

Livet, Solen og landet – jagten på Jordens tidligste liv

Af Minik Rosing, Statens Naturhistoriske Museum

Livet har udviklet sig på Jorden i mere end 3.700 millioner år. De ældste spor af livet findes i sedimenter fra Isua i Vestgrønland og viser, at livet allerede på det tidspunkt var forholdvis avanceret, og sandsynligvis istand til at benytte solenergi til fotosyntese. Fotosyntese gør organismer i stand til at gribe in i Jordens geokemiske kredsløb og derved påvirke Jordens geologiske udvikling. Der er gode argumenter for, at dannelsen af Jordens kontinenter er en konsekvens af udviklingen af fotosyntese i Jordens tidlige mikrobielle økosystemer.

Solsystemets dannelse

Solsystemets dannedes gennem en forholdsvis kortvarig serie af begivenheder for omkring 4,5 milliarder år siden. Indenfor 100 millioner år efter Solsystemets fødsel var Jorden, Månen, vore søsterplaneter og deres måner dannet. Det oprindelige inventar af grundstoffer var destilleret i temperaturgradienten mellem den varme Sol og det kolde rum, således at gasser og andre letfordampelige stoffer først kondenserede og klumpede sig sammen til planeter i den ydre del af Solsystemet. De tungere og mindre flyvske stoffer dannede metal og faste bjergarter, som hovedsagelig består af metaloxider. Disse stoffer dominerer planeterne i den indre del af Solsystemet. Materiale som ikke allerede var indfanget af de store planeter vedblev med at falde ind mod Solen gennem hundreder af millioner år, når det blev påvirket af varierende grader af resonans og dissonans mellem planeternes tyngdefelter. Denne transport forgår endnu og er årsagen til at vi stadig modtager en betragtelig mængde meteoritter i dag. I forhold til planeternes samlede masser er processen dog uden betydning i dag. I Solsystemets første halve milliard år var effekten imidlertid væsentlig større end nu. Forskellige grundstoffer, som er sjældne i jordskorpen, så som guld, og platin, og formentlig også størstedelen af oceanernes vand kom til Jorden gennem disse sene nedfald. En bred vifte af geokemiske og isotopgeokemiske forhold tyder på, at oceanerne opnåede deres nuværende omfang for ca. 4.400 millioner år siden.

Arrene på Månens overflade skyldes sådanne sene meteornedslag. Man mener at have nogenlunde styr på kronologien af nedslag på Månen, fordi man kan datere nogle små glaskugler der dannes under nedslagene, og som nu udgør en stor del af støvet på månens overflade. Ved at datere tilstrækkeligt mange mikroskopiske glaskugler fra månestøvet, kan man få et indtryk af intensiteten af meteornedslag som funktion af tiden. For at gøre en lang historie kort, mener man at nedslagsintensiteten på Månen, og derfor også på Jorden, er aftaget eksponentielt gennem Solsystemets historie, men at der har været perioder med særlige konstellationer af planeternes tyngdefelter hvor nedslagene (fra asteroider eller brudstykker heraf) har været væsentligt intensiveret. En sådan periode indtraf fra 4.100-3.700 millioner år siden. Meteornedslag frem til afslutningen af dette "Late Heavy Bombardement" kan gentagne

gange have steriliseret Jordens overflade på grund af den varmenergi nedslagene frigav.

Båndet jernmalm på Grønland

I 1960'erne foretog geologer fra Kryolitselskabet Øresund målinger af de vestgrønlandske bjergarters magnetiske egenskaber, ved hjælp af flybårne magnetometre. Denne aeromagnetiske metode er et effektivt værktøj i eftersøgningen af malme. Ved randen af indlandsisen ca. 150 km NØ for Nuuk fandt man en markant positiv anomali, og sendte et hold geologer ud for at se hvad den skyldtes. Det viste sig, at et klippeparti der skød sig ind i Indlandsisen som et næs, består af en stribet bjergart opbygget af vekslende lag af det sorte jernoxid-mineral magnetit og kridhvid kvarts. Denne specielle bjergart, der går under navnet båndet jernmalm, er dannet ved kemisk aflejring i havet og kendes kun fra meget gamle aflejringer.



Figur 1. Isua, ved kanten til Grønlands Indlandsis.

Et forbjerg hedder "Isua" på grønlandsk og sedimenter og andre bjergarter, der er dannet direkte på jordoverfladen, hedder supracrustler (supra = på, crust = overflade). Altså blev komplekset kendt som Isua supracrustalerne. I 1973 daterede Stephen Moorbath fra Oxford University en serie prøver fra Isua og opdagede at bjergarterne var ca. 3.770 millioner år gamle. Isua supracrustalerne var dermed langt ældre end nogen anden bjergart der var kendt på Jorden, og de viste at Jorden havde oceaner allerede på dette tidlige tidspunkt. Da Grønlands Geologiske Undersøgelse gennemførte kortlægningen af Isua i 1970'erne mente de fleste

forskere at Jordens have var kommet til forholdsvis sent og, at man nok ikke kunne finde bjergarter meget ældre end et par milliarder år på Jorden. Isua åbnede altså et nyt og uventet vindue til Jordens allertidligste og endnu ukendte historie. De havaflejrede sedimenter viste samtidig at flydende vand – en af de væsentligste betingelser for liv på Jorden allerede var til stede for 3.700 millioner år siden. Det første spæde forskningskapløb om at finde de ældste spor efter liv på Jorden var i gang. Tænk hvis Isua rummede information om de urgamle miljøer hvori livet opstod! Her var måske selve livets vugge.



Figur 2. Borekerner med båndet jernmalm som består af vekslende lag af kvarts og magnetit.

Biologisk kulstof sætter spor i aflejringerne

I 1979 forslod den tyske geokemiker Manfred Schidlowski, at man kunne benytte kulstofisotoper til at belyse de levende organismers indflydelse på Jordens kulstofkredsløb. Kulstoffet på Jorden har et nogenlunde velkendt forhold mellem isotoperne ^{13}C og ^{12}C som antages at have været næsten uændret siden Jordens dannelse. Hvis vi analyserer de forskellige reservoirer som kulstoffet indgår i, viser det sig imidlertid, at de stort set alle sammen afviger fra Jordens gennemsnit. Marine organismers kalkskaller har en sammensætning som er ca. 5 promille beriget i ^{13}C i forhold til Jordens gennemsnit, men afviger kun en lille smule fra sammensætningen af det opløste kuldioxid i havvand. Det kulstof som farver skifer sort, og som stammer fra de bløde organiske dele af marine alger og bakterier, afviger derimod kraftigt fra gennemsnittet. Det er omkring 20 promille *forarmet*, dvs. fattigere, i ^{13}C sammenlignet med Jordens gennemsnit. Schidlowski påpegede, at hele denne opsplitning af Jordens kulstofbudget i diskrete reservoirer med forskellig isotopsammensætning, skyldes et enkelt enzym, ribolose-1,5-difosfat carboxylase-decarboxylase forkortet RuBisCo. Det er det mest udbredte protein på Jorden i dag, og er ansvarligt for optagelse af kulstof fra kuldioxid under dannelsen af organisk materiale i levende organismer. Denne proces forløber lidt mere villigt med ^{12}C end med ^{13}C , og derfor har organisk stof et underskud af ^{13}C . Hvis en tilstrækkelig stor del af Jordens kulstof bliver optaget af levende organismer og omdannet til organisk materiale,

vil atmosfærens og havets CO_2 gradvist blive beriget i det ^{13}C som blev fravalgt under dannelsen af det organiske stof. Schidlowski påpegede altså, at selv uden at have adgang til egentlige fossiler, burde man kunne konstatere omfanget af biologisk aktivitet på Jorden ved f.eks. at analysere marine kalksten. Hvis de er beriget i ^{13}C viser det, at levende organismer, gennem deres stofskifte, havde forrykket isotopsammensætningen i hele Jordens overflademiljø, da aflejringen fandt sted. Schidlowski analyserede en serie prøver fra Isua og påviste et spænd i isotopsammensætningen mellem svagt ^{13}C berigede kalksten og ^{13}C forarmet grafit, som kunne repræsentere forkullet organisk materiale. Noget kunne tyde på, at der var liv på Jorden da Isua-sedimenterne blev aflejret.

Under den fortsatte udforskning af Isua i 1980'erne og 1990'erne blev det klart, at selv om mange af bjergarterne i Isua oprindeligt var dannet som sedimenter eller ved vulkanske udbrud under havet, så var deres geologiske historie meget kompleks. 3.800 millioner år er ganske lang tid, og gennem alle disse mange år har det segment af Jordens skorpe som nu ligger blottet ved Isua oplevet lidt af hvert. Bjergarterne er gentagne gange blevet opvarmet og deformerede under tektoniske begivenheder. I den forbindelse har fluider, som hovedsagelig bestod af vand og CO_2 , gennemstrømmet bjergarterne ved temperaturer omkring 450-500 °C. Disse opløsninger har dels møbleret om på de kemiske komponenter internt i Isua komplekset og dels skabt forbindelse til yngre geologiske aflejringer i de omkringliggende fjeldmassiver. En given bjergart fra Isua rummer altså strukturer, kemiske komponenter og isotopforhold som er resultater af 3.800 millioner års geologiske begivenheder. Det viste sig, at de bjergarter Schidlowski havde studeret, for nogles vedkommende var resultater af meget yngre processer og for andres vedkommende var deres geologi så kompliceret, at det var umuligt at udrede hvilke parametre der var resultater af processer i Jordens tidligste hav, og hvilke der stammede fra senere geologiske forstyrrelser. Derved smuldrede de ellers en overgang så lovende tegn på liv fra Jordens ældste aflejringer.

Jagten på de ældste bevarede sedimenter

Min egen forskning i Isua havde fokuseret på at beskrive de sekundære processer som havde omdannet de oprindelige bjergarter. Målet var, at identificere de mindst omdannede bjergarter og, forhåbentlig, blive i stand til at filtrere effekten af de sekundære processer fra. Herved kunne man opnå et mere klart billede af klimaet og sammensætningen af havet og atmosfæren på den unge Jord. Isuas bjergarter kunne måske sige noget om de betingelser livet var opstået under, eller som havde rådet under livets tidligste udvikling. Under mit feltarbejde havde jeg fundet et lille isoleret område inden for supracrustalerne som stort set havde udgået deformation, og hvor man stadig kunne se fine sedimentstrukturer bevaret i bjergarterne. Her var en mulighed for at få et blik ind i en fjern og ellers helt utilgængelig fortidsverden.



Figur 3. Klippeparti med sedimentære lag, som på grund af tektoniske bevægelser er blevet tippet, så de nu hælder kraftigt. De tykke grå lag er dannet af mudderlaviner som er rutsjet ned af undersøiske skrånninger. De sorte lag er kulstofholdige skifere, som indeholder de tidligste spor af liv på Jorden.

Kulstof fra biologisk aktivitet

Mikroskopiske undersøgelser af de gamle sedimenter viste at skifere, som oprindeligt var aflejret som ler på oceanbunden, indeholdt en stor mængde kulstof i form af mikroskopiske grafitpartikler. Ved at studere kulstofets fordeling i skiferen var det muligt at vise, at kulstof udgjorde en del af det oprindelige sediment og ikke er introduceret i forbindelse med senere forstyrrelser. Isotopanalyser hos Bjørn Buchart på Geologisk Institut viste at kulstoffet havde den karakteristiske mangel på ^{13}C som kendetegner organisk materiale. De mikroskopiske kulstofpartikler var resterne efter det tidligste liv på Jorden.

Det faktum at Isua-skiferen er kulsort skyldes at op mod 1 % af bjergarten består af kulstof, der oprindeligt er sunket til bunds i havet i form af døde organismer. Det må betyde at livet allerede levede i de frie vandmasser og, at den biologiske produktivitet i havet var stor nok til at døde organismer kunne udgøre en betydelig del af sedimentationen. Ved fortsatte studier af de gamle sedimenter i samarbejde med Robert Frei fandt vi geokemiske tegn på at havet rummede diskrete vandmasser med forskelligt iltindhold. Sammen med den store biologiske produktivitet kunne dette bedst forklares ved, at de organismer der levede i havet på Isua-tid, allerede var i stand til at udnytte Solens lys til

fotosyntese i en eller anden form. Fotosyntese fører til en iltning af organismernes umiddelbare miljø, og er en afgørende betingelse for en stor biologisk produktivitet. Livet var altså allerede forholdsvis avanceret og må derfor have haft en lang udviklingshistorie bag sig, da de sorte skifre fra Isua blev aflejret for mere end 3.700 millioner år siden.

Biologisk aktivitet påvirker Jordens dynamik

Som tidligere nævnt har et enkelt enzym – RuBisCO – stort set været ansvarligt for at styre kulstofkredsløbet på Jorden gennem milliarder af år. Det viser sig, at en lang række grundstoffer indgår i bio-geokemiske kredsløb af globale omfang. Vi kan få et indblik i vigtigheden af de levende organismers stofskifte i disse kredsløb, ved at analysere hvor megen energi de forskellige led i kredsløbene omsætter. Jordens indre dynamik, med alle dens jordskælv, vulkanudbrud og drivende kontinenter omsætter mindre end 0,1 watt per kvadratmeter af Jordens overflade udtrykt som døgn-gennemsnit over alle breddegrader. Som kontrast til denne lave omsætning, omdanner de levende organismer ca. $0,3 \text{ W/m}^2$ af Solens energi til kemisk fri energi, som også indgår i de geokemiske kredsløb. Gennem deres stofskifte påvirker de levende organismer altså Jordens dynamik meget kraftigere end Jordens indre kræfter. Begge ovenfor nævnte bidrag kan umiddelbart

virke forsvindende i forhold til Solens strålingseffekt på ca. 340 W/m² (døgngennemsnit over alle breddegrader). Men da størstedelen af solindstrålingen reflekteres eller går til opvarmning af hav og land (uden anden betydning for Jordens dynamik end erosion) bliver de to nævnte bidrag de væsentligste.

En af konsekvenserne af den omfattende fotosyntese der foregår, er en ophobning af stofskifteprodukter i atmosfæren og havet. Disse produkter er ofte i stærk kemisk uligevægt med jordskorpens bjergarter, og fører til den proces der kaldes forvitring. Forvitring er en kemisk nedbrydning af mineraler, hvorved der dannes nye mineraler og frigives stoffer til havet.

Kontinenter af granit

Vores nærmeste naboplaneter Mars og Venus blev dannet ved samme type processer som Jorden, af det samme materiale og på samme tid. Alligevel adskiller Jorden sig markant fra sine søstre. Vi har overfladetemperaturer som tillader flydende vand, vi har en atmosfære som er rig på ilt men fattig på kuldioxid og vi har meget markant liv på Jorden. Hvis vi tager et spadestik dybere viser det sig, at Jordens skorpe også afviger fra de andre planeters skorper. Skorperne på Mars og Venus, og for den sags skyld også en del af asteroiderne og vores egen Måne, består af basalt. Basalt er det første produkt der dannes, når en standard klippeplanet begynder at smelte i sit varme indre. Da basalt er lettere end det omgivende materiale i dybet, stiger det opad hvor det enten når at størkne i skorpen, eller strømmer ud på overfladen gennem vulkaner. To tredjedele af Jordens overflade, nemlig oceanbunden, består også af basalt. Imidlertid er den sidste tredjedel af Jorden dækket af et ganske tyndt lag af bjergarten granit. Granitlaget er kun omkring 20-30 kilometer tykt, sammenlignet med de 6350 km ind til Jordens midte. Så vidt vi kan se, fra de geologiske aflejringer, er Jorden ikke født med disse granit-kontinenter. Det ser ud til at Jorden først begyndte at danne egentlige kontinenter for omkring 4 milliarder år siden. Kontinenterne er vokset gradvist lige siden, og nyt kontinentmateriale dannes stadig i dag. Hvis kontinenternes granit blev dannet ved helt almindelige geologiske betingelser i planetens indre, kan det undre at kontinenterne ikke spirede frem umiddelbart efter at Jorden blev dannet. Ud fra geokemiske modeller og eksperimenter kan vi imidlertid slutte, at granit ikke kan dannes ved opsmeltning af Jordens kappe. Granit dannes ved delvis opsmeltning af forvitret basalt. Omfanget af forvitring af basalt på Jorden er direkte koblet til den biologiske aktivitet, fordi det i vidt omfang er stofskifteprodukter der reagerer med basalten når den forvitrer. Vi kan derfor forklare hvorfor kontinenterne først begyndte at spire og vokse frem på Jorden for lidt mindre end 4 milliarder år siden. Forklaringen kan være, at granitdannelse i stort omfang først blev muligt da de levende organismer havde opfundet fotosyntesen og derved kunne opretholde en biologisk aktivitet der kunne forvitte den oprindelige basaltskorpe i tilstrækkeligt omfang.

Sporene er slettet

Med vores studier af Jordens ældste sedimenter fra Grønland får vi et indblik i livets tidligste udvikling på Jorden. Vi må forestille os, at fotosyntesen som er en meget kompliceret og avanceret proces, må være et resultat af lang tids biologisk evolution, og at livets opståen derfor må ligge væsentligt tidligere end for 3.700 millioner år siden. Måske opstod livet umiddelbart efter at havene opstod for 4,4 milliarder år siden? Vi må også erkende at de overflademiljøer vi kan studere, gennem de ældste sedimenter, allerede var kraftigt påvirket af levende organismers stofskifte, og at vi derfor er afskåret fra at studere de miljøtilstande som muliggjorde livets opståen på Jorden.

Litteratur

- [1] Anbar, A. D., Y. Duan, et al. (2007). A whiff of oxygen before the Great Oxidation Event? *Science* **317** (5846): 1903-1906.
- [2] Brocks, J. J., G. A. Logan, et al. (1999). Archean molecular fossils and the early rise of eukaryotes. *Science* **285** (5430): 1033-1036.
- [3] Buick, R. (1992). The Antiquity of Oxygenic Photosynthesis – Evidence from Stromatolites in Sulfate-Deficient Archean Lakes. *Science* **255** (5040): 74-77.
- [4] Canfield, D. E., M. T. Rosing, et al. (2006). Early anaerobic metabolisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences* **361** (1474): 1819-1834.
- [5] Rosing, M. T. (1999). C-13-depleted carbon microparticles in >3700-Ma sea-floor sedimentary rocks from west Greenland. *Science* **283** (5402): 674-676.
- [6] Rosing, M. T., D. K. Bird, et al. (2006). The rise of continents – An essay on the geologic consequences of photosynthesis. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* **232** (2-4): 99-113.
- [7] Rosing, M. T. and R. Frei (2004). U-rich Archean sea-floor sediments from Greenland – indications of >3700 Ma oxygenic photosynthesis. *Earth and Planetary Science Letters* **217** (3-4): 237-244.
- [8] Rosing, M. T., N. M. Rose, et al. (1996). Earliest part of Earth's stratigraphic record: A reappraisal of the >3.7 Ga Isua (Greenland) supracrustal sequence. *Geology* **24** (1): 43-46.
- [9] Schidlowski, M. (1988). A 3,800-Million-Year Isotopic Record of Life from Carbon in Sedimentary-Rocks. *Nature* **333** (6171): 313-318.



Minik Rosing Minik Rosing er professor i geologi ved Statens Naturhistoriske Museum, Københavns Universitet og co-director ved Danmarks Grundforskningsfonds Nordisk Center for Jordens Udvikling. Han har arbejdet med jordens tidligste geologiske udvikling og med livets indflydelse på jordens udvikling baseret på feltstudier i Grønland.