

# Vier miljard jaar leven op Aarde

Cyanobacteriën zijn verantwoordelijk voor het massaal uitsterven van obligaat anaerobe organismen, zo'n 2500 miljoen jaar geleden, door het produceren van grote hoeveelheden vrije zuurstof.

Foto: Josef Reischig, CC BY SA 3.0.

AUTEUR Marc Siepman,  
[marcsiepman.nl](http://marcsiepman.nl) en [humisme.nl](http://humisme.nl)

In de 13,7 miljard jaar dat het universum bestaat is er aardig wat gebeurd. Eerst ontstonden de bouwstenen van het leven en 4,6 miljard jaar geleden ontstond de Aarde. Het leven erop floreerde meestal, maar soms waren er uitstervingsgolven. In dit artikel wil ik je meenemen op reis langs wat alledaagse wonderen om te laten zien dat het leven op Aarde geen vanzelfsprekendheid is.

## Het ontstaan van de bouwstenen

Het jonge universum bestond uit lichte elementen: waterstof en helium. De waterstof diende en dient als brandstof voor sterren waarin lichte elementen fuseren tot zwaardere elementen, waaronder koolstof en zuurstof. Zodra de voorraad waterstof is verbruikt, explodeert een zware ster soms. Bij zo'n supernova wordt een wolk gas en stof het heelal in geslingerd die de geboorte van nieuwe sterren en planeten mogelijk maakt. Zo kon ook de Aarde met al haar biodiversiteit ontstaan. Drie elementen staan aan de basis van het leven: koolstof, waterstof en zuurstof. Met die drie atomen worden de overbekende en voor het leven cruciale moleculen gevormd: water (H<sub>2</sub>O), zuurstof (O<sub>2</sub>) en koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>).

## Koolstof

Koolstof (C op het periodiek systeem) vind je overal: in gesteenten, de oceanen, de atmosfeer, in organismen – en die koolstof is altijd in beweging tussen die verschillende plekken. Voor het ontstaan van de biosfeer, het dunne flintertje leven op onze blauwe planeet, zijn onvoorstelbare hoeveelheden koolstof nodig geweest. In jouw lichaam alleen al zitten, als je 70 kilo weegt, een slordige zeven quadriljard (7.000.000.000.000.000.000.000.000 of  $7 \cdot 10^{27}$ ) koolstofatomen. Dat is genoeg om het grafiet van negenduizend potloden te maken, of vijftig tot honderd diamanten.

## Het bijzondere van koolstof

Koolstof kan met veel verschillende andere elementen een binding aangaan. Maar koolstof is vooral bijzonder omdat deze ook met andere koolstofatomen kan binden. Zo vormen de atomen gezamenlijk allotropen (pure verschijningsvormen van een element, in dit geval van koolstof) zoals grafiet of diamant. Grafiet is bijzonder zacht, terwijl diamant het hardste mineraal is dat we kennen. Om de atoomkern zit een wolk van zes negatief geladen elektronen. Door die te delen met andere atomen kan elk koolstofatoom met maar liefst vier andere atomen een binding aangaan. Koolstofatomen zijn de kleinste die daartoe in staat zijn. Die binding kan enkelvoudig zijn, maar ook tweevoudige en drievoudige bindingen zijn mogelijk.

Een verbinding van twee of meer atomen

heet een molecuul. In het geval van koolstof zijn deze moleculen meestal geen tweedimensionale ketens of platte vlakken, maar complexe structuren in een enorme variëteit: er zijn al tien miljoen koolstofverbindingen bekend. Omdat de bindingen relatief sterk zijn, zijn ze heel stabiel. Maar ze zijn ook weer niet zo stabiel dat ze niet meer verbroken kunnen worden; daardoor kunnen ze steeds weer andere bindingen vormen.

## Waterstof

Waterstof is het meest voorkomende element in het heelal. Waterstof is tevens het lichtste en eenvoudigste element op het periodiek systeem, waar het vertegenwoordigd is met de letter H en atoomnummer 1 heeft. De meest voorkomende isotoop heeft een atoomkern met alleen maar een proton, meer niet. Geen neutronen, niks. En die heeft ook maar één elektron.

Waterstof bindt zich bij kamertemperatuur aan zichzelf en vormt zo waterstofgas (diwaterstof of H<sub>2</sub>), dat zeer brandbaar is. Bij verbranding (toevoeging van zuurstof) ontstaat er water (H<sub>2</sub>O of diwaterstofoxide). De Space Shuttle werd er de ruimte mee ingeschoten; zoveel energie komt daarbij vrij.

Uitgedrukt in atomen is waterstof het meest voorkomende element in ons lichaam, maar in gewicht uitgedrukt staat het op plaats drie (na zuurstof en koolstof).

# Zuurstof is dus heel reactief en daarom is het eigenlijk een wonder dat er vrije zuurstof in de atmosfeer zit.

## Zuurstof

Zuurstof als element is O op het periodiek systeem, maar de zuurstof die we inademen is moleculaire zuurstof: O<sub>2</sub>. Zuurstof is het meest reactieve niet-metaal en het op twee na meest voorkomende element in het heelal (na waterstof en helium).

Als zuurstof zich bindt aan een element, zoals koolstof, dan heet dat oxidatie: C wordt dan bijvoorbeeld CO<sub>2</sub>. Hout (dat voor de helft uit koolstof bestaat) oxideert in de loop van de (soms tientallen) jaren doordat het wordt verteerd door schimmels en talloze andere organismen die de koolstof oxidieren. Als je het verbrandt, is dat ook oxidatie. Alleen verdwijnt de koolstof dan vrijwel meteen in de atmosfeer.

Zuurstof is dus heel reactief en daarom is het eigenlijk een wonder dat er vrije zuurstof in de atmosfeer zit. Uiteindelijk hebben we dit te danken aan eencellige organismen.

## Hergebruik

Vrijwel alle atomen op Aarde zijn dus al miljarden jaren oud en de stabiele vormen maken het einde van het universum nog mee, tenzij ze in een fusie- of splitsingsproces terecht komen. Elke keer worden dezelfde atomen opnieuw gebruikt: in jouw lichaam zit dezelfde koolstof die ook al zat in vrijwel alle mensen, dieren en planten die tot nu toe geleefd hebben. Ze zaten ook in gesteenten en brachten een groot deel van de tijd in de atmosfeer door.

## Fotosynthese en stofwisseling

Fotosynthese en stofwisseling zijn twee processen die elkaar perfect aanvullen.

### Fotosynthese

Een plant (of boom) haalt slechts 4% van zijn biomassa uit de bodem; hij bestaat voor maar liefst 96% uit koolstof, waterstof en zuurstof. Die drie elementen haalt hij, gebruikmakend van lichtenergie, uit water en koolstofdioxide.

Dit proces heet fotosynthese, wat 'samenvoegen met licht' betekent. Het speelt een cruciale rol voor bijna al het leven op Aarde: het is vrijwel de enige manier waarop koolstof beschikbaar wordt gemaakt voor niet-fotosynthetiserende organismen. Planten, bomen, algen en cyanobacteriën leggen op jaarbasis ruim 100 miljard ton CO<sub>2</sub> vast in biomassa. We noemen deze organismen producenten. Alle andere organismen, waar wij ook toe behoren, heten consumenten. Consumenten moeten, direct of indirect, producenten eten om aan energie te komen.

### Stofwisseling

Mensen zijn obligaat aerobe organismen: we moeten ademen, anders gaan we vrij snel dood. De lucht die je inademt bevat ongeveer 0,04% koolstofdioxide en 21% moleculaire zuurstof. De lucht die je uitademt bevat 5% koolstofdioxide en slechts 15% zuurstof. Door te ademen verbrand (oxideer) je de koolstof uit je voedsel (koolhydraten, vetten, eiwitten): de koolstof wordt aan zuurstof gebonden, waarbij energie vrijkomt. Zo ontstaat er weer koolstofdioxide en water. Door deze stofwisseling kun je je lichaamstemperatuur en andere lichaamsfuncties in stand houden. Dit geldt voor al het aerobe

leven op Aarde.

Stofwisseling is dus precies het tegenovergestelde van fotosynthese. Toeval? Ik dacht het niet!

## En toen was er leven

Dankzij de overvloedige aanwezigheid van koolstof, waterstof en zuurstof en een handjevol andere bouwstenen, kon het leven op Aarde ontstaan. Kennelijk waren de omstandigheden daarvoor zeer gunstig, want het ontstond vrijwel meteen na het verschijnen van vloeibaar water. Dit leven was per definitie autotroof, wat zelfvoedend betekent. Het hoeft dus geen andere organismen op te eten om aan energie te komen (zoals mensen; wij zijn heterotroof).

### Chemo-autotrofen

Het eerste leven was anaeroob: de bacteriën die 4280 miljoen jaar geleden (mij) ontstonden gebruikten anorganische stoffen, zoals ijzer of zwavel, als bron van energie en koolstofdioxide om organische verbindingen mee te produceren. Ze moesten wel, want in de atmosfeer was geen vrije zuurstof te vinden en heel veel koolstofdioxide. We noemen ze chemo-autotroof omdat ze zichzelf voeden met chemische verbindingen. Ze zijn heel succesvol gebleken: 1700

Toen een stervende rode reus zijn atmosfeer afstootte, ontstond de Ringnevel. De witte dwerg die overbleef is nog net te zien in het midden. Hij is ongeveer 2000 lichtjaar van ons verwijderd; wat je op de foto ziet, is dus hoe hij er in de Romeinse tijd uitzag. De kleuren zijn redelijk natuurgetrouw. Donkerblauw is helium, lichtblauw is waterstof en zuurstof, oranje is stikstof en zwavel.

Foto: NASA/Hubble Space Telescope.



miljoen jaar lang waren zij heer en meester op Aarde, en ze bestaan nog steeds.

#### De eerste fotosynthese

Ongeveer 3400 miljoen jaar geleden ontstonden de eerste bacteriën die zonlicht gebruikten als energiebron. Ze absorbeerden bijna-infrarood licht en produceerden zwavelverbindingen als afvalproduct van hun stofwisseling. Dit waren de eerste foto-autotrofen: organismen die, door middel van lichtenergie, koolstofdioxide samenvoegen met water en zo zichzelf voeden. Ze waren obligaat anaeroob: ze konden geen zuurstof verdragen.

#### De zuurstofcatastrofe

Zo'n 2500 miljoen jaar geleden vond er een ongekende milieuramp plaats. Eencellige organismen, die we cyanobacteriën noemen, gingen op grote schaal licht uit het zichtbare spectrum van de zon oogsten. Daarbij produceerden ze een giftig afvalproduct dat een massaal uitsterven betekende voor de anaerobe organismen: zuurstof. In de loop van tweehonderd miljoen jaar kwam er zoveel vrije zuurstof in de atmosfeer dat het gros van de anaerobe organismen verdreven werd naar plaatsen waar zuurstof niet kon komen – zoals diep onder de grond. Er is indirect bewijs dat dit soort bacteriën al bijna 3000 miljoen jaar geleden ontstaan is. Maar misschien bestaan ze nog wel langer.

#### Foto-autotrofen

Tegenwoordig kunnen we niet meer zonder zuurstof. We zijn daardoor volledig afhankelijk van foto-autotrofen: hoewel 21% van zuurstof in onze dampkring bestaat uit vrije zuurstof, zou die vrij snel weer bindingen aangaan met andere elementen als er niet constant vrije zuurstof werd aangemaakt. Zo'n 650 miljoen jaar geleden namen de algen het over van de cyanobacteriën in de oceanen; vanaf toen werden de organismen steeds complexer. De eerste landplanten ontstonden ruim 400 miljoen jaar geleden en werkten samen met schimmels om aan voedingsstoffen te komen; ze hadden nog geen wortels. Pas toen de planten hun eigen wortels en vaatbundels ontwikkelden konden bomen ontstaan. Dit begon zo'n 390 m.jg. Het bladgroen (chlorofyl) in planten is hoogstwaarschijnlijk ontstaan doordat cyanobacteriën (die al zeker 2700 miljoen jaar bestaan) een endosymbiose aangingen met planten. Dat wil zeggen dat ze als symbiont in de plant leefden. Zo heel raar is dat niet; er bestaat zelfs een zeeslak die door middel van een endosymbiose aan fotosynthese doet.

Fytoplankton (een groep organismen die uit algen en cyanobacteriën bestaat) produceert nog steeds meer dan de helft van de zuurstof op Aarde. Het bestaan en gebruik van 'groene aanslagreiniger' zegt veel over hoe afgescheiden wij mensen ons van de natuur voelen. We vinden de productie van zuurstof niet netjes staan.

#### Homeostase

Zonder broeikaseffect zou onze planeet een grote ijsbol zijn. Doordat koolstof, zuurstof en waterstof constant opgeslagen en weer vrijgemaakt worden, vindt het klimaat op Aarde telkens weer een nieuw dynamisch evenwicht. Wij mensen hebben geen controle over deze complexe uitwisselingen, maar we hebben er wel invloed op. We verstoren de balans door onze onophoudelijke uitstoot van waterdamp, koolstofdioxide, methaan, stikstofdioxide en andere broeikasgassen. Dat zou nog tot daar aan toe zijn, als we niet ook nog eens de natuurlijke processen die de balans kunnen herstellen zouden verstoren.

#### Leven op Aarde

Alleen als we inzien dat we onderling afhankelijk zijn van alle andere organismen, van microbe tot megafauna, kunnen we een samenleving opbouwen die toekomst heeft. Onze afgescheidenleving – ik gooi er maar even een nieuw woord in – ontkent de samenhang in alle toonaarden. Dit is de werkelijke oorzaak van alle problemen die we wereldwijd ervaren. We moeten toe naar een samenleving die alle biodiversiteit omarmt als leven dat het leven mogelijk maakt.

Of het nou gaat om sociale of ecologische problemen, om ze op te lossen zullen we ons opnieuw moeten verbinden met elkaar en opgaan in onze natuurlijke omgeving. Fysiek, maar zeker ook mentaal.

13.700 m.jg: het heelal ontstaat  
4540 m.jg: de Aarde ontstaat  
4400 m.jg: vloeibaar water  
4280 m.jg: het eerste leven ontstaat  
2700 m.jg: cyanobacteriën  
1200 m.jg: rode en bruine algen  
750 m.jg: groene algen  
650 m.jg: meercellig leven  
475 m.jg: mossen en levermosses  
430 m.jg: vaatplanten  
390 m.jg: bomen  
230 m.jg: de eerste dino's  
65 m.jg: dino's sterven uit  
2 m.jg: de eerste mensen  
  
m.jg = miljoen jaar geleden



De zeeslak *Elysia chlorotica* eet groenwieren en kan deze negen tot elf maanden in zijn lichaam in leven houden. Op deze manier doet hij eigenlijk aan fotosynthese. Hij heeft zelfs de vorm van een blad! Foto: Nicholas E. Curtis, National Science Foundation, [www.nsf.gov](http://www.nsf.gov)