

samen met een lokale gids aan dit gebied bracht, leverde niet meer op dan wat brachiopoden en weinig interessante Devonische trilobieten. Andere niet-professionele en professionele fossielenzoekers hadden dezelfde ervaring. Ten slotte is er nog de, onlangs aangescherpte, wettelijke regelgeving die het uitvoeren van fossielen zonder vergunning verbiedt. Vanwege het economische belang voor arme regio's stelt de overheid in de praktijk weinig grenzen aan het zoeken en uitvoeren van fossielen, zolang dit maar gebeurt met hulp van lokale gidsen of handelaren. Maar ingrijpen is mogelijk en vindt inderdaad plaats.

Referenties

- Lefebvre, B., Lerosey-Aubril, R., Servais, T., Van Roy, P., 2016. The Fezouata Biota: An exceptional window on the Cambro-

Ordovician faunal transition. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 460, 1-6. (Dit artikel vormt de inleiding van het speciale nummer van dit tijdschrift dat aan de Fezouataformatie is gewijd).

- Van Roy, P., Orr, P.J., Botting, J.P., Muir, J., Vinther, J., Lefebvre, B., El Hariri, K., Briggs, D.E.G., 2010. Ordovician faunas of the Burgess Shale type. *Nature* 465, 215-218.
- Van Roy, P., Briggs, D.E.G., 2011. A giant Ordovician anomalocaridid. *Nature* 473, 510-513.
- Vinther, J., Van Roy, P., Briggs, D.E., 2008. Machaeridians are Palaeozoic armoured annelids. *Nature* 451, 185-188.
- Vinther, J., Parry, L., Briggs, D.E.G., Van Roy, P., 2017. Ancestral morphology of crown-group molluscs revealed by a new Ordovician stem aculiferan. *Nature* 542, 471-474.

'Groene roest' kleurde Precambrische oceaan

door A.J. (Tom) van Loon
Valle del Portet 17, 03726 Benitachell, Spanje
Geocom.VanLoon@gmail.com

Tot de merkwaardigste gesteenten uit het Precambrium behoren de zogeheten 'banded iron formations' (lett. gelaagde ijzerformaties), die uit afwisselende laagjes ijzeroxiden - meestal hematiet en magnetiet - en vuursteen en/of schalie bestaan (afb. 1). Over hun ontstaanswijze bestaat nog steeds veel onduidelijkheid.

Banded iron formations, gewoonlijk aangeduid met hun acroniem BIFs, vormen verreweg de grootste ijzerertsvoorkomens op aarde. Ze werden vrijwel alle gevormd in het verre geologische verleden; voorkomens van jonger dan 1,8 miljard jaar zijn zeldzaam. Het is dan ook geen wonder dat veel van deze gesteenten als gevolg van onder meer gebergte- en breukvorming sterk geplooid zijn (afb. 2). BIFs komen op veel plaatsen op aarde voor en vertegenwoordigen een grote economische waarde. Toch is er weinig over deze gesteenten bekend. Over hun ontstaanswijze circuleren talloze theorieën, maar geen enkele daarvan is algemeen geaccepteerd.

Recente experimenten maken aannemelijk dat BIFs op de oceaانبodem gevormd zijn; het zeewater zou door de bijzondere samenstelling van de ijzerverbindingen een groenige kleur hebben gehad.



Afb. 1. Karakteristiek uiterlijk van een polijstvlak van gesteente uit een BIF. Foto: University of Cincinnati.

Groene oceanen

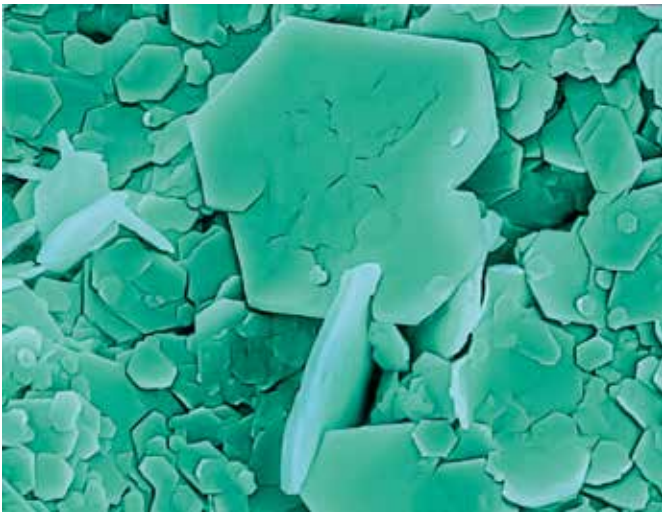
IJzer wordt - sinds de atmosfeer zuurstof bevat - vanaf het land door rivieren naar zee afgevoerd in de vorm van ijzeroxiden en -hydroxiden, waarbij het ijzer driewaardig is en verbindingen vormt zoals Fe_2O_3 , dat niet oplosbaar is in water.

Toen er nog nauwelijks zuurstof in de aardatmosfeer en de oceaan aanwezig was (tot ca. 2,5 miljard jaar geleden), kon een dergelijke oxidatie niet plaatsvinden en was het meeste ijzer tweewaardig. De tweewaardige ijzer-ionen waren oplosbaar in het zeewater, en vormden op den duur verbindingen die bekend staan als 'groene roest'. Het gaat daarbij om een mengsel van uitgekristalliseerde groene verbindingen met zowel twee- als driewaardig ijzer (Fe^{2+} en Fe^{3+}), hydroxylgroepen (OH^-) en nog een anion, gewoonlijk van chloor (Cl^-), carbonaat (CO_3^{2-}) of sulfaat (SO_4^{2-}). Ook kristalwater is bij groene roest normaliter aanwezig.

Door de groene roest (afb. 3), waarvan de kristallen een gelaagde structuur van dubbele hydroxiden vormen, kleurt water waarin deze kristallen voorkomen, groenig. Omdat er in het vroege Precambrium nauwelijks zuurstof in de atmosfeer en het zeewater zat (waardoor de groene roest zou oxideren en bruinoranje zou kleuren), moeten de oceanen destijds groenig gekleurd zijn geweest. De groene roest moet, al dan niet door verbinding met andere elementen, op den duur in de oceanen zijn bezonken, waardoor - afgewisseld met perioden van 'normale' sedimentatie waardoor de BIFs duidelijk gelaagd zijn - sterk ijzerhoudende lagen werden gevormd.



Afb. 2. Door hun hoge ouderdom hebben de BIFs veel geologische processen meegemaakt en zijn ze vaak sterk verplooid, zoals in de Soudan Iron Formation bij Soudan in Minnesota (Verenigde Staten). Foto: James St. John.



Afb. 3. Kristallen van groene roest, zoals zichtbaar met een 'atomic force' microscoop. Foto: Bo C. Christiansen, Universiteit van Kopenhagen.



Afb. 4. Het water van het Matanomeer op Sulawesi heeft door de aanwezigheid van groene roest een groenige kleur. Foto: Jalan Matera.



Afb. 5. Groene roest dat is ontstaan bij het laboratoriumonderzoek dat de omstandigheden in de vroege Precambrië oceanen nabootste. Foto: Weizmann Institute of Science (Rehovot, Israël).



Afb. 6. Prachtig gekleurde BIF van de Soudan Iron Formation. Foto: James St. John.

Experimenten in het lab

Deze hypothese wordt ondersteund door onderzoek in het Matanomeer op Sulawesi (Indonesië). Het water in dit meer is zeer zuurstofarm en mogelijk vergelijkbaar met het zeewater uit het begin van de aardgeschiedenis. Het meest opvallend is dat ook hier nu groene roest gevormd wordt, waardoor het meer een groenig-blauwe kleur heeft (afb. 4).

Onderzoekers hebben deze omstandigheden ook in het laboratorium gesimuleerd. Daarbij vonden ze dat er in het water inderdaad groene roest ontstond (afb. 5), dat na enige tijd een chemische reactie vertoonde met andere opgeloste stoffen. Hierbij ontstond een combinatie van ijzerhoudende oxiden, carbonaten en silicaten, precies de combinatie die ook de BIFs vormen. Een en ander is natuurlijk nog geen definitief bewijs dat de BIFs op deze manier ontstonden, maar het lijkt wel zeker dat de vorming en aanwezigheid van groene roest daarbij een belangrijke rol hebben gespeeld.

De precieze vorming van de BIFs zal zeker nog lang onderwerp van onderzoek blijven. Waarschijnlijk tot genoeg van de betrokken wetenschappers, want alleen al de kleurenpracht die BIFs lokaal vertonen (afb. 6), maakt zulk onderzoek aantrekkelijk.

Referentie

- Halevy, I., Alesker, M., Schuster, R.E.M., Popovitz-Biro, R. & Feldman, Y., 2017. A key role for green rust in the Precambrian oceans and the genesis of iron formations. *Nature Geoscience* 10, 135-139.