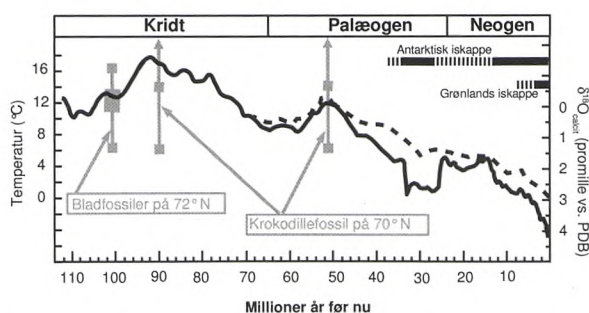


# Fortidens varme klima

Christian J. Bjerrum, Geologisk Institut, Københavns Universitet

I geologisk perspektiv er nutidens klima relativt koldt, mens det tidligere var betydeligt varmere. Spørgsmålet er, om variationen i Jordens middeltemperatur har været styret af atmosfærens indhold af kuldioxid som forudsagt af teorien om CO<sub>2</sub> som drivhusgas. Svaret på dette spørgsmål er vigtigt for at vide om vores beregninger af fremtidens klima under den øgede menneskeskabte udledning af kuldioxid er tilnærmelsesvis rigtige. Geologiske klimaindikatorer kan i den sammenhæng bruges som en prøve af klimamodellernes rigtighed. Ved Geologisk Institut og Center for Jordens Klima og Biogeokemiske Kredsløb er dette et af forsknings-emnerne, hvor vi bl.a. arbejder med at øge vores forståelse af fortidens klima for at give os bedre rammer for at beregne fremtidens klima.

Gennem den sidste million år med istider og mellemistider er der en god korrelation mellem temperatur og atmosfærens indhold af kuldioxid. Ydermere er der nogenlunde overensstemmelse mellem beregninger af istidsklimaet, foretaget med klimamodeller kalibreret til nutidens klima. Det er imidlertid ikke givet, at vores klimamodeller med alle deres parametriseringer kan bruges for en meget højere kuldioxidkoncentration eller meget højere global middeltemperatur. Det er derfor vigtigt at sammenligne modelberegninger med observationer fra tider, hvor klimaet var varmt som for 100 til 40 millioner år siden (Figur 1).



**Figur 1.** Temperatur i dybhavet og på høje breddegrader over de sidste 110 millioner år af Jordens historie. Den fuldt optrukne kurve er baseret på forholdet mellem <sup>18</sup>O og <sup>16</sup>O i kalkfossiler af bundlevende foraminiferer fra dybhavet. Den stiplede kurve er baseret på Mg/Ca målinger på de samme fossiler. I Kridttiden var dybhavstemperaturen 10-16°C, i overensstemmelse med uafhængige data fra høje breddegrader. Figuren er baseret på data fra J. Zachos et al., 2001, C. H. Lear et al., 2002 og andre artikler.

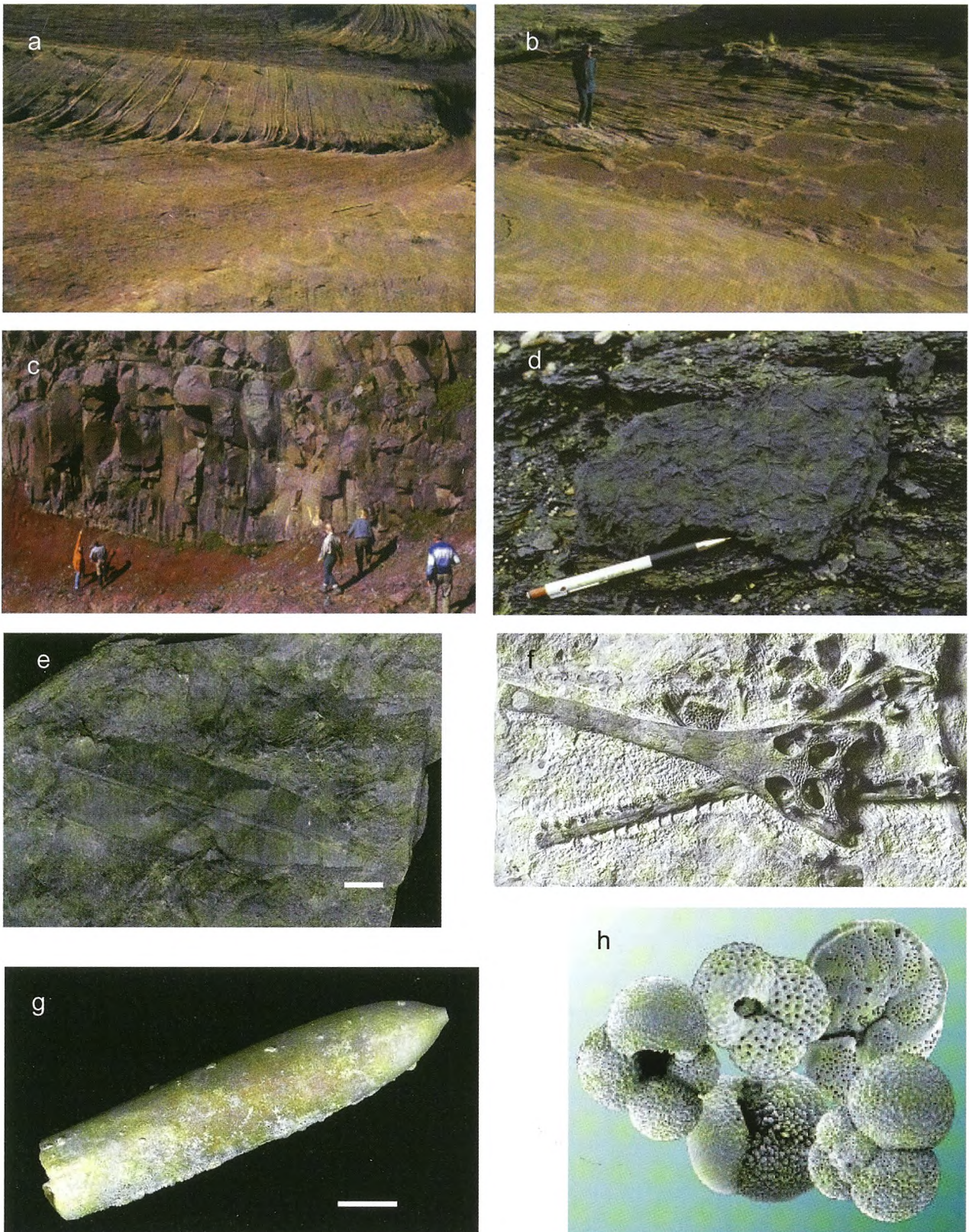
I det følgende beskrives kort udvalgte klimaindikatorer hovedsageligt fra varmere perioder i Jordens historie, som kan findes og undersøges i Danmark og det nære udland. Klimaet siden tidlig Kridt vil kort blive karakteriseret og sammenlignet med den rekonstruerede CO<sub>2</sub>-koncentration. Til slut vil resultater fra koblede ocean-atmosfæremodeller blive diskuteret og sammenstillet med klimakarakteristikken. Det viser sig, at de høje temperaturer, som de geologiske data peger på for arktiske egne, ikke kan reproducere i klimamodellerne for det vurderede CO<sub>2</sub> niveau. Dette paradoks understreger vores manglende forståelse af, hvad der styrer klimaet specielt for varme perioder inklusiv jordens fremtid.

## Klimaindikatorer

Vores undergrund er fyldt med informationer om fortidens klima i kraft af de sediment (transporteret sand, ler, organisk materiale) og fossiler, der blev aflejret og bevaret til forskellige tider. I dag er disse sediment og bjergarter blevet løftet op i forskellig grad og kan studeres i kystklinger eller råstofgrave.

Fra vores viden om klimabælter, associerede sedimentaflejringer og fossiler findes der en række kvalitative og kvantitative klimaindikatorer (Tabel 1). En mere komplet gennemgang af geologiske klimaindikatorer kan findes i f.eks. Parrish (1999).

Saltsøer og sandaflejringer fra store klitsystemer uden vegetation optræder kun i områder med meget lidt nedbør og høje temperaturer (Figur 2a,b). I modsætning hertil findes jordbundstypen laterit (med meget rød jernoxid og/eller aluminiumoxid) f.eks. kun i områder med megen nedbør, høje temperaturer og betydelige sæsonvariationer. Sådanne fossile lateritter finder man f.eks. i Vestgrønland mellem basaltbjergarter dannet af lavastrømme i tidlig Palæogen (Figur 2c). Datering af de enkelte lavastrømme viser at forvitring af basalten og dannelsen af laterit sandsynligvis ikke har taget mere end titusind år. Disse gamle jordbunde viser os, at klimaet må have været varmere og mere fugtigt end i dag, da tilsvarende laterit ikke dannes på basalterne i Island i dag, men kun i mere tropiske egne.



**Figur 2.** Geologiske klimaindikatorer. a. Snit gennem forstenet klit. De mørke kiler er sand-skredstunger på klittens læside. Sandstenene kan følges over mere end 50.000 km<sup>2</sup> og blev aflejret i en stor ørken. Tommestok er 1 m lang. b. Fossile polygoner i klitsandsten dannet pga. saltudfældning (ikke bevaret). c. Forstenet rød laterit jordbund under søjle-basalter i Vestgrønland, dannet under varme og fugtige forhold i Kridttiden. d. Kul og blade i delta-sedimenter fra Kridttiden i Vestgrønland. e. Helrandet blad fra Kridttiden i Vestgrønland. Skala er 1 cm. f. Hovedskjold og underkæbe af fossil havkrokodille fra Kridttiden, fundet i Lindham, Skåne. Underkæben er 1 m lang. g. Belemnit fra kridtet på Møn. Belemnitten sad i bagenden af et blæksprutte lignende dyr. Skala er 1 cm. h. Mikroskopiske foraminiferer (encellede 'dyr' med kalkskal). Hver skal er ca. 2/10 mm i diameter. (Fotos a-g taget af C.J. Bjerrum og H. H. Midtgaard).

**Tabel 1a. Terrestriske klimaindikatorer.**

| Terrestriske klimaindikatorer: kvalitative                                                                                                                                              |                                                                                         |                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Forstening:                                                                                                                                                                             | Nedbør (N):                                                                             | Temperatur (T):                                                                                        |
| <b>Ørken klitter.</b> Udbredelse $\geq 100 \text{ km}^2$ (Fig. 1a)                                                                                                                      | Fordampning $>>N$ ; mindre end 40 mm 0-3 måneder.                                       | $T > 5^\circ\text{C}$ i 12 mdr./år                                                                     |
| <b>Salt.</b> Inddampningskrystaller og relaterede strukturer (Fig. 1b)                                                                                                                  | Årlig middel N $\sim 310 \text{ mm}$ . Kun 1-4 måneder med $N > 40 \text{ mm/mdir}$ .   | Årlig middel T $> \sim 20^\circ\text{C}$                                                               |
| <b>Laterit.</b> Jordbund beriget i jern- og aluminiumoxid (Fig. 1c)                                                                                                                     | $N > 1200 \text{ mm/år}$ og mindre end 6 måneder har under 60 mm/mdir.                  | Årlig middel T $> 22^\circ\text{C}$ ; Stor sæson-variation (monsun)                                    |
| <b>Kul.</b> (Fig. 1d)                                                                                                                                                                   | Årlig middel N $\sim 2240 \text{ mm}$ (300-5000 mm).                                    | Hvis T $> 10^\circ\text{C}$ , må nedbør-fordampning ikke være mindre end 40mm/mdir.                    |
| <b>Træ.</b> Falske årringe                                                                                                                                                              | Tørke i vækstsæson                                                                      | Frost i vækstsæson                                                                                     |
| Terrestriske klimaindikatorer: kvantitative                                                                                                                                             |                                                                                         |                                                                                                        |
| <b>Blade.</b> Multivariat statistik på 31 bladkarakterer (takker, størrelse osv. For dækfrøede planter forklarer temperatur- og vandstress 68% af naturlig floravariabilitet. (Fig. 1e) | Årlig middel N (usikkerhed $\sim 430 \text{ mm}$ ); N i vækstsæson (usikkerhed 280 mm). | Årlig middel T (usikkerhed $\pm 2^\circ\text{C}$ ), Koldeste måneds middel T, Varmeste måneds middel T |

**Tabel 1b. Marine klimaindikatorer.**

| Marine klimaindikatorer: semi kvantitative                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Forstening:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Temperatur (T):                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Koral:</b> Fra eufotisk zone.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | $T > 20^\circ\text{C}$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <b>Krokodille:</b> (Fig. 1f)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Årlig middel $T > 15^\circ\text{C}$ ,<br>Koldeste måneds middel $T > 5^\circ\text{C}$                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| Marine klimaindikatorer: kvantitative                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Kalkskallede organismer.</b><br>Ilt-isotop forholdet i kalken ( $\delta_k$ ) opgives i promille afvigelse fra en standard;<br>$\delta = \left\{ \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{prøve}} \times \left[ \left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{standard}} \right]^{-1} - 1 \right\} \times 1000$ (Fig. 1g, 1h) | $T = \alpha(\delta_k - \delta_v) + \beta.$ $\alpha$ og $\beta$ er lidt forskellige for forskellige arter, men er typisk $\alpha \sim 4, 4^\circ\text{C/promille}$ og $\beta \sim 16, 5$ .<br>$\delta_v$ er havvands isotopsammensætning, der er afhængig af det hydrologiske kredsløb således at $\delta_v = 0, 5 \times S - 17, 3$ promille for Atlanterhavet. |

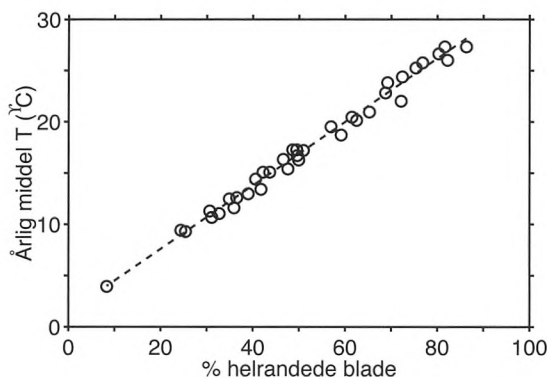
Dannelsen af kul er begrænset til områder med hyppig nedbør. Hvis temperaturen overstiger  $10^\circ\text{C}$  må der ikke være nogen længere tørke perioder. Kullag med træstammer og træstubbe fra store træer optræder i aflejringer fra Kridttiden langs vestkysten af Grønland (Figur 2d). Det viser os, at klimaet var både fugtigere og varmere end i dag. I Kridttiden lå Vestgrønland 10 grader længere mod syd end i dag, så kontinentaldrift kan delvist forklare det varmere klima. Analyser af vækstringene

i tidssvarende træstammer fra det nordlige Alaska viser, at der ingen falske årringe er, hvorfor vækstsæsonen ikke har været afbrudt af frost som det oftest sker i dag. Hvis man integrerer andre data som plantefossiler og stabile isotoper finder man, at den årlige middeltemperatur var  $15^\circ\text{C}$  og  $10^\circ$  på henholdsvis  $60^\circ\text{N}$  og  $70^\circ\text{N}$  nordlige palæobreddegrad. Det vil sige at der i Vestgrønland var et klima svarende nogenlunde til nutidens klima i det sydlige England.

Fossiler kan også bruges til at sætte tempera-

turgrænser på landkortet for den fortidige kontinentfordeling. Et eksempel er krokodiller, der i dag foretrækker vandtemperaturer mellem 25°C og 35°C. Krokodiller lever kun i områder hvor den koldeste måneds middeltemperatur ikke falder under 5°C, hvilket svarer til områder med en årlig middeltemperatur på ca. 14°C. Når vi finder en tand fra en fossil fætter til nutidens havkrokodille i tidlig Palæogen-aflejringer i Fakse Kalkbrud, kan vi derfor være ret sikre på, at havvandet må have været betydelig varmere end i dag (Fig. 2f). Fund af havkrokodiller fra Kridttiden på 70°N palæo-breddegrad er endnu mere tankevækkende.

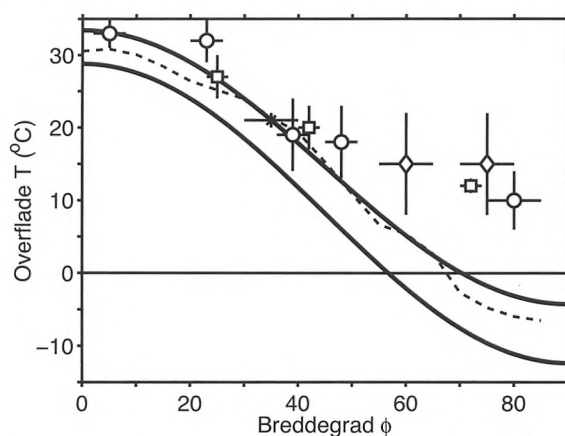
Planter der i dag vokser i tempereret klima finder man også som fossiler i Grønland (Figur 2e). Mere kvantitative observationer kan man imidlertid få ved at bruge bl.a. form og størrelse af de fossile blade fra dækfrøede planter. For en del år siden blev det empirisk vist at procentdelen af blade der er uden bladtakker (helrandede) er en funktion af den årlige middeltemperatur (Figur 3). Metoden er nu blevet bekræftet og udvidet ved at lave statistik på 31 bladkarakterer og 8 klimaparametre. Statistisk analyse af blade fra Kridttiden i f.eks. det nordlige Alaska eller Rusland viser, at den årlige middeltemperatur var 9–12°C og at den koldeste måneds middel var 5°C.



**Figur 3.** Korrelationen mellem årlig middeltemperatur og antal helrandede blade divideret med total antal blade i uforstyrrede skove i syd-øst Asien (efter J. Wolfe, 1993).

Kalkskaller fra forskellige organismer kan også analyseres kemisk for at beregne temperaturen i havvandet på den tid da kalkskallen blev dannet. Når kalk udfældes i ligevægt med havvand er der mere af isotopen  $^{18}\text{O}$  der indbygges i kalken end svarende til koncentrationen i havvand (Tabel 2). Denne fraktionering af ilt-isotoperne er afhængig af temperaturen.  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  forholdet i vand eller kalk udtrykkes som en afvigelse fra en standard og skrives  $\delta^{18}\text{O}$ . Jo højere tempera-

turen er jo mindre forskel er der i isotopforholdene. Havvandets  $\delta^{18}\text{O}_v$  er en funktion af iskapernes volumen og det hydrologiske kredsløb, således at  $\delta^{18}\text{O}_v$  tilnærmelsesvis er proportional med saliniteten. Forskellige organismer fraktionerer desuden i forskellig grad, hvorfor det er vigtigt at have levende arter for at kunne studere fraktioneringen empirisk. Belemnitter (vættelys) fra Kridt har været meget anvendt til at måle isotopforholdet (Figur 2f). Men da denne gruppe af blæksprutter uddøde for 65 millioner år siden, kan vi kun bruge dem til relative temperaturbestemmelser, såsom temperaturgradienten mellem lave og høje breddegrader. Kalkskaller fra foraminiferer (enkeltcellede organismer) som også lever i dag, er således bedre til absolut temperaturbestemmelser (Figur 2h). Nogle arter lever på bunden af havet, mens andre er planktoniske og lever i den øvre vandsøjle. Analyser af isotopforholdet i bundlevende foraminiferer fra Kridttiden viser, at temperaturen var ca. 10°–14°C på 1500 m vanddybde, efter isotopkorrektion på –1,2 promille for manglende is-kapper (Figur 1). Højere temperaturer end i dag var gældende både på høje og lave palæo-breddegrader (Figur 4).



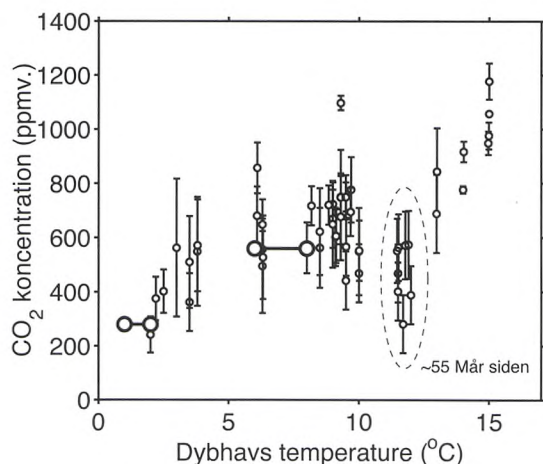
**Figur 4.** Beregnet temperaturprofil sammenlignet med temperaturrekonstruktioner baseret på geologiske data. De to fuldt optrukne kurver er fra en simpel klimamodel med 1× og 4× 280 ppmv  $\text{CO}_2$  (ppmv: parts per million by volume) (Olsen et al., i trykken). Zonalt midlet temperaturprofil fra en 3-dimensional ocean-atmosfære model med 560 ppmv  $\text{CO}_2$  er vist med stiplede kurve (fra Huber og Sloan, 2001). Temperaturrekonstruktionerne (med usikkerhed) er baseret på fossile koralrev (stjerne), bladmateriale (kvadrat), havkrokodillefossiler (diamant) og isotopforholdet i fossile planktoniske foraminiferer (cirkler) (fra bl.a. P. Skelton, 2003). Modelberegningerne underestimerer temperaturen på høje breddegrader.

Andre planktoniske foraminiferer fra 60° palæo-bredde giver umiddelbart meget høje over-

fladetemperaturer (20–28°C). En del af disse høje temperaturer skyldes at  $\delta^{18}\text{O}_w$  på høje breddegrader kan blive 2 promille lavere i tilfældet af et kollaps af den termohaline cirkulation, hvilke svarer til en overestimering af temperaturen på 8°C, som man skal tage højde for i rekonstruktioner (Stabiliteten af den termohaline cirkulation, det hydrologiske kredsløb og salinitetsændringer på høje breddegrader er beskrevet af Bendtsen, i Kvant nr. 3, 1998). For nyligt er det blevet vist empirisk, at magnesium-kalcium forholdet i foraminiferer kun er afhængig af temperaturen. Dette giver endnu en ny uafhængig mulighed for at vurdere havtemperaturen dengang organismen levede (Figur 1).

### Klimaet og CO<sub>2</sub> fra Kridttiden til i dag

Ved en samlet analyse af geologiske klimaindikatorer er der ringe tvivl om, at klimaet i Kridttiden var varmere end i dag, med en årlig middeltemperatur på ca. 10°C i det arktiske område og dybhavet, mens tropiske områder kun var ca. 5°C varmere end i dag (Figur 4). Igennem Kridt, Palæogen og Neogen aftog temperaturen i dybhavet til istids- og mellemistids-temperaturen på 1–4°C (Figur 1).



**Figur 5.** Dybhavstemperatur og atmosfærens CO<sub>2</sub>-koncentration (fra forskellige tidspunkter siden 110 millioner år før nu) (Baseret på bl.a. Zachos et al. (2001) og data fra Retallack (2001) omregnet efter Royer et al. (2001)). Beregnede dybhavstemperaturer fra en 3-dimensional ocean-atmosfære klimamodel (Huber og Sloan, 2001) er vist med cirkler forbundet med fed vandret streg. Data fra 55 millioner år gamle fossiler falder uden for tendensen hvor dybhavstemperaturen er høj for lave CO<sub>2</sub>-koncentrationer.

Hvad var så årsagen til disse bemærkelsesværdig høje temperaturer? En oplagt kandidat er atmosfærens indhold af kuldioxid, der sammen med vanddamp virker som en stærk

drivhusgas. I Kridttiden var atmosfærens CO<sub>2</sub>-koncentration ca. 4 gange så høj som i dag. Vidt forskellige metoder til at vurdere CO<sub>2</sub> har været anvendt, og midlet over længere perioder viser de alle en aftagende CO<sub>2</sub>-koncentration siden Kridttiden. På kortere tidsskala er der større afvigelser mellem CO<sub>2</sub> estimerne indbyrdes og temperaturrekonstruktioner. CO<sub>2</sub> estimer baseret på tætheden af spalteåbninger i ginkgo-blade repræsenterer geologiske øjebliksbilleder. På nuværende tidspunkt er der ikke nok bladmateriale til at rekonstruere en kontinuert temperaturhistorie for atmosfæren, der kan undersøges for korrelation med CO<sub>2</sub> estimerne. Anvender man dybhavstemperaturen, som er et mål for temperaturen på høje breddegrader, er der ikke nogen god korrelation mellem temperaturen og CO<sub>2</sub>-koncentrationen (Figur 5). Nogle af de høje eller lave CO<sub>2</sub> værdier er relateret til kortvarige og specifikke geologiske hændelser, hvor årsag-virkning ikke er endeligt fastlagt. For omkring 55 millioner år siden blev en stor mængde metan frigjort fra kontinentsoklen og forårsagede kortvarige ændringer i klimasystemet. Ser man bort fra data associeret med denne hændelse, er der en tendens til, at højere CO<sub>2</sub>-koncentrationer er associeret med høje dybhavstemperaturer. Det er bemærkelsesværdigt, at dybhavstemperaturen stiger så meget for en given stigning i CO<sub>2</sub> koncentrationen. Det har været foreslået at der også var andre styrende klima faktorer end CO<sub>2</sub> igennem jordens historie såsom metan og solaktivitet. I nærmeste fremtid vil forskere verden over kunne øge antallet af CO<sub>2</sub> estimer baseret på f.eks. fossile ginkgo-blade og temperaturestimer, således at middeltendensen over længere tidsrum kan blive klargjort.

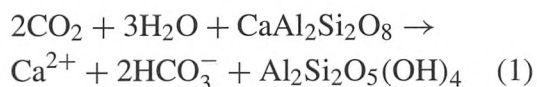
### Vekselvirkning mellem temperaturen og CO<sub>2</sub>

Er det muligt at høje CO<sub>2</sub> værdier blot er et resultat af høje temperaturer, således at det ikke er CO<sub>2</sub> som drivhusgas der resulterer i høje temperaturer på Jorden? En ældre men god diskussion af dette emne er blevet præsenteret af Robert Berner fra Yale University i Scientific American (Marts 1989). På lange geologiske tidsskalaer er mængden af CO<sub>2</sub> i ocean-atmosfære-biosfære systemet bestemt af den kemiske forvitring af silikatrige bjergarter, udfældning af karbonat i havvand og afgasning fra vulkaner. Opdagelsen af sammenhængen mellem CO<sub>2</sub> i atmosfæren og klima via drivhuseffekten tilskrives ofte Svenskeren S. Arrhenius (1896) men faktisk blev det etableret af franskmænden J. Ebelmen så tidligt som i 1845. Ebelmen og Arrhenius viste, at den kemiske

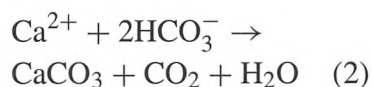
nedbrydning (forvitring) er afhængig af temperaturen, således at f.eks. en højere temperatur resulterer i mere forvitring, hvilket minsker CO<sub>2</sub>-koncentrationen. Høje CO<sub>2</sub>-koncentrationer er således ikke et passivt resultat af høje temperaturer.

### Kemisk forvitring.

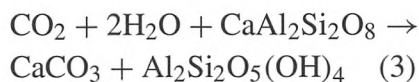
Under kemisk forvitring nedbrydes/opløses mineraler i bjergarter. Regnvand med opløst CO<sub>2</sub> fra luften er en svag syre (CO<sub>2</sub>(g) + H<sub>2</sub>O ↔ H<sup>+</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) der resulterer i kemisk forvitring af blandt andet granit, hvorved mineralerne nedbrydes til opløste ioner og/eller omdannes til nye mineraler der er stabile ved jordens overflade. F.eks. nedbrydes feldspat til opløste calcium- og bikarbonat-ioner og ler via reaktionen:



Vi kan se, at der optages CO<sub>2</sub> via forvitring. Tilsvarende ved vi fra kemien, at denne reaktion forløber hurtigere ved høje temperaturer (Arrhenius, 1896), og at processen accelereres af planter og svampe. Efter forvitring transporteres de opløste ioner med floder til havet. Havet er overmættet med hensyn til calciumkarbonat (kalk) hvorfor de opløste ioner udfældes:



Denne kemiske reaktion resulterer altså i produktion af CO<sub>2</sub>. Hvis man imidlertid lægger reaktion (1) og (2) sammen kan vi se at *netto reaktionen* er et dræn af et molekyle CO<sub>2</sub> per forvitret molekyle CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>:



Opdagelsen af denne nettosammenhæng tilskrives normalt Urey (1952) der ikke var opmærksom på, at den faktisk var blevet vist af Ebelmen i 1845.

Via pladetektonik bliver kalk og ler med tiden begravet og sidenhen bragt ned i Jordens indre, hvor høje temperaturer og højt tryk resulterer i, at reaktion (3) forløber mod venstre hvorved CO<sub>2</sub> frigives og delvis afgasses fra Jordens indre via vulkaner.

Hvis den kemiske forvitring ikke var styret af nogen vekselvirkning ville atmosfære-ocean systemet blive tømt for CO<sub>2</sub> i løbet af 300.000 år. At dette ikke er sket i Jordens historie er et resultat af vekselvirkningen mellem CO<sub>2</sub>, forvitring og temperatur. Vekselvirkning mellem CO<sub>2</sub>, kemisk forvitring og Jordens temperatur har altså på lange geologiske tidsskalaer (længere end 100.000 år) stabiliseret atmosfærens CO<sub>2</sub> indhold og Jordens temperatur. På kortere geologiske tidsskalaer kan CO<sub>2</sub>-koncentrationen nok variere med ca. 20%, på grund af variationer i havcirkulationen, næringssaltkredsløbet og iskappernes udbredelse uafhængigt af silikat-forvitringsskredsløbet.

### Klimamodeller for Jordens varme perioder

Der er i løbet af de sidste 10 år lavet en del atmosfæreberegninger af Kridt- og Palæogen-klimaet med generelle cirkulationsmodeller. I disse modeller er de fortidige grænsebetingelser som CO<sub>2</sub>-koncentration, orbital-parametre, geografi, topografi og vegetation etc. blevet specificeret. Tidligere kollega Matthew Huber, nu ved Perdue University i USA, har anvendt en af de nyeste koblede ocean-atmosfære-modeller bl.a. til at beregne temperaturen for 50 millioner år siden. Der er en rimelig overensstemmelse mellem den beregnede og observerede dybhavstemperatur for den givne CO<sub>2</sub>-koncentration (Figur 5). Imidlertid er konklusionen fra dette og andre studier med simple modeller, at de høje temperature på høje breddegrader ikke kan opnås i det koblede ocean-atmosfære system for det givne CO<sub>2</sub> niveau (Figur 4). Dette på trods af at både is-albedo og vegetation-sne-albedo effekterne er med i beregningerne. For relativt højere CO<sub>2</sub>-koncentrationer opnår man høje temperaturer ved polerne, men så overstiger temperaturene på lave breddegrader værdigrænserne fastlagt af klima-indikatorerne. I det koblede ocean-atmosfæresystem kompenserer varmetransporten i atmosfæren og oceanet hinanden. Der skal altså andre fysiske komponenter i spil for at temperaturstigningen på høje breddegrader er som den observerede. Forklaringen på høje temperaturer er endnu ikke kendt, men der er forskere der spekulerer på om det måske er skydannelsen på høje breddegrader der var årsagen. Denne skydannelse kunne være forårsaget lokalt af en øget mængde partikler i atmosfæren fra mere vegetation på høje breddegrader. Andre forskere mener de høje temperaturer skyldes ændret kosmisk stråling.

## Konsekvenser for klimaforudsigelser

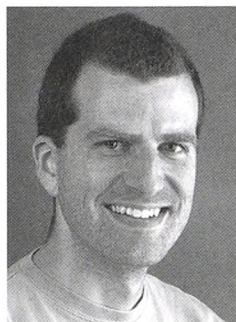
På basis af vores nuværende fysisk-baserede viden om indflydelsen af atmosfærens CO<sub>2</sub>-koncentration på Jordens middeltemperatur og fordeling, kan vi ikke forklare den fortidige varme temperaturfordeling, hvor CO<sub>2</sub>-koncentrationen var op til 4-5 gange højere end det nuværende niveau. De mest avancerede koblede ocean-atmosfære modeller undervurderer temperaturen på høje breddegrader. Der kan være tre forklaringer på dette: 1) De geologiske klima-indikatorer viser noget forkert. 2) Vores modeller mangler vigtige og/eller mere korrekte fysiske beskrivelser af f.eks. skydannelse. 3) Det var ikke alene atmosfærens CO<sub>2</sub>-koncentration, der var årsag til det varme klima. Det er ikke særligt sandsynligt at de mange forskellige og uafhængige geologiske klimaindikatorer (punkt 1), alle skulle indikere for høje temperaturer. Vigtigheden af punkt 2 og 3 er sværere at evaluere, men har markante politiske implikationer. Hvis vores modeller er kalibreret forkert eller mangler vigtige fysiske komponenter for varmere klima end i dag, viser det os, at vores klimaprognoser for fremtiden højst sandsynligt undervurderer temperaturstigningen omkring polerne. Hvis det derimod viser sig, at der var andre vigtige drivhusgasser og aerosoler, der gjorde sig gældende før istiderne, må vi søge at finde frem til hvilke og forstå om de var tilstede som en følgevirkning af varmt klima eller klimaændringer. Vores forståelse af Jordens tidligere varme klima og nøjagtigheden af klimamodeller er stadig ufuldstændig. Mere forskning er påkrævet for at løse problemerne så vi med sikkerhed kan lave klimaprognoser for fremtiden.

### Referencer:

- [1] Parrish, J. T. (1998), Interpreting Pre-Quaternary Climate from the Geologic Record, Columbia University Press.
- [2] Skelton, P. (editor) (2003), The Cretaceous World, Cambridge Univ. Press.
- [3] Zachos, J., et al. (2001), Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present, Science v. 292, s. 686-693.
- [4] Retallack, G. J. (2001), A 300-million-year record of atmospheric carbon dioxide from fossil plant cuticles, Nature v. 411, s. 287-290.
- [5] Royer, D. L., et al. (2001), Paleobotanical Evidence for Near Present-Day Levels of Atmospheric CO<sub>2</sub> During Part of the Tertiary, Science v. 292, p. 2310-2313.
- [6] Huber, M. og Sloan, L. (2001), Heat transport, deep waters, and thermal gradients: Coupled si-

mulation of an Eocene Greenhouse Climate, Geophysical Res. Let. v. 28, p. 3481-3484.

- [7] [www.ngdc.noaa.gov/paleo/education.html](http://www.ngdc.noaa.gov/paleo/education.html)
- [8] Olsen, S. M., Shaffer, G., and Bjerrum, C. J., in press. Ocean oxygen isotope constraints on mechanisms for millennial-scale climate variability. *Paleoceanography*.



Christian Bjerrum er adjunkt ved Geologisk Institut, Københavns Universitet og affilieret med DCESS. Hans faglige forskningsinteresser dækker numerisk modellering af Jordens biogeokemiske udvikling og af drivhusperioder i Jordens Historie.

**PFEIFFER**  **VACUUM**

## Forskerens

**"One-Stop-Shop"  
Massespectrometre:  
massrange op til 2048 amu**

**Alt nødvendigt tilbehør:  
Pumpesystem, In-let system,  
kammer, ventiler, skueglas,  
gennemføringer, fittings og  
tryksensorer**

**Helium læksøger QualyTest™**

**Mød os på DFS årsmøde**

Tel. 4352 3800 Fax 4352 3850  
[efa@pfeiffer-vacuum.dk](mailto:efa@pfeiffer-vacuum.dk)