

Gebrek aan zuurstof droeg bij aan massale uitsterving

Hoogteziek in Pangaea

Perm Rode rotsen, zoals deze in Monument Valley Navajo Tribal Park (Arizona/ Utah, VS), zijn karakteristiek voor gesteente gevormd tijdens het Perm.

Tijdens de meest massale uitsterving van diersoorten, 251 miljoen jaar geleden, bevatte de lucht maar half zoveel zuurstof als nu. Grote delen van het landoppervlak waren daardoor onleefbaar. Het zuurstofgehalte bleef laag tot in het Jura, waardoor een groep dinosauriërs, de *Saurischia*, uit pure noodzaak efficiëntere longen ontwikkelde, waar vogels nu nog baat bij hebben.

Annemieke van Roekel

De oer-atmosfeer bevatte, totdat er leven ontstond, waarschijnlijk helemaal geen vrije zuurstof

Het Perm, een geologisch tijdperk van 300 tot 251 miljoen jaar geleden, eindigde in de grootste crisis ooit voor het leven op aarde. Driekwart van de diersoorten op land en negentig procent in de oceanen stierf toen uit. Vulkanisme wordt tegenwoordig beschouwd als de hoofdoorzaak van de Permcrisis. Ook nu braken vulkanen gassen uit in de atmosfeer, maar in het Perm gebeurde dat op een rampzalige schaal. De bewijzen hiervoor vinden geologen in Siberië, waar uitgestrekte lavavelden, de Siberian Traps, een gebied zo groot als Europa bedekken.

Twee onderzoekers van de universiteit van Washington in Seattle, bioloog Raymond Huey en paleontoloog Peter Ward, reconstrueerden de leefomstandigheden tijdens Perm (300–251 miljoen jaar geleden) en Trias (250–205 miljoen jaar geleden).

“Het vroege Perm was koud en rijk aan zuurstof, terwijl aan het eind van het Perm de temperatuur steeg en de atmosfeer steeds minder zuurstof bevatte”, zegt bioloog Huey. Uit hun analyses blijkt dat het aandeel zuurstof in de aard-

atmosfeer 240 miljoen jaar geleden een dieptepunt van 11% bereikte, de laagste waarde sinds er dieren op land leven. Tegenwoordig bevat de lucht 21% zuurstof. Ademen op zeeniveau in die tijd was vergelijkbaar met ademen op 5,5 kilometer hoogte nu.

Huey: “De toen levende reptielen hadden het zwaar te verduren. We denken dat sommige soorten landdieren zelfs terugkeerden naar de oceaan, omdat in water de lichaamstemperatuur lager ligt en de zuurstofbehoefte hierdoor afneemt.”

Tijdens het Perm was alle landoppervlak op aarde verenigd in één continent, Pangaea. Pas 70 miljoen jaar later zou Pangaea in een aantal stukken breken, de voorlopers van de huidige continenten, die door de beweging van de aardplaten langzaam uit elkaar schoven.

Huey benutte al bestaande topologische kaarten van Pangaea om de leefbaarheid van het supercontinent in kaart te brengen. Bij een laag zuurstofgehalte bevat de lucht al op veel geringere hoogte te weinig zuurstof om dierlijk leven toe te laten. Huey berekende,

dat bij de minimale zuurstofconcentratie eenderde van het continent onleefbaar moest zijn geworden. De daling van de zeespiegel ten tijde van het Perm was volgens hem onvoldoende om dit verlies te compenseren. Na de Permcrisis bleef het zuurstofgehalte nog tientallen miljoenen jaren laag, tot ver in het Jura.

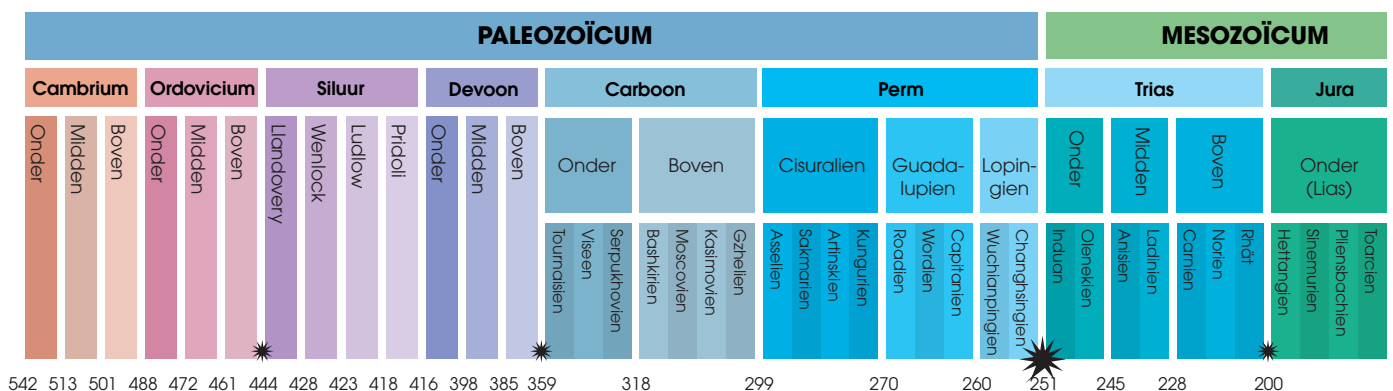
Veel diersoorten, vooral de gewervelden, moeten naar de laagst gelegen delen van het continent verdreven zijn. “Bergpassen die voorheen belangrijk waren als migratieroute voor de dieren werden ontoegankelijk. Laaglandgebieden raakten van elkaar geïsoleerd.”

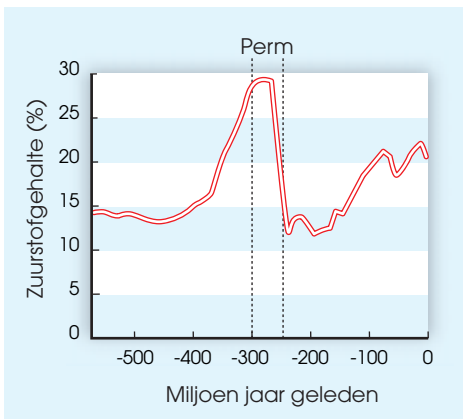
Daar kwam de klimaatopwarming – als gevolg van de uitstoot van vulkanische broeikasgassen – nog bovenop. “De combinatie van beide moet het grote uitsterven veroorzaakt hebben”, denkt Huey.

Bosbranden Fluctuaties in het zuurstofgehalte van de atmosfeer komen gedurende de hele geologische geschiedenis voor. De oer-atmosfeer bevatte, totdat er leven ontstond, waarschijnlijk helemaal

Grootschalig uitsterven De vijf grootste extincties uit de aardse geschiedenis, aangegeven door de sterren. De meest bekende is de extinctie van 65 miljoen jaar geleden toen de dinosaurussen het loodje legden. De grootste ecologische crisis was echter al 251 miljoen jaar geleden, aan het einde van het Perm. Driekwart van de diersoorten op land en negentig procent van de soorten in zee stierven toen uit.

De geologische tijdlijn is onlangs aangepast. Zo is 'Tertiair' voor de tijdvakken Paleoceen tot en met Plioceen officieel niet meer in gebruik, net zo min als 'Kwartair' voor Pleistoceen en Holoceen. In de praktijk gebruikt men deze termen overigens nog wel.





Zuurstoffluctuaties De aardatmosfeer bevat nu 21% zuurstof, maar dat percentage varieerde de afgelopen half miljard jaar tussen 10% en 30%. Circa 240 miljoen jaar geleden bereikte de zuurstofconcentratie een dieptepunt, vergelijkbaar met ademen op 5,5 kilometer hoogte in onze tijd.

geen vrije zuurstof. Cyanobacteriën (blauw-groene algen) waren een paar miljard jaar geleden de eersten die het als afvalproduct van hun fotosynthese produceerden. Deze zuurstof reageerde echter vrijwel direct met ijzerhoudende sedimenten, zodat de atmosfeer nog heel lang zuurstofarm bleef.

Pas dankzij de evolutie van landplanten steeg de zuurstofproductie explosief. Het percentage in de lucht liep soms op tot 30%. Enorme bosbranden moeten als een spontaan controlemechanisme hebben gewerkt om de zuurstofconcentratie weer omlaag te brengen. “Sommige wetenschappers geloven niet dat de atmosfeer wel 30% zuurstof kan bevatten,” zegt de Amerikaanse geochemicus Robert Berner, “omdat papier bij dat percentage spontaan ontbrandt. Maar hetzelfde experiment met houtsnippers en dennenaalden levert andere resultaten op. Natuurlijk materiaal uit bossen blijkt ook bij zoveel zuurstof niet zo snel in brand te vliegen.”

Verbrande organische resten komen in alle geologische lagen van het Phanerozoïcum – de afgelopen 550 miljoen jaar – voor. Dit suggereert dat het zuurstofgehalte in die periode nooit onder de tien procent heeft gelegen, omdat bosbranden dan onmogelijk zijn.

De grootste variatie in atmosferische zuurstof deed zich voor tijdens het Perm. Berner, verbonden aan Yale University, reconstrueerde de hoeveelheid zuurstofgas in de aardatmosfeer van de laatste half miljard jaar met behulp van de koolstofisotopen ¹³C en ¹²C en de zwavelisotopen ³⁴S en ³²S in diepzeesedimenten.

De verhouding van deze isotopen hangt samen met de hoeveelheid fotosynthese en zuurstofproductie door planten en de mate waarin organisch materiaal wordt afgebroken en opgeslagen in sedimenten. Berner baseert zijn atmosfeermodellen dus op de mondiale koolstof- en zwavelcyclus.

Berner: “In het vroege Perm moet de zuurstofconcentratie waarden tot 30% hebben bereikt om circa 265 miljoen jaar geleden sterk te gaan dalen. Het zuurstofgehalte bereikte 240 miljoen jaar geleden een dieptepunt en kwam tot 160 miljoen jaar geleden niet boven de 15% uit”.

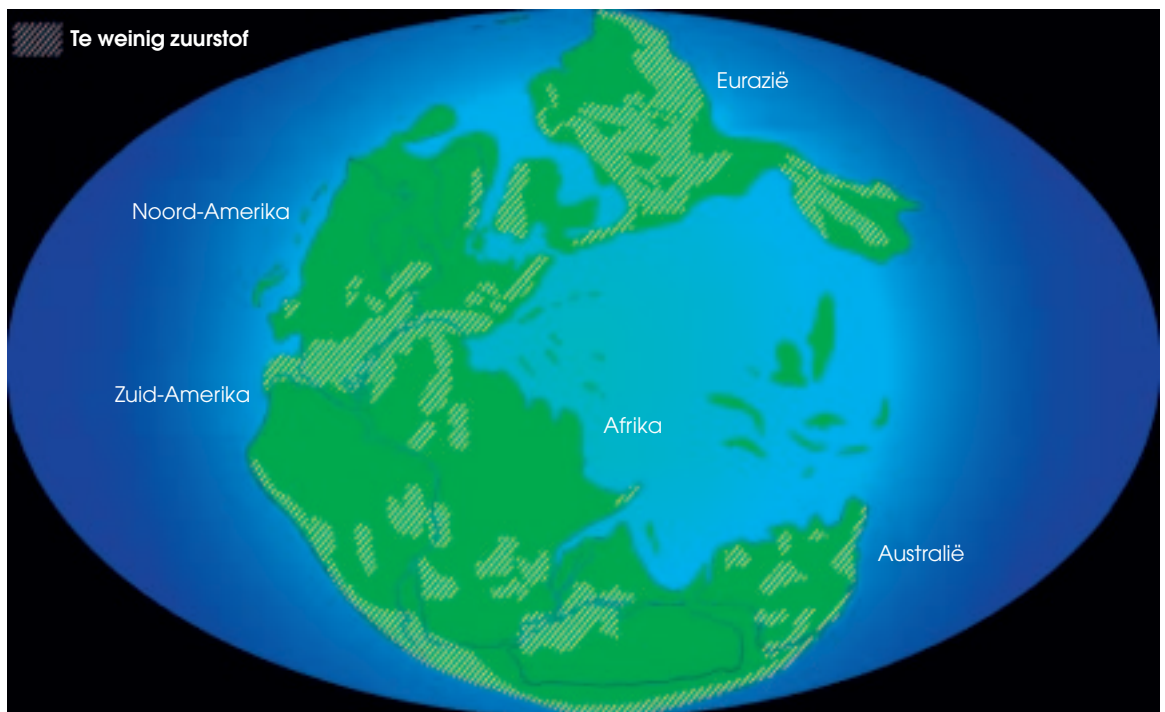
De enorme toename van zuurstof verklaart Berner niet alleen doordat groene planten de continenten koloniseerden, maar ook doordat de exemplaren steeds omvangrijker werden. “De kolonisatie was al in gang gezet tijdens het Carboon, toen de continenten met

varens en coniferen bedekt raakten. Dood organisch materiaal verdween in de talrijke moerasgebieden van Pangaea. Onder water vertraagt het rottingsproces, zodat niet alleen meer zuurstof werd geproduceerd, maar ook minder zuurstof werd geconsumeerd.” Steenkool is voor een groot deel in die periode ontstaan. Niet minder belangrijk voor een dalende zuurstofconsumptie is de evolutie van houtige planten, aldus Berner. Hout verrot minder snel en bovendien zijn bomen in staat veel meer koolstof vast te leggen dan planten.

Toen aan het einde van het Perm door de stijgende temperatuur de moerasgebieden verdroogden en organisch materiaal aan de lucht werd blootgesteld, vond op grote schaal oxidatie plaats, redeneert Berner. Dit moet ertoe hebben geleid dat het zuurstofniveau weer bijna is gehalveerd.

Huey en Ward baseren hun hypothese over de afname van leefgebieden op Pangaea op de modellen van Berner. “Als hij er naast zit, zitten wij er ook naast”, relativeert Huey. Hun artikel verscheen dit voorjaar in *Science*. Huey: “Sommige deskundigen geloven niet in een sterke daling van atmosferisch zuurstof, maar tot zover hebben we nog geen officiële kritiek uit wetenschappelijke hoek gehad”.

MESOZOÏCUM				KENOZOÏCUM						Era														
Jura		Krijt		Paleogeen			Neogeen			Periode														
Midden (Dogger)	Boven (Malm)	Onder	Boven	Paleoceen	Eoceen	Oligoceen	Mioceen	Plioceen	Pleistoceen	Holoceen	Tijdvak													
Adelien	Callioven	Berriasiën	Cenomanien	Danien	Thorstien	Lutetien	Barbonien	Pridonien	Rupellen	Chattien	Aquitanien	Burdigalien	Langhien	Serravallen	Tortonien	Messinien	Zancien	Piaceenzen	Gelasien	Onder	Midden	Boven	Tijd	
176	161	146	99,5	65,5	55,8	33,9	23,0	5,33	1,81	0,01 nu	Mln. jaar geleden													



Nicole Roger Fuller, U.S. National Science Foundation

Tijdens het hoogtepunt van de Permcrisis verdween driekwart van alle amfibieën- en reptielensoorten. Ook veel zoogdierachtige reptielen stierven uit. Deze verre voorouders van de zoogdieren krijgen het in de eerstvolgende massa-extinctie na de Permcrisis, tijdens de overgang van Trias naar Jura, opnieuw zwaar te verduren. De dinosauriërs heersen dan al over de aarde en opvallend is dat een belangrijke groep dino's, de *Saurischia*, die crisis veel beter doorkomt dan hun tijdgenoten. Huey's collega Ward denkt dat het unieke ademhalingssysteem van deze reptielen hun succes verklaart.

De *Saurischia* (een orde van dinosauriërs die op grond van hun bekkenstructuur wordt onderscheiden van de *Ornithischia*; anders dan de naamgeving doet vermoeden zijn juist de *Saurischia* de mogelijke voorouders van de moderne vogels) evolueerden in een zuurstofarme periode. Deze dinosauriërs bezitten geen middenrif, maar in plaats daarvan zijn de longen bevestigd aan een aantal zakjes die als een soort blaasbalg fungeren, aldus Ward. Moderne vogels, directe afstammelingen van deze tak van dino's, hebben een vergelijkbaar ademhalingssysteem. Ze ademen heel efficiënt, wat noodzakelijk is om te kunnen vliegen.

Net als de *Saurischia* hebben vogels een soort blaasbalg als voorportaal naar de – relatief kleine – longen, die op deze manier permanent lucht bevatten. Dat is fundamenteel anders dan bij de

meeste andere dieren en bij mensen. Onze longen zijn de helft van de tijd leeg en in die tijd vindt er dus geen uitwisseling van zuurstof en koolstofdioxide plaats, wat onontbeerlijk is om de energieproductie op gang te houden.

Sommige wetenschappers denken dat de 'blaasbalgmethode' pas tot ontwikkeling kwam bij de moderne vogels, om hen in staat te stellen op grote hoogte te vliegen, waar minder zuurstof beschikbaar is. Maar Ward denkt dat deze natuurlijke innovatie al veel eerder in de evolutie plaatsvond, als gevolg van de zuurstofarme atmosfeer.

Inslagtheorie Over de precieze oorzaak van vier van de vijf massa-uitstervingen in de aardgeschiedenis bestaat geen overeenstemming. Het enige tijdperk waarover zij het inmiddels vrij unaniem eens zijn is de fatale afloop van het Krijt, 65 miljoen jaar geleden, toen een meteoriet het leven op aarde grotendeels vernietigde. Maar ook in de Krijtperiode was al een ernstige ecologische crisis aan de gang en deelde een meteoriet mogelijk slechts de laatste klap uit.

Hoewel extreem vulkanisme als voornaamste oorzaak nu veel populariteit geniet, bestaat er voor de Permcrisis ook een inslagtheorie. Het idee komt van Luann Becker, nu werkzaam aan de universiteit van Californië en destijds verbonden aan de universiteit van Washington. In 2001 kwam zij met bewijs-

materiaal voor een enorme meteorietinslag. Op meerdere locaties had zij gesteente uit het Perm gevonden, waarin sporen van de edelgassen helium en argon zaten met een 'buitenaardse' isotopenverhouding, zoals die ook in kleine meteorieten wordt aangetroffen.

Later kwam haar team een deels begraven inslagkrater op de zeebodem aan de westkust van Australië op het spoor. Dat leidde tot zo'n fel debat dat Nasa nu een expert-panel heeft samengesteld om al het bewijsmateriaal opnieuw te onderzoeken.

"We zullen de resultaten van het specialistenpanel geduldig moeten afwachten", zegt Philippe Claeys, geoloog aan de Vrije Universiteit van Brussel. "De monsters die nu opnieuw worden bestudeerd bestaan uit zogeheten fullerenen. Dit zijn grote koolstofmoleculen met tussen de zestig en tweehonderd koolstofatomen, gerangschikt in de vorm van een voetbal. Volgens Becker zitten binnen in die bolvormige structuur heliumisotopen van buitenaardse oorsprong gevangen."

Claeys trekt een inslagtheorie ten tijde van de Permcrisis persoonlijk sterk in twijfel. "Fullerenen met buitenaardse edelgasisotopen kunnen als bewijs voor een impact dienen", reageert hij, "maar het enige laboratorium waar zij tot nu toe zijn onderzocht, is het lab van Becker zelf. Niemand heeft tot op heden haar analyse kunnen reproduceren."

Onleefbaar Pangaea De schaarste aan zuurstof in hooggelegen (gearceerde) gebieden op het supercontinent Pangaea verdreef de meeste landdieren naar het laagland en de kustzones. Bergpassen werden als migratieroute onbegaanbaar en laaglandgebieden raakten geïsoleerd.

“Om een inslag aan te tonen heb je zowel mineralogische als geochemische bewijzen nodig”, zegt Claeys, “zoals bijvoorbeeld een verhoogde concentratie van iridium of een ander element uit de platinagroep, zoals osmium en rodium. Op aarde zijn deze elementen schaars en ze komen hier vooral via meteorieten terecht. Een andere aanwijzing voor een inslag is geschokte kwarts, dat ontstaat wanneer door een zeer sterke drukgolf de kristalstructuur van gewone kwarts vervormt. Ook tektieten kunnen op een inslag duiden.” Dit zijn gestolde druppels glas met dezelfde chemische samenstelling als het gesteente, een teken dat op die plek door de enorme hitte van de inslag de grond gesmolten is. “Ook om de inslagtheorie aan het einde van de Krijtperiode goed te kunnen onderbouwen, zijn meerdere bewijzen naar voren gebracht”, zegt Claeys. “Behalve de Chicxulub-krater in Mexico is er wereldwijd inslagmateriaal aangetroffen met verhoogde iridiumconcentraties.”

Het moet miljoenen jaren hebben geduurd voordat de biodiversiteit op aarde na de Permcrisis weer op het oude niveau was. Huey denkt dat het lage zuurstofgehalte het herstel van ecosystemen heeft vertraagd. Dat het leven op aarde zich maar moeizaam herstelde, is ook de bevinding van een Utrechtse on-

derzoeksgroep onder leiding van paleoecoloog Henk Visscher. Studie van fossiele pollen en sporen – het werk van de palynologie – wees uit dat het vijf miljoen jaar duurde voordat op lage breedtegraden weer bomen groeiden. Lange tijd na de Permcrisis werd de flora op het supercontinent gedomineerd door sporenplanten als varens en wolfsklauw, echte overlevers in een stressvol milieu.

Dat het leven tijdens de Permcrisis ook voor planten erg stressvol geweest moet zijn, blijkt uit het wereldwijd voorkomen van mutaties in het genemateriaal van planten. Visscher opperde vorig jaar dat een beschadigde ozonlaag 250 miljoen jaar geleden tot mutaties in sporen en pollen zou hebben geleid. De beschadiging van de ozonlaag zou ook een gevolg zijn van vulkanische activiteit door de uitstoot van organische chloorverbindingen. Andere vormen van milieustress zoals zure regen acht Visscher minder waarschijnlijk, omdat er geen aanwijzingen zijn dat de vegetatie in Siberië meer geleden heeft onder de (sterk lokale) gevolgen van zure regen dan elders op Pangaea.

Visscher vraagt zich af of de lage zuurstofconcentratie ook voor de plantenwereld wel zo dramatisch is geweest tijdens het Perm. “Die lage zuurstofniveaus verklaren in ieder geval nog niet waarom er zoveel plantensoorten zijn uitgestorven. Driekwart van de plantenfamilies verdween tijdens de overgang van Perm naar Trias en dat cijfer is waarschijnlijk nog aan de lage

kant”, aldus Visscher. “Anders dan bij dierenfamilies, is het voor taxonomen een stuk lastiger om goed onderscheid te maken tussen de verschillende plantenfamilies. Dit leidt in de biostatistiek tot een systematische onderschatting van uitstervingspercentages.”

Huey: “Planten zijn tijdens het Perm zelf geen slachtoffer van de zuurstofarme atmosfeer geweest. Op een bepaald moment vielen zij weg als zuurstofproducenten. Waarom is niet duidelijk. Mogelijk had Pangaea te maken met mondiale verdroging of was de atmosfeer uiteindelijk zo verzadigd met vulkanische gassen dat de planten hun bladeren verloren”.

Ook na de Permcrisis constateren wetenschappers een enorm verlies aan plantaardige biomassa, de zogeheten *coal gap*. Sedimenten op land uit die periode bevatten nauwelijks organisch materiaal. Het schaars begroeide landschap moet destijds sterk hebben geleden onder erosie. De crisis op land beïnvloedde op zijn beurt de leefcondities in de oceanen door de massale afvoer van mineralen en organische stoffen, redeneert Visscher. Kustzeeën werden voedselrijk en zuurstofarm, met alle gevolgen van dien voor het leven daar. Ecologen en geologen denken inmiddels dat planten een veel grotere rol hebben gespeeld in de regulering van het mondiale klimaat en de leefomstandigheden op aarde dan voorheen werd aangenomen. ■

Informatie

Tijdschalen

www.stratigraphy.org

Gesmolten aardkorst Dit brokje glas uit de Chicxulub-krater in Mexico heeft dezelfde chemische samenstelling als de aardkorst. Dit bewijst dat door de intense hitte van een meteorietinslag een deel van de aardkorst gesmolten geweest is. Het werd gevonden in een aardlaag die 65 miljoen jaar geleden is gevormd, toen een meteoriet een einde maakte aan het dinotijdperk.

