_0^{z_{\max}} dx dy dz \quad (9)$$

$$Q_T = 0,31[15.000 m^3 s^{-1}]. \quad (12)$$

Artiklens konklusion, der måske kom som en overraskelse for mange læsere, var at 90% af bundvandet

i Kattegat i middel kommer fra Nordsøen og Atlanterhavet og dermed ikke fra Tyske Bugt. Dette fremgår af artiklens Figur 5, som viser at den samlede bundvandstransport fra nord og ind i Kattegat er lig med $Q_N + Q_T = 3.05 [15.000 m^3 s^{-1}]$, hvorved tyskebugtandelen bliver lig med $Q_T/(Q_N + Q_T) = 0,31/3,05 \sim 10\%$.

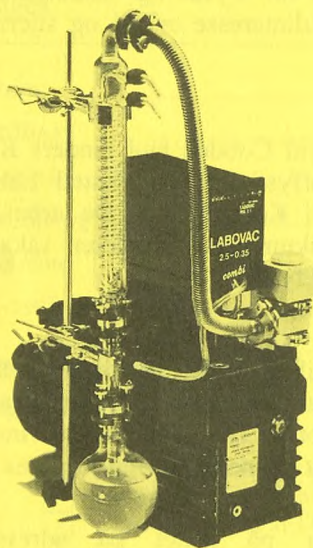
Med andre ord forurener vesteuropæiske floder kun de indre danske farvande lidt.

Derudover var der mindre fejl i referencerne [6] og [9]. De korrekte referencer bringes her:

Referencer:

- [6] Højerslev, N.K. (1986): "Optical properties of sea water". Oceanography V/3, Ed. J. Sündermann, Landolt-Börnstein. Springer Int., New Ser, side 383-462.
- [9] Thorkild Aarup, Niels Holt og undertegnede har sammen skrevet en trilogi om alle disse ting i Continental Shelf Research, august 1996. Således kan den dybt interesserede læser fordybe sig yderligere i emnet på f.eks. forfatterens adresse.

MODERNE VAKUUMTEKNIK TIL FORSKNING OG INDUSTRI



SASKIA HOCHVAKUUM- UND LABORTECHNIK GmbH I ILMENAU er et succesrigt resultat af øst-vest genforeningen i Tyskland. SASKIA's et- og to-trins finvakuumpumper fra 4 til 200 m³h⁻¹ har rotor-skiver af et nyt PTFE materiale som sænker støjniveauet med ca. 3 dBA og tillader pumperne at arbejde konstant ved højt tryk eller med aggressive gasser. Med en frekvensregulering kan pumpehastigheden fordobles, så man f.eks. hurtigt kan evakuere et anlæg og derefter anvende pumpen som holdepumpe ved lav hastighed. SASKIA's kemisk resistente membran-pumper har liniærdrevne membraner, hvilket sikrer en lang levetid og lavt effektforbrug. En membranpumpe på ca. 30 W kan med de store afgifter på brugsvand hurtigt tjene sig ind, hvis den erstatter en vandstråle-pumpe. SASKIA's TOWER pumpestande er kemipumpestande kombineret med kondensatorer og med instrumentering for indstilling af trykket. SASKIA leverer oliefri pumpestande kombineret med turbomolekularpumper i et handy design og rootspumpestande op til 20.000 m³h⁻¹.

ALLE FORMER FOR OLIEFRI & OLIESMURTE ROTATIONSVAKUUMPUMPER • FEDTSMURTE TURBOMOLEKULAR- SPIRO- & HYBRIDPUMPER • DIFFUSIONS- & CRYOPUMPER • VAKUUMMÅLEINSTRUMENTER, VENTILER, HV & UHV FITTINGS • HELIUMLØKSØGERE & MASSESPEKTROMETRE • SPUTTER- ELEKTRONKANON & ÆTSEANLÆG • RF & HV STRØMFORSYNINGER • RUSTFRI SPECIALKAMRE & DELE • OMBYGNING AF VAKUUMANLÆG

WENZEL VAKUUM TEKNIK APS • NYBROVEJ 283 • DK-2800 LYNGBY • TLF. 45 87 97 35
SHOWROOM, SERVICE, LAGER • NYBROVEJ 193 • BIL 30 42 63 00 • FAX 45 93 32 93

Begrænset forudsigelighed

Aksel Wiin Nielsen, *Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik*

Indledning

Mange ikke-lineære systemer udviser stor følsomhed for små ændringer i begyndelsestilstanden. En lille ændring i enten begyndelsestilstanden eller i den ydre påvirkning af systemet kan medføre store ændringer i tidsforløbet af to numeriske integrationer af de ikke-lineære ligninger. Et system, som opfører sig på denne måde, kaldes kaotisk. Der er masser af eksempler på sådanne processer. For geofysikere er den begrænsede forudsigelighed af atmosfæren vel den mest kendte. Når vejrforudsigelser er begrænset til ca. en uge, skyldes det bl.a., at man ikke kan undgå en forskel mellem atmosfærens virkelige tilstand og begyndelsestilstanden for modellen, fordi der er langt mellem observationerne af atmosfæren, og fordi alle observationer er behæftet med fejl. En anden begrænsende årsag er den tilnærmede beskrivelse af de fysiske processer i atmosfæren. Disse processer er i virkeligheden molekulære, men beskrives i modellen i punkter, som er nogle kilometer fra hianden.

Adskillige eksempler på enkle kaotiske systemer såsom Feigenbaum's ligning [1] og Lorenz' simplificerede model for konvektion [2] er offentliggjort, se f.eks. [3,4], hvor disse eksempler er analyseret. Forskellen mellem de to løsninger kan f.eks. vises gennem en beregning af rms-forskellen som en funktion af tiden.

Formålet med denne artikel er at give endnu et eksempel hentet fra en klasse af modeller, som beskriver konkurrencen mellem to eller flere grupper. En sådan konkurrence mellem to grupper er beskrevet i enkeltheder af R.M. May [5]. Den naturlige udvidelse er til en konkurrence mellem tre grupper, men det viser sig, at så snart man kommer til det tre- eller fler-dimensionale parameterrum, så er de (numeriske) løsninger af en sådan rigdom, at man får mange nye og ejendommelige opførsler [6]. Som May [5] skriver: "Det er af denne grund, at vi tæller ligesom den australske Arunta stamme: en, to, mange".

En konkurrence model med tre grupper

En lidt forenklet model af konkurrence mellem tre grupper er beskrevet af Beltrami [7]. Grupperne kaldes 1, 2 og 3. De tre variable for antallet af medlemmer i de tre grupper betegnes med x , y og z . Disse variable er uden dimension og normaliseret til at være mellem 0 og 1. Det antages, at de tre grupper har samme fødselsrate (første led på højre side i de efterfølgende ligninger) og også samme dødelighed (andet led). En given gruppe er påvirket af aktiviteterne i de andre to grupper. Også her er modellen forenklet, idet det an-

tages, at raten for gruppe 1's påvirkning af gruppe 2, benævnet a , er den samme som gruppe 3's indflydelse på gruppe 2 og for gruppe 1's påvirkning af gruppe 3 (tredje led). En tilsvarende antagelse, men med en anden talværdi b , gælder for påvirkningen af gruppe 3 på gruppe 1, gruppe 1 på gruppe 2 og gruppe 2 på gruppe 3 (fjerde led).

Med disse antagelser kan man skrive de tre ligninger for modellen således:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= x(1 - x - ay - bz) \\ \frac{dy}{dt} &= y(1 - y - az - bx) \\ \frac{dz}{dt} &= z(1 - z - ax - by)\end{aligned}\quad (1)$$

Antagelser, som indgår i modellen, kan meget vel mene, at der er mindre rigdom i løsningernes opførsel end den mere almindelige model. Ligningerne har forskellige stationære tilstande, som kan undersøges for stabilitet på den sædvanlige måde ved at udføre en perturbationsanalyse. Resultaterne kan beskrives på følgende måde:

1. (0,0,0) er et stationært punkt for x , y og z . Dette stationære punkt er altid ustabilt.

2. (0,0,1), (0,1,0) og (1,0,0) er stationære tilstande. De tre egenverdier er i alle tre tilfælde de samme, nemlig -1 , $(1-a)$ og $(1-b)$. Instabilitet indtræffer derfor, når enten a eller b er mindre end 1, medens stabilitet er tilfældet, hvis både a og b er større end 1.

3. Man kan også finde stationære tilstande, hvor kun n af de variable er lig med 0. Her ser vi kun på n af disse tilstande, hvor $x_s = 0$. De andre to variable har da værdierne angivet i (2).

$$\begin{aligned}y_s &= \frac{1-a}{1-ab} \\ z_s &= \frac{1-b}{1-ab}\end{aligned}\quad (2)$$

Da de variable måler antallet af medlemmer i de tre grupper, skal de være positive. Det følger derfor, at enten er $a < 1$ og $b < 1$ eller $a > 1$ og $b > 1$. I det første tilfælde finder man instabilitet, medens den anden mulighed giver stabilitet.

4. Endelig er der det generelle tilfælde, hvor alle tre værdier er forskellige fra nul. I dette tilfælde finder man, at de tre grupper indeholder lige mange medlemmer. Den stationære tilstand er:

$$x_s = y_s = z_s = \frac{1}{1+a+b}\quad (3)$$

Også i dette tilfælde kan man gennemføre stabilitetsundersøgelsen, selv om den kræver noget mere regnearbejde. Egenverdierne bliver som angivet i (4)

$$\begin{aligned} \nu_1 &= -1 \\ \nu_{2,3} &= \frac{a+b-2}{2(1+a+b)} \pm i3^{1/2} \frac{a-b}{2(1+a+b)} \quad (4) \end{aligned}$$

Man ser, at instabilitet indtræffer, når $a+b > 2$. Denne betingelse opfylder vi i de følgende eksempler ved at vælge $a < 1$ og $b > 1$. Det betyder, at de stationære tilstand angivet under punkt 2 ovenfor er ustabile, medens de stationære tilstande under punkt 3 slet ikke eksisterer. Vi har derfor kun ustabile stationære med dette valg, og det skulle føre til, at systemet aldrig kommer i ro, hvis man baserer sin argumentation på resultaterne af perturbationsanalysen. Det skal man imidlertid være forsigtig med, som de følgende resultater vil vise. Den egentlige årsag til denne situation synes at være, at vi normalt ikke kan få analytiske løsninger til et sæt af ikke-lineære ligninger. De numeriske løsninger vil altid være behæftet med en vis fejl, som naturligvis afhænger af, hvilket system man anvender til integrationen.

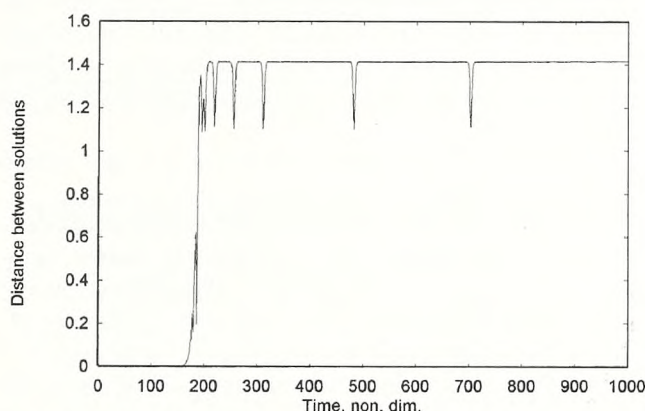


Figure 1a. Afstand mellem to løsninger som funktion af tiden for de værdier, som er angivet over figuren. De samme værdier gælder for Figur 1b-1e.

Af hensyn til fortolkningen af de senere eksperimenter er det nødvendigt at se på et specielt tilfælde. Hvis $x=y=z$ for $t=0$ bliver højresiderne identiske i alle tre ligninger. Det er derfor tilstrækkeligt at se på n af dem, som får formen:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= x(1 - \gamma x) \\ \gamma &= 1 + a + b \end{aligned} \quad (5)$$

Denne ligning kan løses direkte. Med $x=x_0$ for $t=0$ finder man løsningen:

$$x = \frac{\frac{x_0}{1-\gamma x_0}}{e^{-t} + \gamma \frac{x_0}{1-\gamma x_0}} \quad (6)$$

Det ses således, at for denne specielle begyndelsestilstand er den asymptotiske værdi $1/\gamma$ (eller med andre ord den "indre" stationære tilstand. Hvis a og b er sådan, at den stationære tilstand er stabil, ender integrationen i dette punkt, men hvis den er ustabil, vil der ske andre ting.

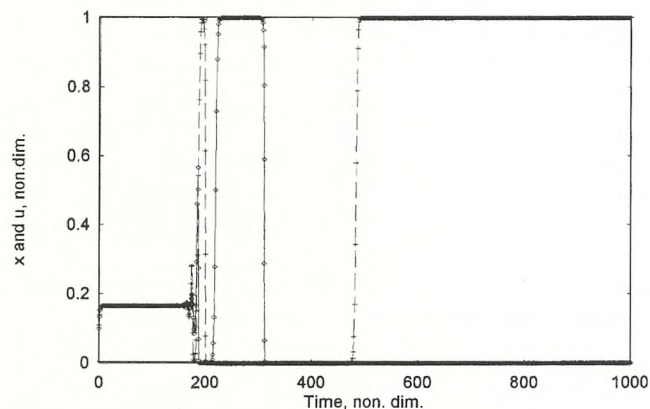


Figure 1b. Værdierne af x og u som funktion af tiden.

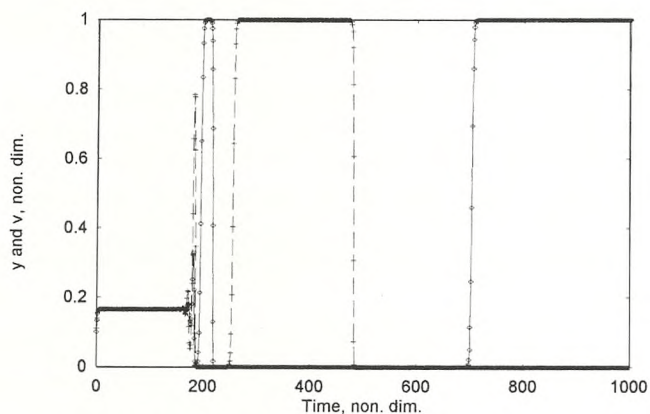


Figure 1c. Værdierne af y og v som funktion af tiden.

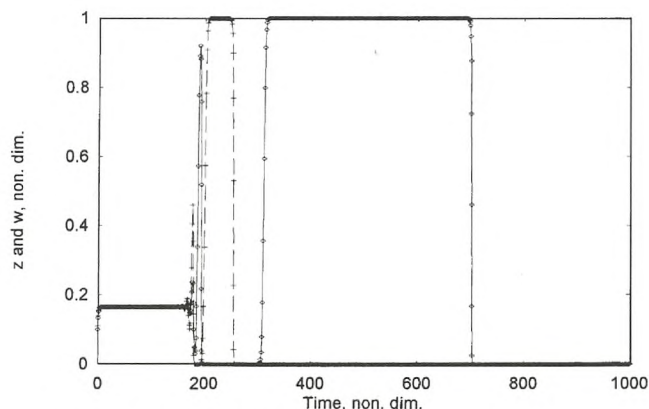
To numeriske eksempler

Formålet med de numeriske eksempler er at vise følsomheden for små ændringer i begyndelsestilstanden i det første tilfælde og for små ændringer i konstanterne a og b i det andet tilfælde. Strategien i disse eksempler er at fremstille to lange integrationer fra f.eks. to lidt forskellige begyndelsestilstande. Dette gøres i det samme program, så man løbende kan holde øje med forskellen i de to integrationer. I den ene integration hedder de afhængige variable (x,y,z) , i den anden (u,v,w) , medens konstanterne hedder a,b i den ene og (a_1,b_1) i den anden. Integrationerne kan sammenlignes på forskellig måde. Man kan f.eks. måle forskellen mellem dem ved at udregne rms-forskellen defineret ved

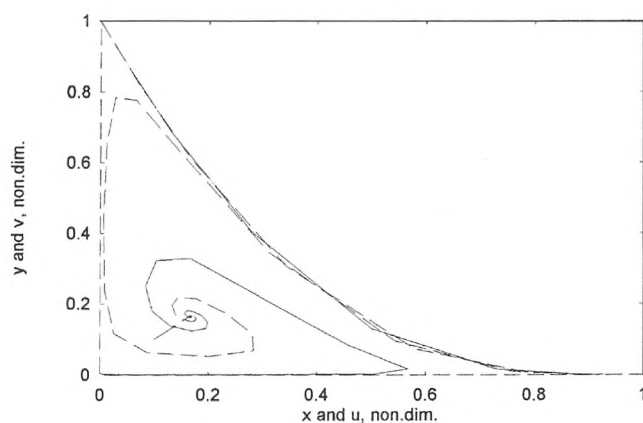
$$d = ((x-u)^2 + (y-v)^2 + (z-w)^2)^{1/2} \quad (7)$$

Man kan også plotte $x(t)$ og $u(t)$ som funktion af tiden og tilsvarende figurer for de andre variable.

Integrationerne er udført med et af de mange Runge-Kutta systemer, den såkaldte Heun's procedure, men resultaterne er efterprøvet ved at anvende andre Runge-Kutta systemer på det samme eksempel med resultater, som ikke er de samme for forskellige systemer, men som ikke ændrer på hovedkonklusionerne.



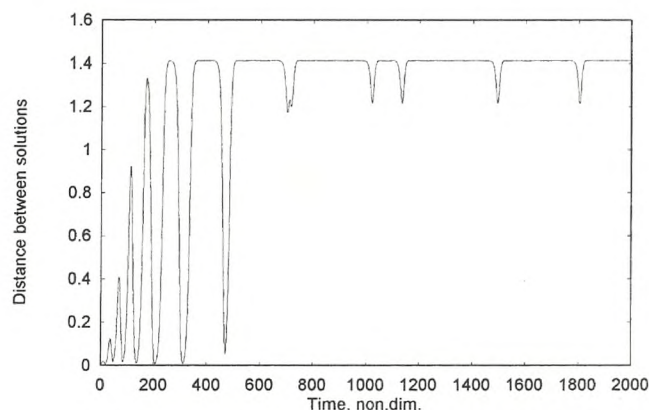
Figur 1d. Værdierne af z og w som funktion af tiden.



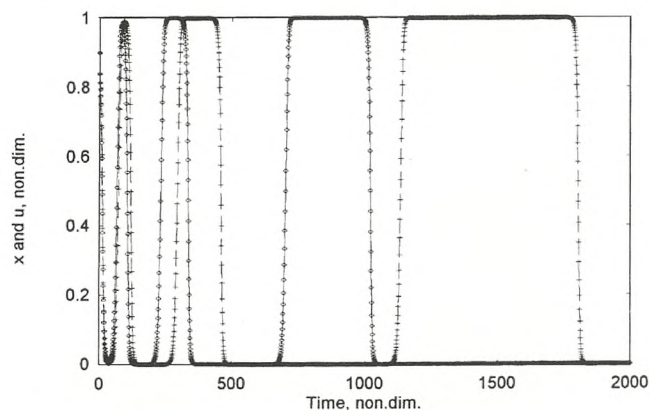
Figur 1e. Banekurverne for (x,y) og (u,v) .

I det første eksempel bruges $a=a_1=0.1$ og $b=b_1=4.9$ og $x=y=z=0.1$ og $u=v=w=0.11$. Begge begyndelsestilstande hører til den særlige klasse, hvor alle tre variable er ens. Vi forventer derfor, at systemet i første omgang skal bevæge sig mod den 'indre' stationære tilstand, men da denne er ustabil for de valgte parametre eftersom $a+b=a_1+b_1 > 2$ skulle systemet igen forlade dette punkt. Figur 1a viser rms-forskellen mellem de to løsninger. Denne kurve viser, at forskellen for de første 170 tidsenheder er nul, hvorefter den ret hurtigt vokser til større værdier. Forskellen bliver efterhånden til en - for det meste konstant - værdi på 1,41. Fra tid til anden er der en kort afvigelse, men tidsforskellen mellem dem bliver større og større. Hvordan kan vi beskrive disse resultater? Figur 1b viser kurverne $x(t)$ og $u(t)$ angivet med forskellige symboler. For at følge forløbet er det

lettest at følge de tykke linier, hvor systemet befinder sig i 0 eller 1. Hvis begge tykke linier er på samme sted er systemerne tæt ved hinanden. Hvis derimod den ene tykke linie er tæt ved 1 og den anden tæt ved 0 er integrationerne meget forskellige i dette tidsinterval. I dette eksempel ender den ene i værdien 1, den anden i 0. En nærmere undersøgelse viser at $x = 0$ og $u = 1$. Figur 1c viser tilsvarende, at $y = 1$ er den asymptotiske værdi for denne variable, medens den samme værdi for v er 0. Endelig viser Figur 1d, at de to variable z og w begge ender i værdien 0. (x,y,z) trajektorien ender derfor i $(0,1,0)$, medens (u,v,w) ender i $(1,0,0)$. Rms-forskellen mellem disse to punkter er $2^{1/2} = 1,41...$



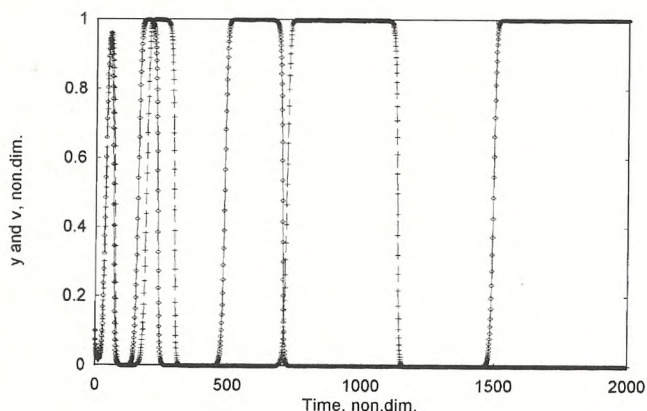
Figur 2a. Afstand mellem de to løsninger med samme begyndelsestilstand, men små ændringer i konstanterne a og b . Samme værdier er anvendt i Figur 2b-2e.



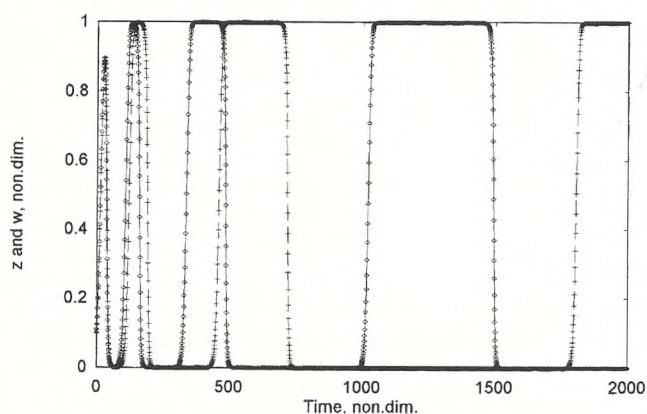
Figur 2b. Værdierne af x og u som funktion af tiden.

For at få yderligere information om systemets opførsel kan vi se på Figur 1e, som er trajektorierne af punkterne (x,y) og (u,v) . Vi ser, at begge trajektorier kommer meget nær til det stationære punkt $1/(1+a+b) = 0,17$. De forlader begge dette punkt, men i forskellige spiraler. Den ene kurve ender i $(0,1)$, den anden $(1,0)$. Men disse stationære tilstande var ustabile. Hvordan kan de så være de asymptotiske tilstande? For det første viser ustabiliteten sig under integrationen, fordi trajektorien drejer bort fra den ustabile tilstand i de første par

omdrejninger. Hver gang kommer trajektorien nærmere til det ustabile punkt og opholder sig dr i længere tid. Denne opførsel kan man forstå ved følgende argument. Betragt vi f.eks. punktet $(1,0,0)$ så vil y og z være ganske små, så den væsentlige del i den første lignings højre side vil være $x(1-x)$, men da x er nær ved 1, vil dette led også være lille. Derfor bliver dx/dt lille. De samme argumenter anvendt på de andre to ligninger viser, at også i disse ligninger er højresiderne ganske små. Da vi ikke kan integrere ligningerne for en uendelig lang tid, vil det derfor være helt tilfældigt om de to trajektorier er i nærheden af samme punkt eller to forskellige punkter.



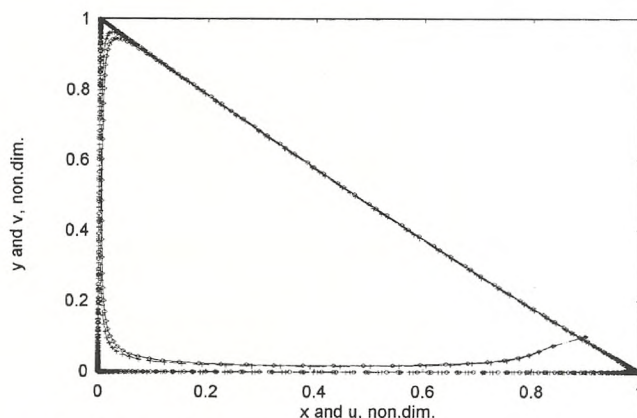
Figur 2c. Værdierne af y og v som funktion af tiden.



Figur 2d. Værdierne af z og w som funktion af tiden.

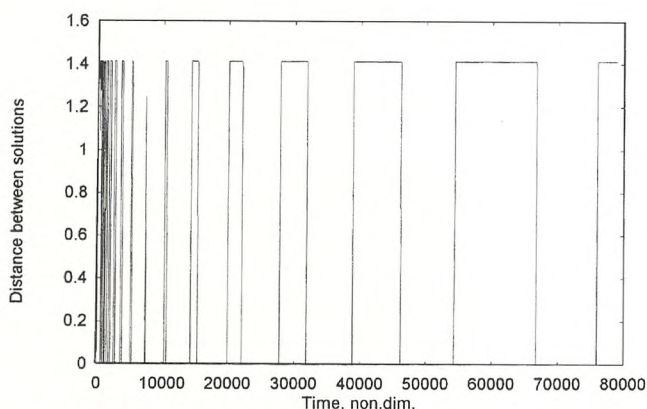
I det andet eksempel skal vi se på følsomheden, når vi starter fra samme begyndelsestilstand, men sammenligner to integrationer med små forskelle i konstanterne a og b . Eksperimentet bruger $a=0,8$, $b=1,3$ i den ene integration og $a_1=0,81$, $b_1=1,31$ i den anden. Den fælles begyndelsestilstand er: $x=u=0,9$, $y=z=v=w=0,1$. Figur 2a viser afstanden mellem de to tilstande som funktion af tiden. Man ser, at denne kurve er af samme natur som den i Figur 1a, idet afstanden efter et stykke

tid er 1,41 for det meste af forløbet med relativt korte afvigelser fra den konstante værdi. I Figur 2b ser vi, at x og u begge slutter med at være nul, medens Figur 2c og 2d viser, at y og v ligesom z og w har den ene variable lig med 1 og den anden med 0. Endelig viser Figur 2e, at man også i dette tilfælde kan se de første omløb ganske klart, hvorefter trajektorien opfører sig på lignende måde som i det første eksempel. Integrationerne viser derfor samme slags følsomhed overfor små ændringer i værdierne for ligningernes konstanter som for små ændringer i begyndelsestilstanden.



Figur 2e. Banekurverne for (x,y) og (u,v) .

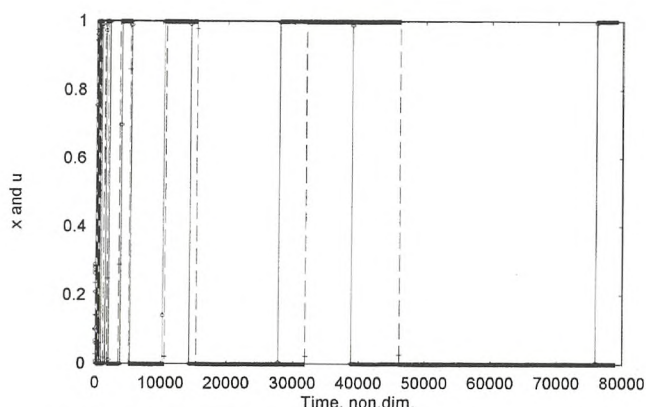
Endeligt skal det bemærkes, at alle beregningerne, som fører til figurene i denne artikel, er udført med den størst mulige nøjagtighed svarende til 19 til 20 signifikante cifre i hvert tal. Anvender man mindre nøjagtighed, får man helt andre resultater.



Figur 3a. Afstand mellem de to integrationer med samme begyndelsestilstand, men små forskelle mellem (a,b) og (a_1,b_1) .

Man kan spørge om systemet faktisk ender i t af de tre punkter: $(1,0,0)$, $(0,1,0)$, $(0,0,1)$ og bliver dr. For at få svar på dette spørgsmål er en meget lang integration blevet fremstillet. I den ene er $(a,b)=(0,5;1,7)$, medens

den anden integration har $(a_1, b_1) = (0,51; 1,71)$. Startpositionen er i begge integrationer $(0,1; 0,11; 0,1)$. Figur 3a, som viser rms-værdierne for afstanden mellem de to løsninger, viser for det første, at under hele integrationen synes afstanden at variere mellem en situation, hvor de to integrationer er meget nær ved hinanden, og en anden, hvor de er 1,41 fra hinanden. Tidsintervallet, hvor de to løsninger er nær ved hinanden øger med integrationstiden, men det er også tilfældet med længden af de tidsrum, hvor de opholder sig i hvert sit hjørne punkt. Dette ses også fra Figur 3b, hvor både x og u er plottet som funktion af tiden. Systemet kommer derfor aldrig i ro. Det ser kun sådan ud.



Figur 3b. Værdierne for x og u som funktion af tiden.

Afsluttende bemærkninger

Begrebet 'begrænset forudsigelighed', som først blev opdaget af H. Poincaré [8,9] i 1890'erne i forbindelse med et forsøg på en numerisk integration af ligningerne for tre-legeme problemet, blev genopdaget af Thompson [10] i forbindelse med numeriske vejrprognoser og af Lorenz [2], som brugte en 3-component model af konvektion mellem to vandrette plader, som hver for sig blev holdt på en konstant temperatur med temperaturen af den nedre plade større end temperaturen på den øvre. Siden da har man observeret fænomenet i mange tilfælde i forskellige områder i fysikken, kemien, biologien, økonomien og flere andre områder, hvor numeriske modeller står til rådighed. Fænomenet sætter en grænse for, hvad der kan forudsiges, og hvor langt ind i fremtiden man kan producere prognoser af praktisk værdi. Disse grænser kan ikke bestemmes på forhånd, men må fastlægges ved numeriske eksperimenter, hvor man har gode data at sammenligne med. Disse grænser for forudsigelighed er ikke udført i så mange tilfælde.

Det specielle eksempel, som er anvendt her til at illustrere begrænset forudsigelighed, tilhører en klasse,

hvor man har udført sådanne eksperimenter ved at sammenligne observationer af f.eks. forskellige dyre- og fuglearter, som lever i det samme område og derfor også er afhængige af den samme fødemængde [5].

Referencer:

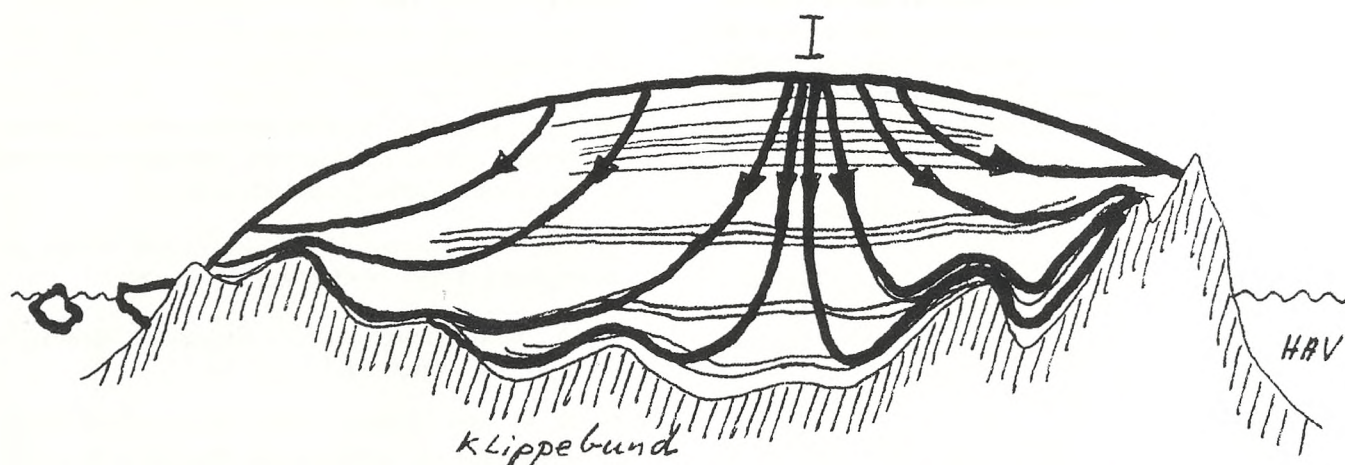
- [1] M. Feigenbaum (1978) Quantitative universality for a class of nonlinear equations, J. of Stat. Physics, bind 19, side 25-52.
- [2] E. N. Lorenz (1963) The predictability of hydrodynamic flow, Transactions, New York Academy of Science, Serie II, bind 25, side 409.
- [3] A. Wiin Nielsen (1997) Begrænset forudsigelighed I, Vejret, bind 2, side 27-35.
- [4] A. Wiin Nielsen (1997) Begrænset forudsigelighed II, Vejret, bind 4, side 11-17.
- [5] R. M. May (Editor) (1976) Theoretical Ecology, Principles and Applications, Blackwell Scientific Publications, 317 pp.
- [6] R. M. May og W. J. Leonard (1975) Nonlinear aspects of competition between three species, SIAM, Journal of Applied Mathematics, bind 29, side 243-253.
- [7] E. Beltrami (1987) Mathematics for dynamic modeling, Academic Press, Inc., 277 pp.
- [8] H. Poincaré (1893) Les Méthodes nouvelle de la mécanique celeste, Paris, Gauthiers-Villar.
- [9] H. Poincaré (1912) Science et Méthode, Paris, Flammarion.
- [10] P. D. Thompson (1957) Uncertainty of initial state as a factor in the predictability of large scale atmospheric flow patterns, Tellus, bind IX, side 275-295.



Aksel Wiin Nielsen er professor emeritus, Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Fysik, Astronomi og Geofysik.

Iskerner fortæller klimahistorie

Claus Uffe Hammer, Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik



Figur 1. Skematisk vest-øst snit gennem Indlandsisen. I betegner isdeleren; sne som falder øst for denne flyder mod østkysten og vise versa. Bemærk, at kun ved en isboring tæt på I kan det antages, at isen i en borekerne oprindelig faldt som sne tæt ved borestedet. Isens bevægelse er antydnet ved flydelinier (med pil); de tynde linier indikerer is af samme alder (kronologiske lag).

For at forstå nutiden må fortiden kendes! Selvfølgelig er der noget rigtigt i den sætning; men den er jo temmelig upræcis og lægger ingen begrænsninger på, hvad der menes med fortiden, lige som der heller ikke nævnes, hvad det er, der skal forstås, og hvad det er, vi skal kende.

Så lad mig springe alle de filosofiske muligheder over og udvælge temaet klimaændringer, som det vi gerne vil kende, og indskrænke fortiden til de sidste par millioner år. Begrænsningen i tid skyldes ønsket om at koncentrere forståelsen til den geologiske periode, som er kendetegnet ved den sidste istid (med flere nedisninger og varmeperioder) til forskel fra de mange millioner eller milliarder år før den sidste istid. Perioden kaldes af geologerne kvartærtiden, og vores nuværende klima tilhører denne periode.

Nogle ville måske undre sig over, hvorfor netop disse sidste par millioner år skulle være noget særligt; men det spørgsmål kan faktisk besvares ved at se på fordelingen af hav og land på Jorden! Denne fordeling er helt afgørende for, hvordan Jordens klima er. Det er ikke det eneste forhold, som bestemmer Jordens klima, men fordelingen bestemmer de vigtigste spilleregler for både klimaet og de ændringer, som kan forekomme. Den fysiske forklaring på dette er også relativt simpel: Land og hav reflekterer/absorberer solstrålingen forskelligt, og atmosfærens strålingsenergi balance er derfor bestemt af hav- og landfordelingen. Hertil kommer, at områder med stor absorption af strålingsenergi fra

solen skaber forhold, som forsøger at overføre energien til de områder, hvor energiabsorptionen er lille, f.eks. overførsel af energi fra ækvatoregnene mod polerne. Måden dette foregår på afhænger af den geografiske fordeling mellem hav og land: Golfstrømmen kan f.eks. kun eksistere, hvis der faktisk findes et Atlanterhav, hvilket ikke var tilfældet for 35 millioner år siden.

Det særlige ved de sidste par millioner års klima er, at fordelingen mellem hav og land åbnede muligheden for, at klimaet blev relativt koldt samtidig med, at det blev særdeles ustabil og begyndte at veksle mellem det, vi i dag kalder nedisningstider og varmetider. Under nedisningstiderne blev ca. 50 millioner km³ af havet overført til Indlandsis på land som f.eks. den skandinaviske iskappe; og under varmetiderne smeltede isdækket bort, og havvandstanden steg 120-140 meter.

I dag lever vi i en varmetid, som begyndte da den sidste nedisning fik sit dødsstød for 11.550 år siden, dvs. at stort set hele menneskets hurtige udviklingshistorie knytter sig til den sidste varmeperiode ud af mange gennem de sidste par millioner år. Det er derfor ikke så mærkeligt, at vi som mennesker gerne vil forstå både hvorfor klimaet ændrer sig, og hvilken indflydelse dette kan have på de samfund og kulturer, vi lever i.

For at forsøge et svar på dette spørgsmål, må vi have viden om, hvad der bestemmer klimaet; og da disse årsager til klimaets ændringer ikke kan findes kun ved at studere nutidens meteorologiske forhold, må vi se tilbage i tiden. På en måde kan

man sige, at fortidens klimaændringer og de dermed følgende virkninger på det globale miljø (ørken, vindforhold, nedbør, temperatur osv.) er klimaforskningens "laboratorieforsøg": Laboratoriet var Jorden selv og virkningerne af ændringerne påvirkede Jordens temperatur, nedbørsfordeling, skovfordeling, havstrømme, trykforhold i atmosfæren etc. Ændringerne, som skete inden for de sidste par millioner år, er derfor vigtige, men de sidste par hundrede tusinde års ændringer er af særlig vigtighed, fordi det endnu er muligt at studere dem i detaljer ved hjælp af de spor, de har efterladt.

Det er i denne sammenhæng at iskerner fra Grønland og Antarktis kan læses som et særligt detaljeret leksikon over, hvad der skete, og til dels hvorfor det skete.

Derfor er iskerner så vigtige

Det særlige ved iskerner fra Grønland og Antarktis er, at de består af, hvad man kunne kalde atmosfærens eget bundfald gennem tiderne. Bundfaldet sedimenterer i form af sne, som omdannes til gletscheris og deltager i iskappens flydning (Figur 1). Sneen der f.eks. faldt for 1.000 år siden virkede også som en slags rensemiddel, som fjernede urenheder fra atmosfæren: En sådan proces foregår til stadighed, når det regner eller sneer. Hvis sne og regn ikke havde denne virkning, ville atmosfæren, vi færdes i og indånder, være mere snavset end den værste byforureningsluft, vi i dag kan finde på kloden.

Også atmosfærens gassammensætning (ilt, kvælstof, kuldioxid og methan m.m.) indelukkes, når sneen omdannes til gletscheris: Med andre ord indeholder fortidens snefald på f.eks. Indlandsisen information om atmosfærens sammensætning. En vigtig oplysning om fortidens temperaturforhold indeholdes i sneen selv: Den isotopiske sammensætning af sneen fortæller om temperaturen på det sted, hvor sneen faldt. En anden vigtig information, som også kommer fra sneen selv, skyldes at det er muligt i en iskerne at få oplysninger om, hvor meget sne, der faldt.

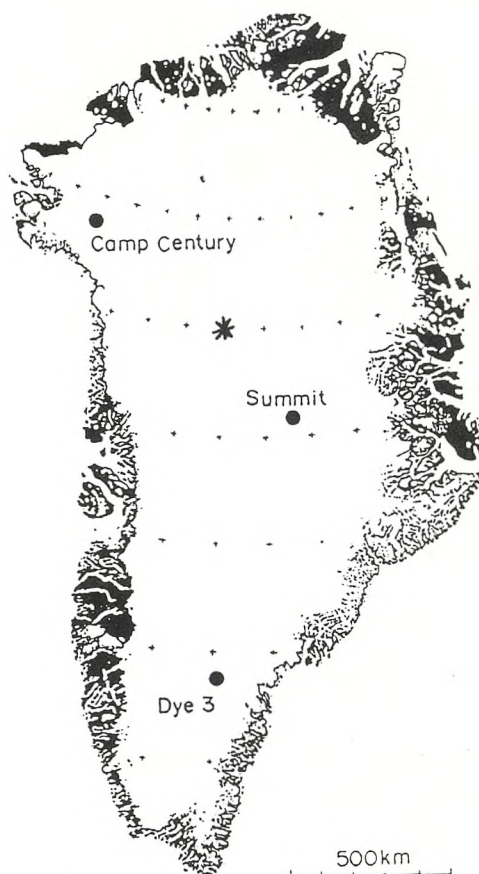
Denne direkte forbindelse mellem fortidens atmosfæriske forhold og lag i en iskerne er meget speciel i forhold til de fleste andre kilder til oplysning om fortidens klima (f.eks. havsedimenter, moselag, træringe m.m.). Der er endnu en særlig fordel ved iskerner, idet de muliggør en høj tidsopløsning tilbage i tiden, f.eks. er det muligt i nogle iskerner at studere fortidens atmosfæriske forhold næsten måned for måned flere tusinde år tilbage i tiden.

Nogle forudsætninger for at læse iskernebiblioteket

Nu er det ikke helt så let at "læse" klimainformationer f.eks. i Indlandsisen: For det første må en iskerne udbores på et passende sted (se Figur 5); for det andet må de målinger, som udføres på iskernen, være udtryk for en klimatisk information og/eller en oplysning knyttet til de årsager, som kan forårsage klimaændringer; endelig er sådanne oplysninger kun af værdi, hvis de kan

placeres i tid, dvs. iskernen skal dateres.

Ved dybdeboringer gennem Indlandsisen er det særligt vigtigt, at boringen foregår på en lokalitet, hvor ændringer af iskappens form gennem tiden får så lille indflydelse på resultaterne som muligt (se også teksten til Figur 1); det er ikke altid muligt, idet omkostningerne kan være for store. Det sidste var f.eks. tilfældet ved Dye 3 dybdeboringen (1979-1981) i sydgrønland. I øjeblikket dybdebøres der på lokaliteten NORTH GRIP (Figur 2), hvor udvælgelsen af borestedet først og fremmest skyldes ønsket om, at den nederste og ældste is er så gammel som mulig, uden at lagdelingen er forstyrret af en ujævn klippebund.



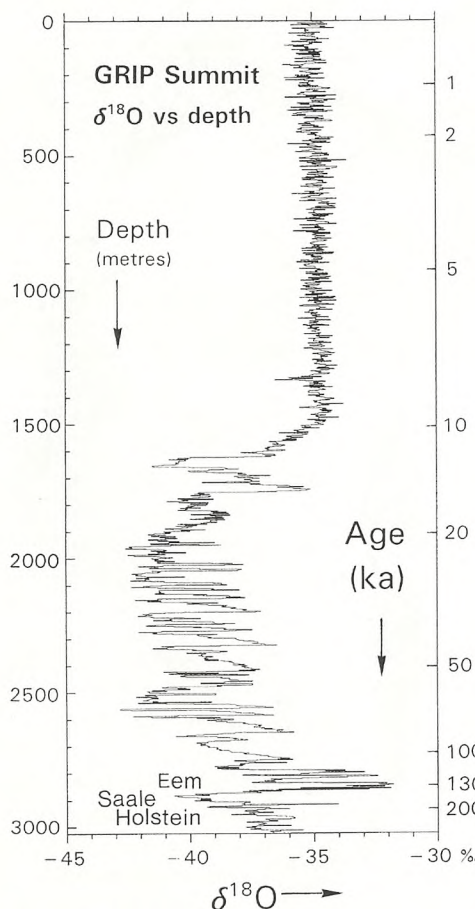
Figur 2. Tre steder hvor en iskerne er udboret gennem hele Indlandsisen. Det nuværende borested NORTH GRIP er markeret med en stjerne. NORTH GRIP-borestedet anses for det optimale sted på Indlandsisen for en udboring af meget gamle og velordnede islag; måske vil bundisen indeholde is tilbage til tiden for Grønlands nedisning for et par millioner år siden.

Tre udvalgte typer målinger på iskerner

Jeg har nedenfor valgt at beskrive tre forskellige typer målinger, som har interesse for klimaforskningen: De er isotopmålinger på isen, detektion af fortidig vulkanisme og drivhusgasserne CO₂ og CH₄ (kuldioxid og methan). Iskernerne indeholder langt flere oplysninger, men disse tre er direkte tilknyttet klimaændringer/klimaårsager.

Isotopsammensætning af isen

Vand er sammensat af to brintatomer og et iltatom; men i naturen forekommer vand i flere isotopiske former. Kemisk set er disse former stort set ens, men fysisk har de forskellige molekylvægte. På Geofysisk afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik måler vi isens isotopiske sammensætning ved hjælp af et massespektrometer, og vi koncentrerer os om H_2^{18}O og H_2^{16}O . Forholdet mellem disse forskellige former af vand kan udtrykkes ved, hvad vi kalder δ ; hvis δ er høj, er indholdet af tungt vand højt, og hvis δ er lav, er indholdet lille. Denne forskel udtrykkes i promille i forhold til en standardprøve.



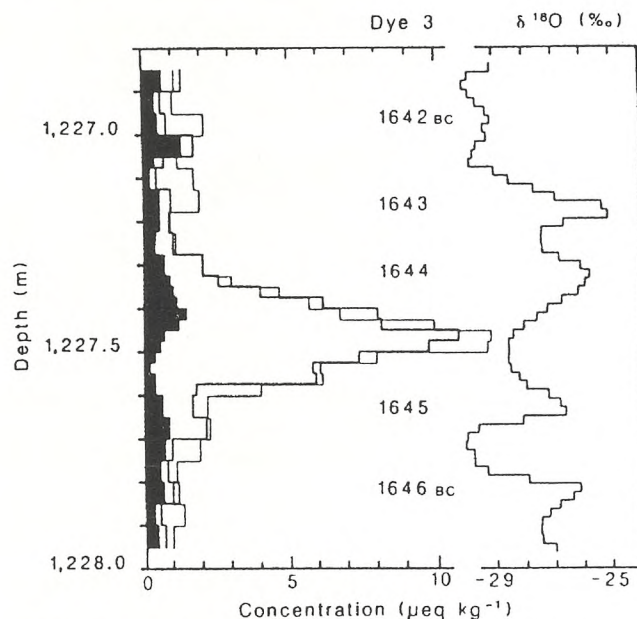
Figur 3. GRIP-klimakurven som funktion af dybden; bemærk aldrene til højre på kurven, som er udtryk for, at årlagene udtyndes med dybden på grund af isflydningen.

I slutningen af 50'erne viste den danske fysiker og senere glaciolog*, Willi Dansgaard, at der for nedbør på Indlandsisen gjaldt følgende sammenhæng:

$$\delta = 0,67 T - 13,7 \text{ (hvor } T \text{ måles i } ^\circ\text{C)}$$

Med andre ord sneen, som falder på Indlandsisen, har en isotopisk sammensætning, som fortæller, hvad temperaturen var på Indlandsisen, da sneen faldt. Helt så enkel er virkeligheden ikke; men ideen danner grundlaget for studiet af fortidens klima ved hjælp af iskerner fra Indlandsisen og Antarktis. I årene 1989-1992 gen-

nemførtes på Indlandsisens top, Summit, i 3.235 meters højde over havet den hidtil mest omfattende dybdeboring gennem Indlandsisen. Dette europæiske projekt blev kaldt GRIP (Greenland Ice core Project) og en 3.028 meter lang iskerne blev udboret af isen. På Figur 3 er vist den information om fortidens klima, som målingerne afslørede. Læg mærke til, at de sidste ca. 11.500 år ikke udviser voldsomme ændringer, mens den sidste istid var kold og samtidig udviste et utroligt uroligt og voldsomt varierende klima.



Figur 4. Et historisk interessant vulkanudbrud på den græske ø Santorini fandt sted 1646 år før Kristi fødsel (BC = Before Christ). Isens surhedsgrad og sulfatindhold steg voldsomt i årene efter udbruddet (tynde kurver; viser at det drejer sig om svovlsyre). Den sortsvartede kurve viser nitratkoncentrationen, som ikke påvirkes af vulkanudbrud.

Fortidig vulkanisme

Blandt de urenheder (støv, havsalt m.m.), som fjernes fra atmosfæren af sne og regn, er også udbrudsprodukter fra vulkaner. Vulkansk aske spiller kun en ringe rolle i klimasammenhæng, fordi askepartiklerne er relativt store og derfor hurtigt fjernes fra atmosfæren ved tyngdekraftens virkning; det gælder også, selvom asken i store mængder kan slynges 20-50 km op i atmosfæren.

Derimod vil en vulkansk produceret gas som SO_2 (svovldioxid) kun langsomt fjernes fra stratosfæren (mere end 10-20 km over havniveau). Gassen omdannes i løbet af nogle måneder til mikroskopiske partikler bestående af svovlsyre, som på grund af friktionskraften (Stokes lov) kan være år om at "falde" ud af stratosfæren. Disse partikler spreder sollyset, og nogle procent af solenergien når aldrig ned til den nederste del af atmosfæren (troposfæren), hvor bl.a. nedbørsprocesserne foregår. Partiklerne spredes derfor

*Viden om is



Figur 5. GRIP-lejren på toppen af Indlandsisen 3.235 meter over havet er her under opbygning i 1989. Bygningen til venstre blev indrettet med køkken, toiletter, opholdsrum og kommunikationscenter. Den hvide bygning blev benyttet til en mindre boring i 1989, mens selve dydboringen foregik i 1990-1992.

Software

- Windows
- Image acquisition
- Image display and data analysis
- Control language

Platforme

- Explorer
- Discover
- Aurora
- Voyager
- Universal

Åben Arkitektur

Elektronik

- ECU
- CPU
- Electrochemistry
- Networking
- Experimenter's tool kit

Hardware

- AFM
- STM
- MFM
- LFM
- EFM
- SNOM



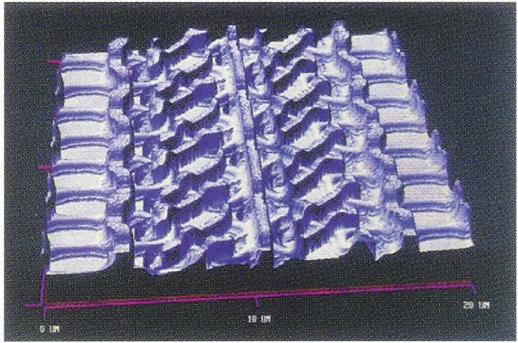
TopoMetrix er en af de førende producenter af **Scanning Probe Microscopes** i Silicon Valley, USA. **TopoMetrix** har været på forkant med udviklingen lige siden starten.

Flexibilitet er nøgleordet blandt ingeniørerne hos **TopoMetrix**. Det modulære design gør det muligt for brugeren at tilpasse software og hardware til egne nutidige og fremtidige behov. Dette indebærer en optimal udnyttelse af investeringen.

Fordele ved SPM: Mulighed for af se prøver ned til atomar størrelse. 3D-forstørrelse. Kan arbejde under vakuum, atmosfærisk tryk og i væsker. Ved SPM kræves der ingen forberedelse af prøverne.

Anvendelses områder: Biologiske undersøgelser under fysiologiske betingelser. Udvikling af mikroelektronik, elektrokemiske undersøgelser af materialer i deres oprindelige miljø. Materialeforskning, hvor der ses på fibre, ultraflade overflader, evaluering af overfladebehandling, etc.

AFM billede af multilags semi-conductor taget med TopoMetrix Voyager.



E-mail: dkbuchol@ibmmail.com

Buch & Holm A/S

Marielundvej 36 - 2730 Herlev ☎ 42 91 75 11 Fax 44 92 31 00

ud over hele Jorden eller hele halvkuglen og lægger sig som et højtliggende slør i atmosfæren.

Efter nogle år fjernes partiklerne dog via sne og regn: På Indlandsisen bliver sneen derfor ekstra sur. Den surhed kan måles ved en elektrisk målemetode langs iskernen, og "signalets" kemiske sammensætning kan måles ved andre metoder (Figur 4). På denne måde har vi fået kendskab til vulkanismens styrke, hyppighed og til dens geografiske beliggenhed ud fra målinger på iskerner. Herved har det også været muligt at påvise vulkanudbruds indvirkning på klimaet samt, at hyppig og voldsom vulkanisme var hovedårsagen til det kolde klima på f.eks. Christian den Fjerdes tid.

Drivhusgasserne CO₂ og CH₄

Isen indeholder luftbobler, som er blevet indelukket i isen under sneens omdannelse til is. Denne indelukkelsesproces er skyld i, at alderen på gassen i et stykke iskerne er yngre end den is, gassen er indelukket i; men det kan der korrigeres for. Målinger af boblernes gassammensætning viser ikke overraskende, at atmosfæren gennem 100 tusinder af år har det samme indhold af kvælstof (N₂) og ilt (O₂) som vore dages atmosfære. Derimod ændrer indholdet af drivhusgasserne CO₂ og CH₄ sig voldsomt gennem tiden. Oplysninger om fortidens atmosfæres indhold af drivhusgasser kan benyttes i forbindelse med klimamodeller m.m.

For nylig blev ændringerne i methankoncentrationen under sidste istid brugt til at vise, at klimaændringer på den nordlige og sydlige halvkugle ikke nødvendigvis var samtidige (dette gælder dog ikke istiden som sådan). En sådan oplysning er utrolig vigtig for klimaforskning

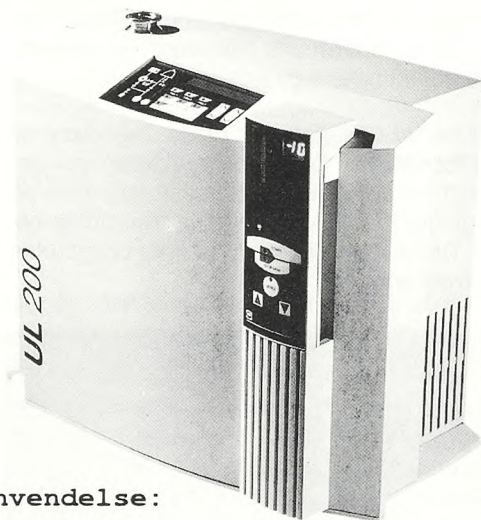
gen, fordi den fortæller noget om, hvordan vort komplicerede klimasystem er koblet geografisk, og dermed antyder de næste forskningsskridt til forståelse af klimaændringernes årsag.

Referencer:

- [1] C. U. Hammer: "Isboringer i Centralgrønland; VARV nr. 2, 1997.
- [2] C. U. Hammer: "Indlandsisen - et langsomt flydende bibliotek"; Naturens Verden: Grønlands fysiske natur, forlaget Rhodos, 1995.
- [3] C. U. Hammer m.fl.: Nature, bind 328, 1987, side 517-519.
- [4] Dansgaard m.fl.: Nature, bind 364, 1993, side 218-220.



Claus Uffe Hammer er professor ved Geofysisk Afdeling, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.



Anvendelse:

- * Kvalitetskontrol
- * Forskning og udvikling
- * Analyseudstyr
- * Høj -og ultrahøjvakuum

Læksøger på heliumbasis

Hvilke krav stilles der?

- * Hurtig
- * Nem og entydig betjening
- * Oliefri indsugning
- * Robust
- * Enkelt service
- * Prisbillig

Leybold ApS
Roskildevej 342A
2630 Tåstrup
Tlf.: 43996444
Fax: 43996544



Hans Tausen iskerne boreprojektet – specielt om datering af kernen

Mia Stampe, Kort- og Matrikelstyrelsen

Iskerneforskning er et fremragende redskab til klimaforskning, både når det gælder nyere tid som f.eks. forureningen af atmosfæren i den industrialiserede periode, og når det drejer sig om palæoklimatologi. Iskerner fra dybdeboringer på Grønland og Antarktis har beriget os med informationer om klimaet 2-300.000 år tilbage i tiden. Men også kortere iskerner fra bl.a. mindre iskapper og gletschere bidrager til vores samlede viden om klimaet og meteorologiske forhold. Denne artikel følger et mindre boreprojekt på Verdens nordligste iskappe, Hans Tausen (HT) Iskappen i Pearyland, Nordgrønland.

Borearbejdet

Klokken er 7.05, vækkeuret har lige ringet. Jeg vikler mig ud af soveposen og stikker den kolde næse udenfor teltet. Det fryser 10 grader og frisk, kølig fygesne rammer ansigtet. Jeg vågner helt!

En time efter er borearbejdet i gang. Dette er teamwork. Stykke for stykke bores en iskerne ud af iskappen. En iskerne, hvorpå der måles, markeres og registreres og som til slut pakkes omhyggeligt med henblik på transport til København og videre analyser og undersøgelser i laboratorier. Arbejdet afbrydes regelmæssigt af spisetider og uregelmæssigt af tekniske problemer ledsaget af en "Gl. Dansk tænkepause".

Pludselig er det langt over midnat, vi tvinger os selv i seng, selv om det er lyst. På 83 grader N bevæger solen sig på 24 timer bare rundt i et lille cirkel på himlen, hvis farve i øvrigt på få minutter kan skifte fra strålende blå til stormgrå og faretruende. Sådan passerer et typisk døgn med glaciologisk feltarbejde i 1.300 m højde midt på Hans Tausen Iskappen i det nordligste Grønland.

Hans Tausen Iskappen er en lille, lokal iskappe, der geografisk befinder sig på 82,5°N; 38°V i det vestlige Pearyland. Den dækker et plateau, med flere lokale højdemaxima op til mellem 1.200 og 1.300 m.o.h., og den strækker sig ca. 75 km fra nord til syd og 50 km fra øst til vest. Længs den østlige, nordlige og vestlige rand drænes iskappen af flere større gletschere, hvoraf nogle udmunder i en fjord med en kælvende front. Den sydlige grænse vender ind mod Indlandsisen og domineres af fygesne, som ofte overlever somersmeltingen [1].

Glaciologi, specielt iskerneforskning

Glaciologi - læren om is og sne - er i dag ikke så ukendt et begreb i Danmark som for bare 10 år siden. Det skyldes især en lang række populærvide-

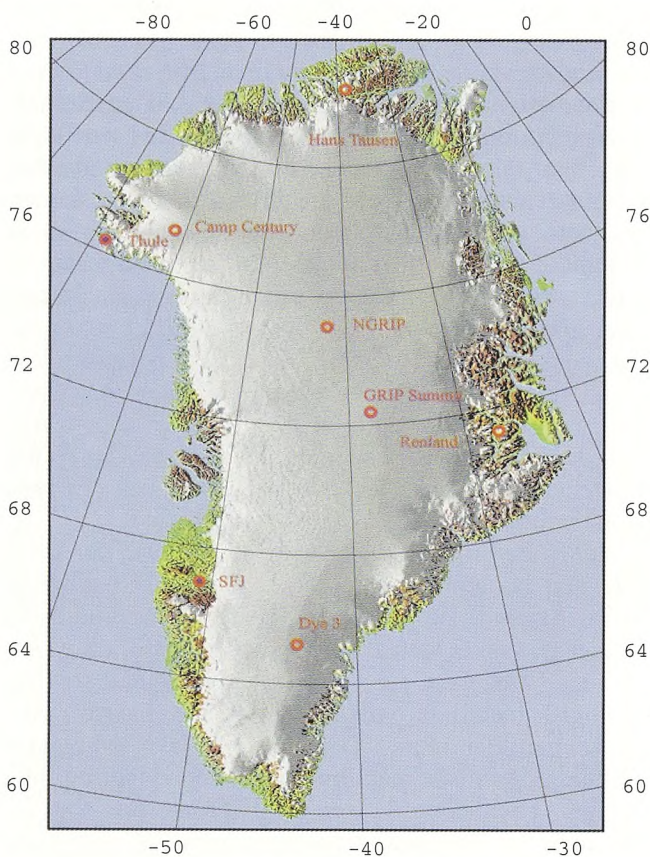
enskabelige artikler om de store dansk/internationale boreprojekter på Grønland gennem de senere år (se Figur 1). Men videnskaben glaciologi dækker et meget bredt område. Udover iskerneforskningen, som er en relativ ny disciplin, kun ca. 30 år gammel, rækker forskningsfeltet fra massebalanceundersøgelser og gletscher-fysik (klassisk glaciologi) over glacial-morfologi (landskabets nutidige udformning som følge af tidligere isdække), periglaciologi (forskning i de ikke-snedækkede områder med permafrost) til krystalstudier af is og sne, både som meteorologisk og fysisk fænomen. På alle områder spiller modellering og andet teoretisk arbejde ligeså stor rolle som det praktiske felt- og laboratoriearbejde.

Ideen bag iskerneboringer er, at alt, hvad der kommer ned fra atmosfæren, evt. indfanget af nedbøren, bliver liggende på sneens overflade, med mindre det blæser af, vaskes væk af smeltevand eller fjernes på anden vis. Det være sig vindblæst kontinentalt støv og biologisk materiale, vulkansk materiale, havsalt, kosmiske partikler m.m. Den konstant lave temperatur forhindrer kemiske reaktioner, intet forsvinder og intet tilføres. Urenhederne i isen forbliver uberørte som indikatorer for datidens atmosfæres kemiske og fysiske forhold. Teoretisk set ændres årlagenes sammensætning kun ved nedbrydning af radioaktive urenheder og ved diffusionsprocesser, men især under firnifikation (den langsomme proces, hvor sne presses sammen til is) har diffusion stor indflydelse på, hvordan opløsningen af de forskellige komponenter er bevaret i den underliggende is. I praksis vil ujævne bundforhold også kunne lave forstyrrelser i lagdelingen tæt ved bunden (se Figur 1 side 26).

Generelt vil de stadige snepålejringer opbygge en kronologisk lagdeling, således at man i en kerne, udboret i en gletscher eller iskappe, kan lave kontinuerte tidsserier på baggrund af forskellige kemiske og fysiske parametre. Iskappen er som en tyk bog, fyldt med informationer om atmosfæren og klimaet, og hvor den ældste information er gemt på sidste side. Læst fra top til bund får vi en lang, detaljeret klimahistorie.

Der findes mange analyser (som jeg ikke skal komme nærmere ind på her), iskernen kan underkastes, allervigtigst er dog først at få dateret kernen. Det giver ingen mening f.eks. at vide, at isen i 150 m dybde bærer præg af, at klimaet var varmere, hvis man ikke kender alderen af isen. Datering er alfa og omega! Eftersom mange fysiske og kemiske parametre udviser en sæsonvariation, er det muligt ved måling af disse at "tælle" årlagene ned gennem kernen. Den oftest anvendte para-

meter er forholdet mellem iltisotoperne ^{18}O og ^{16}O , som afspejler temperaturen i atmosfæren, på det tidspunkt sneen blev dannet[2].



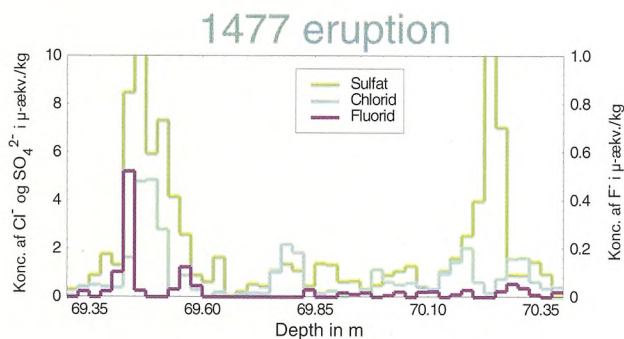
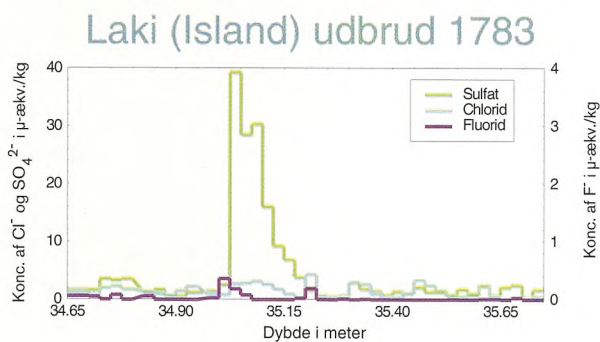
Figur 1. De vigtigste borer med dansk deltagelse på Grønland. Borestedet NORTH GRIP, der er markeret med "NGRIP", er omtalt i Claus Uffe Hammers artikel side 26. Denne artikel handler om boreren ved Hans Tausen iskap-pen.

I HT kernen kan man imidlertid ikke via sæson-svingninger i isotopforholdet tælle sig tilbage, da disse svingninger, pga. lav årlig nedbør, er udvaskede pga. diffusion. Derfor må man forsøge at datere på anden vis, f.eks. ved identifikation af sure islag forårsaget af kendte vulkanudbrud. Disse kan give nogle fixpunkter, således at området kan tilpasses med en computer-model. Med dette formål for øje udvælges til analyse en række sektioner af HT kernen, der indeholder særligt sure lag. Stykkerne er alle fra de øverste 150 m (og dermed øvre halvdel) af iskappen.

Hvordan ses et vulkanudbrud i isen?

Ud over aske udspys ved et udbrud store mængder gasser, især svovldioxid (SO_2), tildels saltsyre (HCl) og - i ganske lille omfang - flusssyre (HF) til atmosfæren, hvorfra de senere udvaskes som sur regn eller sne. På iskappen bevares syren i isen, og vi kan måle den ved

en metode kaldet Electric Conductivity Measurement (ECM)[3]. Denne går i princippet ud på at føre to højspændings-elektroder ned langs en rensed flade på iskernen (se Figur 5). Da et surt lag har højere ledningsevne, fås et kraftigt udslag i ECM kurven. Ved at sammenligne med andre allerede daterede iskerners ECM-kurve får vi en ide om, hvilket udbrud, det kunne dreje sig om. En kemisk analyse bidrager yderligere til identifikationen, idet nogle udbrud er karakteristiske ved deres indhold af kemiske komponenter og disses relative forhold. Det vulkanske signals bredde indeholder ligeledes information. Fjerntliggende udbrud kan kun ses, hvis de er så kraftige, at materialet transporteres helt op i stratosfæren, hvorfra det vil udvaskes over et længere tidsrum og dermed føre til et bredt signal i modsætning til f.eks. mange islandske udbrud, som kemisk fremstår smalle og skarpe. Et eksempel er vist i Figur 2, hvor den islandske vulkan Lakis udbrud i år 1783 AD træder tydeligt frem med en stor og skarp SO_4^{2-} top. Endelig ved vi, at de fleste af de signaler, vi ser, stammer fra udbrud på den nordlige hemisfære pga. de to hemisfæres relativt isolerede vindsystemer.



Figur 2. I 35 m dybde ses dette sulfatsignal, der stammer fra et meget svovlsur nedbør, som den Islandske vulkan Lakis udbrud i år 1783 AD gav anledning til. Som i alle andre kerner fra Grønland optræder dette udbrud som det kraftigste af alle. Det andet signal fra 69,4 m dybde ses også i alle grønlandske iskerner er her dateret til år 1477 AD. Den specifikke vulkan er ikke kendt, skønt den – pga. sit høje indhold af HCl og HF – formodes at befinde sig i relativ nærhed. Signalet i 70,25 m dybde er ikke identificeret i andre iskerner.



Figur 3. Boremester Sigfus Johnsen trækker iskernen ud af boret.

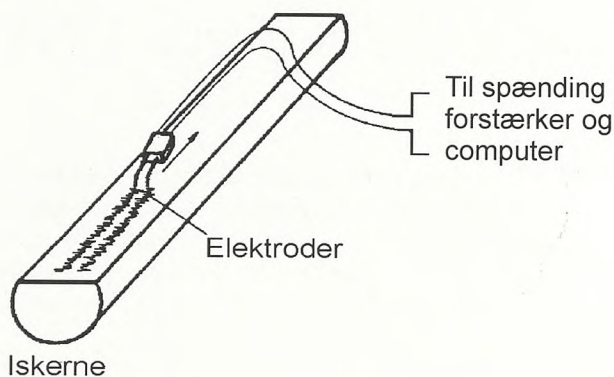


Figur 4. Forfatteren renser et stykke iskerne til kemisk analyse. Arbejdet foregår i en laminarbænk.

Hvis vi var i den situation, at vi allerede havde en datering for iskernen, ville vi kunne tidsfæste vulkanske udbrud, som man ellers ikke har nogen skriftlige historiske vidnesbyrd om. Eksempelvis bidrog studiet af den ca. 2.000 m lange kerne fra Dye 3 borestedet i Sydgrønland til at datere Elgja's udbrud på Island i år 934 AD [4].

Den kemiske analyse

Koncentrationen af kemiske urenheder i isen er meget lav – i størrelsesordenen ppb, dvs. 10^{-9} gram pr gram is! Derfor må arbejdet med og analysen af isen foregå under særligt rene forhold for ikke at kontaminere prøverne, og specielle teknikker må anvendes for at måle de lave koncentrationer præcist. Hertil er ionkromatografi en god metode. Det grundlæggende princip er skitseret i figuren på bladets bagside: Ca. 5 ml smeltet isprøve ledes gennem en kolonne – en ionbytter – der er fyldt med et aktivt stof, som binder enten anioner eller kationer. Herefter ledes en eluent (udvaskningsvæske) igennem, der løsner de enkelte ioner igen. Da de forskellige ioner har forskellige bindingsenergier, slipper de ikke alle lige nemt, men forlader kolonnen i "pakker" efter et tidsrum, der er karakteristisk for netop det pågældende stof. Koncentrationen af stofferne beregnes ved sammenligning med kendte kalibreringsprøver.



Figur 5. Måling af ledningsevne (ECM).

De kemiske stoffer, der måles, inkluderer bl.a. anionerne flourid (F^-), methylsulfon-syre (MSA), chlorid (Cl^-), nitrat (NO_3^-), sulfat (SO_4^{2-}) og kationerne natrium (Na^+), ammonium (NH_4^+), kalium (K^+), magnesium (Mg^{2+}) og calcium (Ca^{2+}). Ionerne Mg^{2+} og Ca^{2+} har hovedsagelig kontinental oprindelse, mens Na^+ , Cl^- og en del SO_4^{2-} stammer fra havet (salt) ligesom MSA, der kommer af di-methylsulfid (DMS), produceret af havalger. Da Na^+ , Cl^- og SO_4^{2-} indgår med et fast blandingsforhold i havsalt kan det ikke-marine Cl^- (fra saltsyre) og SO_4^{2-} (fra svovlsyre) bidrag beregnes. Sammen med F^- (fra flussyre) er det netop disse komponenter, som er aktuelle i vulkansk øjemed.

Bestemmelsen af udbruddene og dermed datering

Til identifikation af de vulkanske udbrud bidrager altså:

- * den samlede mængde syre,
- * forholdet mellem de enkelte syrer,
- * bredden af signalet,
- * kendskab til gennemsnitlig årlig nedbør,
- * vulkanske serier i andre iskerner.

Ved gennemarbejdning af alle til rådighed værende oplysninger fremkommer efterhånden en tidsfæstelse af de enkelte udbrud, og de dertil hørende dybder dateres. Tidsperioden af de udvalgte iskerne sektioner spænder fra år 1912 og tilbage til år 934. Disse fixpunkter er nu til rådighed i en model for iskappens udvikling. Forskellige modeller, supplerende analyser og betragtninger [5-7] daterer forsigtigt bundisen i Hans Tausen kernen til ca. 4-6.000 år. Dvs. en relativ ung iskappe, der ikke er i ligevægt, men som stadig vokser. Den er med andre ord opbygget efter Istidens afslutning, altså i vores nuværende (interglaciale) varmeperiode. Forskere er dog enige om, at der også har eksisteret en iskappe på stedet under den sidste istid, men at den er smeltet væk under det klimatiske optimum (ca. år 7000-3000 BC), hvor klimaet menes at have været ca. 2 grader varmere end i dag, for så at opbygges igen bl.a. som følge af den generelle afkøling og også pga. landhævning.

Udover kemiske analyser foretages også målinger af mængden af uopløselige partikler (støv) i de smeltede isprøver. Dette gøres med en såkaldt Coulter Counter – et instrument, som er i stand til både at tælle og størrelsesbestemme partiklerne. Den målte variation i støvkonzentrationen er uafhængig af vulkanske udbrud. Egentlige vulkanske askepartikler ses ikke i iskernen, de er enten for store og tunge eller for få til at skille sig ud fra baggrundskonzentrationen. Men overordnet set bidrager støvkonzentrationen og støvets sammensætning – ligesom alle de kemiske komponenter – til vores samlede viden om de lokale meteorologiske forhold og kilder.

Referencer:

- [1] N. Reeh (editor) (1996), Report on activities and results 1993-1995 for Hans Tausen Ice Cap Project - Glacier and Climate Change Research, North Greenland. Report from Danish Polar Center/Geological Survey of Denmark and Greenland.
- [2] W. Dansgaard (1954) The ^{18}O -abundance in fresh water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, bind 6, side 241-260.
- [3] C. U. Hammer (1980) Acidity of polar ice cores in relation to absolute dating, past volcanism and radio-echoes. *Journal of Glaciology*, bind 25, side 359-372.

- [4] C. U. Hammer (1984) Traces of Icelandic Eruptions in the Greenland Ice Sheet, *Jökull*, nr. 34, side 51-65.
- [5] Karen Nørgaard Madsen (1997), Hans Tausen Iskernen - studier af krystalstruktur, datering og smeltelagsstratigrafi, Speciale, Københavns Universitet
- [6] C.U. Hammer og Henrik Højmark Thomsen (1998) Final report for Hans Tausen Iskappe Project. Glacier and Climate Change Research, North Greenland 1993-1997, Nordic Environmental Research Program 1993-1997.
- [7] Henrik Højmark Thomsen, Dorthe Dahl Jensen, Niels Reeh m.fl. Refererer til et fælles arbejds møde om Hans Tausen Ice Cap Project på GEUS 13.-14. november 1997. En række abstracts herfra foreligger og vil senere blive trykt i et særnummer af Meddelelser om Grønland.

To gode og lettilgængelige artikler er:

W. Dansgaard og J. P. Steffensen (1992) Indlandsisen gennemboret, *Naturens Verden*, nr. 10, side 361-370.

C. U. Hammer, H. B. Clausen, W. Dansgaard, N. Gundestrup, S. J. Johnsen og N. Reeh (1978) Dating of Greenland ice cores by flow models, isotopes, volcanic debris, and continental dust, *Journal of Geophysical Research*, bind 20, nr. 82.

En af de allerbedste bøger om gletschere og iskapper er:

W. S. B. Paterson (1994) *The physics of Glaciers* (3rd edition), Pergamon, Elsevier Science Ltd., Oxford, England.



Mia Stampe blev kandidat i geofysik med speciale i glaciologi i 1997. Har siden arbejdet en tid som forskningsassistent på NBIfAFG for den glaciologiske gruppe og er p.t. ansat på Kort- og Matrikelstyrelsen.

Læs om naturens lysfænomener, nobelpriserne 1998 og dommedagen i næste nummer:

Lysfænomener i naturen

Næste nummer af *Kvant* udkommer ca. 15. december og bringer bl.a. artikler om lysfænomener i naturen: Lars Lindberg Christensen, Anne Værnholt Olsen og Mike van der Poel skriver om brydningsfænomener i Jordens atmosfære, Allan Bro Hansen skriver om regnbuens fysik og Henrik Leth fortæller om lyn og torden.

Nobelpriserne i fysik og kemi 1998

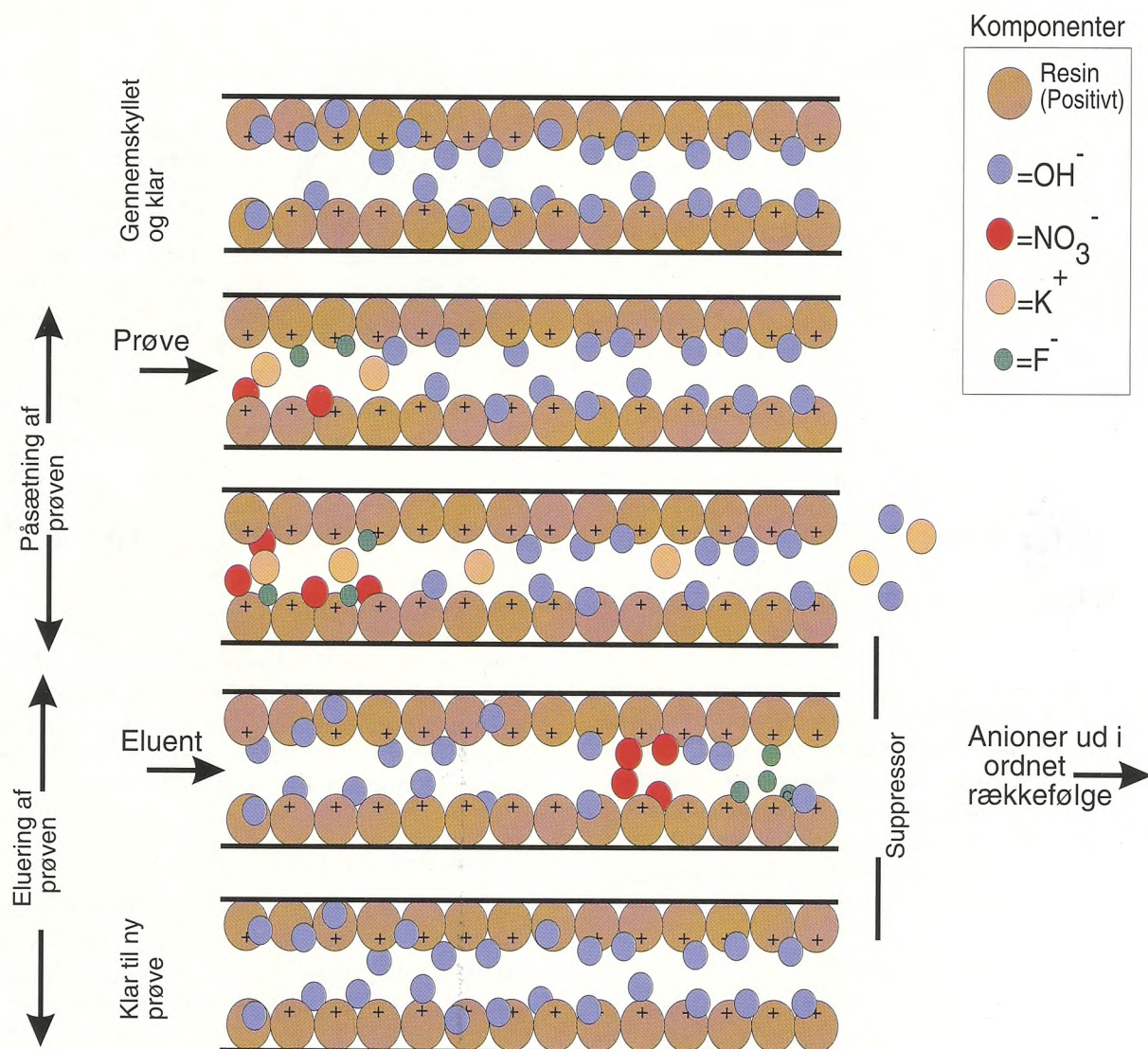
Årets nobelpriser er uddelt og bliver overrakt samtidig med at næste nummer af *Kvant* udkommer. Derfor har *Kvant* bedt Per Hedegård, Poul Erik Lindelof og Henrik Smith om at skrive om fysikprisen 1998, mens Aage E. Hansen vil skrive om nobelprisen i kemi. Interesserede læsere kan i ventetiden finde juli-nummeret af *Kvant* fra

1994 (nr. 2), hvor Per Hedegård skrev om fysikken bag årets nobelpris i artiklen "Fermioner, bosoner, anyoner og kvante Hall effekten". Per's artikel slutter med sætningen "Med lad os snakkes ved om 5 år..." - det bliver således i næste nummer af *Kvant*!

Er dommedagen nær?

Der har altid været fanatikere, som har ment, at dommedag var nær, og for en del år siden kom nogle naturvidenskabelige forskere til nøjagtig samme konklusion. Ikke ved at påvise muligheden af en altomfattende naturkatastrofe, men blot ud fra en vurdering af det totale antal mennesker, der indtil nu har levet her på Jorden. I næste nummer af *Kvant* diskuterer Thomas Døssing, Benny Lautrup og Andrew Jackson om dommedagen er nær.

Læs om Jordens klima i dette nummer:



Princippet i en ionbytter-søjle, der bruges i iskerneforskningen. I eksemplet analyseres for to forskellige anioner NO_3^- og F^- samt en kation K^+ . Eluenten (se teksten i Mia Stampes artikel på side 31) er OH^- . Denne søjle separerer kun anioner. En lignende, parallel procedure med andet søjlemateriale og anden eluent separerer forskellige kationer.