

Da Jorden var en kæmpesnebold

Klima og geologi

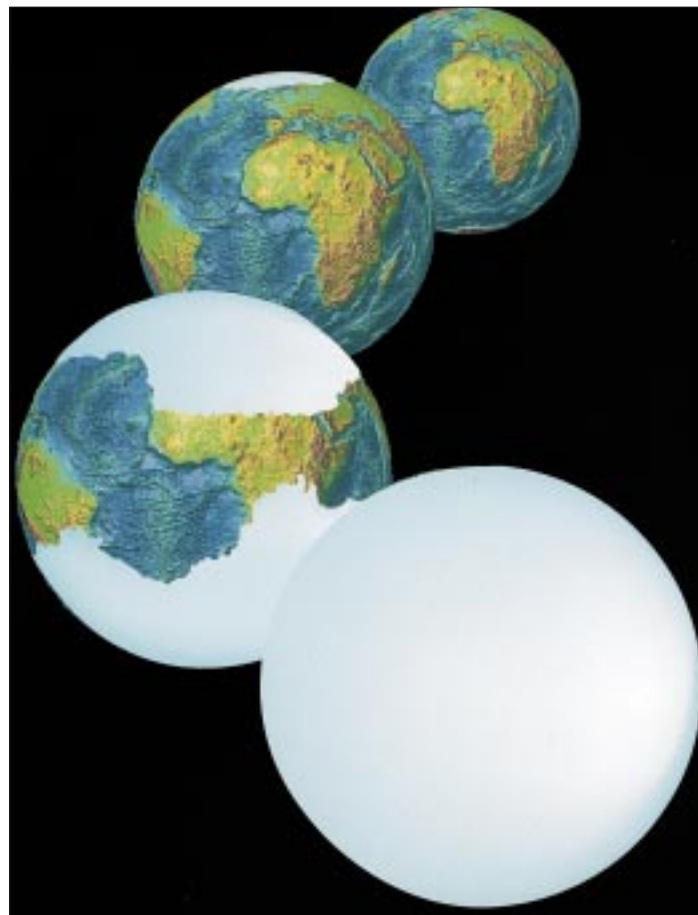
Det er vanskeligt at forestille sig Jorden som en kæmpemæssig snebold - fuldstændig dækket af is. Men der er meget, der tyder på, at det faktisk har været tilfældet indtil flere gange i forudtids tid. Måske havde disse nedisninger af Jorden stor betydning for livets udvikling.

Den 25. november sidste år besøgte den canadiske geolog Paul Hoffmann DTU, og holdt foredrag om "Snowball Earth teorien". Hoffmann er en af hovedmændene bag denne teori, som går ud på, at Jorden i en periode for mellem 730 og 580 millioner år siden gennemgik 4 perioder, hver på op til 10 millioner år, hvor den var fuldstændig dækket af et flere hundrede meter (måske flere kilometer) tykt lag is.

Ved denne periodes slutning for omkring 600 millioner år siden begyndte udviklingen af flercellede organismer for alvor at tage fart. På dette tidspunkt opstod således alle de *kropsgrundplaner*, der kan genfindes hos de fleste dyr i dag.

Denne tilsyneladende pludselige opståen af et væld af flercellede organismer kaldes for den *kambriske eksplosion*. Dette fænomen har gennem tiden undret mange forskere, især fordi der allerede inden denne begivenhed havde eksisteret (eukaryot) liv i ca. 1 milliard år.

Mysteriet om den kambriske eksplosion var således også en væsentlig grund til, at Paul Hoffmann begyndte at interessere sig for netop denne periode i Jordens historie. Og når man i



Grafik: Paul F. Hoffmann

Der findes mange indicier på, at Jorden for mere end en halv milliard år siden flere gange var fuldstændig dækket af is – som en kæmpe-snebold

dag hører Paul Hoffmann fortælle om "Snowball Earth teorien" fremstår den som en meget overbevisende teori, både hvad angår *klimaet* i en bestemt periode i jordens historie og

hvad angår *den biologiske udvikling* af de flercellede dyr.

Kæmpesnebolden - Jorden

I 1964 postulerede geologen Brian Harland fra Cambridge



Foto: Jon Chase

Paul Hoffmann

Paul Hoffmann har i over 30 år beskæftiget sig med feltgeologi bl.a. for The Geological Survey of Canada, hvor han har deltaget i den geologiske kortlægning af Nordvestcanada. Han har siden 1994 været ansat som Sturgis Hooper Professor ved Harvard University, USA.

Hoffmanns hjemmeside på Harvard:
<http://eps.harvard.edu/people/faculty/hoffman/>

Af Hans Ramløv

University, at jorden havde undergået en stor nedisning i Neoproterozoisk tid (se tids-tavle). Harland påstod, at isen dækkede alle kontinenter, og at den også fandtes ved havoverfladen i troperne. Denne påstand var baseret på, at der findes Neoproterozoiske glaciale aflejringer på stort set alle kontinenter. Men mere vigtigt: de glaciale aflejringer findes også i tilknytning til havaflejringer, som tydeligvis er dannet i tropiske miljøer. Der har altså også været is ved havoverfladen nær ækvator, da disse aflejringer blev dannet.

Når albedoen løber løbsk

Fundamentalt set er Jordens klima kontrolleret af balancen mellem den stråling, som Jorden modtager fra Solen og den stråling, som Jorden selv udsender. Når Solens stråler rammer Jorden, reflekteres en del tilbage til rummet af skyer eller Jordens overflade. Ca. 2/3 af strålingen absorberes dog af Jordens atmosfære og overflade, og dette er med til at øge temperaturen. Til gengæld udsender Jorden selv stråling ved en længere bølglængde (infrarød), og dette er med til at skabe en balance mellem ind- og udstråling, som bestemmer gennemsnits-temperaturen på Jorden.

Jo mere af Solens stråling, der reflekteres, jo lavere vil temperaturen altså blive. Jordoverfladens *albedo* er et udtryk for, hvor meget stråling, der reflekteres. En hvid overflade som sne, der har en høj albedo, reflekterer op imod 90% af den indkomne stråling, mens havområder omvendt kun reflekterer omkring 10%. Landområder ligger et sted midt imellem.

På samme tidspunkt som Harland fremsatte sine postuler, arbejdede russeren Budyko med simple energi-balance klimamodeller, der afslørede, at en "løbsk" albedo kunne medføre, at der blev dannet is helt til ækvator.

Budyko beregnede, at hvis Jordens klima blev koldere, og der derfor dannedes mere is, ville der opstå en *positiv feedback*, der ville afstedkomme en



Foto: Paul F. Hoffmann

Foto af såkaldte "drop-sten" (dropstones). Drop-sten er små kantede sten, som ligger indlejret i en meget finkornet bjergart. Stenene er smeltet ud af et isbjerg og faldet ned på havbunden, hvor de blev begravet i den bløde havbund. Denne prøve af is-transporterede dropsten stammer fra Namibia i Sydvestafrika, og er omkring 650 millioner år gammel. Mønten er 2 cm i diameter.

yderligere afkøling og mere isdannelse. Budyko beregnede yderligere, at når isdækket nåede til ca. 30°N og 30°S, hvilket svarer til, at ca. halvdelen af Jordens overflade er dækket af is, ville den positive feedback blive så kraftig, at Jordens temperatur ville styrtdykke, og Jorden ville blive helt dækket af is.

CO₂ og kontinenterne

Men hvilke forhold på den Neoproterozoiske Jord kunne få albedoen til at løbe løbsk, så Jorden endte som kæmpe snebold?

Paul Hoffmann fortalte, at der formodentligt var flere årsager.

En af de væsentlige årsager var formentlig landmassernes fordeling på Jorden på dette tidspunkt. Kontinenterne fungerer nemlig som dræn for atmosfærens indhold af drivhusgassen CO₂. Dette sker, når kulsyre forvitrer siliciumholdige bjergarter og danner kalk ved reaktionen $\text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$. Dette er med til at balancere tilførslen af CO₂ til atmosfæren fra f.eks. vulkaner.

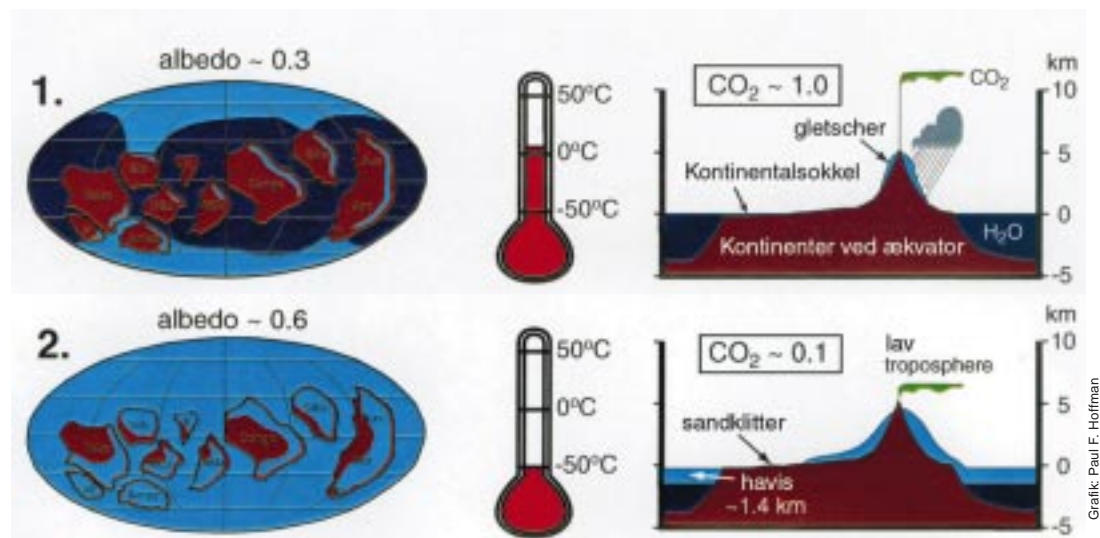
Man antager, at al landmassen for 700 mio. år siden var samlet i et såkaldt superkontinent (Rodinia). Dermed var en stor del af landmassen fjernet fra havet, og klimaet var derfor meget tørt i lighed med Centralasien i dag. Der var ikke megen nedbør og dermed ikke megen forvitring i de tørre områder.

Det antages, at den store sammenhængende landmasse brød op i slutningen af præ-kambrium (figur 1), hvilket medførte, at en større del af kontinenterne blev udsat for regnvand og dermed forvitring af jordoverfladen. Forvitring er mest intensiv i tropiske områder med megen nedbør, og alle kontinenterne lå netop i troperne i et bælte rundt om ækvator.

På grund af det øgede optag af CO₂ fra atmosfæren via forvitring begyndte temperaturen at falde.

Den totale nedisning

På grund af den lavere temperatur begyndte iskapperne ved polerne at vokse (figur 1). Når iskapperne ved polerne er store, vil et albedo-feedback i forbindelse med en lille, men hurtig, ændring af ismængden være stærkere. Dette skyldes, at når iskapperne er meget store, vil selv en lille negativ ændring i temperaturen medføre en meget stor forøgelse af iskapperens areal, idet disse strækker sig fra begge poler mod ækvator, hvor jordens omkreds er større.



Grafik: Paul F. Hoffmann

Figur 1 og 2. Figur 1-4 viser en komplet "snebold-episode" med variationerne i albedo, temperatur, CO₂, havens tykkelse og placeringen af glaciale aflejringer og "dolomit-dækker".

Da albedo-feedback-procesen først var i gang var den ikke til at stoppe, og Jorden blev fuldstændig dækket af is (figur 2). Denne totale nedfrysning af Jorden er, ifølge Paul Hoffman, sket i løbet af nogle få år eller årtier! På grund af den høje albedo og det lave CO₂-niveau skulle gennemsnitstemperaturen på Jorden have ligget på -50°C i denne periode.

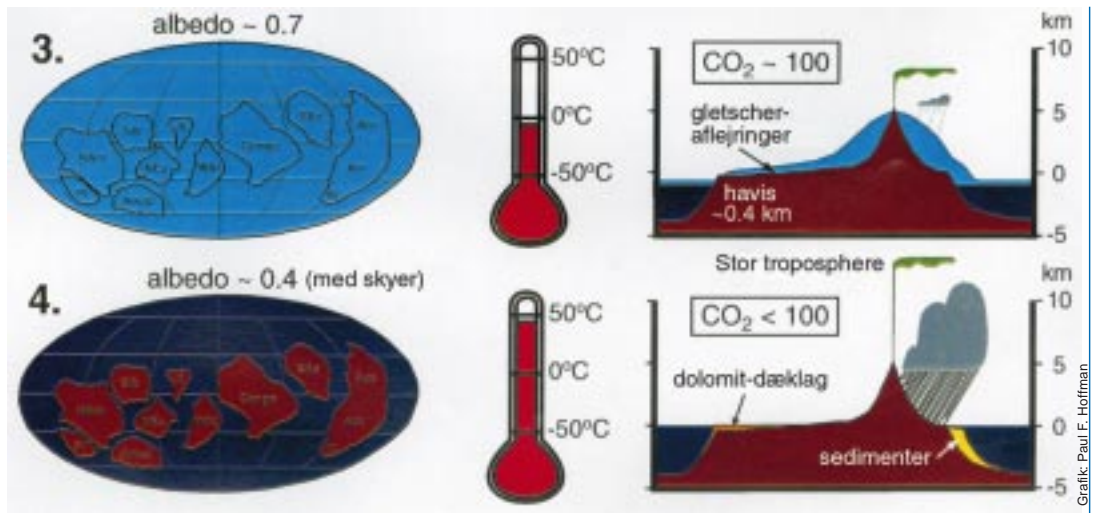
Ud af fryseren

Men, hvordan kom Jorden så ud af de omfattende nedisninger? Her foreslår Paul Hoffman følgende model: Efter at jorden blev dækket fuldstændigt af is, gik forvitringen stort set i stå, da der næsten ingen fugtighed var i atmosfæren. Der var i sagens natur heller ikke nogen fotosyntese på den isdækkede jord. Derfor ville al CO₂ i atmosfæren forblive dér og enhver tilførsel akkumuleres. Da den vulkanske aktivitet fortsatte uændret, medførte dette en stadigt stigende mængde CO₂ i atmosfæren (figur 3). Da CO₂ niveauet nåede 100.000 ppm (svarende til ca. 350 gange det vi kender i dag) drev dette Jordens overfladetemperatur op til is' smeltepunkt, på trods af den høje albedo.

Hvis man antager en vulkansk aktivitet som i dag, tog det fra millioner til tital millioner år, før CO₂-niveauet blev så højt, at havisen begyndte at smelte ved ækvator. Da først havet i troperne blev isfrit, faldt albedoen.

Nu var der igen sat en albedo-effekt i gang, men med omvendt fortegn. Denne proces var endog hurtigere, da smeltningen begyndte ved ækvator, hvor indstrålingen er størst. Isen antages derfor at være forsvundet meget hurtigt, måske inden for 100 – 200 år, idet det høje CO₂-niveau gav anledning til, at overfladetemperaturen steg meget hurtigt.

Efter at al isen var smeltet, og der stadig var et højt CO₂-niveau i atmosfæren (det tog flere årtusinder før CO₂-niveauet faldt for alvor), steg havets overfladetemperatur, i en periode, formodentligt til ca. 50°C (figur 4).



Figur 3-4 . Afslutningen af en "snebold-episode".

Der hersker en del usikkerhed om, hvor hurtigt CO₂ niveauet faldt. På grund af gletschernes malende effekt på jordskorpen og på grund af den meget høje fordampning fra havet og deraf følgende nedbør indeholdende store mængder CO₂, vil de kemiske reaktioner, der konsumerede CO₂, operere med maksimal hastighed. Og ifølge biologerne steg også fotosyntesen kraftigt lige efter nedisningsperioden, hvilket også medvirkede til at sænke CO₂ niveauet. Dette må have sænket CO₂ indholdet i atmosfæren meget hurtigt, i forhold til det man normalt finder, men det vil alligevel have taget tusinder eller titusinder af år før CO₂ niveauet nåede et normalt niveau.

Indicier på, at Jorden var en kæmpesnebold

Som nævnt er glaciære aflejringer i forbindelse med neoproterozoiske marine sedimenter et væsentligt indicium på, at Jorden var en kæmpesnebold for 700 mill. år siden. Men, hvilke andre indicier er der?

Et indicium er forekomsten af jernholdige sedimenter kaldet "Banded Iron-formation" (BIF), disse findes mest i aflejringer fra Jordens tidlige historie, men de findes også i Neoproterozoiske aflejringer. Disse aflejringer dannes, når jernionen Fe²⁺ kommer i kontakt med ilt og oxideres til Fe³⁺.

Joe Kirschvink, fra Caltech, USA (som har fundet på navnet "Snowball Earth"), antager, at

dybhavet blev iltfattigt (anoxisk) under de verdensomspændende nedisninger, fordi havet ikke var i kontakt med atmosfæren. Der blev derfor akkumuleret store mængder jern i havvandet i form af det opløselige Fe²⁺. Da nedisningsperioden endte, kom havvan-

det i kontakt med luftens ilt, og jern blev udfældet i forbindelse med aflejringer fra sedimentfyldte isbjerge.

"Dolomit-dæklag"

Den australske geolog George Williams har påvist, at Neoproterozoiske glaciære aflejringer overalt i Australien er dækket af et dæklag af dolomitkalksten, som er karbonatbjergarter opbygget af mineralet dolomit (Ca/Mg(CO₃)₂). Williams fandt, at overgangen mellem de Neoproterozoiske glaciære aflejringer og disse dolomit-dæklag er brat, uden nogle andre mellemiggende aflejringer.

Paul Hoffman har selv arbejdet en del med disse bjergarter, og det er nu påvist, at de neoproterozoiske dolomit-dæklag forekommer overalt i verden. Han forklarer deres tilstedeværelse med den ultra-drivhusatmosfære, der herskede på Jorden lige efter de Neoproterozoiske istider. Han forestiller sig, som før nævnt, at temperaturen var meget høj, og at der derfor var en meget stor fordampning fra oceanerne og en deraf følgende kraftig nedbør. Nedbøren var sur som følge af det høje indhold af CO₂ i atmosfæren, og dette gav anledning til, at store mængder kationer og bikarbonat blev ført fra kontinenterne ud i de lavvandede områder i havet.

Her neutraliserede mineralerne det sure overfladevand og var årsag til, at der blev udfældet enorme mængder af uorganisk karbonat-sediment –

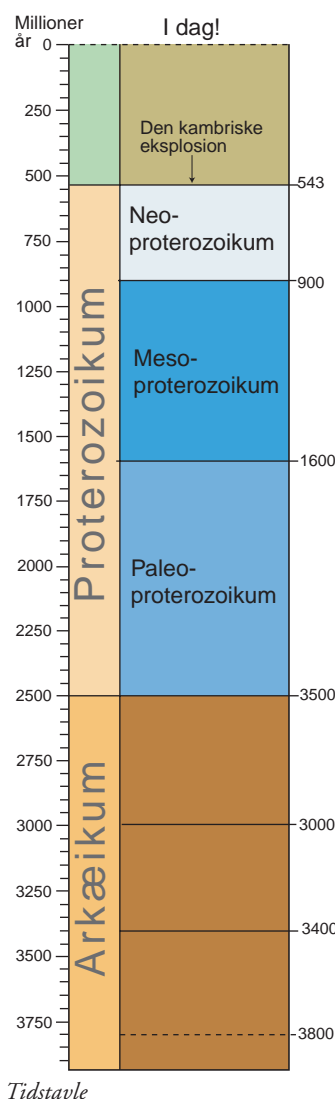




Foto: G. A. Goss

Foto af en rød jernstens-formation (BIF = Banded Iron Formation) fra Mackenzie Mountains i det nordvestlige Canada. Jernstens-formationen indeholder også en stor istransporteret "drop-sten", og er aflejret ved slutningen af en "snebolde-periode" for omkring 750 millioner år siden. Jernstens-formationen er dannet ved, at store mængder Fe^{2+} er oxideret til Fe^{3+} . Kniven er ca. 15 cm lang.

altså dolomit-dæklag, som ville lægge sig umiddelbart oven på de neoproterozoiske glaciale sedimente.

Forholdet mellem C13 og C12

Et sidste indicium er variationen i forholdet mellem de to kulstofisotoper (kulstof-12 og kulstof-13) i de neoproterozoiske sedimente. Kulstoffet, der findes i atmosfæren og i oceanet, tilføres fra vulkansk aktivitet i form af CO_2 . Forholdet mellem disse to isotoper i CO_2 fra vulkaner er 1% kulstof-13 og 99% kulstof-12.

Hvis kulstof blev fjernet fra havet udelukkende ved sedimenteringen af calciumkarbonat, ville dette calciumkarbonat have den samme fordeling af de to kulstofisotoper,

som det oprindelige vulkanske CO_2 . Men kulstof bliver også fjernet fra havvandet i form af organisk stof, hvor kulstof er 2,5% fattigere på kulstof-13 end calciumkarbonat.

Da ca. 20% af det kulstof, der tilføres oceanet i dag (og i løbet af de sidste 500 mill. år), fjernes igen som organisk stof, er moderne calciumkarbonat beriget mht. kulstof-13 med ca. 0,5% i forhold til det kulstof, der tilføres fra vulkanerne.

Paul Hoffman fortæller, at i det neoproterozoiske hav blev ca. halvdelen af kulstoffet fjernet i form af organisk kulstof. Dette ses af, at de karbonatholdige bjergarter, som findens umiddelbart under isaflejringerne, er beriget med 1,5% kulstof-13 i forhold til vulkansk kulstof.

Umiddelbart under grænsen til isaflejringerne falder kulstof-13-niveauet i karbonatbjergarterne til et niveau meget lig den vulkanske kilde. Dette skyldes angiveligt, at den organiske produktion i havet stort set gik i stå som følge af den fremadskridende nedisning.

I isaflejringerne finder man ikke noget isotop-signal, og det overliggende dolomit-dæklag viser et tilsvarende lavt kulstof-13 niveau – meget tæt på den vulkanske kilde. I de overliggende aflejringer vender forholdet mellem kulstof-12 og -13 langsomt tilbage til det normale.

Livet på kæmpesnebolden

Hvilken betydning havde de nævnte nedisningsperioder for livets udvikling? Hvordan var

livet overhovedet i stand til at overleve?

Der findes den dag i dag livsformer, der kunne tænkes at overleve en total nedisningsperiode, ligesom der på Jorden findes områder, der godt kunne tænkes at fungere som refugier for overlevelsen af liv under en sådan nedisning. Sådanne miljøer er f.eks. såkaldte hydrotermale vældområder i dybhavet, varme kilder, der ville kunne eksistere nær havoverfladen eller som ville findes tæt på isens overflade eller evt. genembryde denne. Et problem med disse er dog, at de enkelte kilder eller væld sjældent eksisterer mere end højst nogle tusinder år. De organismer, der skulle overleve i forbindelse med sådanne miljøer, skulle da

have været i stand til at lade sig transportere med enten vinden eller drive med havstrømme dybt under isen. Begge dele er lige sandsynlige.

Skjult liv

Der findes i dag en hel række dyre- og plantearter, der kan optræde i et stadium, der kaldes cryptobiose (skjult liv). Disse organismer er aktive, når der er frit vand til stede i omgivelserne, men når vandet forsvinder, overgår de til et stadium, hvor de kan tåle at udtørre helt, og hvor de ikke har nogen metabolisme. I den cryptobiote tilstand kan de transporteres med vinden over store afstande; de fleste nulevende cryptobiote dyr er ret små (nogle få millimeter og derunder) og i denne tilstand er de meget resistente over for ekstreme miljøpåvirkninger. Der findes cryptobioter, der tåler temperaturer ned til i nærheden af det absolutte nulpunkt, og da de også tåler meget høje temperaturer, som dem man f.eks. finder i varme kilder, udgør disse organismer oplagte kandidater til at overleve en total nedisning. I dag finder vi disse organismer i ørkener, polare og alpine områder f.eks. i "The Dry Valleys" i Antarktis, hvor temperaturen om vinteren kommer ned på -60°C, og hvor luftfugtigheden en stor del af året ligger på ca. 2%. Disse organismer kan ligge i den

cryptobiote tilstand i årevis og så genoptage aktiviteten, når der igen forekommer frit vand.

Livet spredes

I dybhavet findes der også i dag organismer, der overlever helt uafhængigt af sollyset ved de hydrotermale væld, der findes langs de undersøiske højderygge. Disse organismer udnytter de høje koncentrationer af kemiske forbindelser og de redox og syre-base gradienter, der findes her, i deres metabolisme. Hvorvidt de organismer, der har levet i forbindelse med de hydrotermale vældområder under glaciationerne også er dem, der har overlevet og givet ophav til en del af dyrene i den kambriske "eksplosion", er dog ret tvivlsomt.

Organismer, der overlevede en total nedisning i de ovennævnte miljøer, vil have været delvis genetisk isoleret i millioner af år. Samtidig ville de have været udsat for både temperatur- og kemiske gradienter, der favoriserede tilpasninger, som ville være velegnede til at overleve de ekstreme forhold, der opstod i tiden efter glaciationsperioden.

Paul Hoffman fortæller, at man i dag tror mest på, at organismene har overlevet i varme kilder, idet forholdene her mest ligner dem, organismene mødte lige efter nedisningsperiodens ophør. Disse

isolerede grupper af organismer skulle således have udviklet nye former inden for netop det miljø, hvor de var isoleret, og efter nedisningsperiodens ophør har disse nye livsformer spredt sig til de mange nye nicher, som var dannet under nedisningsperioden.

Nye muligheder for livet

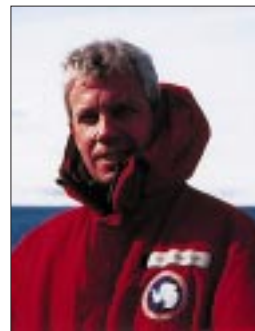
Rekoloniseringen af Jordens overflade efter en nedisningsperiode vil være foregået i et miljø, der var meget forskelligt fra det miljø, der eksisterede inden nedisningen satte ind. Også dette har medvirket til udviklingen af nye livsformer. Paul Hoffman mener, at disse totale nedisningsperioder kan have haft stor betydning for dyrelivets udvikling, idet de skabte muligheder for "genetisk reorganisation" og selektion samt udviklingen af nye kropsplaner.

Nedisningerne kan således have medvirket til at accelerere evolutionshastigheden for nogle arter og således medvirket til dannelsen af flercellede organismer, med en kropsplan, som vi kender den fra de fleste af de dyr, vi finder i dag. I følge Paul Hoffman kan nedisningerne i den Neoproterozoiske periode dermed medvirke til at forklare den "Kambriske eksplosion"

En ny kæmpesnebold?

Et spørgsmål, som presser sig på, er, hvorfor Jorden ikke siden har været totalt nediset? Paul Hoffman mener, at de væsentligste årsager til den totale nedisning i neoproterozoisk tid var den meget usædvanlige fordeling af alle kontinenterne nær ækvator, samt at Solen dengang var 6% svagere end i dag.

I de sidste millioner år har Jorden oplevet flere istider, og noget peger på, at disse er blevet stærkere fra gang til gang. Dog har deres omfang været lang fra det kritiske punkt, som ville have ført til en ny kæmpesnebold. Og en ny periode som kæmpesnebold vil Jorden i den nærmeste fremtid næppe heller komme til at opleve på grund af kontinenternes nuværende placering. ☺



Om forfatteren

Hans Ramløv er adjunkt ved Institut for Biologi og Kemi Roskilde Universitetscenter Postboks 260 4000 Roskilde

Tlf. 4674 2739

E-mail: hr@virgil.ruc.dk

(Medlem af Redaktionskomiteen for Aktuel Naturvidenskab).

Videre læsning:

Hoffman, P., Kaufman, A.J., Halverson, P. and Schrag, D.P. (1998): *A Neoproterozoic Snowball Earth*. Science. Vol. 281:1342-1346.

McMenamin, M.A.S. (1998): *The Garden of Ediacara*. Columbia University Press, N.Y.

Minik Rosing: *Ud af dybfryseren*, Politiken 5/12 - 1999.

Hjemmesider og links:

Artiklen i Scientific American med mange gode links: www.sciam.com/featarch.html Se under januar 2000

Hoffmans hjemmeside på Harvard: <http://eps.harvard.edu/people/faculty/hoffman/index.html>

Side med diskussion af teorien: <http://www-geology.ucdavis.edu/~GEL3/snowball.html>

Populær amerikansk side om geologiske tidsperioder: <http://www.ucmp.berkeley.edu/help/timeform.html>

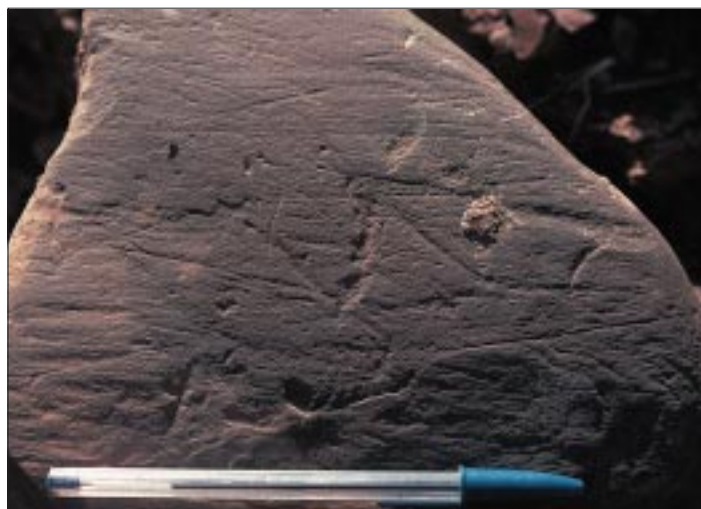


Foto: Paul F. Hoffman

Stenen på billedet stammer fra en såkaldt "tillit" (moræne), som blev dannet af materiale fra kontinentale gletschere, som dækkede Mauritanien i det vestlige Sahara for omkring 600 millioner år siden. Ridserne i stenen er såkaldte "skurestriber", som er opstået ved at stenen er blevet slæbt henover grundfjeldet af isen.

Sneboldteori:

Da jorden frøs til is

**Weekendavisen 14 oktober 2005, 4 .
sektion side 4**

Der er fundet aflejringer, som tyder på is og gletschere i troperne. Gik klima-systemet amok for 6-700 millioner år siden, så hele kloden blev dækket af is? Og i så fald - hvorfor fortsatte livet?

Af Jens Olaf Pepke Pedersen og Michael Pepke Pedersen, Center for Sol-Klima Forskning, Danmarks Rumcenter

DET kan måske være svært at forestille sig, hvordan det danske landskab så ud i de perioder under sidste istid, hvor isen bredte sig og dækkede hele landet under tykke ismasser.

Men kan man forestille sig, at isen engang har bredt sig over hele kloden - fra Nordpolen og til Sydpolen - og omdannet vores planet til en dybfryser med en gennemsnitstemperatur på 40 frostgrader, hvor alle oceanerne frøs til is i flere hundrede meters dybde?

Det er ikke desto mindre, hvad flere geologer mener, har været tilfældet endda adskillige gange i det omtrentlige tidsrum for fra 750 til 585 millioner år siden. Teorien om en global istid eller en sneboldplanet, Snowball Earth, blev fremsat allerede i starten af 1960'erne, men vakte ikke større opmærksomhed før geologerne Paul F. Hoffman og Daniel P. Schrag fra Harvard University for syv år siden underbyggede den med nye fund. Siden er diskussionen bølget frem og tilbage. Der findes nemlig ikke et enkelt afgørende bevis, men derimod en række geologiske undersøgelser, som kan bruges til enten at argumentere for eller imod teorien om den globale snebold, og det har bidraget til debatlysten. Det allerseneste bidrag til diskussionen blev bragt for nylig i tidsskriftet Science Express, hvor en gruppe forskere fra University of Southern California offentliggjorde en undersøgelse af aflejringer fra det sydøstlige Brasilien, som kunne dateres til sneboldperioden. Ved at undersøge de fossile rester af organismer i aflejringerne mener forskerne at have påvist, at organismer, som benyttede sig af fotosyntese, trivedes under

hele sneboldperioden. Da fotosyntese nødvendigvis kræver lys, så stemmer resultaterne ikke særlig godt med sneboldteorien. Organismene ville måske have overlevet under et tyndt islag, som lyset kunne skinne igennem, men ikke under flere hundrede meter havis.

IFØLGE Hoffman og Schrag begyndte sneboldperioden i den geologiske periode Neoproterozoikum, hvor Jorden i forvejen var inde i en kold periode.

Hvorfor det var så koldt er ikke afklaret, men tidsmæssigt falder det sammen med et langt tidsrum, hvor Jorden blev ramt af en forøget mængde kosmiske stråler, og det kan have reduceret temperaturen. Man forestiller sig derfor, at store flydende ismasser begyndte at brede sig ud fra polerne. Et isfrit hav optager størstedelen af Solens stråling, men fryser det til is, vil den hvide overflade reflektere det meste af strålingen. Når havisen breder sig, får det derfor den virkning, at kloden afkøles yderligere, og det sætter endnu mere fart i udbredelsen af isdækket.

På et tidspunkt er isdækket så stort, at mekanismen løber helt løbsk. Nedisningen går hurtigere og hurtigere, og i løbet af få årtier dækkes resten af oceanerne af is. Herefter synes Jordens skæbne beseglet. Fotosyntesen går i stå, oceanernes ilt bruges op, og det meste af livet i oceanerne dør. For at gøre det hele endnu værre, så kan Jorden på grund af den hvide overflade ikke komme ud af tilstanden igen og ender sine dage som en kæmpemæssig snebold.

REDNINGEN kommer dog, ifølge Paul Hoffman, fra vulkaner, som med deres udbrud gennem isdækket blandt andet udsender CO₂. Da den isdækkede overflade ikke kan optage CO₂, får vulkanerne over millioner af år efterhånden CO₂-mængden i atmosfæren til at stige til enorme koncentrationer.

På et tidspunkt bliver drivhuseffekten af CO₂-gassen så stor, at havisen begynder at smelte igen. Først bryder isen op ved troperne, og de åbne havområder optager igen solens varme. Herefter starter den samme mekanisme, som fik isdækket til at brede sig, men nu med modsat fortegn. Efterhånden som de hvide isoverflader forsvinder, optager Jorden mere og mere af

solstrålingen, og i løbet af få århundreder smelter hele isdækket.

Men processen sker så hurtigt, at Jorden slet ikke kan nå at optage de enorme CO₂-mængder, som har hobet sig op i atmosfæren under sneboldperioden. Så opvarmningen fortsætter, selv efter at isen er smeltet, og det hele ender med en ekstrem drivhusperiode, hvor havtemperaturen stiger til 50 graders varme.

Klimasystemet bevæger sig i sneboldscenariet således lige fra den ene ekstreme tilstand til den anden. Først efter flere årtusinder falder CO₂-indholdet og temperaturen igen til et mere normalt niveau.

ET...

ET af Hoffmans overbevisende argumenter er, at vi i aflejringer fra Neoproterozoikumperioden finder tegn på, at der har været is i troperne. For eksempel har han fundet store sten mellem de ellers lagdelte aflejringer, og det tolkes som et tegn på, at stenene er tabt fra smeltede gletschere eller isbjerge.

Beviset kompliceres af, at kontinenterne som bekendt flytter sig på jordskorpen, men man mener, at alle kontinenterne dengang netop lå rundt om Ækvator. Hoffman og hans medarbejdere har også målt fordelingen af tunge og lette kulstofatomer i aflejringerne. Når levende organismer optager kulstof i form af CO₂ og omdanner det til organisk materiale, optager de fortrinsvis de lette kulstofatomer. Derfor indeholder kulstof fra levende organismer færre tunge kulstofatomer end kulstof i luften og havet.

Ud fra målinger af fordelingen mellem tunge og lette kulstofatomer kan man derfor beregne størrelsen af den samlede biologiske produktion, og det viser sig, at i perioden med de glaciale aflejringer gik den biologiske produktion næsten helt i stå. Det passer med, at isdækket har bredt sig så meget, at der ikke var åbent hav tilbage. Et andet argument er, at de glaciale aflejringer overalt er dækket af et tykt lag af dolomit-kalksten. Det kan være resultatet af den ekstreme drivhusperiode, som afsluttede istiden. De høje temperaturer har givet en kraftig fordampning fra oceanerne og dermed store regnmængder. Regnvandet var surt på grund af den store CO₂-mængde i atmosfæren, og det kulshol-

dige vand førte til nedbrydning af stenarter på landjorden. Når stenene forvitredes, blev kulstoffet bundet som kalk og ført med regnvandet ud i havet. Her blev det udfældet på havbunden i store dolomit-lag lige oven på de glaciale aflejringer.

Yderligere er skellet mellem disse to aflejringer meget brat og skarpt, og det styrker teorien om, at klimaet skiftede fra den ene yderlighed til den anden i løbet af kort tid. Et tredje argument er jernholdige aflejringer. Hvis der er ilt i oceanerne, udfældes jernioner løbende, men i de iltfattige oceaner under isdækket, steg koncentrationen af opløst jern i stedet. Da istiden sluttede, og oceanerne igen kom i kontakt med atmosfæren, blev den store mængde af jern udfældet på én gang og viser sig nu som et højt jernindhold i aflejringerne.

VI mangler imidlertid en forklaring på, hvad det var, der udløste istiden. Her har man peget på, at kontinenterne før sneboldperioden sandsynligvis var samlet i ét stort superkontinent, som kaldes Rodinia. Der har altså været én samlet landmasse omgivet af et kolossalt hav, og det kan netop være forklaringen.

Som nævnt ovenfor opsuger kontinenterne CO₂ fra atmosfæren på den måde, at det CO₂-holdige regnvand forvitrer nøgne bjergarter og binder sig til kalk. Men mekanismen virker kun, hvis der er vand i atmosfæren og nedbør på landjorden. Hvis kontinenterne før sneboldperioden var samlet i ét stort sammenhængende område, har en stor del af landmasserne ligget langt fra havet og formodentlig haft et tørt klima uden megen nedbør ligesom i Centralasien i dag. Derfor har CO₂-optaget været beskedent.

Men da superkontinentet på et tidspunkt brød op i et antal mindre kontinenter, kom en stor del af landjorden nu til at ligge tættere på havet. Det gav mere nedbør på landjorden og satte fart i forvitringen, hvilket fik CO₂-koncentrationen i atmosfæren til at falde. Det reducerede drivhuseffekten og kan have været startskuddet til den kuldeperiode, der omdannede Jorden til en snebold.

MANGE livsformer uddøde under sneboldperioden, men man har også fundet fossiler af organismer, som overlevede. Hvordan kunne det lade sig gøre, hvis hele jordkloden lå

i dybfryseren i millioner af år?

Her peger tilhængerne af sneboldteorien på, at livet har kunnet søge tilflugt i varme kilder i dybhavet eller nær vulkanske områder. Men da de varme kilder måske kun eksisterer nogle tusinde år, har det været nødvendigt for disse organismer også at kunne overleve på andre måder. Måske kunne de gå i en tilstand, der kaldes cryptobiose, det såkaldt »skjulte liv«, hvor organismerne kan tåle at udtørre helt og blive udsat for ekstremt høje eller lave temperaturer. Cryptobiotiske organismer findes også i dag, og måske kunne organismerne i en dvaletilstand lade sig drive med havstrømme eller af vinden mellem de varme kilder.

Organismer, der har overlevet sneboldperioden, har i hvert fald været godt rustet til også at kunne modstå de efterfølgende høje temperaturer. For cirka 550 millioner år siden - det vil sige omkring 35 millioner år efter, at den sidste globale istid sluttede - opstod et væld af nye dyrearter i den

kambriske eksplosion (som beskrevet af Lone Frank i IDEER 23. september 2005). Det har ført til den tillokkende teori, at sneboldperioden har fungeret som en flaskehals i evolutionen, der ligefrem har drevet den **kambriske eksplosion**.

SELVOM sneboldteorien passer godt med mange af de geologiske observationer, er den også problematisk. Som nævnt i indledningen viser de nyeste forskningsresultater, at der har levet organismer, som brugte fotosyntese i de millioner af år, hvor isdækket ellers ifølge sneboldteorien skulle have lukket for sollyset.

Det kan måske forklares med, at de undersøgte aflejringer lige netop stammer fra et af de områder med varme kilder, der fungerer som et tilflugtssted for livet, men det ville være et sært tilfælde. Der har også været indvendinger mod de klimamodeller, der forklarer udbredelsen af isdækket. For eksempel beregnede Raymond Pierrehumbert fra universitetet i Chicago sidste år, at der skal ekstremt høje CO₂-værdier til for at få kloden ud af en helt isdækket tilstand. Han anslog, at der var brug for et CO₂-indhold svarende til flere tusinde gange nutidens niveau, og at det ville tage vulkanerne op imod 100 millioner år at akkumulere så meget.

Nye klimamodeller har også vist, at havisen

godt kan brede sig ned til subtropenerne, uden at udbredelsen løber løbsk. I så fald kan der godt have været isfrit i havet omkring Ækvator, og så var der heller ikke behov for de ekstreme CO₂-niveauer for at komme ud af sneboldfasen igen.

MEN hvad så med stenene, der ligger i sedimenterne? Hvordan er store gletschersten i så fald landet i tropenerne? Ja, de kan jo stadig være tabt af isbjerge, som er drevet hen over de isfrie tropeområder, de kan stamme fra iskanten eller fra gletschere på land. Geologer fra St. Andrews universitetet i Skotland fandt for et par år siden, at stenene lå så tæt, at det også kunne være et argument for, at oceanerne måtte have været isfrie i hvert fald en del af tiden hvert år.

Derfor er der foreslået en alternativ teori: Slushball Earth eller tøsne-teorien, som opererer med en forestilling om, at der stadig var is over størstedelen af kloden, men kun på land. Imens holdt havet sig isfrit omkring Ækvator. Her kunne livet overleve og den globale middeltemperatur har været nærmere 0 grader i stedet for minus 40. Efter tøsneperioden fulgte en kortere og mere moderat drivhusperiode, hvor temperaturerne ikke nåede nær så højt op som i tiden efter snebold-scenariet.

Det kræver en alternativ forklaring på dolomit-lagene, som ellers passer fint med den efterfølgende drivhusperiode, som sneboldteorien foreskriver. Her er det en mulighed, at dolomit-lagene i stedet er resultatet af metanudslip fra havbunden. Som tidligere omtalt i IDEER (26. august 2005) opsamler bakterier på havbunden metan, som bindes i metanis. Hvis man forestiller sig, at metanisen blev ustabil ved afslutningen af istiden, og metanen blev frigivet, kunne den - i fald der var ilt nok - oxideres til CO₂, der siden blev aflejret som kalk på havbunden.

Nye undersøgelser af fordelingen af lette og tunge kulstofatomer i dæklagene på aflejringer i Kina har støttet denne teori, fordi fordelingen også passer godt med den, man ville forvente efter et metanudslip.

TIL gengæld har en gruppe geologer fra universitetet i Wien i foråret været ude med en støtte til sneboldteorien. De har undersøgt fordelingen af de små mængder støv fra meteoritter, som hele tiden regner ned over Jordens overflade. Hvis Jordens over-

flade er dækket af is, lægger støvet sig oven på isen, og hvis isen pludselig smelter, vil der blive efterladt et tykkere lag støv end normalt. Et sådant tykt lag har de østrigske geologer fundet i borekerner fra kobberminer i Congo og Zambia. De har dateret laget til at stamme fra afslutningen på en istid for 635 millioner år siden, og tykkelsen af laget tyder på, at støvet er opsamlet over en istid på 12 millioner år. Situationen er derfor, at hverken tilhængerne af snebold- eller tøsne-teorien kan forklare alle observationerne ud fra deres teori. Så måske får ingen af parterne ret, fordi virkeligheden viser sig at være mere kompliceret, end hvad de simple modeller kan forklare. Men under alle omstændigheder er der tale om en meget spændende og helt usædvanlig periode i Jordens historie.

Kambrium: Biologiens big bang Weekendavisen 23 september 2005, 4 . sektion side 5

Hvordan blev primitive encellede organismer pludselig til komplekse skabninger med arme, ben og snabler? Gåden går tilbage til Darwin, men holder stadig biologerne i ånde.

Af Lone Frank

DER skete noget sært og forunderligt for en halv milliard år siden. I de godt tre milliarder år livet havde eksisteret som fænomen, havde kloden været befolket næsten udelukkende af mikroskopiske encellede organismer.

Men nu to fanden pludselig ved udviklingen. I løbet af et øjeblik - en periode på måske 20 til 70 millioner år - opstod et væld af revolutionerende nye former. Ikke alene var der tale om flercellede væsner, men om væsner med kompliceret kropslig arkitektur. Organismer som viste tydelig forskel på for og bag, som havde lemmer og specialiserede organer. Faktisk opstod grundmodellerne til næsten samtlige de livsformer, man i dag henregner til dyreriget, Animalia, og kun meget lidt nyt er kommet til siden da.

Mange har kaldt det biologiens svar på Big

Bang. Mere officielt er revolutionen kendt som den **kambriske eksplosion**, fordi den skete i overgangen til den geologiske periode, der kaldes kambrium. Hvad der egentlig skete, er en af livsvidenskabens helt store gåder. Ganske vist har de seneste par årtier givet bedre forståelse og nye muligheder for at kigge evolutionen i kortene, men diskussionen koger stadig på højt blus.

»Ja, er du rigtig klog!« siger lektor ved Zoologisk Museum, marinzoolog Danny Eiby-Jacobsen. »Jeg er netop hjemkommet fra en konference i Kina, hvor bølgerne gik højt. Det er slet ikke afklaret, hvor lang tid den eksplosive udvikling tog, og der er flere teorier om, hvad årsagerne var.«

DISKUSSIONEN går helt tilbage til hr. Charles Darwin selv. I sin teori om udvikling gennem variation og naturlig udvælgelse, holdt han altid på, at der var tale om graderet evolution. Al biologisk udvikling skete med små gradvise forandringer, som efterhånden med tidens fylde gav ophav til radikalt forskellige livsformer.

Men der var et lille problem med fossilrækken. Af det man havde gravet frem af undergrunden, var det nemlig tydeligt, at stort set alle de tidligste stamformer dukkede op i de geologiske lag fra det tidlige kambrium. Der var ingen tidligere spor og altså ingen spor af de mere primitive former, som måtte være der.

Vennen og biologen T. H. Huxley forsøgte at overtale Darwin til at forlade sin ide om gradualisme. Den var ikke essentiel for selve princippet om naturlig udvælgelse og kunne jo ikke rigtig passe med den forhåndenværende evidens. Udviklingen kunne vel foregå i spring, foreslog Huxley. Men den gamle holdt fast ved sit og blev til sin død ved med at argumentere for, at geologiske undersøgelser nok skulle vise sig at løse gåden. Bare man gravede omhyggeligt nok, ville der dukke fossiler af tidligere, primitive livsformer op.

DET er da også sket. Man har indirekte tegn på liv to milliarder år tilbage, og de første fossilerede bakterier er omkring en milliard år gamle. Lige før overgangen til kambrium, for omkring 610 millioner år siden, har man de første fossile spor af Metazoa - flercellede dyr. Men det er livsformer, som ikke har nogen plads i de nuværende dyregrupper, og som i høj grad lignede hinanden på tværs af arter.

»Men Darwin fik ikke ret. I dag ved vi, at evolutionen ikke foregår jævnt glidende, men typisk sker i større eller mindre spring,« siger Eibye-Jacobsen og medgiver, at det var noget af et tigerspring, der fandt sted i kambrium. Fundene fra denne periode, især de cirka 530 milliarder år gamle aflejringer i den canadiske Burgess Shale, viser, at kambrium gav ophav til en hidtil ukendt biologisk spredning.

Faktisk opstod mere end to tredjedele af de 37 grundlæggende forskellige typer kropsarkitektur, man kender i dag, svarende til de nuværende 37 dyrerækker. Et eksempel på en række er arthropoderne, altså leddyrerne, som omfatter insekter, krebsdyr og spindlere som blandt andet edderkopper. En anden velkendt række er bløddyrerne med muslinger, snegle og blæksprutter, og i rækken chordata, som omfatter alle dyr med en form for rygmarv, finder man i den ene ende de små gennemsigtige søpunge og i den anden mennesket.

»Men det var mere end diversifikation. Og så graden af kompleksitet steg kolossalt. Organismer fik helt nye træk - særlige væv, der adskilte sig fra hinanden, egentlige organer med specialiseret funktion og lemmer som ben, antenner og den slags.«

HVOR kom kompleksiteten fra? Det var længe en hård nød at knække, men det hjalp gevaldigt, da man i løbet af 1980'erne og de tidlige 1990'ere fik tilstrækkelig teknologisk kunnen til at kigge genetikken efter i sømmene. Den afgørende forskel på encellede og primitive flercellede organismer på den ene side og komplekse flercellede organismer på den anden er differentiering. Det vil sige, at de forskellige celler udvikler sig væk fra den oprindelige urtilstand, som findes i det befrugtede æg, og antager forskellige identiteter. Nogle bliver til tarmbeklædning, andre får plads i et øje eller en leverlap, og atter andre udvikler sig til elektrisk aktive nerveceller. De deler alle den samme arvemasse, men identiteten kommer an på hvilke af de tusindvis af gener, der får lov at udfolde sig i cellen. Betragter man fosterudviklingen, ligner forvandlingen af celler til færdigt individ mest af alt en mirakuløs proces. En perfekt dirigeret symfoni, hvis dirigent man ikke kan få øje på. Samtlige individets celler må imidlertid have klar besked om, hvad de skal udvikle sig til, hvordan de skal gøre det

skridt for skridt, og hvornår de forskellige skridt skal tages. Her kommer dirigenten ind i form af gener, der regulerer.

Der findes en særlig gruppe gener, som hjælper med at stimulere eller dæmpe aktiviteten af andre gener. Dermed styrer de i praksis, hvordan cellen ser ud, og hvad den producerer af proteiner. En af de betydelige opdagelser i udviklingsbiologien op gennem 1990'erne var, at de overordnede gener, som kontrollerer og styrer udviklingen på fosterstadiet, er bemærkelsesværdigt ens på tværs af dyreriget.

»Det er her, vi kommer ind på de særlige homeobox-gener,« siger Danny Eibye-Jacobsen. Der er tale om en klasse af gener, som indbyrdes er i familie på tværs af dyreriget. Rent strukturelt indeholder de alle en lille fælles sekvens af DNA-byggesten, og funktionelt er de fælles om at virke som en slags udviklingsmæssige kontakter. Tidligt i udviklingen bestemmer de så at sige fosterets verdenshjørner - Homeobox-gener går i aktion og definerer, hvad der er op og ned og for og bag på fosteret. Senere i udviklingen går de ind og sørger for, at der bliver lavet et hoved netop dér, hvor hovedet skal være, og blokerer for hovedudvikling alle andre steder. Endnu senere opdeler de organismen i segmenter og sætter gang i dannelsen af lemmer - insektben, finner eller menneskearme - på de rigtige steder. Tilsvarende står der Homeobox-gener bag udvikling af øjne, antenner og andet avanceret sanseudstyr. Antallet af Homeobox-gener varierer stærkt mellem de forskellige dyrerækker. De primitive havsvampe kan fremvise et enkelt, mens leddyr har otte og pattedyr er helt oppe på 38 af de særlige regulerende gener. Men deres funktion er forbavsende ens. Så ens at man kan tage de to gener, som kontrollerer øjenudvikling i henholdsvis mus og insekter, bytte dem om og stadig se den korrekte udvikling i begge dyr.

»HOMEBOX-generne var en af de helt store opdagelser, når vi taler om den **kambriske eksplosion**,« siger Eibye-Jacobsen. »Men i dag kan vi se, at de ikke er hele historien. Genetiske undersøgelser viser, at disse gener må være opstået før den **kambriske eksplosion**, og at potentialet for at udvikle kompleksitet var til stede allerede i de tidlige flercellede dyr.« De prekambriske flercellede dyr havde

imidlertid ikke for og bag og op og ned og da slet ikke segmenter og arme eller ben. Men hvad udløste så det store potentiale? »Der sker formentlig flere ting. For det første ved vi fra geologiske analyser, at indholdet af ilt i miljøet stiger kraftigt i overgangen til kambrium. Det betyder, at de organismer, som på dette tidspunkt har fundet ud af, hvordan man dels beskytter sig mod iltens giftvirkning, dels ligefrem kan udnytte ilt til at danne energi, har en fordel. Et energistofskifte, som kører på ilt, er nemlig otte-ti gange mere effektivt end et stofstifte uden ilt.«

Der er også indicier for en gunstig masseudryddelse for omkring 550 milliarder år siden. Den såkaldte Snowball earth teori beskriver, hvordan hele eller i hvert fald det meste af kloden i prekambrium var særdeles kold, og sedimenter i blandt andet Oman tyder på, at livsformer gik under i massevis. Nærmest som en parallel til den langt senere udryddelse af dinosaurerne. På samme måde som dinosaurernes sortie gav plads for blandt andet udvikling af pattedyrene, kan man forestille sig, at der efter den kolde prekambriske periode var både ilt og masser af ledige økologiske nicher at indtage.

»Angående nicher ser man også, at dyrene ved overgangen til kambrium udvikler hårde kropsdele. Med skaller og skeletter er der mulighed for at udvikle større individer, som til gengæld kan leve af mindre dyr og indtage nye nicher,« forklarer Eibye-Jacobsen

Han understreger dog, at intet så at sige endnu er hugget i sten. Der er tale om teorier, som forskerne stadig strides lystigt om, og som meget vel kan vise sig at skulle både modificeres og kombineres. Ikke desto mindre er der stor optimisme i feltet, fordi man i dag har et decideret geologisk vindue til den **kambriske eksplosion**. Det handler om, at man i starten af 1980'erne gjorde et stort fund i Chengjiang i Kina, hvor der viste sig fossilspækkede sedimenter fra det tidlige kambrium omkring 550 milliarder år siden.

»Det vil sige, at vi direkte kan sammenligne faunaen fra Burgess Shale med faunaen i Chengjiang og se udviklingen i de 15-20 milliarder år, der er imellem. De kinesiske fund er slet, slet ikke fuldt udgravede endnu, og de fleste regner med, at der vil

komme afgørende ny indsigt, efterhånden som de bliver det,« siger Danny Eibye-Jacobsen. Indtil videre glæder han sig over, at der heldigvis ligger årtiers forskning og debat, før man kommer så langt.