



Van broeikas naar ijstijd:

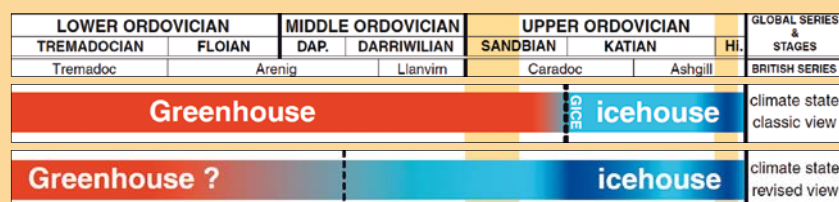
Het klimaat gedurende het Ordovicium

PERCY VAN KEULEN
PSFVANKEULEN@GMAIL.COM

AFBEELDING BOVEN. | Een zogenaamde dropstone in schalies uit het Ordovicium in Spanje. Deze dropstones vallen op de zeebodem en zinken erin als er aan het oppervlak ijsbergen voorbijdrijven die langzaam smelten en hun vracht loslaten. Het is duidelijk bewijs van de aanwezigheid van ijs.
Foto: Bas van de Schootbrugge.

AFBEELDING 1. | Klassieke versus herziene visie op het klimaatverloop in het Ordovicium. Uit Vandenbroucke et al. 2010.

Tot zo'n dertig jaar geleden werd het klimaat in het Ordovicium door paleoklimatologen en geologen als een schoolvoorbeeld van een broeikas-klimaat beschouwd. Wel viel de heftige ijstijd aan het eind van het tijdperk daarmee moeilijk te rijmen, en dit is door klimaatsceptici dan ook aangegrepen om het verband tussen het CO₂-niveau in de atmosfeer en de wereldwijde temperatuur te betwisten. Recentelijk is gebleken dat de oudere opvattingen over het klimaat in het Ordovicium aanmerkelijk moeten worden bijgesteld (Afb. 1). De ijstijd aan het eind is gebleven, maar tegenwoordig wordt algemeen aangenomen dat deze is voorafgegaan door een periode van afkoeling en zelfs al een ijstijd in het Midden-Ordovicium. Dit alles gebeurde waarschijnlijk bij (veel) lagere CO₂-niveaus dan waarvan men vroeger uitging. Over de oorzaken van beide ijstijden tast men nog altijd in het duister. Echter, hypotheses genoeg.



Een vreemde wereld

De wereld tijdens het Ordovicium, het geologische tijdperk dat van 486 tot 443 miljoen jaar geleden duurde, verschilde in veel opzichten van de onze (Afb. 2).

Aan het begin van het Ordovicium bevond bijna alle landmassa zich op het zuidelijk halfrond (Afb. 4). Afrika, Zuid-Amerika, Arabië, Antarctica, India en Australië waren geclusterd en vormden tezamen het supercontinent Gondwana. De geografische zuidpool lag ergens in wat nu de westelijke lob van Afrika is. Azië en Europa bestonden nog niet in hun huidige vorm; de vele kleinere componenten, 'terranes', waaruit deze continenten zijn opgebouwd, lagen over het zuidelijk halfrond verspreid. De noordoostelijke helft van Europa inclusief Nova Zembla vormde een afzonderlijk paleocontinent, Baltica genaamd. Door een actieve platentektoniek bewoog het tijdens het Ordovicium snel noordwaarts, van 60° ZB naar 20° ZB, en kwam het steeds dichterbij het paleocontinent

Laurentia – het huidige Noord-Amerika – in het noordwesten te liggen. Ook andere terranes verplaatsten zich in noordelijke richting (Afb. 3).

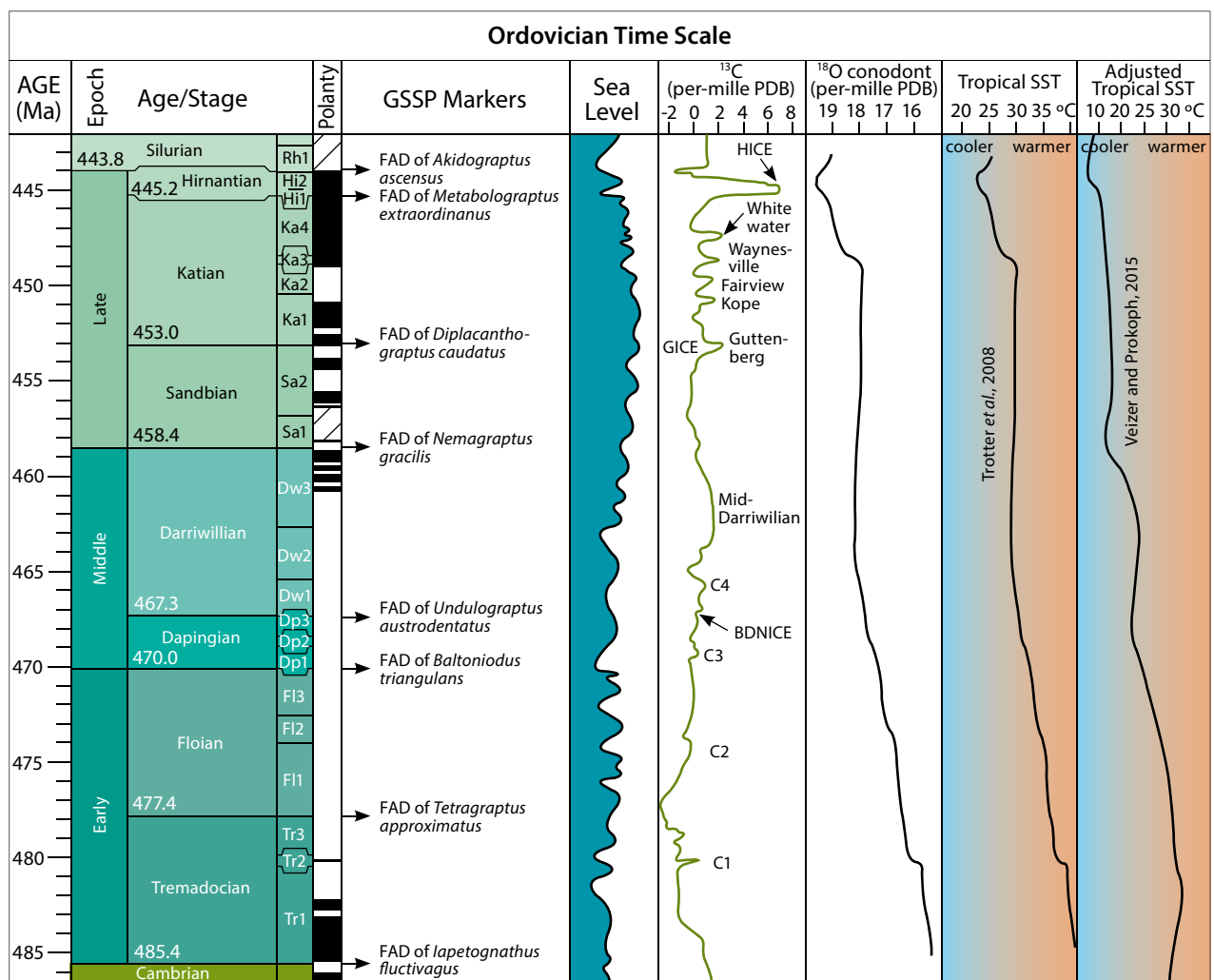
Een merkwaardig fenomeen in het Ordovicium, althans het begin ervan, is de ongeëvenaard hoge zeespiegel. Hierdoor lagen de vlakke delen van sommige paleocontinenten onder water. Het bijzonder vlakke Baltica ging zelfs voor het grootste deel onder een ondiepe zee schuil. Van dergelijke epicontinentale zeeën bestaat geen hedendaagse equivalent. De getijdenwerking in deze zeeën moet sterker dan tegenwoordig geweest zijn doordat de maan zich op kleinere afstand van de aarde bevond.

De atmosfeer kende een veel hoger kooldioxideniveau dan de huidige 390 parts per million. Hoeveel hoger, is nu voorwerp van veel discussie. Een tot voor kort gangbaar model berekent ca. 7000 ppm aan het begin van het Ordovicium, wat een *gemiddelde* temperatuur op aarde van 25°C oplevert, waarbij nog meegenomen is dat de zon bijna 5% minder krachtig scheen dan nu! Het percentage zuurstof in de atmosfeer, aanvankelijk ongeveer de helft van het huidige, nam in de loop van het Ordovicium sterk toe.

Het (meercellige) leven speelde zich voornamelijk af in de bovenste lagen van de oceanen en de ondiepe epicontinentale zeeën af en ontwikkelde zich in de loop van het Ordovicium sterk. Van plantaardig leven op het land ten tijde van het Ordovicium zijn weinig sporen gevonden, maar (niet door ijs bedekte) ordovicische landafzettingen zijn in het geologisch archief sowieso zeldzaam. Vermeldenswaard is nog dat de ordovicische dag ongeveer 21 uur duurde doordat de aarde sneller om haar as draaide, maar wat de consequenties hiervan voor het klimaat waren, is onduidelijk.

Reconstructie van het klimaat in het Ordovicium

Het is allesbehalve een eenvoudige zaak om iets te weten te komen over het



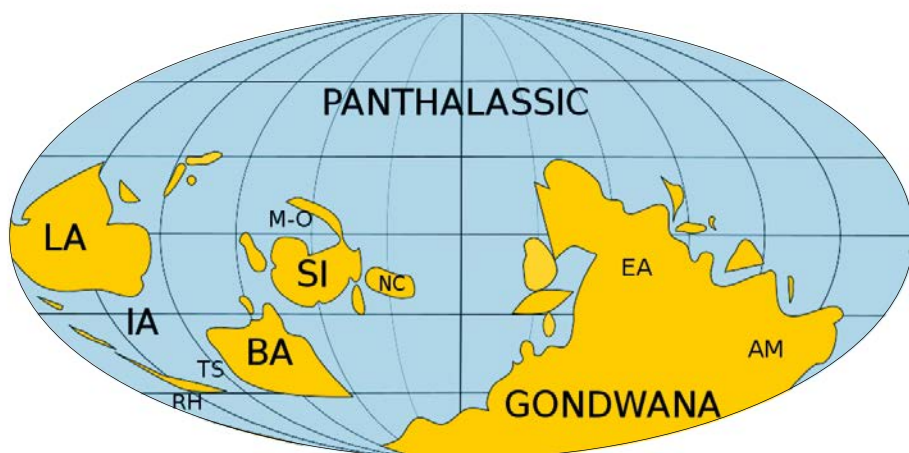
AFBEELDING 2. | Chronostratigrafische indeling van het Ordovicium.



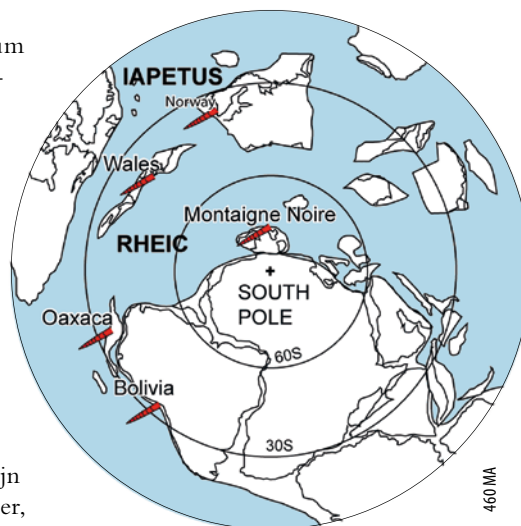
klimaat in een tijdperk zo lang geleden. Er is geen ijs uit het Ordovicium bewaard waaruit monsters genomen kunnen worden, zodat we zijn aange-
wezen op sedimentaire gesteenten en fossielen uit die periode. Om uit dat
materiaal data over het klimaat te verkrijgen, kan men gebruik maken van
vier methodes:

1. Studie van geomorfologische verschijnselen. Het klimaat is van
rechtstreekse invloed op afzettingen op land en in zee en laat allerlei
sporen achter in gesteenten. Gletscherkrassen, morenes en tills (ver-
steende keilemafzettingen) getuigen van een ijsbedekking; woestijn-
afzettingen van een heet, droog klimaat. In hoeverre zulke verschijn-
selen ook iets kunnen zeggen over het wereldwijde klimaat, hangt af
van de geografische breedte waarop ze zich voordoen en hun verspreiding.
Ook marine sedimenten verschaffen klimaatgerelateerde informatie, en
dan met name over de hoogte van de zeespiegel in de periode waarin ze zijn
afgezet. Uit gesteentetypen is af te leiden of ze in ondiep dan wel diep water,
nabij een kust of juist ver daarvan verwijderd, zijn afgezet. Strandribben en
evaporieten wijzen op zeer ondiep water; hardgrounds en abrasievlakken op
onderbrekingen in de afzetting en dus *regressie* (terugtrekking) van de zee.
Regressie kan duiden op de vorming van een ijskap, waardoor water aan de
oceanen onttrokken wordt; *transgressie* (zeespiegelstijging) op het afsmelten van
een ijskap. Voorwaarde voor het signaleren van een *eustatische* (wereldwijde)
zeespiegelverandering is wel, dat het gebied waar de zeespiegelverandering
geconstateerd wordt, tektonisch rustig is en bovendien een zeer lage sedimeta-
tietempo kent. Aldus kunnen plaatselijke invloeden op de zeespiegel worden
uitgesloten. Het paleocontinent Baltica was zo'n rustig gebied. Daarom zijn de
zeespiegeldalingen en -stijgingen die daar zijn vastgesteld, in verband gebracht
met de groei, respectievelijk het afsmelten van een ijskap op de zuidpool.
Overigens moet men bedenken dat ook eustatische zeespiegelveranderingen
een tektonische oorzaak kunnen hebben, bijvoorbeeld doordat de oceanbodembodem
stijgt. Waarschijnlijk was dit ook een factor in het Ordovicium.
Bij deze methode hangt veel af van de interpretatie door de onderzoeker, het 'oog
van de meester', wat maakt dat er een zekere subjectiviteit aan kleeft (Afb. 5).

2. Studie van marine fauna's en ecosystemen (biofacies-analyse).
Marine levensgemeenschappen stellen specifieke eisen aan hun milieu wat betreft
waterdiepte, -temperatuur, -helderheid, nabijheid van land en andere factoren.
Fossiele fauna's kunnen dus belangrijke indicatoren van zeespiegelniveau en
klimaat zijn, vooral als hun paleogeografische locatie min of meer bekend is.
Zo duidt uitbreiding van een tropische fauna richting hogere breedtegraad op
opwarming. Ondubbelzinnige aanwijzingen over (zeewater)temperatuur geven
fossiele fauna's echter lang niet altijd. Conclusies worden vaak op basis van
analogie met recente organismen getrokken en het is de vraag in hoeverre dat
gerechtvaardigd is. Ook bij deze methode is de interpretatie van de onderzoeker
een bepalende factor.



AFBEELDING 4. | Ligging van paleocontinenten in het Midden-Ordovicium.
Kent G. Budge, via Wikimedia Commons (CC-0).



AFBEELDING 3. | Ligging van paleocontinenten op het zuidelijk halfrond aan het begin van het Katian. Uit Kröger et al. 2009 (CC-BY-3.0).

3. Modellen

A. Oceaancirculatie. De stroming aan het oppervlak van de oceanen wordt voor een belangrijk deel aangedreven door winden. De richting van deze winden wordt bepaald door natuurkundige principes die samenhangen met de rotatie van de aarde, zoals het Coriolis-effect. Wanneer de ligging van de paleocontinenten ongeveer bekend is, kan men in beginsel de richting van de oceaanstromen berekenen. Daarmee is dan te reconstrueren welke gebieden onder invloed van koude of warme kustwateren stonden. De gepubliceerde modellen lopen echter behoorlijk uiteen.

B. Schatting van de hoeveelheid atmosferisch CO₂. Geen redelijk mens zal vandaag de dag nog het verband ont-
kennen tussen de hoeveelheid van het broeikasgas CO₂ in de atmosfeer en de temperatuur. Het is dus voor de reconstructie van het klimaat in het Ordovicium van groot belang om een beeld te krijgen van de concentratie CO₂ in de toenmalige atmosfeer. Om die concentratie in het geologische verre verleden te schatten, zijn geochemische modellen ontworpen die uitgaan van de koolstofcyclus als gesloten systeem. Er vindt binnen dit systeem een voortdurende uitwisseling plaats tussen verschillende reservoirs: koolstof opgeslagen in carbonaat- en silikaatgesteenten, organische koolstof, CO₂ opgelost in oceaانwater, atmo-



sferisch CO₂ en CO₂ uitgestoten door vulkanen. Modellen proberen aan de hand van wiskundige vergelijkingen de concentratie atmosferisch CO₂ te schatten door de hoeveelheid koolstof in andere koolstofreservoirs, en de uitwisseling er tussen, te kwantificeren. Zulke modellen zijn uiterst complex, omdat alle mogelijke data, zoals uitkomsten uit isotopen-analyse (waarover meer in het vervolg) erin verwerkt worden. Een bekend model is GEOCARB, ontwikkeld door de Amerikaanse geoloog Robert Berner, dat in stappen van 10 miljoen jaar, vanaf 600 MA geleden tot heden, de concentratie atmosferisch CO₂ berekent (Berner & Kothavala 2004; Royer *et al.* 2004). Het zijn dit soort modellen die voor het Ordovicium een hoge concentratie atmosferisch CO₂ aangeven, overigens binnen een grote bandbreedte (2000 tot 7500 ppm).

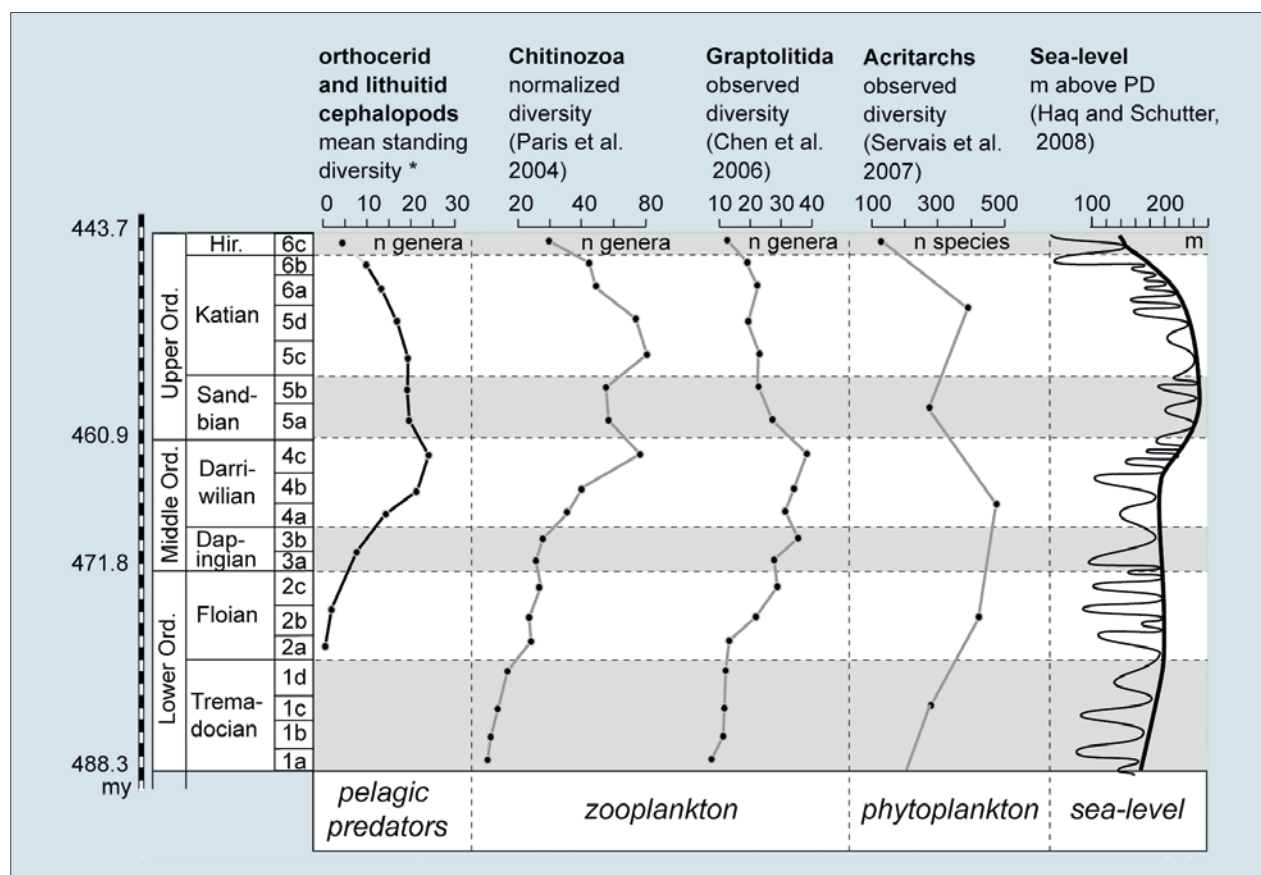
4. Stabiele isotopen-analyse. Een belangrijke methode voor het verkrijgen van klimaatgerelateerde gegevens is isotopen-analyse. Elementen onderscheiden zich van elkaar door een verschillend aantal protonen in de atoomkern. Zo heeft zuurstof het *atoom-*

nummer acht, hetgeen betekent dat het acht protonen in de kern heeft. Het aantal neutronen in de kern kan iets van het aantal protonen afwijken, zodat het *atoomgewicht* – de som van alle protonen en neutronen – van een element kan variëren. De verschillende varianten heten *isotopen*. Zo kent koolstof (atoomnummer zes) de isotopen C-12, C-13 en C-14.

Isotopen komen in een bepaalde verhouding in de natuur voor. De verhouding tussen twee isotopen wordt uitgedrukt door de zogenaamde deltawaarde (symbool δ): de concentratie van de minst voorkomende isotoop ten opzichte van het meest voorkomende. De deltawaarde kan men vaststellen met een massaspectrometer. Door geochemische en biochemische processen kunnen kleine fluctuaties ontstaan in die deltawaarde, en bij sommige elementen zijn die fluctuaties klimaatgerelateerd. Daarom maakt de paleoklimatologie graag gebruik van isotopen-analyse, en worden er voortdurend nieuwe toepassingen ontwikkeld. De geochemische en/of biochemische processen waar deze isotopen bij betrokken zijn, verschillen uiteraard per element. Bij het onderzoek naar het klimaat in het Ordovicium zijn vooral de stabiele isotopen van koolstof en zuurstof van belang, in mindere mate die van strontium, zwavel, boor en uranium.

A. Bij koolstofisotopen draait het om de verhouding tussen organische en anorganische koolstof in de atmosfeer en de oceanen. Tijdens fotosynthese halen planten en algen CO₂ uit de atmosfeer. Daarbij hebben ze een voorkeur voor de lichtere isotoop C-12 boven het zwaardere C-13. Ongeveer 99% van koolstof bestaat uit C-12, slechts 1% uit C-13. De deltawaarde, gebaseerd op de minst voorkomende isotoop, wordt daarom genoteerd als δ¹³C, en verwijst naar het aantal deeltjes C-13 per duizend (‰) ten opzichte van een bepaalde standaard. Een waarde van nul betekent dat de verhouding tussen C-12 en C-13 in een monster overeenkomt met die van de standaard (bij C-13 gebaseerd op de zogenaamde Pee Dee belemniet).

Door de tijd heen treden er, door allerlei oorzaken, voortdurend verschuivingen in δ¹³C op. Wanneer een hoeveelheid organische koolstof verbrand wordt, stijgt het percentage C-12 in de atmosfeer en neemt het percentage C-13 af. Omge-



AFBEELDING 5. | Curve van de zeespiegel gedurende het Ordovicium met samenhangende biodiversiteit. Uit Kröger *et al.* 2009 (CC-BY-3.0).



keerd kan het percentage C-13 gemeten in gesteenten stijgen wanneer een grote hoeveelheid organisch materiaal, rijk aan C-12, wordt begraven en zo aan de cyclus wordt onttrokken. Maar het is ook mogelijk dat C-13 gemeten in gesteenten stijgt doordat bij grootschalige verwerking van silikaatgesteenten tot carbonaten koolstof wordt vastgelegd zonder de voorkeur voor C-12 die planten tonen. Het maakt natuurlijk ook uit, in welk materiaal men de koolstofisotopen meet; zo bevat organisch materiaal van nature veel meer C-12 dan gesteenten.

Isotopen-analyse van koolstof geeft dus geen rechtstreekse informatie over het klimaat; het is een *proxy* (letterlijk: gevolmachtigde). De gemeten uitkomsten kunnen verschillende oorzaken hebben en vereisen daarom duiding. Het is vooral de verschuiving in deltawaarde door de tijd heen die als signaal van klimaatverandering wordt herkend: in koelere perioden/ijsstijden lijken hogere C-13 waarden op te treden.

B. Van groot belang voor de studie naar het klimaat in het Ordovicium is de isotopen-analyse van zuurstof. Zuurstof kent de stabiele isotopen O-16 en O-18; 99,75% van de natuurlijke zuurstof bestaat uit O-16, slechts 0,2% uit O-18. Als calciumcarbonaat, CaCO_3 , zich vormt in de aanwezigheid van water, neemt het bij lagere temperatuur iets meer O-18 op dan bij hogere (Urey 1948). Door het percentage O-18 in CaCO_3 te meten kan men dus uitrekenen bij welke temperatuur die CaCO_3 zich gevormd heeft. Voor fosfaatmineralen zoals Apatiet geldt hetzelfde (Finnigan *et al.* 2011).

Onderzoekers maken graag gebruik van fossielen van brachiopoden en conodonten om het percentage O-18 te meten. De meeste brachiopoden bouwen hun schaal op uit calciumcarbonaat; conodonten vormen hun kauwapparaat uit fosfaatmineraal. Van beide organismen komen fossielen in veel Ordovicische formaties voor. Door de O-18 te meten in brachiopoden en conodonten uit opeenvolgende formaties kan men dus idealiter het temperatuurverloop in een bepaalde regio meten.

Er kleven echter de nodige mitsen en maren aan deze methode: het is soms moeilijk om monsters te verkrijgen die niet diagenetisch veranderd zijn en het staat niet vast dat de $\delta^{18}\text{O}$ in zeewater in het Ordovicium bij een bepaalde temperatuur hetzelfde was als tegenwoordig (Finnigan *et al.* 2011). En dan is er nog het mechanisme dat wanneer water, H_2O , uit zee verdampt, er iets meer van de zwaardere isotoop O-18 achterblijft. De gewone verhouding wordt hersteld wanneer waterdamp boven zee uitregent, maar als de neerslag als sneeuw valt op een landoppervlak en die sneeuw zich ophoopt tot een ijsmassa, neemt O-18 in het zeewater op den duur toe. Hoe meer O-18, des te meer ijs op hoge breedte en hoe kouder het wereldwijde klimaat. Deze 'extra' O-18 moet ook verdisconteerd worden bij de isotopen-analyse en de daarop gebaseerde berekening van de temperatuur.

C. Op grond van isotopen-analyse zijn recentelijk ook methodes ontwikkeld om het gehalte CO_2 in de ordovicische atmosfeer vast te stellen.

Één methode maakt gebruik van de $\delta^{13}\text{C}$ van fossiele marine algen (phytoplankton). Hoe meer van dit CO_2 beschikbaar is, des te beter kunnen de algen het lichtere C-12 selecteren, en dit is af te lezen aan de isotopensamenstelling van de koolstof in hun biomoleculen. Zo kun je berekenen hoeveel CO_2 in het water – correlerend met atmosferisch CO_2 – is opgelost. Veel andere factoren zijn echter ook van invloed op de $\delta^{13}\text{C}$ van phytoplankton, hetgeen de toepassing van deze methode complex maakt (o.a. Witkowski *et al.* 2018; Polissar *et al.* 2023). Ook is er een proxy die gebruik maakt van $\delta^{13}\text{C}$ van in paleosols (oude bodems) gevormd carbonaat. Dit carbonaat heeft dezelfde $\delta^{13}\text{C}$ als CO_2 uit de bodem. Die bodem- CO_2 is dan weer een mengsel van respiratoir (door organismen in de bodem uitgeademd) CO_2 en atmosferisch CO_2 . Als de deltawaarden in het carbonaat en die van de respiratoire CO_2 bekend zijn, kan de concentratie atmosferisch CO_2 worden berekend (Breecker *et al.* 2010). Deze proxy is voor het Ordovicium niet toegepast wegens het ontbreken van fossiele bodems, maar een dalende trend voor het Devoon suggereert een hogere niveau atmosferisch CO_2 voor Ordovicium en Siluur, wat overigens niet veel hoger lag dan 2000ppm.

De genoemde methodes leveren een veelheid aan zeer diverse data op. Aan klimatologen de taak om op grond van deze gegevens het ordovicische klimaat te

reconstrueren. Hierbij twee observaties: 1. Data zijn niet altijd met elkaar in overeenstemming. Wanneer ze dat wel zijn, levert dat een robuust klimaatsignaal op; 2. De waarde van veel methodes ligt meer in het feit dat ze klimaatgerelateerde veranderingen laten zien over een bepaalde periode dan dat ze exacte informatie over het klimaat op een bepaald tijdstip opleveren.

Op grond van beschikbare data kan de ontwikkeling van het klimaat in het Ordovicium als volgt worden geschetst:

Vroeg-Ordovicium

Het begin van het Ordovicium moet extreem warm geweest zijn (Quinton *et al.* 2018; Goldberg *et al.* 2021) (Afb. 6). Metingen van O-18-waarden in conodonten uit Noord-Amerika en Australië wijzen een SST (Sea Surface Temperature = watertemperatuur aan het oceaanoppervlak) van ca. 42°C uit (Edward *et al.* 2022; Trotter *et al.* 2008). Dit is in overeenstemming met de hoge niveaus atmosferisch CO_2 die modellen voor deze periode berekenen, zij het dat de extreme waarden tot 7000 ppm die uit oudere modellen rolden tegenwoordig fors naar beneden zijn bijgesteld. In zo'n broeikas konden zich geen ijskappen aan de polen vormen. Toevoer van koud smeltwater vanuit de polen naar de oceanen ontbrak dan ook. Nu zijn verschillen in watertemperatuur en zoutgehalte belangrijke motoren van oceaancirculatie. Als die verschillen klein zijn, is de oceaancirculatie navenant zwak. Die geringe circulatie en het warme water – dat minder zuurstof kan bevatten dan koud water – leidden tot uitgebreide zuurstofarme zones in oceanen, vergelijkbaar met de situatie die nu in de Zwarte Zee heerst. Uit het vroege Ordovicium zijn van diverse plaatsen ter wereld schalieafzettingen bekend, die zich vormen in zuurstofarme omstandigheden. De zeespiegel was hoog, maar kende in deze periode flinke fluctuaties (Nielsen 2004). Vorming en afsmelten van ijskappen zijn niet erg waarschijnlijk als oorzaken hiervan, zodat de enige plausibele verklaring moet worden gezocht in de tektoniek.

Midden-Ordovicium

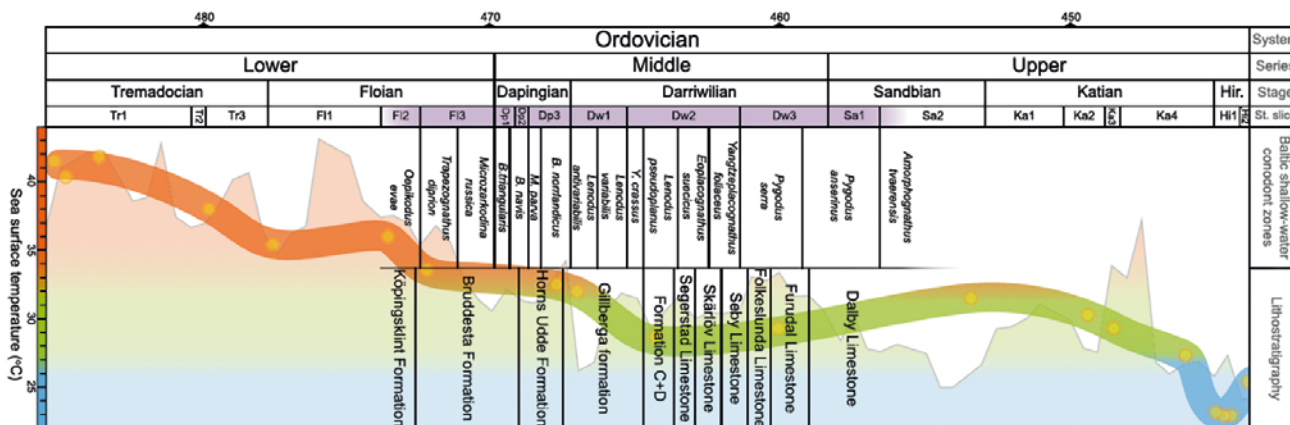
Vanaf het vroege Ordovicium zet de temperatuur van het (tropische) zee-water aan het oceaanoppervlak (SST), afgeleid uit de stijgende O-18 waarden



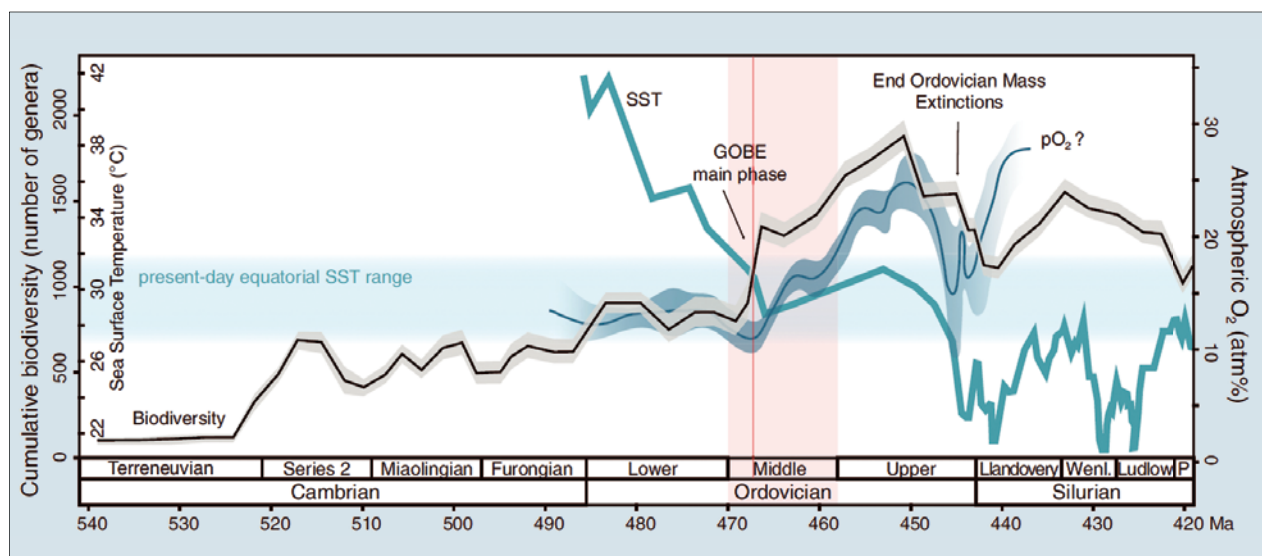
van conodonten en brachiopoden (van Gotland), een dalende trend in (Afb. 6). Tegen het eind van het Midden-Ordovicium bereikt die SST een niveau dat het huidige weinig ontloopt (ca. 30°C). De wereldwijde zeespiegel zakt in deze periode sterk, met zo'n 60 meter, maar blijft fluctueren, te zien aan transgressies en regressies in Baltica. Tegen de achtergrond van een lagere watertemperatuur is het niet onlogisch om de relatief lage zeespiegel toe te schrijven aan vorming van een ijskap. Sedert een jaar of 15 nemen veel paleoklimatologen dan ook aan dat er vanaf het Midden-Ordovicium op de zuidpool een ijskap lag. Directe aanwijzingen uit deze periode voor een glaciële bedekking in de vorm van moreneafzetting, gletscherkrassen of anderszins zijn er nauwelijks, maar het is mogelijk dat zulke sporen door latere ijsbedekking zijn uitgewist. Modellen

en computersimulaties hebben berekend dat voor het ontstaan van een ijskap op de zuidpool het gehalte atmosferisch CO₂ aanzienlijk lager moet hebben gelegen dan gepostuleerd wordt voor het Vroeg-Ordovicium, maar de schattingen tussen de verschillende modellen lopen nogal uiteen (van vijf tot twaalf keer het pre-industrieel CO₂-niveau).

Sommige paleontologen hebben recentelijk een verband gelegd tussen de Midden-Ordovicische afkoeling en de zogenaamde GOBE, de Great Ordovician Biodiversification Event (Afb. 7). De aanduiding slaat op de spectaculaire groei van de biodiversiteit in de loop van het Ordovicium. Niet alleen neemt het aantal soorten en families dan sterk toe, er ontstaan zelfs geheel nieuwe phyla en klassen, zoals de rugose koralen, de tabulate koralen, de stromatoporen en misschien de bryozoën (o.a. Servais *et al.* 2010). Deze ontplooiing van het leven maakt een grote sprong omhoog precies op het moment dat de Midden-Ordovicische afkoeling een voorlopige bodem bereikt heeft en er dus een ijskap op de zuidpool verondersteld mag worden. Hoe die afkoeling zou hebben geleid tot versnelling van de GOBE, is niet geheel duidelijk. Volgens sommige paleontologen zou afname van fysiologische stressfactoren de weg vrij hebben gemaakt voor diversificatie (Trotter *et al.* 2008). Anderen menen dat biota zich diversifieerden in reactie op de omslag van een gelijkmatig broeikasklimaat naar een situatie met grotere klimaat- en temperatuurverschillen, met als gevolg een sterkere oceanocirculatie en, daarmee samenhangend, opwellen van zuurstofrijk water in bepaalde zones (Rasmussen *et al.* 2016). Ook wordt een sterke toename van het zuurstofgehalte, niet alleen in de oceanen, maar ook in de atmosfeer, als verklaring aangevoerd (Edwards *et al.* 2017).



AFBEELDING 6. | Sea Surface Temperature gedurende het Ordovicium, berekend op grond van $\delta^{18}\text{O}$ in fossielen. Uit Edward *et al.* 2022 (CC-BY-NC-ND-4.0).



AFBEELDING 7. | Biodiversiteit, SST en atmosferisch zuurstof gedurende het Ordovicium. Uit del Rey *et al.* 2022 (CC-BY-4.0).



Opmerkelijk is dat parallel aan de afkoeling, maar een paar miljoen jaar later, het gehalte C-13 stijgt, de zogenaamde MDICE (Mid-Darriwilian Carbon Isotope Excursion). Ook deze MDICE wordt niet goed begrepen. Als een mogelijke oorzaak is gedacht aan de sterke toename van de biproductiviteit ten gevolge van de GOBE, waardoor meer organisch C-12 werd vastgelegd (Rasmussen *et al.* 2016).

Over de oorzaak van de Midden-Ordovicische afkoeling en daarmee samenhangend (?) de GOBE is niets met zekerheid bekend, maar verklaringen zijn in alle richtingen gezocht. Een van de meer avontuurlijke hypothesen draait om het uiteenvallen van een asteroïde. 20% van de meteorieten die nu nog op aarde vallen zijn zogenaamde L-chondrieten (L=Low in ijzer). Door chemische analyse is hun ouderdom vastgesteld op 470 MA, het tijdstip waarop de asteroïde waaruit ze afkomstig zijn, uit elkaar viel. In Midden-Ordovicische kalksteen uit Zuid-Zweden is een hoge concentratie van deze meteorieten gevonden (Afb. 8). De ouderdom van de kalksteen correspondeert met de versnellingsfase van de GOBE. Deze coincidentie heeft bij sommige paleontologen tot de veronderstelling geleid dat de GOBE op enigerlei wijze is gestimuleerd door een meteorietenregen (Schmitz *et al.* 2008). In een herziening van de hypothese wordt het verband anders gelegd. Nu zou het uiteenvallen van de asteroïde in de ruimte een stofwolk veroorzaakt hebben die de zonnestraling op aarde afschermd. Dit zou dan de afkoeling in gang hebben gezet die leidde tot de GOBE (Schmitz *et al.* 2019). Onlangs is echter berekend dat de piekfase van de GOBE 800.000 jaar eerder inzette dan de meteorietenregen.

Laat-Ordovicium

Over de ontwikkeling van het klimaat in de eerste helft van het Laat-Ordovicium bestaat veel onduidelijkheid. Metingen van gehaltes O-18 in fossielen geven uiteenlopende uitkomsten, die tot verschillende conclusies hebben geleid: het klimaat zou na de Midden-Ordovicische afkoelingsfase redelijk stabiel zijn gebleven, met temperaturen die de huidige benaderen (Trotter *et al.* 2008; Pohl *et al.* 2016); het klimaat zou, althans regionaal, wat milder zijn geworden (Quinton *et al.*, 2018); of de algemene trend van afkoeling zou zich in een langzamer tempo doorgezet hebben, waarbij de gemiddelde temperatuur met zo'n 9°C daalde (Männik *et al.* 2021). Schommelingen in gehaltes O-18 en het zeeniveau zijn toegeschreven aan het beurtelings afsmelten en aangroei van een ijskap (Finigan *et al.* 2011), hetgeen impliceert dat de temperatuur, binnen de grotere trend, varieerde.

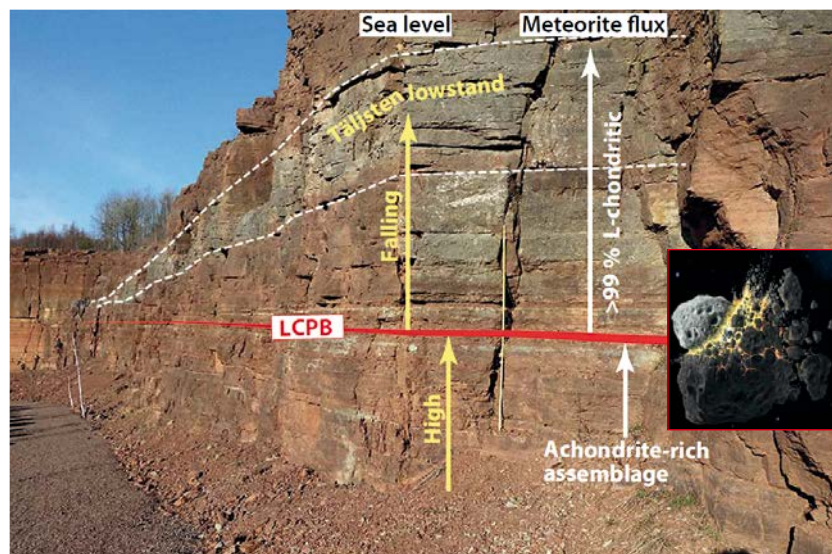
Temperaturen in de tropische gordel bleven waarschijnlijk op peil. Een grote temperatuurgradiënt tussen tropen en polen sluit een gelijkmatig broeikas-klimaat uit, zodat wordt aangenomen dat het gehalte atmosferisch CO₂ in het Laat-Ordovicium lager lag dan voorheen (Vandenbroucke *et al.* 2010). Een

opvallende piek in C-13 ligt aan het begin van het Katian, de zogenaamde Guttenberg Isotope Carbon Excursion (GICE). Uit deze periode dateren ook afzettingen van bentoniet (in een soort klei veranderde vulkanische as), die op veel plaatsen in Baltica, Noord-Amerika en zelfs China zijn aangetroffen (Afb. 9). Ze worden toegeschreven aan vulkaanuitbarstingen die samenhangen met het sluiten van de Iapetus-oceaan tussen Laurentia en Baltica. Men heeft verondersteld dat de asuitstoot van deze grootschalige erupties afkoeling veroorzaakte, die op haar beurt leidde tot afsterven en begraving van organisch materiaal. Dit zou dan zowel de piek in C-13 als een afname van atmosferisch CO₂ teweeg hebben gebracht (Saltzman & Young 2005; Chen *et al.* 2022).

In het Midden-Ashgill (Laat-Katian) breiden trilobieten- en brachiopodensoorten die rond de evenaar voorkwamen, zich richting de zuidpool uit, en vinden er ook andere opvallende faunaverschuivingen plaats. Hieruit is geconcludeerd dat er in deze periode sprake moet zijn geweest van een wereldwijde opwarming, de zogenaamde Boda-event, vernoemd naar de Zweedse Boda-kalksteen (Fortey & Cocks 2005). Die vermeende opwarming wordt niet bevestigd door andere indicatoren. Uit het fossielarchief blijkt overigens wel, dat het in Baltica warm moet zijn geweest, maar dit kan samenhangen met het feit dat het paleocontinent inmiddels de tropische zone binnen was geschoven.

De Hirnantian-ijstijd

Aan het begin van het Hirnantian breidt zich in korte tijd een enorme ijskap over het zuidelijke continent Gondwana uit (Afb. 10). Tal van glaciale en periglaciale structuren zoals tillieten (fossiel keileem), drumlins (langgerekte door gletschers gevormde heuvels), morenes en gletscherkrassen in Afrika, Zuid-Amerika en het Arabisch schiereiland vormen hiervan het bewijs (Sheehan 2001). Het wereldwijde zeeniveau daalt met 70 tot 100 meter. Tegelijkertijd stijgen δ¹³C en δ¹⁸O. De hoge O-18 waarden in tropische brachiopoden suggereren een sterke daling in de gemiddelde temperatuur, al kunnen deze hoge waarden deels veroorzaakt zijn door het uitsneeuwen van aan O-16 rijke waterdamp boven de ijskap. Schattingen van de duur van deze maximale



AFBEELDING 8. | De midden-ordovicische Hällekis-sectie in zuidelijk Zweden. Uit Schmitz *et al.* 2019 (CC-BY-4.0).

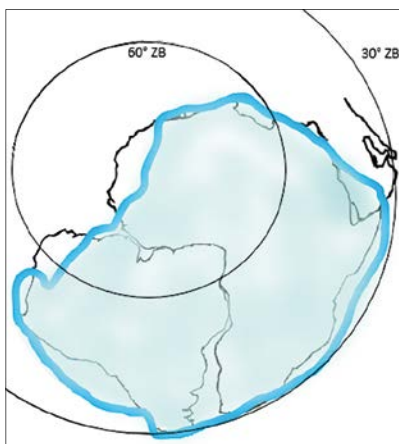




AFBEELDING 9. | *Bentonietaalag (geel) in ordovicische afzettingen (D1-D2), Ristna, Estland.*

glaciatie variëren van een paar honderd-duizend tot 1 miljoen jaar (Brenchley *et al.* 1994). Even abrupt als de ijskap is gegroeid, krimpt die aan het eind van het Hirnantian ook weer, hetgeen tot een snelle zeespiegelstijging leidt en een terugval in $\delta^{13}\text{C}$.

Zo'n omvangrijke glaciatie kan niet ontstaan bij een hoog gehalte aan gehalte CO_2 in de atmosfeer. Diverse hypothesen zoeken de verklaring voor de glaciatie dan ook in een drastische afname van atmosferisch CO_2 , misschien tot ca. vijf maal het huidige niveau (Vandenbroucke *et al.* 2010).



AFBEELDING 10. | *Ligging van de Hirnantian-ijskap op Gondwana. Naar Pohl *et al.* 2016, sterk vereenvoudigd.*

Volgens de zogenaamde productivity hypothesis groeide het volume plankton sterk door het op gang komen van thermische circulatie in de oceanen en de aanvoer van voedingsstoffen. Door de toename in de productie van organische koolstof werd veel CO_2 aan de atmosfeer onttrokken, wat vervolgens door begraafing uit de cyclus verdween (Brenchley *et al.* 1994; Sheehan 2001). De verweringshypothese stelt dat door gebergtevorming (van de Caledoniden en de Appalachen) grote oppervlakken siliciumhoudende gesteenten aan verwerking werden blootgesteld, zodat zich carbonaten vormden die atmosferisch CO_2 vastlegden (Kump *et al.* 1999; Sheehan 2001). Beide hypothesen slagen erin, de piek in $\delta^{13}\text{C}$ te verklaren.

De klimaatschokken die met snelle expansie en afsmelting van de ijskap gepaard gingen, hadden een funeste uitwerking op biota. De eerste schok werd veroorzaakt door het droogvallen van epicontinentale zeeën, waardoor het marine milieu waar de rijkste levensgemeenschappen floreerden, gedecimeerd werd. Soorten die zich met de zeespiegeldaling verplaatsten naar voorheen dieper water, bezweken ten gevolge van de competitie met plaatselijke soorten. Eerder in het Ordovicium waren in de diverse epicontinentale zeeën allerlei endemische fauna's tot ontwikkeling gekomen. Die provinciale fauna's maakten nu plaats voor kosmopolitische, waarvan de bekendste wel de Hirnantia-fauna is. Deze fauna, die verspreid over de wereld in allerlei Ordovicische afzettingen is te vinden, wordt gedomineerd door enkele soorten brachiopoden en schijnt een voorkeur gehad te hebben voor koude wateren. Tegen het eind van het Hirnantian, als de temperatuur toeneemt, verwijnt ook de Hirnantia-fauna. De snelle afsmelting van de ijskap – mogelijk in slechts een paar duizend jaar – leidt tot een stagnerende oceaancirculatie, waardoor grote delen van de oceaan zuurstofarm worden (Harper *et al.* 2013). Hiervan worden opnieuw veel soorten het slachtoffer. Bij elkaar opgeteld maken de twee uitstervingspulsus de Hirnantian-ijstijd tot de op twee na grootste extinctie in het Phanerozoicum (na de eind-Perm en eind-Krijt extinctie). In totaal sterven 26% procent van de families, 49% van geslachten en misschien wel 85% van de soorten in het Hirnantian uit. Op hoger taxonomisch niveau valt de schade echter mee. Anders dan in het Perm en Krijt, verdwijnen er in het Hirnantian geen complete phyla. Ecologische niches worden gauw weer opgevuld door andere soorten. Wel vinden er drastische verschuivingen plaats; zo komen de trilobieten het verlies in taxa aan het eind van het Ordovicium nooit meer te boven.



Uiteraard valt veel meer te zeggen over alle aspecten van het ordovicische klimaat. Veel onderzoekers houden zich ermee bezig, en nieuw ontwikkelde methodes die gebruik maken van isotopen-analyse zorgen voor een gestage stroom aan nieuwe

data. Het inzicht in het ordovicische klimaat zal zich de komende jaren ongetwijfeld sterk verdiepen.

LITERATUUR

- Berner, R.A., and Kothavala, Z. (2001). *Geocarb III: A revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time: American Journal of Science*, 301, 182–204.
- Chen, C., Shi, X., Zhang, W., Tian, X. (2022). *The Guttenberg δ¹³C excursion (GICE) and paleoclimate change recorded in the early Late Ordovician carbonate succession of the Ordos Basin, Northern China. Journal of Asian Earth Sciences*, 231, Article 105211.
- Edward, O., Korte, C., Ullmann, C.V., Colmenar, J., Thibault, N. & Bagnoli, G. (2022). *A Baltic perspective on the Early to early Late Ordovician δ¹³C and δ¹⁸O records and its paleoenvironmental significance. Paleoclimatology and Paleoclimatology*, 37, e2021PA004309.
- Edwards, C.T., Saltzman, M.R., Royer, D., & Fike, D.A. (2017). *Oxygenation as a driver of the Great Ordovician biodiversification event. Nature Geoscience*, 10, 925–929. <https://doi.org/10.1038/s41561-017-0006-3>
- Finnegan, S., Bergmann, K., Eiler, J.M., Jones, D.S., Fike, D. A., Eisenman, I., et al. (2011). *The magnitude and duration of Late Ordovician–Early Silurian glaciation. Science*, 331, 903–906. <https://doi.org/10.1126/science.1200803>
- Fortey, R.A., & Cocks, L.R. M. (2005). *Late Ordovician global warming – The Boda event. Geology*, 33, 405–408. <https://doi.org/10.1130/g21180.1>
- Goldberg, S.L., Present, T.M., Finnegan, S., & Bergmann, K.D. (2021). *A high-resolution record of early Paleozoic climate. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(6). <https://doi.org/10.1073/pnas.2013083118>
- Harper, D.A.T., Hammarlund E., Rasmussen, C.M.Ø. (2013). *End Ordovician extinctions: A coincidence of causes, Gondwana Research (2013). http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2012.12.021*
- Kump, L.R., Arthur, M.A., Patzkowsky, M., Gibbs, M., Pinkus, D., Sheehan, P. (1999). *A weathering hypothesis for glaciation at high atmospheric pCO₂ during the Late Ordovician. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 152, 173–187.
- Männik, P., Lehnert, O., Nölvak, J., Joachimski, M.M. (2021). *Climate changes in the pre-Hirnantian Late Ordovician based on δ¹⁸O_{phos} studies from Estonia. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 569, Article 110347.
- Kröger, B., Servais, T., & Zhang, Y. (2009). *The origin and initial rise of pelagic cephalopods in the Ordovician. PLOS ONE*, 4(9), e7262.
- Nielsen, A.T. (2004). *Ordovician sea level changes: A Baltoscandian perspective. In B.D. Webby, F. Paris, M.L. Droser, I.C. Percival (Eds.), The Great Ordovician biodiversification event (84–93). Columbia University Press.*
- Pohl, A., Donnadieu, Y., Le Hir, G., Ladant, J.-B., Dumas, C., Alvarez-Solas, J., & Vandenbroucke, T.R.A. (2016). *Glacial onset predated Late Ordovician climate cooling, Paleoclimatology*, 31, [doi:10.1002/2016PA002928](https://doi.org/10.1002/2016PA002928).
- Polissar, P., Phelps, S., Zhang, Y., Pearson, A. & Hönisch, B. (2023). *Marine phytoplankton δ¹³C, paleo-CO₂ [website], www.paleo-co2.org/proxiesPhytoplankton*
- Quinton, P. C., Speir, L., Miller, J., Ethington, R., & MacLeod, K. G. (2018). *Extreme heat in the Early Ordovician. Palaios*, 33, 353–360. <https://doi.org/10.2110/palo.2018.031>
- Rasmussen, C.M.O., Ullmann, C.V., Jakobsen, K.G., Lindskog, A., Hansen, J., Hansen, T., et al. (2016). *Onset of main Phanerozoic marine radiation sparked by emerging Mid Ordovician icehouse. Scientific Reports*, 6, 18884. <https://doi.org/10.1038/srep18884>
- Royer, D.L., Berner, R.A., Montañez, I.P, Tabor, N.J. & Beerling, D.J. (2004). *CO₂ as a primary driver of Phanerozoic climate. GSA Today*, 14(3), 4–10.
- Saltzman, M. R., & Young, S. A. (2005). *Long-lived glaciation in the Late Ordovician? Isotopic and sequence-stratigraphic evidence from western Laurentia. Geology*, 33, 109–112. <https://doi.org/10.1130/g21219.1>
- Schmitz, B., Farley, K.A., Goderis, S., Heck, P.R., Bergström, S.M. & Boschi, S., et al. (2019). *An extraterrestrial trigger for the mid-Ordovician ice age: Dust from the breakup of the L-chondrite parent body. Science Advances*, 5, eaax4184. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax4184>
- Schmitz, B., Harper, D.A.T., Peucker-Ehrenbrink, B., Stouge, S., Alwmark, C., Cronholm, A., Bergström, S.M., Tassinari, M. & Xiaofeng, W. (2008). *Asteroid breakup linked to the Great Ordovician Biodiversification Event. Nat. Geosci.*, 1, 49–53.
- Servais, T., Owen, A.W., Harper, D.A.T., Kröger, B. & Munnecke, A. (2010). *The Great Ordovician biodiversification event (GOBE): The palaeoecological dimension. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 294, 99–119.
- Sheehan, P.M. (2001). *The Late Ordovician mass extinction. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 29, 331–364.
- Trotter, J.A., Williams, I.S., Barnes, C.R., Lécuyer, C. & Nicoll, R.S. (2008). *Did Cooling Oceans Trigger Ordovician Biodiversification? Evidence from Conodont Thermometry, Science*, 321, 550–555.
- Urey, H.C. (1948). *Oxygen isotopes in nature and in the laboratory. Science*, 108, 489–496.
- Vandenbroucke, T.R.A., Armstrong, H.A., Williams, M., Paris, F., Zalasiewicz, J., Sabbe, K., et al. (2010). *Polar front shift and atmospheric CO₂ during the glacial maximum of the Early Paleozoic Icehouse. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(34), 14983–14986. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003220107>
- Witkowski, C.R., Weijers, J.W.H., Blais, B., Schouten & Sinninghe Damsté, J.S. (2018). *Molecular fossils from phytoplankton reveal secular Pco₂ trend over the Phanerozoic. Science Advances*, 4(11), x-x.

