



Zuurstofvorming en de evolutie van leven op aarde

Krijtrotsen bij Dover, Engeland. Foto GlennV

Tekst Henk van der Scheer

Zonder zuurstof op aarde geen leven van mensen, dieren en planten, dus ook geen leven voor honingbijen. Zuurstof is een chemisch element met symbool O (uit het Latijn: *oxygenium*). Het komt in de atmosfeer vooral voor als dizuurstof (O_2). Zuurstof komt in de atmosfeer in vrije vorm voor, dat wil zeggen zonder verbinding met andere elementen, als gevolg van het leven op aarde. Cyanobacteriën produceerden als eerste zuurstof door fotosynthese, een proces dat bekend staat als de *Neoproterozoic Oxidation Event* en naderhand vertoonden alle groene planten dat kunstje. Zonder die voortdurende productie zou het element geleidelijk uit de atmosfeer verdwijnen, omdat het zich gemakkelijk verbindt met oxideerbare materialen. Bosbranden zijn van dat proces een goed voorbeeld.

Dat planten zuurstof nodig hebben om te overleven lijkt vreemd, omdat ze zuurstof produceren, maar alle cellen, ook plantencellen, gebruiken voortdurend zuurstof. Ademhaling betekent niet alleen ademen. Het is een proces dat alle levende wezens gebruiken om energie vrij te maken voor gebruik in hun cellen. Planten ademen ook, net als dieren, alleen hebben ze daarvoor bladeren en geen longen. Die ademhaling bij planten gebeurt in geringe mate overdag, maar vooral 's nachts.

Zuurstof in verschillende vormen

Zuurstof is een kleurloos, geurloos en smaakloos gas. In samengestelde vorm is zuurstof een wijdverspreid element omdat alle water van de oceanen en alle silicaten waar de aardkorst uit bestaat zuurstof bevatten. Gemeten

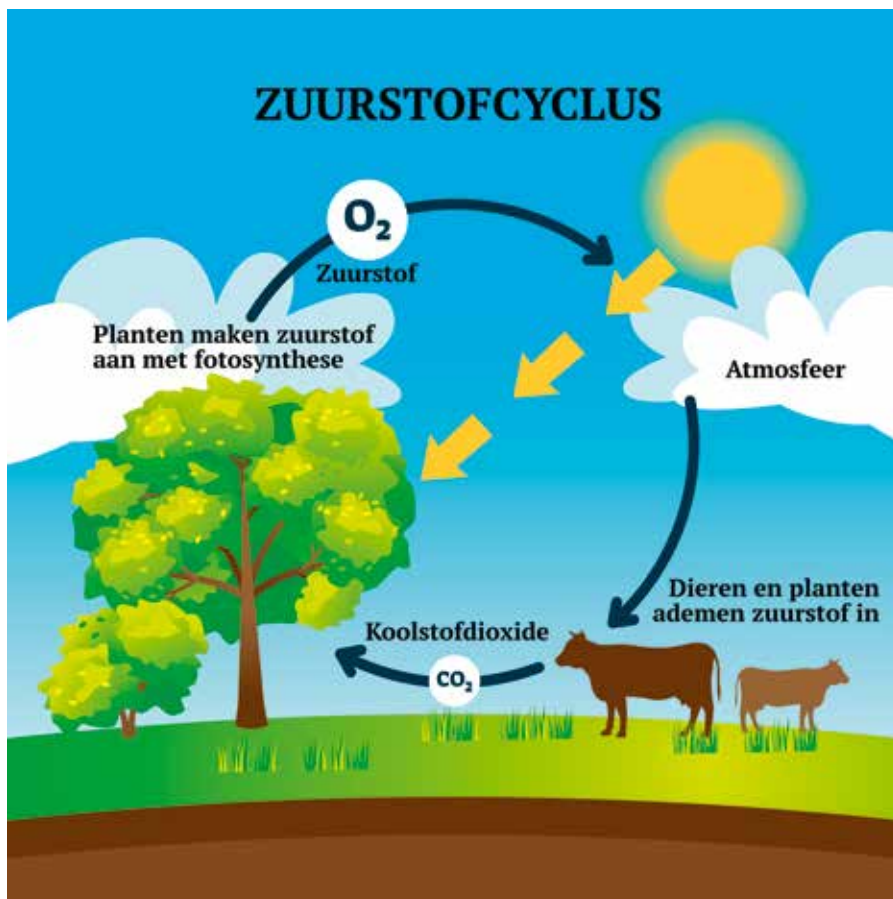
naar massa is zuurstof veruit het meest voorkomende element in het menselijk lichaam: dat bestaat voor ongeveer 65% uit zuurstof (voornamelijk als bouwsteen van water).

In de atmosfeer komt zuurstof voornamelijk voor als O_2 . Ook komt nog tri-zuurstof of ozon (O_3) voor, met name in de ozonlaag waar het gevormd wordt onder invloed van kosmische straling, maar het kan ook op zeeniveau gevormd worden door luchtvervuiling. In de ijlere hoge lagen van de atmosfeer komt het voor als los zuurstofatoom O. Losse zuurstofatomen reageren zeer gemakkelijk en verbinden zich snel met andere stoffen; we noemen ze niet voor niets zuurstofradicalen. Bij het ontleden van waterstofperoxide (H_2O_2) bijvoorbeeld zal het 'losse' O-atoom zich direct verbinden met een ander O-atoom tot O_2 .

Zuurstof maakt ongeveer 47% van de aarde uit, het meest in de vorm van metaaloxiden, silicaten, carbonaten en andere zouten. Het is het hoofdbestanddeel van de oceanen, als een van de elementen waaruit water (H_2O) bestaat. Hetzelfde geldt voor het ijs waaruit de poolkappen bestaan. Op andere hemellichamen, bijvoorbeeld Mars, bestaat het ijs mogelijk uit koolstofdioxide (CO_2), dat overigens ook zuurstof bevat. Europa, een maan van Jupiter, is geheel bedekt met waterijs en ook kometen bestaan grotendeels uit waterijs.

Anaeroob (zonder zuurstof)

Pas geruime tijd na het ontstaan van de aarde kwam er vrije zuurstof in de atmosfeer; dat was vanaf ongeveer 2,4 miljard jaar geleden. Vermoedelijk



Zuurstofcyclus. Illustratie VectorMine

hebben blauwalgen de atmosfeer langzaam maar zeker gevuld met zuurstof, door glucose en zuurstof te vormen uit koolstofdioxide en water ($6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$) onder de invloed van licht (fotosynthese). Voor die tijd kon er slechts anaeroob worden geleefd, dat wil zeggen zonder lucht, waarbij met 'lucht' zuurstof wordt bedoeld. Tot dergelijke anaerobe organismen behoren archaea (eencellige micro-organismen zonder celkern die zich ongeslachtelijk voortplanten) en verder gisten en sommige bacteriën. Die organismen gebruiken dus geen zuurstof om energie op te wekken, maar komen aan energie door gisting of anaerobe afbraak van suikers. Aan zuurstofvorming door fotosynthese heeft de aarde zijn enorme biodiversiteit te danken. Het proces zou weleens even oud kunnen zijn als het cellulaire leven zelf, blijkt uit moleculair-biologisch onderzoek aan betrokken eiwitten. Een recente publicatie beweert nu dat fotosynthese met zuurstofvorming de oudste vorm is. De 'last universal common ancestor' (Luca), oftewel de oudste

voorouder van alle leven, zou het wellicht al hebben gedaan. Van Luca stammen de huidige drie domeinen van leven af: archaea, bacteriën en eukaryoten (organismen waarvan elke cel een kern bevat, zoals planten en dieren), aldus Oliver e.a. (2020). Als Luca niet het eerste organisme was dat via fotosynthese vrije zuurstof kon produceren, dan zijn het de blauwalgen, ofwel cyanobacteriën, die tot de oudste organismen op aarde behoren; naar schatting bestaan ze al 3,5 miljard jaar. De zuurstofvorming in de atmosfeer maakte de evolutie van hogere organismen mogelijk. Volgens de endosymbiosetheorie (endo = binnen, symbiose = samenleven) zijn de mitochondriën en de chloroplasten (bladgroenkorrels) oorspronkelijk zelfstandige organismen geweest die in de cellen van andere organismen zoals planten zijn opgenomen. Ze zouden voortkomen uit voorouders van de huidige cyanobacteriën. Virussen zijn dus niet de enige eenheden die in cellen van plant, dier en mens voortleven.

Great Oxidation Event

De hedendaagse hoge zuurstofgehalten in de atmosfeer zijn te danken aan de eerste lagere niet-vaatplanten die 470 miljoen jaar geleden het land veroverden, met als belangrijke groep de mossen. Het supercontinent Pangea was zich langzaam aan het vormen op het zuidelijk halfrond, terwijl de rest van de aarde bestond uit oceaan. De eerste mossen koloniseerden de kale rotsen en door fotosynthese steeg de hoeveelheid atmosferische zuurstof in relatief rap tempo. Tegelijkertijd daalde de hoeveelheid koolstofdioxide in de atmosfeer, wat het begin van een serie ijstijden betekende met uiteindelijk de vorming van ijskappen op de Noord- en Zuidpool. Zo schiepen de mossen en vervolgens andere lagere planten binnen twintig tot veertig miljoen jaar een wereld waarin het huidige klimaat kon ontstaan. Dat concludeert een internationale groep onderzoekers op basis van een computersimulatie (Chena e.a., 2020). Dit proces staat bekend als de Great Oxidation Event, en het duurde tot zo'n 400 miljoen jaar geleden dat het zuurstofgehalte van vandaag de dag was bereikt. Het onderzoek suggereert dat de productiviteit van die eerste landplanten verrassend groot was. Groot genoeg althans om de enorme zuurstoftoename in de aardse atmosfeer in diezelfde periode te verklaren. Om tot de huidige stabiele zuurstofconcentratie van zo'n 21 procent te komen, was het cruciaal dat een groot deel van de geproduceerde biomassa eerst in het sediment terecht kwam en niet direct door microben werd afgebroken. Wanneer microben organisch materiaal afbreken, onttrekken ze juist weer zuurstof uit de atmosfeer. Miljoenen jaren later kwam het organisch materiaal door verwerking weer vrij uit het gesteente, gingen microben het wel afbreken en ontstond er een evenwichtige zuurstofkringloop. Toch is de precieze oorzaak van deze sterke zuurstoftoename al lange tijd onderwerp van discussie onder wetenschappers van verschillende disciplines.

Draaiing van de aarde

Recent is aan de discussie over de toename van zuurstof in de atmosfeer een nieuwe theorie toegevoegd (Klatt e.a., 2021). Die houdt verband met de



Bloei van blauwalgen in het water.

Foto Wikimedia.org

snelheid waarmee de aarde om zijn as draait. Dat concluderen Duitse en Amerikaanse wetenschappers op basis van onderzoek naar micro-organismen die op grote diepte leven in het Huronmeer, op de grens van de VS en Canada. Op die plek, in koud en zuurstofarm water, leven micro-organismen onder vergelijkbare omstandigheden als in de oceanen kort na het ontstaan van de aarde. De aarde en de maan komen steeds dicht bij elkaar te staan onder invloed van de zwaartekracht. Daardoor remt de draaiing van de aarde om zijn as af. Daardoor duren de dagen tegenwoordig bijna 24 uur en die daglengte neemt nog steeds iets toe, terwijl de daglengte bij het ontstaan van de aarde, zo'n 4,5 miljard jaar geleden, maar ongeveer 6 uur was. In het lab stelden de onderzoekers de micro-organismen uit het Huronmeer bloot aan licht. Daaruit bleek dat de zuurstofproductie toenam als ze langer in het licht stonden, waarna de wetenschappers via modellen uitrekenden wat het effect hiervan op wereldwijde schaal zou kunnen zijn. Vervolgens kwamen ze tot de conclusie dat langere dagen wel eens een essentiële rol gespeeld zouden kunnen hebben bij de ontwikkeling van het leven op aarde.

Toen de dagen korter waren, hadden de micro-organismen minder kans om zuurstof te produceren, omdat ze in

die vele korte periodes te veel werden dwarsgezeten door andere soorten micro-organismen. Dat veranderde toen de dagen langer werden en ze in het voordeel waren ten opzichte van micro-organismen die geen energie uit licht halen. Daardoor kregen ze meer tijd om zuurstof uit te stoten, menen de onderzoekers. Het was al langer de vraag waarom op bepaalde momenten in de geschiedenis van de aarde het zuurstofgehalte explosief toenam. Het vermoeden was altijd al dat micro-organismen daarbij betrokken waren, maar welke factoren daarbij een rol speelden en wanneer dat was niet duidelijk. De onderzoekers menen dat de lengte van een dag antwoord kan geven op die vragen. De onderzoekers gaan echter niet in op het gegeven dat de meest explosieve toename van zuurstof in de atmosfeer te danken was aan mossen en niet aan cyanobacteriën. Ook wordt niet ingegaan op het feit dat die micro-organismen in het Huronmeer op het noordelijk halfrond leven en de mossen indertijd op het supercontinent Pangea op het zuidelijk halfrond. Die plaats maakt verschil in de netto hoeveelheid lichtinstraling en daarmee op de vorming van zuurstof in de oceanen, omdat de aardas onder een hoek van ruim 23 graden staat. Die stand zorgt er ook voor dat we seizoenen kennen.

Broeikasgas

Naast 21% zuurstof bestaat lucht uit 78% stikstof, bijna 1% argon en 0,04% koolstofdioxide (CO_2). Van het broeikasgas CO_2 hebben we momenteel wat te veel met dank aan de activiteiten van de mens. Wel doet de fotosynthese de hoeveelheid CO_2 afnemen, maar bij lange na niet voldoende. De oceanen vormen ook buffers waarin nogal wat CO_2 kan verdwijnen. CO_2 uit de atmosfeer lost op in water waarbij koolzuur (H_2CO_3) ontstaat, een instabiele verbinding die kan reageren met calcium tot calciumcarbonaat (CaCO_3). Veel zeedieren gebruiken calciumcarbonaat als bouw materiaal voor hun schelpen of exoskelet. Als ze afsterven, zinkt het kalkhoudende materiaal naar de bodem, waar het dikke lagen krijtgesteente kan vormen. Als de zeespiegel daalt of de bodem rijst dan zien we dat krijt boven water, bijvoorbeeld bij de beroemde White Cliffs bij Dover in Engeland.

Ademen

Mensen, dieren en planten hebben zuurstof nodig om te kunnen leven. Net als alle andere zoogdieren ademen wij door zuurstof via de longen op te nemen in het bloed, waar het zich bindt aan de rode bloedlichaampjes. Bij insecten, inclusief (honing)bijen, gaat dat heel anders. Die hebben tracheeën, oftewel ademhalingsbuizen die van de buitenkant van het lichaam naar binnen lopen, met elkaar in verbinding staan en zo de lucht met zuurstof direct naar de cellen in de organen brengen. Het ademhalingsstelsel van insecten en vele andere geleedpotigen is gescheiden van de bloedsomloop. Larven maken geen ademhalingsbewegingen. Bij hen moet zuurstof door verplaatsing (diffusie) via de tracheeën de organen bereiken. Op pagina 28 van dit nummer van *Bijenhouden* vindt u een uitgebreid verhaal met afbeeldingen over de ademhaling als onderdeel van de serie 'Anatomie & Morfologie', geschreven door redacteur Wietse Bruinsma.

Een groot deel van de lichaamsholte van insecten wordt ingenomen door tracheeën en is daardoor gevuld met lucht in plaats van bloed. Overigens hebben insecten geen bloedvaten, maar stroomt het bloed (de hemolymfe) vrij door de lichaamsholte op alle plekken die niet worden ingenomen door andere weefsels of organen. ●

Literatuur

- Chena, S.-C., Sun, G.-X., Yan, Y., Konstantinidis, K.T., Zhang, S.-Y., Deng, Y, Li, X.M., Cui, H.L., Musat, F., Popp, D., Rosen, B.P. en Zhu, Y.G., 2020. The Great Oxidation Event expanded the genetic repertoire of arsenic metabolism and cycling. *PNAS* 117(19):10414-10421.
- Klatt, J.M., Chennu, A., Arbic, B.K., Bidanda, B.A. en Dick, G.J., 2021. Possible link between Earth's rotation rate and oxygenation. *Nature Geoscience* doi.org/10.1038/s41561-021-00784-3.
- Oliver, T., Sánchez-Baracaldo, P., Larkum, A.W., Rutherford, A.W. en Cardona, T., 2020. Time-resolved comparative molecular evolution of oxygenic photosynthesis. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics* 1862(6):148400.