

uit grondwater, dat is opgesloten in het gastgesteente. Dit is waarschijnlijk een genetisch proces. Als gevolg van een hoge grondwaterstand vormden zich in Australië laterieten, die uitloging van ijzerrijke mineralen uit het sediment veroorzaakten. Dit eindigde toen als gevolg van wereldwijde klimaatveranderingen zeer droge omstandigheden gingen optreden. Het gevolg was een verlaging van de grondwaterstand.

De sedimenten zijn voornamelijk impermeabele (ondoordringbare) klei en poreuze zandsteen. Als de grondwaterstand nu verlaagd werd tot een kleihorizon, dan kwam het water opgesloten te zitten. Dit water moet het opgeloste silica hebben bevat als gevolg van de uitloging uit het omringende gesteente. Aangenomen kan worden dat er enige laterale beweging in het water is geweest, wat kan hebben geresulteerd in de aanvoer van nieuwe silica in het systeem. Het water is uiteindelijk verloren gegaan als gevolg van verdamping door de permeabele lagen en met de tijd zal de silica zich hebben ontwikkeld van een sol naar een colloïdale gel. Er zijn veel factoren van invloed op deze processen, zoals de pH (zuurgraad) van het water, de temperatuurgradiënt en de permeabiliteit van het bovenliggende gesteente. De schatting is, dat de natuurlijke snelheid van afzetting van opaal ligt in de orde van grootte van ongeveer enkele centimeters in vijf miljoen jaar op een diepte van zo'n veertig meter.

De volgende stap is de solidificatie van de gel. Het wordt aangenomen dat dit in de een à twee miljoen jaar heeft plaatsgevonden. De opaal bleef lang zacht en onsamenvast, zoals blijkt uit allerlei insluitsels die in de nog zachte gel zijn gevallen. Uiteindelijk vond gedeeltelijke uitdroging en cementatie plaats. Dit is niet geheel zonder haken en ogen voor de vorming van edelsteenkwaliteit-opaal. Als er teveel cementatie plaats vindt kan dit opvulling van de holtes tussen de silicabooltjes tot gevolg hebben, waardoor de brekende werking verloren gaat en daarmee het kleurspel van de opaal. Een ander effect kan zijn dat de uitdroging van de gel gepaard gaat met een vervorming van de bolletjes en dus ook van de tussenliggende holtes, met hetzelfde resultaat: verlies van het kleurspel. Al met al is opaal dus een zeer bijzonder materiaal, dat door veel mensen over de gehele wereld bijzonder wordt gewaardeerd: door de een als geologisch interessant materiaal en door de ander als schitterende edelsteen.

#### Enkele interessante boeken over opaal:

R.G. Hail (1995) Opals of the Never Never. Kangaroo Press Pty. Ltd. Kenthurst, NSW, Australië, 127 pp.

B. O'Leary (1992) A field guide to Australian opals. Gemcraft Books, Melbourne, Australië, 159 pp.

## GEOCOMpositie 12

### Stikstof in de oceaan bepaalde de ontwikkeling van ecosystemen en droeg bij aan klimaatveranderingen

De concentratie stikstof in de oceanen is van enorm belang, omdat uit de oceanen vrijkomende stikstof op significante wijze de samenstelling van de atmosfeer beïnvloedt en daarmee ook de ecosystemen op het land en in het water. Deze nieuwe visie lijkt een eind te maken aan de rol die tot nu toe vooral werd toegedicht aan fosfor. Tot nu toe werd immers algemeen aangenomen dat de hoeveelheid aanwezig fosfor, samen met licht en koolzuurgas, de hoeveelheid plantaardig leven bepaalt die in zee kan ontstaan, en daarmee - direct en indirect - ook de hoeveelheid dierlijk leven. Deze veronderstelling leek in de afgelopen jaren bevestigd te worden door het teruglopen van onder meer bepaalde vissoorten in de Noordzee: de schuld werd gelegd bij de nieuwe, fosfaatvrije wasmiddelen, en door sommigen ook bij de verbeterde afvalwaterzuivering. Er zou daardoor via de rivieren minder fosfor in zee terecht komen dan vroeger.

De overheersende rol van fosfor als voedingsstof wordt echter betwifteld door Paul Falkowski, een oceanograaf van het Brookhaven

National Laboratory in Upton (Verenigde Staten) in Nature 387, 1997. Stikstof is volgens hem veel belangrijker. Hij kwam tot die conclusie nadat hij had vastgesteld dat geologisch lange perioden waarin stikstof werd vastgelegd, afwisselden met perioden waarin juist weer stikstof door de zee werd afgegeven (denitrificatie). De oceaan blijkt dus als een enorm reservoir voor stikstof te fungeren. Falkowski stelde vast dat in de geologische perioden met denitrificatie steeds nieuwe soorten microben en enzymen een hoofdrol speelden. Daarentegen speelden alle keren dat stikstof werd vastgelegd, onderling zeer sterk verwante cyano- en eubacteriën een hoofdrol. Die bacteriën bleken over een gezamenlijke voorouder te beschikken, waardoor ze alle een bepaalde eigenschap gemeen hadden: een enzym (nitrogenase) dat stikstof bindt.

Dit enzym zou door de betrokken bacteriën al zijn ontwikkeld toen de aardatmosfeer nog nauwelijks zuurstof bevatte, d.w.z. meer dan zo'n tweemiljard jaar geleden. Dat is goed verklaarbaar, want voor de vorming van dit enzym is niet alleen ijzer nodig, maar ook een reducerend milieu. De huidige diepzee vertoont in dat opzicht geen gunstige omstandigheden, de ondiepe zeeën nog minder. Daarom wordt momenteel nauwelijks stikstof door die bacteriën vastgelegd, maar in het geologische verleden lag dat vaak heel anders.

Voor denitrificatie is behalve stikstof (in de vorm van nitriet en nitraat) ook veel organische stof nodig. Deze omstandigheden komen zowel nu als in het geologische verleden slechts zeer lokaal in de diepzee voor, maar vaker in wateren van hooguit enkele honderden meters diep. Omdat het binden van stikstof (bij gunstige omstandigheden) vooral in de diepzee gebeurt, terwijl denitrificatie juist in relatief ondiepe wateren plaatsvindt, komen (en kwamen) deze processen veelal ruimtelijk gescheiden voor. Dat betekent overigens niet per definitie dat er geen balans tussen beide processen zou bestaan. Integendeel, tussen opname en afgifte van stikstof door de oceaan bestond voor het grootste deel van de aardgeschiedenis juist een goede balans. Men moet zich daarbij voorstellen dat jaarlijks (!) zo'n honderdmiljoen ton werd vastgelegd, terwijl er elders ongeveer evenveel vrijkwam. Volgens Falkowski kon een 'onbalans' van zo'n 3% echter al catastrofale gevolgen hebben: de afwisseling van ijstijden en interglacialen zouden er volgens hem aan toe te schrijven zijn, en wel doordat meer of minder stikstof in het water, via meer of minder plantaardig leven, invloed uitoefent op het koolzuurgasgehalte in de atmosfeer. Minder stikstof in de oceanen bevordert volgens hem dus het broeikaseffect.

De uitkomsten van Falkowski sporen goed met de bevindingen van een team van Amerikaanse en Canadese onderzoekers. Deze hebben in het (subtropische) noordelijke deel van de Stille Oceaan de rol van stikstof in de biochemische cyclus onderzocht. Ook zij komen tot de conclusie dat stikstof, via cyanobacteriën, een uiterst belangrijke rol speelt. Wat dat betreft wijkt de huidige situatie dus niet af van die in het geologische verleden. In oligotrofe wateren is vooral het geslacht *Trichodesmium* actief; deze soort haalt biologisch vrijwel inerte stikstof uit de atmosfeer en zet die om in 'bruikbare' verbindingen. Gebeurt dat in zeer sterke mate, dan gaan de bacteriën zelf een grotere voedselbron vormen. Op deze wijze kunnen ze de hoeveelheid biomassa sterk in omvang doen toenemen. Dit is een nieuwe aanwijzing dat de activiteiten van cyanobacteriën, op basis van de beschikbaarheid van stikstof en ijzer, in de loop van de afgelopen miljarden jaren een tot nu toe duidelijk onderschatte rol hebben gespeeld in de ontwikkeling en levensvatbaarheid van aquatische, terrestrische en atmosferische ecosystemen.

Falkowski, P.G., 1997. Evolution of the nitrogen cycle and its influence on the biological sequestration of CO<sub>2</sub> in the ocean. Nature 387, p. 272-275.

Falkowski, P.G., Barber, R.T. & Smetacek, V., 1998. Biochemical controls and feedbacks on ocean primary production. Science 281, p. 200-206.

Jickells, T.D., 1998. Nutrient biogeochemistry of the coastal zone. Science 281, p. 217-222.

Karl, D., Letelier, R., Tupas, L., Dore, J., Christian, J. & Hebel, D., 1997. The role of nitrogen fixation in the biochemical cycling in the subtropical North Pacific Ocean. Nature 388, p. 533-538.

A.J. van Loon