

# Waar we ons ijzer vandaan halen: Precambrische gebande ijzerertsen (BIFs)

door Frank F. Beunk, Aardwetenschappen VU Amsterdam

f.f.beunk@vu.nl

Goud, diamant, smaragd, ....: denkend aan kostbare metalen en mineralen zijn dat misschien de eerste die ons te binnen schieten. Of lithium, kobalt en Zeldzame Aarden, vanwege de energietransitie. Maar ijzer ....? Niettemin, veruit het belangrijkste metaal, economisch of technisch bekeken, is ijzer!



▲ Afb. 2. Goethitische ijzeroëliet uit Duitsland. Beeldbreedte 18 mm. Bron: [www.sandatlas.org](http://www.sandatlas.org).

Ijzer is overal – de bovenste continentkorst bevat gemiddeld vijf gewichtsprocent ijzer, uitgedrukt als oxide ( $\text{FeO}$ ); wie de tropen kent of Australië, kent ook hun roestbruine lateritische verweringsbodems (afb. 1). Bijna alle ijzer wordt gewonnen uit sedimentaire afzettingen. De ruggengraat van de industriële revolutie in West-Europa en Noord-Amerika waren Phanerozoïsche ijzeroëlieten, met goethiet,  $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH})$ , of hematiet,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , als ertsmineraal (afb. 2). Het ijzer kwam van chemische verwerking van gesteenten en spoelde met rivier- en grondwater de zee in (Matheson et al., 2022). Ze zijn afgezet in rivierlopen en in delta's maar meestal in ondiep zeewater en zijn bekend van Midden-Engeland, Wales en Spanje, de Elzas-Lotharingen (Frankrijk) en Luxemburg, en uit het Appalachengebergte van de oostelijke VS en Canada. Afzettingssouderdommen zijn Silurisch-Devonisch (440–360 Ma) of, zoals die van de Elzas, uit de Vroege tot Midden-Jura (ca. 190–170 Ma), perioden met hoge zeespiegelstanden en overstromde continentale laaglanden.



▲ Afb. 1. De eindeloze vlakke en dorre *outback* van West-Australië, met zijn roestbruine lateritische verweringsbodems, gevormd toen het noordwaarts schuivende continent in het Plioceen in een vochtige tropische klimaatzone lag.

## Precambrische Schild

Noord-Europeanen, i.h.b. Zweden en Finnen, haalden hun ijzer al sinds de middeleeuwen uit een ander sedimentair ijzererts: de gebande ijzerertsen uit het Precambrische (Baltische) Schild. Zweedse dorpen nabij ijzermijnen hadden veelal hun eigen hoogoven en gieterij, 'hyttan' in het Zweeds (hetzelfde woord als het Duitse Hütte). Een blik op de kaart van Midden-Zweden levert tientallen dorpsnamen op eindigend op -hyttan, zoals Garpshyttan, Grythyttan, Pershyttan en Sångshyttan. Soms staat de lokale smeltoven nog overeind (afb. 3) en vaak wordt die door vrijwilligers nog één maal per jaar aangestoken, als herinnering aan een verleden dat Zweeds staal tot een begrip heeft gemaakt.

## Sedimentair ijzererts: BIFs

Precambrische gebande ijzerertsen, 'Banded Iron Formations' of kortweg BIFs, komen in alle Precambrische schilden voor en zijn nu het belangrijkste ijzererts (>60%), vnl. afkomstig uit Brazilië, Australië, Canada, de VS, India, Rusland, Zuid-Afrika en Oekraïne. Het erts bevat ca. 30% ijzer. Vanwege hun ligging zijn die van Noordwest-Australië (afb. 4–6) vooral in trek bij China.

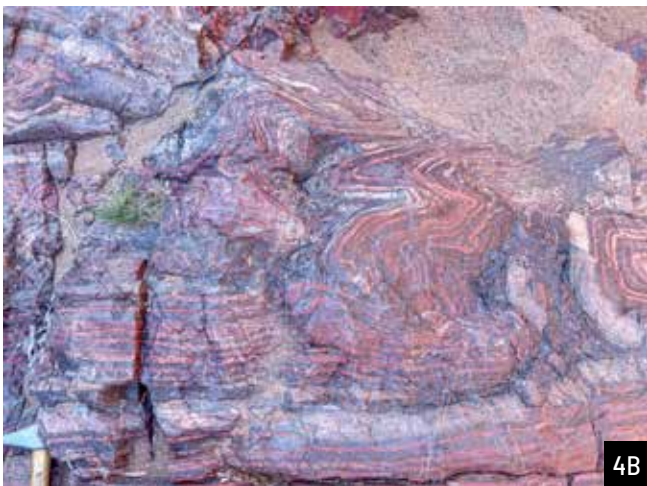


▲ Afb. 3. Twee historische hoogovens in Jädraås (Ockelbo), Midden-Zweden, in gebruik in de periode 1856-1930. Zwartwitfoto uit de jaren '50. Bron: publiek domein.



4A

▲ Afb. 4A en B. Tektonisch verplooid BIF van Coppin's Gap, Coppin Gap groensteengordel, Pilbara Kraton, NW-Australië.



4B

Sterker nog, Chinese bedrijven kopen er geregeld een hele berg op, om die in een paar jaar tijd geheel af te graven.

BIFs zijn vernoemd naar hun karakteristieke dunbandige gelaagdheid (afb. 4), waarvan men vermoedt dat die samenhangt met astronomische cycli, seizoenswisselingen en getijden (zie verderop in deze tekst).

### Twee soorten BIFs

We onderscheiden twee soorten BIFs, het Lake Superior-type en het Algoma-type, genoemd naar een district van Ontario (Canada). Het eerste, naar voorkomens bij Lake Superior in Michigan en Minnesota (noordoostelijke VS), heeft een karakteristieke afwisseling van rode, 0,5 mm tot 2,5 cm dunne laagjes, die rijk zijn aan ijzermineralen, zoals hematiet, magnetiet en sideriet (ijzercarbonaat), en witte kiezelige bandjes (chert), die tot wel over ruim 100 km kunnen worden gevolgd. We denken dat ze zijn afgezet in ondiepe zeeën op het continentale plat, onder invloed van verdampingscycli van het zeewater en dat het ijzer en silicium van hydrothermale oorsprong zijn (onderzeese heetwaterbronnen). De afzettingen van het Hamersley Bekken in NW-Australië behoren tot dit type (afb. 5 en 6), en ook die in Labrador (Oost-Canada), de Serra dos Carajas in Noord-Brazilië en het Zuid-Afrikaanse Transvaalbekken.

De karakteristieke rood-witte gebandheid vertoont ook over de dikte van de afzettingen een zekere cyclischeiteit. Utrechtse geologen hebben (met steun van het



▲ Afb. 5. Wegenkaart van West-Australië, met Port Hedland aan de noordkust en Newman in het Hamersley Bekken, ten noorden van Kumarina.

onvolprezen Dr. Schürmannfonds voor Precambrium-onderzoek, zie [www.schurmannfonds.nl](http://www.schurmannfonds.nl)) de cycliciteit van 2,47 miljard jaar oude BIFs uit Griqualand (Zuid-Afrika) en het West-Australische Hamersley bekken (2,46 Ga) onderzocht. Ze vonden er het ritme in terug



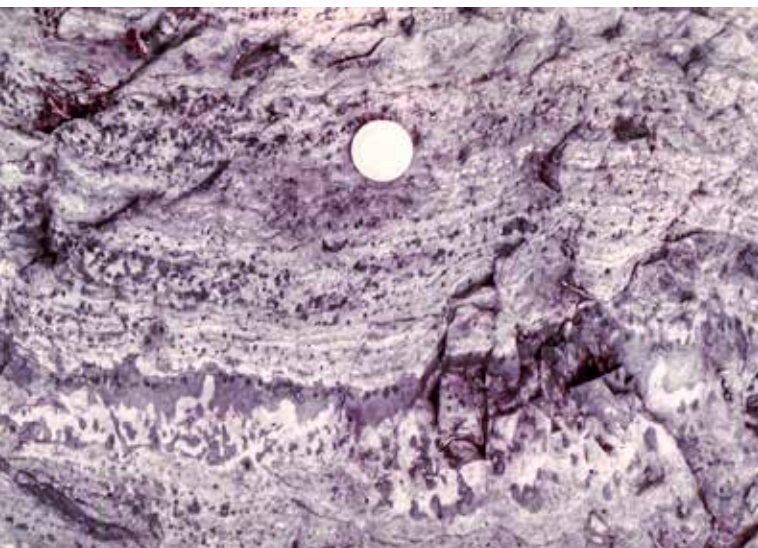
6A



6B

▲ Afb. 6. A. Newman-ijzermijn, Hamersley Range, NW-Australië. De open pit meet 5,5x1,5 km en is 200 m diep. Vanaf hier gaat het ruwe erts per trein naar Port Hedland aan de noordkust (afb. 5) en van daar vnl. rechtstreeks naar China. B. Eindstation van de spoorweg bij de Newman-ijzermijn. Roest alom ...

van de Milankovitch-cycli van de aardbaan om de zon, i.h.b. de 405.000- en 1,5-miljoen-jarige cycli van de excentriciteit (vormvariaties van de aardbaan om de zon), en ook de precessiecyclus (toebeweging van de aardas), met een huidige periode van 26.000 jaar. Naar verwachting bleek de precessieperiode toen aanzienlijk korter te zijn, en wel ca. 11.900 jaar, corresponderend met een afstand tussen aarde en maan van ca. 321.800 km (nu 384.400) en een daglengte van 16,9 uur (Lantink et al., 2019, 2022). Ook het afzettingstempo kon bepaald worden: 5 tot 15 m per miljoen jaar. IJzerrijke bandjes in het Hamersley Bekken zijn zelf soms weer opgebouwd uit millimeterdunne microbandjes, zo'n 28 stuks. Ze zijn onlangs (Williams, 2022) geïnterpreteerd als halfdaagse neerslagen, gegroepeerd in 14-daagse cycli van een onderzees hydrothermaal systeem dat onder invloed van de oceanische getijden 'aan' en 'uit' ging.



▲ Afb. 7. Magnetietbandje (zwart) tussen dunne, lichtgekleurde vulkanische tuflaagjes (ca. 1,9 Ga oud), W-Bergslagen, Zweden. Het zwarte ijzererts zakte onder zijn eigen gewicht weg in de onderliggende verse, nog onverharde tuflaag.

BIFs van het Algoma-type, zoals die uit het Zweedse Precambrische Schild, zijn geassocieerd met en ingeschakeld tussen dikke onderzeese, veelal 'zure' vulkanische afzettingen (afb. 7). Belangrijke voorkomens zijn er, behalve in Europa, in Ontario (Canada), West-Australië (Yilgarn kraton) en Liberia (West-Afrika). Door hun associatie met onderzees vulkanisme dicht men deze afzettingen een vulkanische oorsprong toe, temeer omdat er in dezelfde vulkanische series ook 'vulkanogene massieve sulfide-afzettingen' voorkomen, zoals in Bergslagen (Midden-Zweden). Een tweede argument is dat er in de tegenwoordige oceanen rond diepe, vulkanische heetwaterbronnen vaak kiezel neerslaat, vergelijkbaar met de kiezellaagjes van de BIFs.

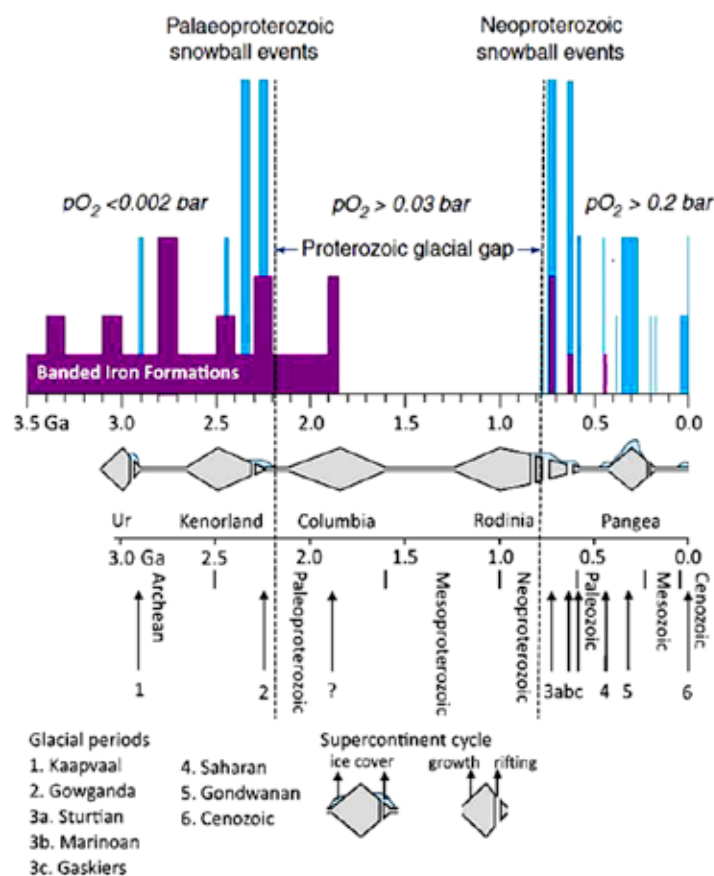
### BIFs in de geologische tijd

BIFs zijn vrijwel exclusief Precambrisch (afb. 8). De oudste stammen uit het Archaeïcum (ca. 3,5 miljard jaar oud, wanneer de eerste organismen evolueren die

d.m.v. fotosynthese vrije zuurstof produceren, waarover later meer), de jongste zijn Neoproterozoïsch, het allerlaatste Precambrische tijdvak, tussen 740 en 550 miljoen jaar geleden. Het valt op dat deze jongste voorkomens samenvallen met het optreden van ijstijden, i.h.b. de laat-Proterozoïsche 'Snowball Earth'-perioden gedurende een tijdvak dat om die reden het Cryogeen is genoemd.

Na het Precambrium worden er nog enige BIFs gevormd tijdens het Ordovicium (met een ouderdom van ca. 440 miljoen jaar).

De 'Snowball Earth'-theorie stelt dat zee-ijs zich in die tijd uitbreidde vanaf de polen tot in de tropen (Kirschvink, 1992). Ook oudere BIFs vallen nogal eens samen met glaciële periodes (afb. 8). De Zweedse BIFs zijn 1,89 miljard jaar oud (afb. 7) zonder dat er een bekend verband is met glaciaties, maar daar denken wij (VU-onderzoekers) intussen anders over (Vandenberghe et al., 2020; Kuipers et al., 2021, 2022). Het verband tussen de vorming van BIFs en vaak wereldwijde glaciaties opent een interessant perspectief op de ontwikkeling van de atmosfeer gedurende het Precambrium.



▲ Afb. 8. Voorkomen van Banded Iron Formations (paars) en ijstijden (blauw) en supercontinenten (grijze balk) in de geologische tijd. BIFs ontstonden in het Archaeïcum (3,5-2,5 Ga) en het Palaeoproterozoïcum (2,5-1,85 Ga), daarna een hele tijd niet en ten slotte nog enkele keren in het jonge Proterozoïcum, tijdens de Cryogene Periode (850-635 Ma) en het oudste Phanerozoïcum (Ordovicium, 440 Ma). Vóór de 'Great Oxidation Event' (GOE, ca. 2,3 Ga) was het zuurstofgehalte van de atmosfeer minder dan 1% van de huidige 21% (= 0,2 bar partiële zuurstofdruk). Bij de GOE en kort voor het Cryogeen (~780 Ma) steeg het zuurstofgehalte stapsgewijs naar het huidige niveau. Naar: Hoffman & Schrag (2002) en Eyles (2008).

## BIFs en de evolutie van klimaat en atmosfeer

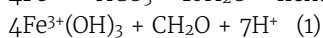
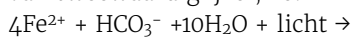
De zon wordt met de tijd steeds warmer. Hoe meer helium hij verzamelt, als gevolg van fusie van waterstofatomen, des te (soortelijk) zwaarder en heter hij wordt. Twee miljard jaar geleden gaf hij slechts 70% van de huidige warmte af, daarvoor nog minder. Zou dat nu gebeuren, dan raakte de aarde stijf bevroren. Geen wonder dus dat de aarde in die tijd gevoeliger was voor wijdverbreide en langdurige, fluctuerende verijzingen. Dankzij de Precambrische atmosfeer is het hier al die tijd toch leefbaar geweest. De vroege atmosfeer was vrijwel zuurstofloos (afb. 8), maar wel rijk aan het broeikasgas CO<sub>2</sub>, omdat er nog geen kalkbindende organismen bestonden, zoals schelpen, koralen, mosdiertjes of kalkplankton. Het sterke atmosferische broeikas effect (als gevolg van het hoge CO<sub>2</sub>-gehalte) compenseerde de lage zonne-intensiteit en hield de oppervlaktetemperatuur grosso modo boven het vriespunt.



▲ Afb. 9. Archaeïsche stromatolieten, ca. 3,4 Ga. Pilbara Kraton, NW-Australië.

## Fotosynthese

Eencellig bacterieel leven bestaat al sinds het oudste Archaeicum. Fotosynthese, het biologische proces in bacteriën en planten dat kooldioxide en water combineert tot suikers, is door de evolutie al rond 3,4 miljard jaar geleden door bepaalde bacteriën 'uitgevonden'; eerst gebruikte het proces gereduceerde moleculen of ionen (waterstof, opgelost tweewaardig ijzer, zwavel, e.a.) als elektron donor voor de reductie van geoxideerd koolstof (in CO<sub>2</sub>, en bicarbonaat: HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), bijv., in het geval van tweewaardig ijzer, zo:



... waarin CH<sub>2</sub>O (formaldehyde) staat voor 'biomassa'.

Stromatolieten (fossiele 'algenmatten'), gevormd door fotosynthetiserende, chlorofylhoudende cyanobacteriën (vroeger wel blauwalg genoemd) getuigen daarvan (afb. 9). Stromatolieten komen vandaag de dag

nog voor in Shark Bay in West-Australië (afb. 10), en bijvoorbeeld ook in Zeeland (Boekschoten, 1995)! Hun 'anoxygene fototrofie', reactie (1), produceerde nog geen vrije zuurstof. Dat ontstond mogelijk pas 2,75 miljard jaar geleden in het late Archaeicum, bij de oxygene fotosynthese, een meerfasig proces dat het watermolecuul splitst en vrije zuurstof als restproduct achterlaat, vereenvoudigd weer te geven als:



## Vroege oases van zuurstof

Vrije zuurstof is sterk reactief, het is als een 'gif' voor het milieu en oxideert alles wat het te pakken krijgt – vandaar die rode tropische bodems (afb. 1). Het oxideert ook het in de oceanen opgeloste ijzer. Ijzer is alleen als tweewaardig positief ion (Fe<sup>2+</sup>) goed in water oplosbaar. Oxideert Fe<sup>2+</sup> tot driewaardigheid (Fe<sup>3+</sup>), dan slaat het neer als ijzer(hydr-)oxide. Ziedaar de sleutel tot het ontstaan van BIFs: onder de zuurstofvrije oud-Precambrische atmosfeer vond er geen oxidatie en neerslag plaats van het opgeloste oceanische Fe<sup>2+</sup>; de oceanen waren toen relatief ijzerrijk. Het ijzer was afkomstig van verweering en erosie van het landoppervlak en ook van onderzees vulkanisme, nl. uit chemische reacties tussen verhit zeewater en vulkanische gesteenten van de oceaانبodem. Alleen *anoxygene fototrofie* (reactie (1) hierboven) zou voor de vroeg-Archaeïsche BIF-neerslag kunnen hebben gezorgd, maar het is twijfelachtig of er genoeg blauwalgen waren om de massale BIF-neerslag te veroorzaken. Dat er op ondiepe zeebodems van de continentale platen niettemin toch zoveel ijzer in BIFs kon neerslaan, wordt wel toegeschreven aan oxidatie in lokale 'zuurstof-oases', 'whiffs of oxygen', de allereerste, plaatselijke voorkomens van vrije zuurstof, geproduceerd door cyanobacteriën in het ondiepe zeewater. Dat veronderstelt dat de oxygene fotosynthese al veel vroeger dan 2,75 Ga zou zijn ontstaan, misschien wel een miljard jaar eerder.



▲ Afb. 10. Recente stromatolieten. Shark Bay, West-Australië.

## 'Great Oxidation Event'

De voortdurend biologisch geproduceerde vrije zuurstof in de atmosfeer werd aanvankelijk weggenomen door oxidatie van alles wat er aan het aardoppervlak te oxideren viel. Maar mettertijd, met de groei van de (toen nog vrijwel uitsluitend oceanische) biosfeer, kreeg de zuurstofproductie de overhand. Rond 2,4 miljard jaar geleden zien we hierdoor een snelle toename van het atmosferisch zuurstofgehalte, ongeveer een vertien- of vervijftienvoudiging (afb. 8), maar nog ver onder het huidige niveau van ca. 21%. Dit staat bekend als de 'Great Oxidation Event' (GOE). Vóór de GOE, onder de vrijwel zuurstofloze atmosfeer, zijn er veel BIFs gevormd, erna veel minder (afb. 8), omdat ook de diepe oceanen zuurstofrijk werden en bijv. vulkanisch gegenereerd ijzer in de oceaan onmiddellijk neersloeg.

Hoe kan het dan dat Lake Superior-type BIFs tegen het eind van het Precambrium nog een aantal keren terugkeerden? Aanhangers van de 'Snowball Earth'-theorie schrijven dat toe aan de wereldwijde glaciaties van die episode, met zee-ijs tot aan de evenaar. Dat ijs isoleerde het oceaanwater van de zuurstofhoudende atmosfeer; opgelost  $\text{Fe}^{2+}$  werd niet langer al in de diepzee geoxideerd, maar kon zich opnieuw tot op de ondiepe shelfzeeën uitbreiden, waar het lokaal contact maakte met de atmosfeer en alsnog oxideerde en neersloeg. Datzelfde moet gebeurd zijn met de 1,9 miljard jaar oude post-GOE-BIFs, waar we als gezegd nu sporen van een 'Snowball event' beginnen terug te vinden.

Aan het eind van het Precambrium trad er opnieuw een relatief snelle toename op van de atmosferische zuurstofconcentratie (afb. 8). Daarmee was het tijdperk van de BIFs definitief voorbij, met uitzondering van een korte periode tijdens de omvangrijke Ordovicische glaciatie in het oud-Phanerozoïcum (afb. 8).

De concentratie van opgelost ijzer in de tegenwoordige zuurstofrijke oceanen is extreem laag, wat verklaart waarom ook Algoma-type BIFs niet meer ontstaan. 'Geo-engineering' wordt wel gezien als één van de oplossingen voor het huidige anthropogene broeikas-effect. Experimenten met ijzerbemesting van de oceaan vallen daar onder (bijv. Güssow et al., 2010), van o.a. het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee (NIOZ, Texel), om groei van fytoplankton in de oceanen te stimuleren en daarmee  $\text{CO}_2$  aan de atmosfeer te onttrekken.

*De foto's bij dit artikel zijn van de auteur, tenzij anders vermeld.*

## Literatuur

- Boekschoten, G.J., 1995. Stromatoliet op rif: een Zeeuwse specialiteit. *Grondboor & Hamer* 49 (3/4), 54-56.
- Eyles N., 2008. Glacio-epochs and the supercontinent cycle after ~3.0 Ga: Tectonic boundary conditions for glaciation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 258, 89-129; <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.09.021>.
- Fischer, W.W., J. Hemp, J.E. Johnson, 2016. Evolution of oxygenic photosynthesis. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 44, 647-683; <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054810>.
- Güssow K., A. Proelss, A. Oschlies, K. Rehdanz, W. Rickels, 2020. Ocean iron fertilization: Why further research is needed. *Marine Policy* 34 (5), 911-918; <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2010.01.015>.
- Hoffman P.F., D.P. Schrag, 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova* 14, 129-155; <https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.2002.00408.x>.
- Kirschvink, J.L., 1992. Late Proterozoic Low-Latitude Global Glaciation: the Snowball Earth. In: J. W. Schopf & C. Klein (eds.), *The Proterozoic Biosphere: A Multidisciplinary Study*. Cambridge University Press, 1992. 2.3, 2 pp.
- Kuipers, Gerrit, Frank F. Beunk, Keewook Yi, Frederik M. van der Wateren, 2021. A 1.9 Ga glacial sedimentary facies association at low palaeolatitude from the Grythyttan Field, Bergslagen, Sweden. *Norwegian Journal of Geology* 101, 202101. <https://doi.org/10.17850/njg101-1-1>.
- Kuipers, Gerrit, Frank F. Beunk, 2022. The Fagervik diamictite: Evidence for a low-latitude, post-1871 Ma glaciation in the Svecofennian orogen of northern Sweden. *Norwegian Journal of Geology* 102; <https://dx.doi.org/10.17850/njg102-4-3>.
- Lantink M.L., J.H.F.L. Davies, P.R.D. Mason, U. Schaltegger, F.J. Hilgen, 2019. Climate control on banded iron formations linked to orbital eccentricity. *Nature Geoscience* 12, 369-374; <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0332-8>.
- Lantink, M.L., J.H.F.L. Davies, M. Ovtcharova, F.J. Hilgen, 2022. Milankovitch cycles in banded iron formations constrain the Earth-Moon system 2.46 billion years ago. *Proceedings National Academy of Sciences USA (PNAS)* 119 (40), 10 pp; <https://doi.org/10.1073/pnas.2117146119>.
- Matheson E.J., P.K. Pufahl, A. Voinot, J.B. Murphy, D.M. Fitzgerald, 2022. Ironstone as a proxy of Paleozoic ocean oxygenation. *Earth and Planetary Science Letters* 594; <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2022.117715>.
- Vandenbergh, Jef, Gerrit Kuipers, Frank F. Beunk, Keewook Yi, Frederik M. van der Wateren, 2020. Evidence of permafrost in the Palaeoproterozoic (c. 1.9 Ga) of Central Sweden. *Permafrost and Periglacial Processes* 32 (1), 169-177; <https://doi.org/10.1002/ppp.2094>.
- Williams G.E., 2022. Cyclic tidalites and seismites at a submarine hydrothermal system for a 2450 Ma banded iron formation, Hamersley Basin, Western Australia. *Austr. J. Earth Sci.*; <https://doi.org/10.1080/08120099.2023.2150682>.