

Og der kom ilt...

- udviklingen af livsbetingelserne på Jorden

Geologi

Nye forskningsresultater tyder på, at der først for alvor kom ilt i Jordens oceaner for omkring 800 millioner år siden. Dette er mere end 1 milliard år senere, end man tidligere har antaget.



Foto: Donald E. Cantfield

Billede af en rød båndet jernstens-formation (BIF = Banded Iron Formation) fra Hamersley Range i Vestaustralien. Aflejringerne er 2,5 mia. år gamle og blev aflejret i et jernholdigt ocean, hvor Fe^{2+} blev oxideret til Fe^{3+} .

Vores solsystem – og dermed også Jorden – blev dannet for ca. 4,6 milliarder år siden. Desværre har vi ingen direkte spor fra Jordens tilblivelse, men på den lille ø Akilia ud for Grønlands vestkyst findes der 3,85 milliarder år gamle klipper, som viser, at der allerede på dette tidspunkt fandtes oceaner på Jorden. Oceaner blev altså dannet meget tidligt i Jordens historie, og sandsynligvis er livet opstået i disse oceaner for ca. 4 milliarder år siden.

På dette tidspunkt var der formodentlig endnu ikke dannet større kontinentale landmasser, og klipperne viser, at forholdene i de oprindelige oceaner har været meget anderledes end i nutidens, ligesom Jordens tidlige atmosfære også var meget forskellig fra vores atmosfære i dag. Der har således været en voldsom vulkansk aktivitet (både under og over

havet), og det er sandsynligt, at den oprindelige atmosfære ud over kvælstof (N_2) var domineret af kulilte (CO), svovldioxid (SO_2), kuldioxid (CO_2), brint (H_2), ammoniak (NH_3), svovlbrinte (H_2S) og metan (CH_4), mens der f.eks. ikke var megen ilt (O_2), hverken i atmosfæren eller i oceanerne. Til gengæld har der været store mængder opløst jern i det tidlige ocean.

De første bakterier udnyttede svovl

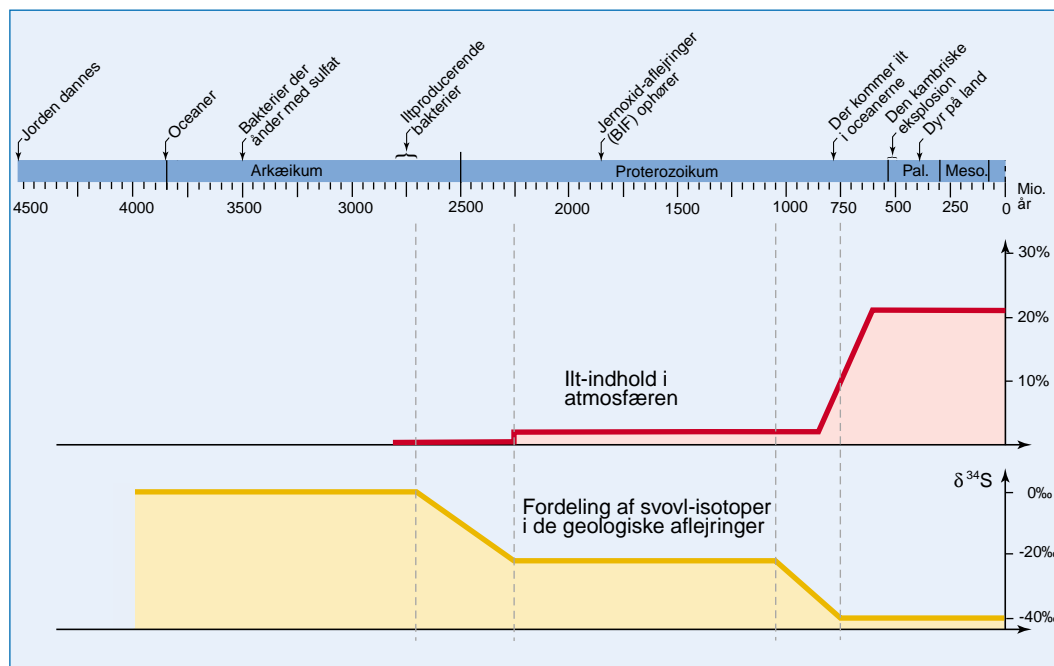
De første livsformer, der opstod i det iltfattige ocean, var simple encellede bakterier, som bl.a. kunne udnytte de vulkanske gasser og udvinde energi af de svovlholdige komponenter. Formodentlig kunne nogle af disse tidlige bakterier, som skulle komme til at dominere Jorden i flere milliarder af år, udnytte sollyset i deres metabolisme, dvs. i de kemiske reaktioner som finder sted i cellerne

og som giver energi til alle de vitale processer og til produktion af nyt organisk materiale. Når vi i dag taler om fotosyntese, hvor organisk materiale produceres fra kuldioxid, forbinder vi dette med frigivelse af ilt, men den tidlige fotosyntese er foregået uden at producere ilt, og er i stedet sket ved oxidation af f.eks. svovlbrinte (H_2S) og jernioner (Fe^{2+}). Andre tidlige stofskeftetyper kan have involveret omsætningen af svovlforbindelser, bl.a. ånding med sulfat (se boks).

Iltproduktionen begynder

En af de store begivenheder i udviklingshistorien indtrådte, da en gruppe bakterier (cyanobakterier) begyndte på den iltproducerende fotosyntese, vi kender i dag. De første geokemiske spor efter disse bakteriers aktivitet findes i aflejringer, der er 2,7-2,8 milliarder år gamle. Selvom vi ikke

Kemien



Tidsakse, der viser hovedbegivenheder i Jordens biologiske udvikling.

Bakterier, der ånder med sulfat, findes for 3,5 mia. år siden, og for 2,7 mia. år siden finder vi bakterier, der ånder med ilt. Den kambriske eksplosion finder sted for ca. 550 mio. år siden. Senere udvikler en gruppe af fiskene lemmer og forlader havet, hvorefter de hurtigt udvikler sig til alle de forskellige dyr, der tager landjorden i besiddelse. "Samtidig" bliver de grønne alger stamfædre til alle de planter, der breder sig på Jorden. Graferne under tidsaksen viser udviklingen i atmosfærens indhold af ilt samt udviklingen i forholdet mellem svovl-34 og svovl-32 isotoperne. Størrelsen δ³⁴S er et udtryk for, hvor meget indholdet af svovl-34 afviger fra den oprindelige isotopfordeling.

kender ældre aflejringer, kan cyanobakterierne godt have udviklet sig tidligere, så tidspunktet må opfattes som det seneste tidspunkt for udviklingen af den iltproducerende fotosyntese. Vi kender ikke til særlige ændringer i forholdene på Jorden, der kan have stimuleret fremkomsten af den iltproducerende fotosyntese, så den er måske betinget af en gradvis udvikling af bakteriernes gener. Men ændringen åbnede muligheder for livet, for nu kunne bakterierne overleve, blot der var lys, vand og næringsstoffer, og de var således ikke længere afhængige af, at der fandtes reaktive kemiske stoffer, som kunne oxideres. Det betød, at den globale produktion af ilt og organisk materiale blev forøget, og det satte gang i en udvikling, hvor der også blev aflejret mere organisk kulstof på havbunden.

Men det skulle være yderligere milliarder af år, før der var opbygget større mængder af ilt i atmosfæren og oceanerne. Cyanobakteriernes iltproduktion var formodentlig hæmmet af en lav tilgængelig-

hed af næringsstoffer i det jernholdige ocean, og desuden var det opløste jern i lang tid særdeles effektivt til at opsuge den producerede ilt. Opløst jern forbinder sig i havet med iltmolekyler, hvorefter det bundfældes som rust (jernoxid), og i dag kan vi se resultatet forskellige steder i verden som flotte røde bandede jernformationer, hvor den røde farve afhænger af jernindholdet i aflejringerne (se foto).

Livet "eksploderer"

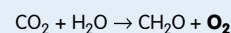
På et tidspunkt slap de store mængder af opløst jern i oceanerne op, og dermed kunne iltindholdet begynde at stige i oceanerne og i atmosfæren. Hidtil har man antaget, at dette skete for ca. to milliarder år siden, da det passer med alderen på de yngste bandede jernaflejringer, og man har forestillet sig, at mængden af ilt i atmosfæren og i oceanerne herefter steg til vore dages niveau. Efter yderligere halvanden milliard år accelererede den biologiske udvikling for ca. 500-550 millioner år siden under det, der kaldes *den kambriske eksplo-*

sion, hvor stort set alle dyrerækkerne opstod.

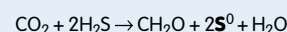
Man må imidlertid undre sig over, hvorfor der skulle gå så lang tid mellem de to hovedbegivenheder i Jordens historie: dannelse af store mængder ilt og eksplosionen i højere livsformer. Ifølge den nyeste forskning på Center for Jordens Klima og Biogeokemiske Kredsløb (DCESS) er svaret, at der slet ikke gik så lang tid. Der kom nemlig først ilt i oceanerne sent i Neoproterozoikum (550-900 millioner års siden), og altså ikke for to milliarder år siden, som man hidtil har antaget. Dybhavet fortsatte således med at være iltfattigt i yderligere mindst en milliard år, efter at udfældningen af jern var ophørt. Denne konklusion er man nået til ved at studere fordelingen af svovlisotoper i aflejringer, som man formoder er af biologisk oprindelse, fra forskellige tidspunkter i Jordens historie. Disse isotopfordelinger viser, at indholdet af svovlbrinte i oceanerne begyndte at stige for ca. 2 mia. år siden, og forskergruppen, der ledes af professor Donald Canfield,

Fotosyntese

Cyanobakteriernes iltproducerende fotosyntese, hvor organisk materiale produceres fra kuldioxid, kan skrives som en generaliseret kemisk reaktion:

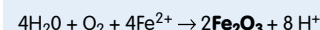


hvor CH₂O betyder organisk materiale. Den tidlige fotosyntese uden iltproduktion har den generaliserede reaktion:

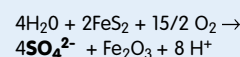


Udfældning af jern

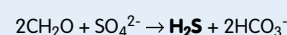
I det tidlige ocean forbinder opløst jern sig med ilt:



Ilt i atmosfæren nedbryder svovlsulfid på land:



Herefter transporterer nedbør sulfat til oceanerne. Her oxiderer bakterierne organisk materiale i deres ændring med sulfat (sulfatreduktion) og producerer svovlbrinte efter reaktionen:



Den producerede svovlbrinte overtager nu iltens rolle i udfældningen af jern i oceanerne:



Svovlisotoper

Isotopsammensætningen af svovl i geologiske aflejringer giver information om de kemiske forhold igennem de geologiske tidsaldrer, og specielt giver de et fingerpeg om iltindholdet i atmosfæren gennem tiden.

For at kunne fortolke isotopmålingerne er det vigtigt at vide, hvordan bakterier, der kan leve i de svovlholdige omgivelser, påvirker isotopsammensætningen. F.eks. viser det sig, at sulfatreducerende bakterier foretrækker at reducere ³²SO₄²⁻ fremfor ³⁴SO₄²⁻ således, at de producerede sulfider får et relativt mindre indhold af ³⁴S-isotopen i forhold til det oprindelige sulfat.

En lignende isotopseparation ses ved forgæring af svovl til svovlbrinte og sulfat. Denne isotopseparation undersøges derfor i laboratorierne på DCESS, hvor man udfører forsøg med bakteriekulturer, som er hentet hjem med en specialbygget under-vandsbåd fra dybtliggende, varme undersøiske svovlholdige kilder i Den californiske Golf.

mener, at det herefter var svovlbrinte og ikke længere ilt, som sørgede for udfældningen af jern. Det var derfor ikke store mængder ilt i oceanerne, som var årsagen til, at de bandede jernformationer ophørte for ca. 2 mia. år siden, men derimod store mængder svovlbrinte som begyndte at reagere med det opløste jern (se boks).

Ilt i atmosfæren gav svovlbrinte i dybhavet

Fremkomsten af store mængder svovlbrinte i oceanerne var imidlertid et resultat af det øgede iltindhold i atmosfæren. Her gav iltten nemlig anledning til en nedbrydning af svovlkis på jordens overflade, som reagerede med atmosfærens ilt og blev omdannet til sulfater. Nedbøren skyllede sulfaterne ud i oceanerne, og her reducerede bakterier sulfaterne til svovlbrinte.

En vurdering viser, at tilførslen af sulfat og dermed produktionen af svovlbrinte i oceanerne allerede for 2 milliarder år siden var så stor, at det resulterede i en bundfældning af alt det opløste jern som jernsulfider (svovlkis). Herefter må man forestille sig, at dybhavet har holdt sig svovlbrinteholdigt, men iltfattigt. De samme forhold finder vi i vore dages svovlbrinteholdige Sorte Hav, som derfor måske ligner fortidens oceaner en hel del.

Der kom ilt i oceanerne senere end hidtil antaget

De store mængder ilt i dybhavet kom først ved en meget senere begivenhed for mindre end en milliard år siden, hvor iltten igen fjernede svovlbrinten fra dybhavet.

Isotopstudierne af de geologiske aflejringer viser, at iltindholdet i atmosfæren ganske vist steg ved begyndelsen af den proterozoiske tidsalder for godt 2 milliarder år siden, men at det holdt sig lavt (under en tiendedel af nutidens niveau) indtil for ½ - 1 milliard år siden. Herefter steg iltniveauet kraftigt. Den seneste stigning i atmosfærens iltindhold (altså for mindre end en milliard år siden) frigav så megen ilt, at det var nok til at



Forskningssubåden Alvin, der drives af Woods Hole Oceanographic Institute i USA. Alvin bruges til at samle sedimenter i Guaymas Bassinet i Den californiske Golf på ca. 2,5 kilometers dybde.

lykkes at identificere, hvilke faktorer der kontrollerer isotopsammensætningen af sulfider. Sideløbende hermed indsamler centeret prøver fra geologiske aflejringer rundt omkring i verden, bl.a. fra USA, Canada, Kina og Australien.

Herhjemme er Mariager Fjord formodentlig også i familie med fortidens svovlbrinteholdige oceaner, og forskere fra DCESS har derfor undersøgt svovlkredsløbet i fjorden for bedre at kunne forstå fortidens svovlkredsløb. En pudsigt anvendelse af forskningen i denne del af Jordens kredsløb er derfor, at den ikke alene hjælper med at forstå fortidens oceaner, men også kaster lys over årsagen til Mariager Fjords forgiftning med svovlbrinte.

Regulering af ilt

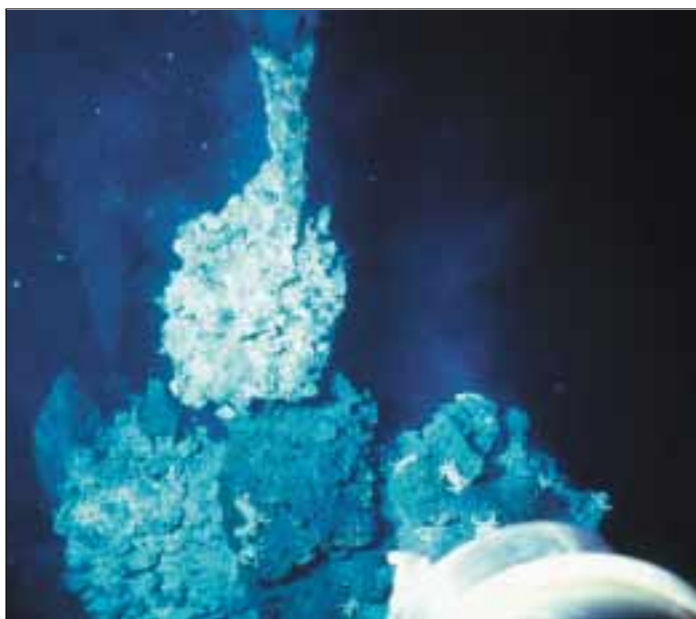
De næste opgaver bliver at finde mulige årsager til de pludselige stigninger i iltindholdet. Hertil arbejder forskerne ved DCESS i Odense og København på at konstruere computermodeller, som simulerer de store, globale biogeochemiske kredsløb. I disse modeller prøver man at inkludere alle de biologiske, geologiske og kemiske faktorer, der regulerer atmosfærens iltindhold, f.eks. aflejring af organisk kulstof, kemiske forhold i oceanerne og udgasning fra Jordens kappe.

Herefter kan man undersøge, hvordan de forskellige

oxidere svovlbrinten i dybhavet og dermed åbnede dybhavet for højere organismer. Ud over studier af svovlisotoper i aflejringer styrkes den nye forklaring også af resultaterne fra enkle oceanmodeller, som viser hvorledes iltkoncentrationen i dybhavet reguleres.

Det sorte Hav og Mariager Fjord

Eftersom Det sorte Hav, som nævnt ovenfor, i dag formodes at ligne fortidens ocean, planlægger DCESS flere togter dertil, for i detaljer at undersøge det mikrobiologiske og biogeochemiske svovlkredsløb. Det er specielt spændende, om det



En varm, undersøisk kilde, også kaldet en "sort skorsten" (black smoker).

Vandet, der strømmer ud fra kilden er 350°C varmt og indeholder store mængder svovlbrinte og opløste metaller. Et stykke fra kilden, hvor sedimenterne har en temperatur på lidt over 100°C trives såkaldte hypertermofile organismer. Mange af disse organismer formodes at være direkte efterkommere af de første levende organismer på Jorden.

Foto: Donald E. Canfield

Foto: Donald E. Canfield

faktorer påvirker iltindholdet. En lang, stabil periode i Jordens historie med lavt iltindhold kan skyldes et stabilt biogeokemisk system, hvor der er stabiliserende tilbagekoblinger. At koblingerne er stabiliserende betyder, at systemet reagerer på en lille afvigelse, således at systemet søger tilbage igen mod den stabile tilstand. Det er imidlertid også muligt, at systemet kan nå et kritisk punkt, hvor den stabile tilstand bryder sammen, og systemet domineres af destabiliserende tilbagekoblinger, som bringer det længere og længere bort fra den oprindelige ligevægtstilstand. En sådan ændring af tilbagekoblingsmekanismerne kan være årsagen til, at der blev frigivet de store mængder ilt til atmosfæren, som satte gang i nedbrydningen af svovlkis på Jordens overflade, og som herefter – med hjælp fra de sulfat-reducerende bakterier – førte til dannelse af store mængder svovlbrinte i oceanerne for 2 mia. år siden. På et tidspunkt har systemet imidlertid fundet en ny ligevægtstilstand, hvorefter stabiliserende tilbagekoblinger igen har taget over, og oceanerne forblev svovlbrinteholdige i millioner af år,



Prøve af svovlholdige aflejringer fra Vestaustralien. De 3,5 mia. år gamle aflejringer er for nylig undersøgt af forskere fra DCESS. Sammen med kollegaer fra Universitetet i Sydney har de fundet de hidtil ældste spor fra bakteriernes ånding med sulfat.

indtil en ny dramatisk ændring af mekanismerne førte til, at der kom ilt i dybhavet.

Så selvom vi endnu ikke kender svarene på, hvad der udløste de store ændringer i atmosfærens iltindhold, er det givet, at projektet med at rekonstruere oceanernes natur og atmosfærens kemi over lange geologiske tidsskalaer vil

afsløre nye sammenhænge mellem ændringer i Jordens overfladekemi og biologiske udvikling. Dermed kan arbejdet også yde et lille bidrag til at finde svarene på nogle af de mest grundlæggende spørgsmål, som vi alle på et tidspunkt har stillet: hvor og hvordan opstod livet på vores planet? ☺



Om forfatteren

Jens Olaf Pepke Pedersen er forskningslektor og administrator på DCESS (Danish Center for Earth System Science) Københavns Universitet

Juliane Maries Vej 30
2100 København Ø

Tlf.: 3532 0573

E-mail: jopp@dcess.ku.dk

Her kan du læse videre

DCESS hjemmeside:
www.dcess.ku.dk

D. E. Canfield (1998): *A new model for Proterozoic ocean chemistry*. Nature. Bind 396, side 450-453.

U. Thomsen (1999): *Glad for forurening, iltsvind hjælper til forståelse af jordens udvikling*. Ny Viden, Syddansk Universitet. Nr. 12 (8. oktober) side 17.

M. C. Andersen og A. Damm (2000): *Det astrofysiske grundlag for liv*. Kvant. Bind 11, nr. 1, side 5-12. (http://www.nbi.dk/dfs/kv_1_00_liv.pdf)