

Da Jorden var en kæmpesnebold

Klima og geologi

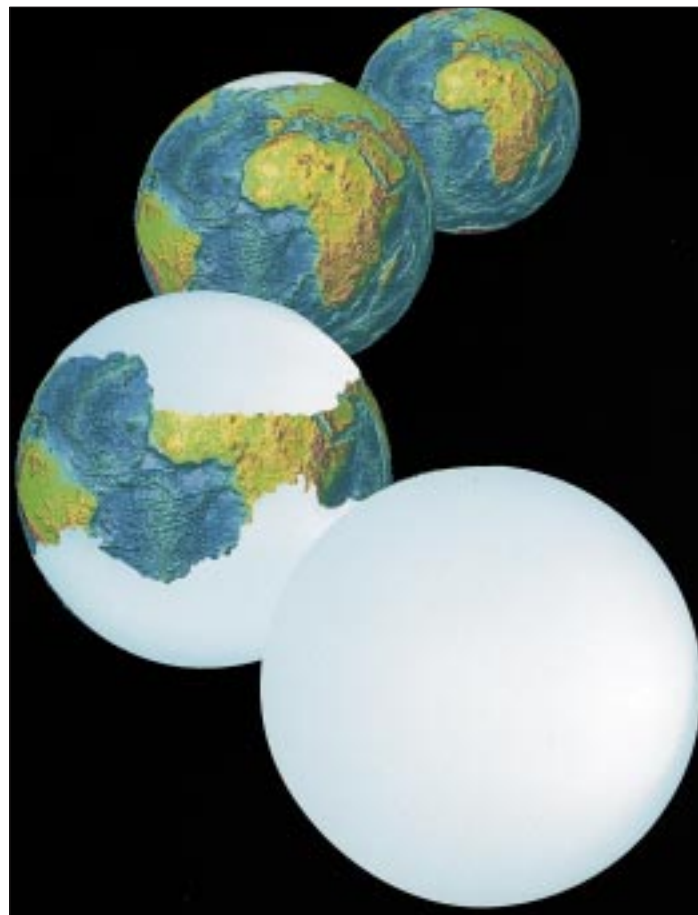
Det er vanskeligt at forestille sig Jorden som en kæmpemæssig snebold - fuldstændig dækket af is. Men der er meget, der tyder på, at det faktisk har været tilfældet indtil flere gange i forudtids tid. Måske havde disse nedisninger af Jorden stor betydning for livets udvikling.

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 forvitret 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.

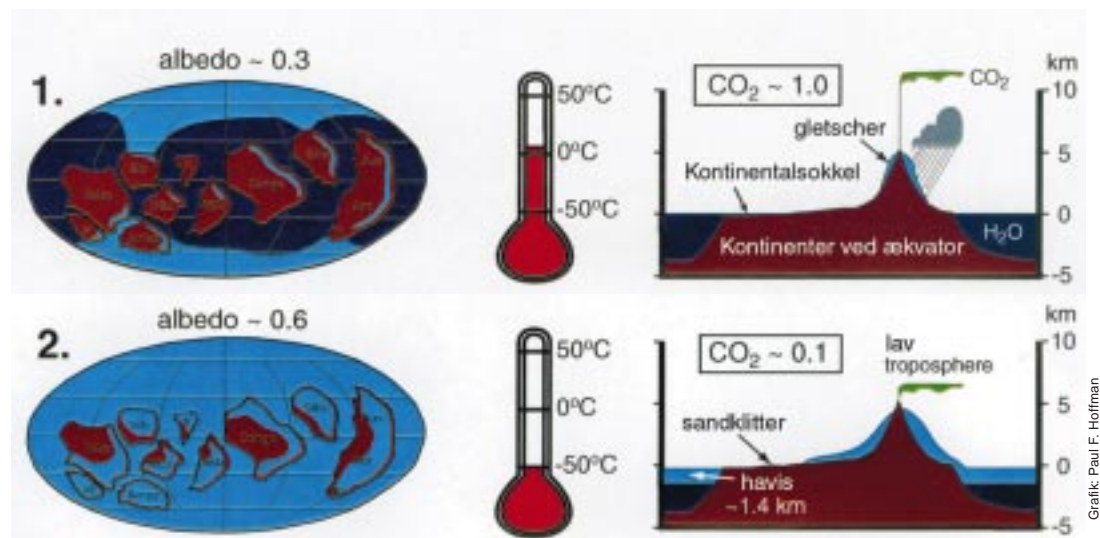
Man antager, at al landmassen for 700 mio. år siden var samlet i et såkaldt superkontinent (Rodinia). Dermed var en stor del af landmassen fjernet fra havet, og klimaet var derfor meget tørt i lighed med Centralasien i dag. Der var ikke megen nedbør og dermed ikke megen forvitring i de tørre områder.

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, havisens 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.

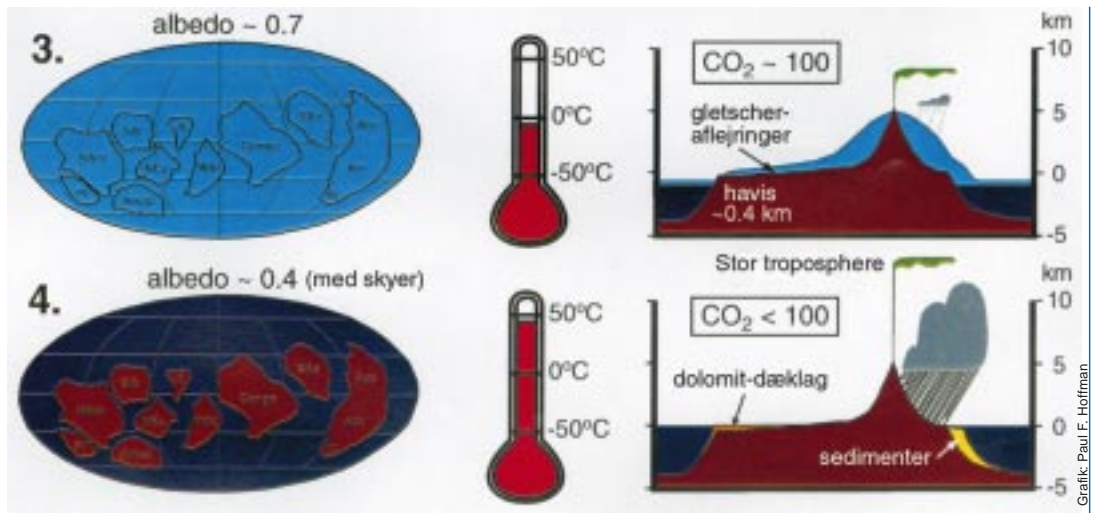
Ud af fryseren

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 tals 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 –

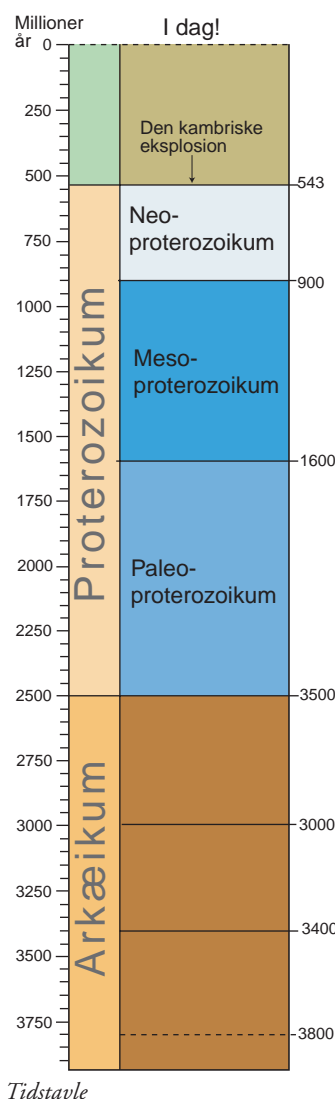




Foto: G. A. Goss

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>

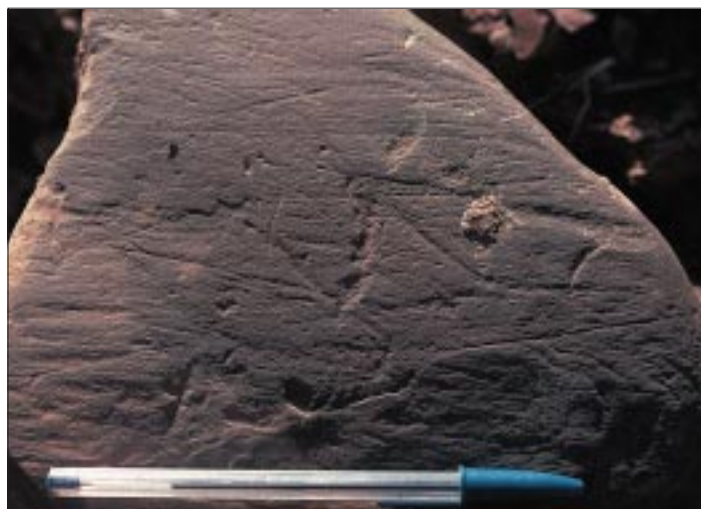


Foto: Paul F. Hoffman

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.