



Stelsel aarde

Ontregeld
en wat nu?

Jos Verhoeven
e.a.

Stysteem aarde

Ontregeld, en wat nu?

Redactie:

prof. dr. Jos Verhoeven

prof. dr. Jelle Reumer

prof. dr. Mariëtte Wolthers

prof. dr. Ellen van Donk

ir. Nora van Klingerén (kunstenaarsoog)

ir. Astrid Smit (eindredactie)

Laura Heesbeen, MA (bureaucoördinatie)

Joy Kerklaan, MSc (bureaucoördinatie)

Infographics:

Eva Dekker, MSc


L i a s


bio wetenschap+
maatschappij

Over stichting Biowetenschappen en Maatschappij

Stichting Biowetenschappen en Maatschappij (BWM) is in 1969 op initiatief van prinses Beatrix en prins Claus opgericht om het Nederlandse en Vlaamse publiek te informeren over ontwikkelingen binnen de biowetenschappen (*life sciences*) en de daaraan verbonden maatschappelijke implicaties te bespreken.

BWM verspreidt daartoe, zowel online als gedrukt, populairwetenschappelijke informatie over actuele thema's in de gezondheids- en biowetenschappen, geschreven door vooraanstaande wetenschappers. BWM verschaft inzicht in actuele en toekomstige ontwikkelingen en toepassingen van de biowetenschappen en de betekenis en gevolgen daarvan voor mens, natuur en maatschappij. De thema's worden zorgvuldig geselecteerd op maatschappelijke relevantie.

Drie keer per jaar worden boeken uitgebracht die beschikbaar zijn via de boekhandel en via de webshop van BWM. Alle online informatie, waaronder lesmateriaal, is kosteloos beschikbaar via de website.

www.biomaatschappij.nl



© 2025 stichting Biowetenschappen en Maatschappij
Omslag en vormgeving: Nico Richter
© Illustraties: zie de afzonderlijke illustraties, freepik.com
© Fotografie kunstenaarsoog: Dennis van de Water
ISBN 978 90 8803 152 6 | NUR 930

Alle rechten voorbehouden | All rights reserved
Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd
en/of openbaar gemaakt door middel van druk,
fotokopie of op welke andere wijze en/of
door welk ander medium ook, zonder voorafgaande
schriftelijke toestemming van de uitgever.

www.uitgeverijlias.nl



INHOUD

Voorwoord 9

– Marjan Minnesma

Inleiding 11

– Jos Verhoeven en Jelle Reumer

1 Het ontstaan van de aarde 15

1.1 Waarom de aarde anders is 15

– Inge Loes ten Kate

Kader De aardse planeten vergeleken 18

– Inge Loes ten Kate

Kader Hoe kwam het water op aarde? 22

– Inge Loes ten Kate

Kunstenaarsoog Digging in the dark 29

– Nora van Klingeren

2 Het systeem aarde 31

2.1 De ontregelde aarde 31

– Inge Loes ten Kate en Jos Verhoeven

Kader Kringloop van biologische processen: verbranding en opbouw 38

– Inge Loes ten Kate en Jos Verhoeven

- 2.2 De waterkringloop 42
 - Marc Bierkens
- 2.3 De zuurstofkringloop 43
 - Mariëtte Wolthers
- Kunstenaarsoog** Ourobouros 47
 - Nora van Klingeren
- 3 **De mondiale koolstofkringloop** 48
 - 3.1 De koolstofkringloop is verstoord 48
 - Jos Verhoeven
 - Kader** Hoe werkt het broeikaseffect? 49
 - Peter Kuipers Munneke
 - Kader** Het carbonaatevenwicht tussen atmosfeer en oceaan 58
 - Jos Verhoeven
 - Kader** De effecten van koolstofdioxide, methaan en lachgas 62
 - Jos Verhoeven
 - 3.2 De warme Golfstroom kan ermee ophouden 65
 - Henk Dijkstra
 - 3.3 Wat als de bevroren ondergrond ontdooit? 68
 - Ko van Huissteden
 - Kunstenaarsoog** De aarde ontdooit 71
 - Nora van Klingeren
- 4 **De gevolgen van een verstoorde koolstofkringloop** 72
 - 4.1 Een cascade van effecten 72
 - Rik Leemans
 - 4.2 Kantelpunten of niet? 84
 - Max Rietkerk
 - Kunstenaarsoog** Kantelpunten 87
 - Nora van Klingeren
- 5 **De mondiale stikstofkringloop** 89
 - 5.1 Van schaars goed naar overvloed 89
 - Jan Willem Erisman
 - Kader** Bufferstroken 100
 - Jos Verhoeven
 - Kunstenaarsoog** I think... 103
 - Nora van Klingeren
- 6 **De mondiale fosforkringloop** 105
 - 6.1 Zonder fosfor geen leven 105
 - Caroline Slomp
 - Kader** Van soldaat tot bron van fosfaat 112
 - Jelle Reumer
 - 6.2 Het belang van walvissen 119
 - Frank Zanderink, Nynke Osinga en Caroline Slomp
 - 6.3 Voedingstoffen van land naar zee uit balans 121
 - Lex Bouwman
 - Kunstenaarsoog** Aegir en de algen 125
 - Nora van Klingeren
- Epiloog** 127
 - Maarten Hajer
- Kunstenaarsoog** Hoofd vol illusies 133
 - Nora van Klingeren
- Meer weten?** 135
- Auteurs** 137
- Register** 139

VOORWOORD

Marjan Minnesma



Hoe houd je de moed erin, in het licht van alle feiten die dit boek bevat? In mijn presentaties begin ik altijd met het benadrukken van de urgentie rondom klimaatverandering, biodiversiteit en grondstoffen. Daar word je licht depressief van, want we staan ver af van een duurzame samenleving. Maar... kondig ik meestal aan, daarna gaat twee derde van mijn verhaal over oplossingen en hopelijk ga je dan toch nog positief opgeladen naar huis, bereid om in actie te komen.

Dit boek laat zien dat de mens al ruim honderd jaar op veel te grote voet leeft en daarmee allerlei kringlopen heeft verstoord. Op een eendige planeet kun je niet oneindig groeien en tot nu toe is dat wat we doen op vele vlakken: groeien. Je zou denken, de mens is zo slim, kan zo veel meer dan alle andere levende wezens, waarom gebruiken we onze hersens niet om ons huis op aarde op orde te houden en de soort gezond. ‘We hebben 1 procent meer DNA dan een aap, waarom gebruiken we dat niet?’, zei Jan Terlouw.

Laten we de wal het schip keren en heel snel aan de slag gaan met z’n allen. Want we kunnen binnen 10 à 20 jaar enorm veel veranderen

en ten goede keren, als we dat écht willen. Als we ons voorstellen wat we daarmee allemaal winnen, dan denk je, wie wil dit nu niet? Als we versneld duurzame energie gaan gebruiken, zo veel mogelijk grondstoffen in de kringloop houden, veel meer plantaardig gaan eten, veel minder gaan consumeren en veel meer gaan genieten van niet-materiële zaken (zoals van vrije tijd, kunst, liefde, verveling, samen zijn, muziek), dan kunnen we heel snel zaken veranderen. Want op dit moment is de aarde met al zijn planten en dieren en andere wezens nog relatief veerkrachtig en kunnen we het tij nog keren. We hebben alleen niet de tijd om daar nog langer mee te wachten.

Het eindresultaat zou een maatschappij zijn met meer rust en vrije tijd en daardoor ook mentaal gezondere mensen, die hopelijk ook wat vriendelijker zijn voor elkaar. Het levert ook veel meer lichamelijke gezondheid op. Wonen in gezondere huizen, betaalbare vervoerssystemen die niet de halve stad in beslag nemen, gezond en lekker eten, waarbij we niet meer driekwart van de landbouwgrond in ons land voor veevoer hoeven te gebruiken, veel meer groen en schone lucht. Je vraagt je toch af waarom we dat niet gewoon doen. Gewoon beginnen, niet wachten op een ander. Dit boek geeft je alle aanleiding om daarmee aan de slag te gaan en handvatten waar te starten. Het kan, als je het wilt!

Marjan Minnesma,
directeur Stichting Urgenda

INLEIDING

Astronauten op weg naar de maan zagen in juli 1969 door het raampje van hun ruimteschip onze aarde voor het eerst als een vrij kleine, blauw-groene bol. Dat iconische beeld ging de hele wereld over en liet velen beseffen hoe nietig en kwetsbaar onze planeet is. Inmiddels weten we door alle satellietbeelden dat de blauwe kleur de oceanen verraadt, die twee derde van het oppervlak uitmaken, terwijl de groene kleur voornamelijk afkomstig is van het bladgroen van de vegetatie op het land.

De planeet wordt tegenwoordig gezien als een dynamisch systeem met stromen van water en kringlopen waarin het leven in zijn breedste zin een hoofdrol speelt: systeem aarde. Groene planten – van eencellige algen tot mossen, varens en woudreuzen – zetten de energie van de zon om in energierijke biomassa die als basis dient voor al het andere leven, inclusief de mens. Complexe voedselwebben zijn eruit ontstaan met een grote diversiteit van met elkaar interacterende eencelligen, schimmels, en ongewervelde en gewervelde dieren. Het is eten of gegeten worden. Ze teren op die enorme, steeds hernieuwbare voorraden zonne-energie. De aarde is als het ware een gigantisch ecosysteem.

Gaia

Hoe werkt systeem aarde precies? Hoe werken de kringlopen? Zorgen terugkoppelingen voor een leefbare aarde? Het is misschien niet

toevallig dat enkele decennia na de eerste maanlanding het boek *Gaia, een nieuwe kijk op het leven op aarde* van James Lovelock verscheen. Lovelock lanceerde hierin de Gaia-hypothese, genoemd naar de godin van de aarde uit de Griekse mythologie. Hij stelde dat de biologische en geologische kringlopen op aarde leiden tot buffering van extremen, waardoor langetermijnveranderingen geleidelijker tot stand komen. Inmiddels zijn er veel aanwijzingen dat dit inderdaad zo is. Zo bestaan er twee verschillende geologische verweringsprocessen die een tegengesteld effect hebben op atmosferisch koolstofdioxide (CO₂), oftewel koolzuurgas. De verwerking van kalksteen leidt tot het vrijkomen van koolstofdioxide, maar bij de verwerking van sommige andere gesteenten wordt koolstofdioxide juist weer vastgelegd. Daardoor zijn schommelingen in de hoeveelheid atmosferisch koolstofdioxide gedurende het bestaan van de aarde sterk afgevlakt.

Buffers

Onderzoekers hebben veel voorbeelden van zulke bufferende processen ontdekt in de mondiale kringlopen van koolstof, stikstof en fosfor. Deze kringlopen vormen het hoofdonderwerp van dit boek. De elementen koolstof, stikstof en fosfor worden in verschillende gedaanten uitgewisseld tussen de atmosfeer, de hydrosfeer (oceanen en meren), de lithosfeer (gesteenten) en de biosfeer (het leven). De atmosfeer is daarbij zeer belangrijk omdat bepaalde gassen die daarin voorkomen grote invloed hebben op het klimaat. Dit zijn de zogeheten broeikasgassen, zoals koolstofdioxide, methaan en lachgas. De concentraties van deze gassen zijn de afgelopen tienduizend jaar opmerkelijk constant geweest maar sinds 1850 sterk gaan stijgen, vooral als gevolg van het verbranden van fossiele brandstoffen en het kappen en ontginnen van bosgebieden voor de landbouw. Dit leidt tot een steeds duidelijker waarneembare opwarming van onze planeet, die al in de loop van deze eeuw zal leiden tot gevaarlijke weersextremen, smelten van gletsjers, zeespiegelstijging en grote schade aan de biodiversiteit van koraalriffen, regenwouden en veengebieden. De plotselinge continue stijging van duizenden jaren min of meer constant gebleven concentraties broeikasgassen laat duidelijk zien dat de bufferende mechanismen op aarde niet meer in staat zijn deze snelle veranderingen op te vangen.

Kunstmest

Daarnaast is de landbouw steeds intensiever geworden, mede dankzij het gebruik van kunstmest sinds de jaren vijftig van de twintigste eeuw. Dit heeft geleid tot een mondiale verdubbeling van de hoeveelheid ‘reactief’ stikstof, de vorm die organismen kunnen benutten, in landbouwsystemen. Tot 1910 was de enige manier om stikstof uit de lucht tot meststof om te vormen het binden van stikstof door bacteriën die van nature voorkomen in bodems of in symbiose leven met bepaalde planten zoals vlinderbloemigen, de zogeheten groenbemesters. Ook het gebruik van fosfor in de landbouw is sterk gestegen. Die wordt gewonnen uit fossiele vogeluitwerpselen (guano) en uit fosforrijke gesteentelagen, de laatste voor de fabricage van kunstmest. Het sterk gestegen gebruik van meststoffen heeft in de afgelopen eeuw hongersnoden voorkomen en meer veeteelt mogelijk gemaakt. De schaduwzijde is echter dat dit ook heeft geleid tot de uitspoeling van stikstof en fosfaat naar natuurgebieden, rivieren en kustwateren waardoor grote schade aan de natuur is ontstaan, bijvoorbeeld door algenbloei die kan leiden tot zuurstofgebrek in kustgebieden. In de Baltische Zee en in de Golf van Mexico heeft dit massale vissterfte tot gevolg gehad.

In dit boek beschrijven wetenschappers uit diverse hoeken – van astrobiologie en geologie tot klimaatwetenschap – hoe onze planeet is ontstaan en waarin zij verschilt van andere planeten, hoe de mondiale kringlopen van koolstof, stikstof en fosfor binnen systeem aarde functioneren en hoe die door de mens de afgelopen anderhalve eeuw langzaam ontregeld raakten. Niet zonder reden siert een slang het omslag. De slang die in zijn eigen staart bijt is één van de oudste mythische symbolen in vele culturen en verbeeldt de cyclische aard van de natuur. Welke ontwikkelingen kunnen we verwachten, waar liggen de grenzen en kantelpunten, en zijn er nog mogelijkheden om de verstorings weer terug te draaien of op zijn minst te stoppen?

Veel leesplezier!

Namens de redactie,
Jos Verhoeven
Jelle Reumer

We kijken in dit boek niet alleen vanuit de wetenschap naar systeem aarde maar ook door de ogen van een kunstenaar. Dit biedt een waardevol perspectief omdat kunstenaars vaak net anders reflecteren op de wereld. Nora van Klingeren is textielkunstenaar en laat zich inspireren door klimaatverandering en het gebruik van de aarde. Met haar verbeeldingskracht probeert ze te laten zien wat de gevolgen van een ontregeld systeem aarde kunnen zijn. Speciaal voor dit boek maakte zij verschillende nieuwe werken, allemaal van wol en zijde, samen vervilt. De werken *De aarde ontdooit* en *Hoofd vol illusies* maakte zij al eerder. Haar bijdragen vind je steeds tussen twee hoofdstukken, ze zijn een uitnodiging om als lezer op een nieuwe manier te kijken naar de complexe relatie tussen mens en aarde.

1 Het ontstaan van de aarde

1.1 Waarom de aarde anders is

– Inge Loes ten Kate

In ons zonnestelsel is de aarde anders dan de drie andere rotsachtige planeten – Mercurius, Venus en Mars – en al helemaal anders dan de vier gasplaneten. Onze planeet heeft als enige een volledige planetaire kringloop waarin materiaal voortdurend rondgaat, en heeft ook als enige een sterk magneetveld. Ook is de aarde de enige planeet met ver geëvolueerd leven. De planetaire kringloop en het magneetveld van de aarde hebben te maken met de ontstaansgeschiedenis. Misschien dat dit voor het leven ook wel geldt. Hier een korte samenvatting van 4,6 miljard jaar aarde.

Planeten worden gevormd in donkere koude wolken in de ruimte. In het geval van ons zonnestelsel begon het ongeveer 4,6 miljard jaar geleden. In de ruimte bevinden zich enorme, langzaam ronddraaiende gaswolken, met een hele lage temperatuur (10-50 Kelvin, dat is -263 tot -223 graden Celsius) en een hele lage dichtheid (honderden tot duizenden deeltjes per kubieke centimeter; ter vergelijking: onze atmosfeer bevat 25.000.000.000.000.000 deeltjes per kubieke centimeter). Door een combinatie van druk van buitenaf, bijvoorbeeld een schokgolf van een supernova – een stervende ster die ontploft –, en trekkende zwaartekracht van binnenuit, kunnen delen

van deze stofwolk ineensstorten tot zogeheten dichte kernen (tienduizend tot een miljoen deeltjes per kubieke centimeter). Zo'n dichte kern was het begin van ons zonnestelsel. Die dichte kern had een massa van ongeveer 1,1 keer de massa van onze huidige zon en bestond voor circa 90 procent uit het gas waterstof, voor 8 procent uit het gas helium en voor de overige 2 procent uit alle andere elementen die zwaarder zijn dan helium. De dichte kern bleef onder invloed van de zwaartekracht verder instorten en het overgrote deel van het materiaal eindigde als een bol in het midden: de protozon. Door dit instorten ging de reeds draaiende dichte kern steeds sneller draaien, waardoor niet al het materiaal in de protozon kon worden opgenomen maar een schijf er omheen vormde: de protoplanetaire schijf. Terwijl het waterstof in de zon door de hoge temperatuur (15 miljoen graden) en druk (225 miljard keer de luchtdruk op aarde) fuseerde tot helium, stopte de aanvoer van nog meer materiaal uit de gaswolk en begon de protoplanetaire schijf af te koelen. Dit afkoelen maakte het mogelijk dat deeltjes uit de schijf condenseerden tot stof en ijsdeeltjes die vervolgens samenklonteren. Deze minuscule deeltjes (kleiner dan een micrometer) bewogen in een baan om de zon en groeiden door te botsen en aan elkaar te blijven plakken tot ze uiteindelijk protoplaneten vormden, voorstadia van planeten.

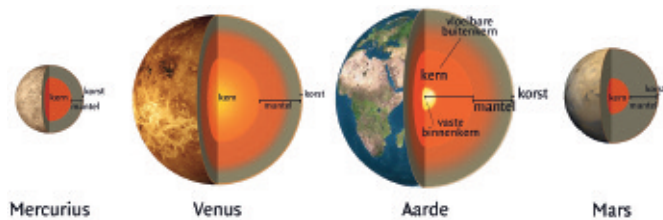
Protoplaneten

De samenstelling van de protoplanetaire schijf was niet overal hetzelfde maar veranderde met de afstand tot de zon, omdat het dichterbij de zon warmer was dan verder weg. De protoplaneten werden voornamelijk gevormd uit het materiaal dat voorkwam in hun eigen baan om de zon, maar botsingen zorgden ervoor dat protoplaneten soms uit hun baan werden geketst, in een baan van een andere protoplaneet terecht kwamen en daarmee een grotere protoplaneet gingen vormen. Op het moment dat de eerste protoplaneten ontstonden, bevatte de protoplanetaire schijf ook nog veel gas. De grootste protoplaneten trokken door hun zwaartekracht veel van dat gas aan; zo vormden zich de planeten Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus. Zeer waarschijnlijk zijn deze gasplaneten niet ontstaan op hun huidige plaats in het zonnestelsel, maar hebben ze zich pas nadat ze gevormd waren verder naar de buitenkant bewogen. Tijdens deze verhuizing trokken ze nog

meer gas aan en werd de rest van het gas uit het zonnestelsel geduwd. Uit het materiaal dat achterbleef zijn, wederom uit lokaal materiaal en door botsingen met protoplaneten uit andere banen, de vier 'aardse planeten' gevormd: Mercurius, Venus, Aarde en Mars.

Evolutie van aardse planeten

We noemen de aardse planeten aards omdat ze net als de aarde uit rotsachtig materiaal bestaan. Maar ze hebben niet allemaal precies dezelfde samenstelling en eigenschappen (zie kader De aardse planeten vergeleken, figuur 1 en tabel 1). Dat komt doordat ze gevormd werden in verschillende delen van de protoplanetaire schijf en ook nog botsten met materiaal uit weer andere delen. Alle planeten bevatten een kleine hoeveelheid radioactieve elementen, die na verloop van tijd vervielen naar andere elementen en daarbij warmte produceerden. Deze (radioactieve) warmte en de vele botsingen tijdens en vlak na de vorming van de planeten zorgden ervoor dat planeten zowel van binnen als van buiten werden opgewarmd. Daarna begon ook de zwaartekracht een rol te spelen. Onder invloed van die warmte en de zwaartekracht zonken verbindingen met een hoge dichtheid naar het binnenste van de planeten. IJzer speelt daarin een grote rol, omdat ijzer onder de hele hoge druk en temperatuur in het binnenste van een planeet een vloeistof met zeer hoge dichtheid vormt. Elementen die graag een verbinding aangaan met ijzer zakten met het ijzer mee en vormden daardoor samen de kern van een planeet. Boven op de kern vormde zich een laag met minder dichte materialen, zoals magnesiumsilicaten (verbindingen van magnesium, silicium en zuurstof), die de mantel vormden. De buitenste laag van een planeet, de korst, werd gevormd door weer andere silicaten, zoals aluminium-, natrium-, kalium- en calciumsilicaten. Dit proces van verdeling van materiaal binnenin planeten vindt ook op aarde nog steeds plaats bij plaatvorming en vulkaanuitbarstingen. Deze zogeheten differentiatie over de kern, de mantel en de korst bepaalt uiteindelijk de dichtheid van de planeet. Door een combinatie van metingen aan de aarde, analyse van gesteenten op aarde en op andere aardse planeten, experimenten en computermodellen hebben we inmiddels een goed begrip van het binnenste van de aarde en een globaal begrip van het binnenste van Mercurius, Venus en Mars.



Figuur 1 De overeenkomsten en verschillen tussen de binnensten van de vier aardse planeten (bron: NASA/Wikipedia, bewerking Inge Loes ten Kate).

De aardse planeten vergeleken

– Inge Loes ten Kate

In tabel 1 is een aantal eigenschappen van de aardse planeten naast elkaar gezet. Wat opvalt is dat Mercurius, Venus, Aarde en Mars behoorlijk verschillen, ondanks dat ze allemaal aards zijn. Mercurius en Mars zijn veel kleiner dan Venus en Aarde. De tijdsduur van een rondje om de zon – voor Aarde een jaar – is afhankelijk van de afstand tot de zon. Als we de lengte van een dag – de tijd die het kost om een rondje om de eigen as te draaien – bekijken, zien we dat Aarde en Mars ongeveer even snel om hun as draaien, maar blijkt een dag op Mercurius bijna drie aardse maanden te duren en op Venus wel acht aardse maanden. De zwaartekracht van de zon heeft de draaisnelheden van Mercurius en Venus ontzettend vertraagd. De draaisnelheid hangt dus niet af van de grootte van de planeet, maar van de afstand tot de zon. De grootte van een planeet wordt onder andere bepaald door de hoeveelheid materiaal die beschikbaar was op de plaats waar de planeet ontstond, maar ook bijvoorbeeld een gigantische botsing kan nog invloed hebben.

De beschikbaarheid van materiaal bepaalt niet alleen de grootte, maar ook de dichtheid van een planeet. Mercurius, Venus en Aarde verschillen niet zoveel in dichtheid, terwijl Mars een veel lagere dichtheid heeft. De aardse planeten bestaan vooral uit vast gesteente dat opgebouwd is uit mineralen. Mine-

ralen hebben een bepaalde dichtheid, die wordt bepaald door de samenstelling (lichtere of zwaardere elementen) en interne structuur (dicht of minder dicht tegen elkaar aan zittende elementen). Mars heeft een lagere dichtheid omdat het minder zwaardere elementen bevat en omdat de elementen er mineralen hebben gevormd die niet zo dicht op elkaar zijn gepakt.

De combinatie van dichtheid en grootte bepaalt de zwaartekracht op het oppervlak van een planeet. In het geval van Mercurius en Mars leidt dit tot een veel lagere zwaartekracht dan op Venus en Aarde, waardoor het voor Mercurius en Mars veel moeilijker is om een atmosfeer vast te houden.

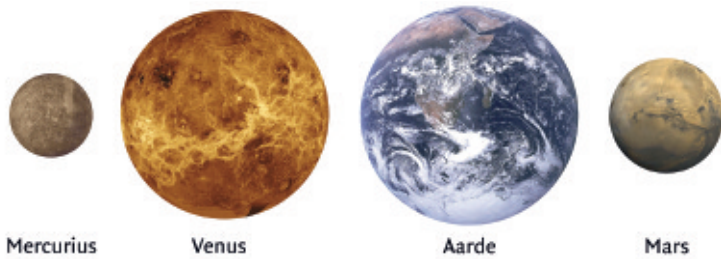
Eigenschap	Mercurius	Venus	Aarde	Mars
Straal (km)	2440	6052	6378	3396
Afstand van de zon (AE)	0,39	0,72	1	1,5
Een jaar (in aardse dagen)	87,97	224,70	365,26	686,98
Een jaar (in aardse jaren)	0,24	0,62	1	1,8
Een dag (in aardse dagen)	58,65	243,02	1	1,03
Massa (10^{24} kg)	0,33	4,87	5,97	0,64
Dichtheid (g/cm^3)	5,43	5,2	5,52	3,94

AE = astronomische eenheid (ongeveer 149,5 miljoen km)

Tabel 1 Eigenschappen van de aardse planeten

Planeetsferen

Als we naar het oppervlak van de vier aardse planeten kijken (zie figuur 2), valt meteen op dat ze er aan de buitenkant heel verschillend uitzien. De aarde heeft een atmosfeer met wolken erin. Venus heeft een veel dichtere atmosfeer en ook Mars heeft een atmosfeer, maar dan een hele ijle. Mercurius is de enige planeet zonder atmosfeer. Mercurius is volledig bedekt met kraters, maar heeft ook uitgedoofde vulkanen en waterijs in een aantal kraters. Venus heeft veel vulkanen



Figuur 2 Het oppervlak van Mercurius, Venus, Aarde en Mars (bron: NASA/Wikipedia, bewerking Inge Loes ten Kate).

en minder kraters. Het oppervlak van Mars bestaat uit een combinatie van vulkanen, kraters, opgedroogde oude rivieren, vlaktes en poolkappen van ‘droogijs’ (vast koolstofdioxide) en waterijs. Het overgrote deel van het oppervlak van onze planeet is daarentegen bedekt met water waar eilanden en continenten boven uitsteken.

De indeling van de aarde in sferen, zoals de atmosfeer, begon al bij Empedocles, de Griekse filosoof die rond 450 voor Christus vier aardse basiselementen definieerde: lucht, water, aarde en vuur. De term ‘atmosfeer’ kwam in gebruik in 1619, toen de Nederlandse wetenschapper Snellius de term voor het eerst publiceerde. De Oostenrijkse geoloog Suess voegde daar in 1875 de termen ‘hydrosfeer’, ‘lithosfeer’ en ‘biosfeer’ aan toe. De hele vaste aarde, kern, mantel en korst, noemen we de geosfeer. De korst en de bovenste laag van de mantel vormen de lithosfeer. De atmosfeer bevat de lucht rond de planeet, en de hydrosfeer omvat al het water, bevroren, vloeibaar en gasvormig. Waterdamp is dus een onderdeel van zowel de hydrosfeer als de atmosfeer. Daarnaast is er nog een magnetosfeer, het magneetveld dat een planeet beschermt tegen straling met zeer hoge energie afkomstig van de zon en uit de ruimte. Tot slot is er, alleen op Aarde, de biosfeer die al het leven omvat.

Binnen en tussen deze diverse sferen spelen zich processen en kringlopen af op verschillende tijdschalen. Bij de geosfeer en magnetosfeer gaat het om lange, trage processen van vele miljoenen jaren. Bij de vier andere, de atmo-, hydro-, litho- en biosfeer, gaat het om snellere processen en kringlopen; van dagen in de bio- tot honderdduizend jaren in de lithosfeer.

Processen en kringlopen op aardse planeten

Als we alleen al naar de oppervlakken van de verschillende planeten kijken, krijgen we een beeld van de manier waarop de verschillende sferen elkaar beïnvloeden door processen en kringlopen. Het verschil tussen processen en kringlopen is dat processen één richting op gaan, bijvoorbeeld dat materiaal of energie wordt verplaatst van A naar B. Kringlopen bewegen in een cirkel, zodat het materiaal of de energie van A via B, en misschien zelfs C, weer bij A terechtkomt.

Tijdens en kort na de planeetvorming waren er nog veel botsingen en inslagen. Die inslagen hebben op alle planeten een gekraterd oppervlak achtergelaten. Maar de oppervlakken van de vier aardse planeten zijn op dit moment heel verschillend. Op Mercurius zijn de kraters nog over de hele planeet zichtbaar. Op Mars is alleen het zuidelijk halfrond gekraterd en is het noordelijk halfrond veel gladder. Op Venus zien we nog een kleine hoeveelheid inslagkraters. En op Aarde vinden we slechts hier en daar een inslagkrater. Dit betekent dat, nadat de inslagen afnamen, andere processen actief waren die het oppervlak veranderden en de kraters als het ware uitgewist hebben.

Naast inslagen zijn de belangrijke processen die een oppervlak kunnen veranderen vulkanisme, erosie, verplaatsing van het geërodeerde materiaal (sedimentatie) en platentektoniek. Vulkanisme is het proces waarbij gesmolten gesteente – magma – vaak afkomstig uit de mantel, door de korst naar buiten barst, waar het vervolgens lava heet. Op alle vier de aardse planeten vinden we aanwijzingen voor vulkanisme, een proces dat zich afspeelt in de geosfeer. Grootschalige erosie en sedimentverplaatsing worden veroorzaakt door wind of water. Voor wind en water is echter een atmosfeer nodig.

Atmosferen

Iedere aardse planeet had na het ontstaan een atmosfeer van vluchtige stoffen die verdampten uit de planeten toen ze nog heet waren. Deze eerste atmosfeer bestond bij alle aardse planeten voor het grootste deel uit koolstofdioxide. Niet alle planeten wisten echter zo’n atmosfeer te behouden. Zwaartekracht speelt een rol – een planeet met een lagere zwaartekracht houdt moeilijker een dichtere atmosfeer vast. Als we de atmosferen van nu vergelijken, blijkt dat Mercurius slechts een hele ijle gaslaag heeft met een druk van 10^{-14} bar. Mer-

curius staat zeer dicht bij de zon en krijgt daardoor veel hoogenergetische zonnestraling te verduren in combinatie met een lage zwaartekracht. Deze planeet was daardoor niet in staat haar atmosfeer te behouden. Venus en Mars hebben hun atmosferen behouden en deze bestaan nog steeds voornamelijk uit koolstofdioxide, respectievelijk 96,5 en 93,6 procent. Venus heeft echter een luchtdruk van 92 atmosfeer, terwijl die op Mars slechts 0,06 atmosfeer is. Ook de aarde heeft nog steeds een atmosfeer. Hierin zijn inmiddels stikstof en zuurstof de hoofdrolspelers en is er slechts 0,04 procent koolstofdioxide bij een druk van 1 atmosfeer. Vulkanisme stoot niet alleen lava uit, maar ook gassen, die weer opgenomen worden in de atmosfeer. Op deze manier vult vulkanisme ook de atmosfeer aan met nieuwe gassen vanuit de geosfeer.

Met de (vroegere) aanwezigheid van een atmosfeer zijn Venus, Aarde en Mars goede kandidaten voor de (vroegere) aanwezigheid van vloeibaar water op het oppervlak (zie kader Hoe kwam het water op aarde?). Een atmosfeer zorgt voor luchtdruk en houdt warmte vast, twee belangrijke voorwaarden om water vloeibaar te houden. Alleen onder hoge druk is water onder 0 graden nog vloeibaar, anders bevriest het. Bij een druk lager dan 1 atmosfeer begint water te verdampen en als de druk lager is dan 0,01 atmosfeer kan water alleen bestaan als damp (boven de 0 graden) of ijs (onder de 0 graden). De aarde heeft nog steeds vloeibaar water. Van Mars weten we door onder andere de achtergebleven rivierbeddingen en mineralen zeker dat daar heel vroeger ook vloeibaar water was. En ook bij Venus hebben we sterke aanwijzingen voor de aanwezigheid van water. Een atmosfeer is dus noodzakelijk voor de aanwezigheid van een hydrosfeer waarin vloeibaar water aanwezig is.

Hoe kwam het water op aarde?

– Inge Loes ten Kate

Op Mars en Venus is er ooit, zoals nu nog steeds op Aarde, vloeibaar water geweest. Maar de bron van dat water is niet bij alle drie de planeten hetzelfde. Mars is deels gevormd uit materiaal

dat zich zo ver van de zon af bevond dat het koud genoeg was om water en ijs te bevatten. Dus het water van Mars was al aanwezig tijdens de vorming. Venus en Aarde zijn echter gevormd uit min of meer hetzelfde materiaal, veel dichterbij de zon, zonder water. Dit materiaal kan wel waterstof en zuurstof hebben bevat, twee gassen die ontsnapten toen de planeten nog heet waren en tijdens de planeetvorming waterdamp vormden. Toen de planeten langzaam afkoelden, condenseerde een deel van deze waterdamp en vormde vloeibaar water op het planeetoppervlak. De aanwezigheid van water in de aardmantel ondersteunt deze theorie. We weten echter ook dat er, nadat de planeten gevormd waren, nog veel inslagen waren. De kometen en planetoïden die toen insloegen, kwamen uit het koudere buitenste deel van ons zonnestelsel en bevatten veel water. Het is aannemelijk dat ook deze inslagen op Venus en Aarde een bron van water zijn geweest. Water op jonge planeten lijkt daarmee niet ongewoon.

Magnetosfeer

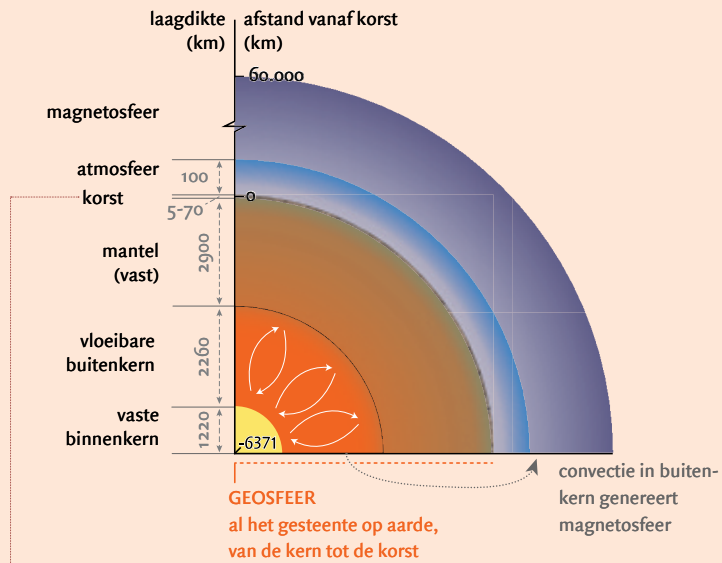
De geosferen, hydrosferen en atmosferen op alle aardse planeten hebben invloed op elkaar. Naast deze drie sferen hebben Aarde en Mercurius ook nog een magnetosfeer. Dit planetaire magneetveld is het resultaat van een proces in de geosfeer, namelijk convectie in de kern. Convectie krijg je wanneer warm, licht materiaal naar boven stijgt, daar afkoelt en zwaarder geworden weer naar beneden zinkt. Alleen convectie is echter niet genoeg. De planeet moet snel genoeg om haar as draaien en het materiaal dat omhoog en omlaag stroomt, moet elektrisch geleidend zijn. Venus draait veel te langzaam om haar as om een magneetveld te kunnen vormen.

Op Mars laat het gesteente zien dat deze planeet een tijdlang een magneetveld heeft gehad, maar recente metingen tonen dat er nu geen magneetveld meer is. Mercurius heeft nog wel een magneetveld,

[pag. 24-25] *Figuur 3 De planetaire kringloop op Aarde in vier aspecten uitgelicht: (A) de doorsnede van de aarde, (B) de aardkorst, (C) de invloed van platen tektoniek en (D) de gesteentekringloop (© Stichting BWM).*

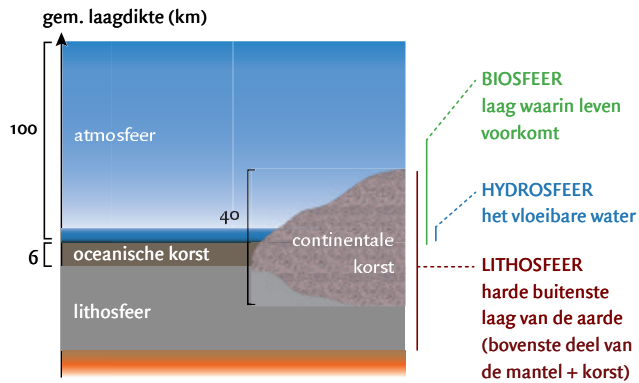
A. DOORSNEDE VAN DE AARDE

Alle lagen van de aarde beïnvloeden elkaar door uitwisseling. Wij bevinden ons op de nul.



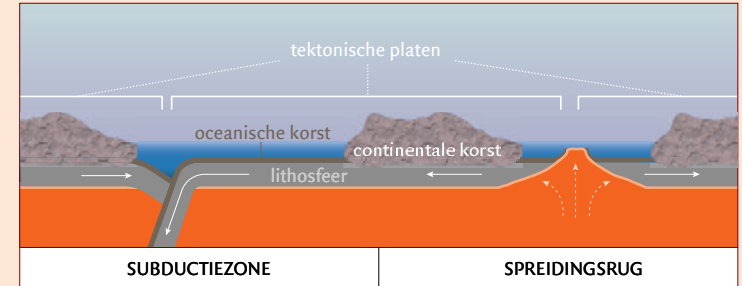
B. DE AARDKORST

Het grootste deel van de kringlopen vindt plaats op een relatief klein laagje van de aarde.



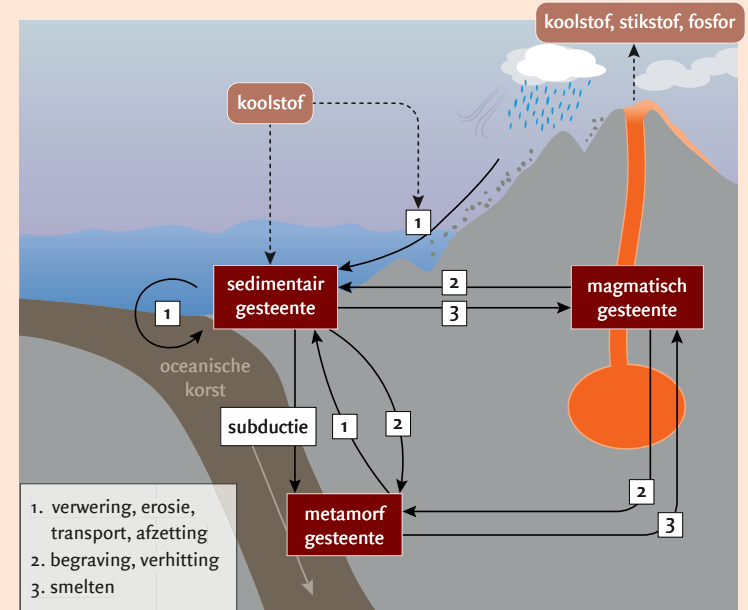
C. PLATENTEKTONIEK MAAKT PLANETAIRE KRINGLOOP MOGELIJK

De lithosfeer is opgebroken in tektonische platen die ten opzichte van elkaar bewegen.



D. DE GESTEENTEKRINGLOOP

Door verschuivende gesteenten komen stoffen die voor leven nodig zijn via drie hoofdprocessen op nieuwe plekken terecht.



zij het met een sterkte van slechts 1 procent van dat van Aarde.

De magnetosfeer is dus het gevolg van een proces in de geosfeer en kan wellicht een atmosfeer beschermen tegen straling, maar is cruciaal om het oppervlak van een planeet te beschermen tegen hoogenergetische straling van de zon en uit de ruimte. Het magneetveld buigt deze straling af, zodat deze niet het aardoppervlak kan bereiken. Zonder magnetosfeer was de evolutie van leven op Aarde waarschijnlijk niet mogelijk geweest.

De vier aardse planeten hebben dus verschillende sferen met elkaar gemeen gehad: de magnetosfeer, de atmosfeer, de hydrosfeer en de geosfeer, en de lithosfeer als onderdeel van die laatste. En op alle vier de planeten zijn of waren die sferen met elkaar verbonden via verschillende processen. Wat we nog niet hebben gezien, zijn kringlopen die materiaal vanuit de geosfeer, via de atmosfeer en/of de hydrosfeer weer terug de geosfeer invoeren. De enige planeet met zo'n volledige planetaire kringloop is Aarde.

De planetaire kringloop op Aarde

In het kort werkt de planetaire kringloop op Aarde als volgt: de lithosfeer (de korst en de bovenste laag van de mantel) is niet één harde schil, maar opgebroken in tektonische platen. Deze aardplaten kunnen langs elkaar bewegen, maar ook van elkaar af en over elkaar heen. Omdat de aarde een bol is die niet van grootte verandert, zijn alle bewegingen van de aardplaten gekoppeld. Als er ergens platen uit elkaar bewegen, moeten ergens anders platen naar elkaar toe komen. Daarbij schuift een van beide platen onder de andere, een proces dat we subductie noemen. Als aardplaten niet onder elkaar zouden schuiven, zou de aarde op die plek een uitstulping krijgen. Bij subductie beweegt plaatmateriaal van het oppervlak de mantel in. Op plaatsen waar aardplaten uit elkaar bewegen ontstaat ruimte voor mantelmateriaal om naar het oppervlak te komen en nieuwe stukken plaat te vormen.

Tektonische platen bestaan uit continentale en oceanische korst, die verschillende samenstellingen en dus verschillende dichtheden hebben. Het grootste deel van de continentale korst ligt boven water. Vooral op land, maar ook een beetje onder water, vindt verwerking plaats, waarbij ook stoffen uit de atmosfeer oplossen in water. Op land

versterken deze stoffen de afbraak van gesteente, en via het proces van erosie wordt dit materiaal naar de bodem van zeeën en oceanen getransporteerd. Ook stoffen uit de atmosfeer lossen op in de oceaan, reageren daar met geërodeerd materiaal en slaan neer op de bodem. Het neergeslagen materiaal op de oceanabodem klinkt in onder invloed van de druk en de toevoer van meer materiaal erbovenop, en vormt gesteente. Als dat gesteente uiteindelijk in een subductiezone aankomt, wordt het omhoog geplooid tot gebergten, waarna de verwering weer kan beginnen, of duikt het de mantel in. Daar wordt het subductiemateriaal opgewarmd tot het smelt en worden de mineralen in het gesteente afgebroken. De vluchtige stoffen in de mineralen ontsnappen naar boven en worden uiteindelijk via vulkanisme de atmosfeer weer ingepompt. De rest van het subductiegesteente wordt opgenomen in de aardmantel en vormt weer nieuwe platen en gesteenten.

Op deze manier maakt de platentektoniek een volledige kringloop mogelijk waarin stoffen als koolstof en water zich verplaatsen van de geosfeer naar de atmosfeer en via de hydrosfeer terug naar de geosfeer. Deze kringloop beïnvloedt de samenstelling van de aardplaten, de atmosfeer en de hydrosfeer. De afwezigheid van platentektoniek op de andere aardse planeten ligt waarschijnlijk aan een combinatie van factoren, waaronder hun verschillende grootte en samenstelling.

Biosfeer

Er zijn dus twee grote verschillen tussen Mercurius, Venus en Mars aan de ene kant en Aarde aan de andere kant: een sterke magnetosfeer en een platentektoniek die de planetaire kringloop op Aarde mogelijk maakt. Er is echter nog een zeer belangrijk verschil tussen Aarde en de rest, en dat is de biosfeer. Want de aarde heeft leven en de andere drie niet. Hoe, waar en wanneer het leven Aarde precies is ontstaan, is nog niet duidelijk, en of er op andere planeten ooit leven zou kunnen zijn ontstaan weten we ook niet.

Wat we wel weten, is dat het leven op de aarde, met haar magnetosfeer en planetaire kringloop, vanuit een eencellig begin verder is geëvolueerd en dat kringlopen essentieel zijn voor de evolutie van leven. Levende organismen nemen immers materiaal uit de omgeving op (wat je kunt zien als 'eten') en stoten het in de omgeving weer uit (wat je kunt zien als 'poepen'). Door dat te doen past leven de omgeving

een beetje aan, want niet alles wat erin gaat komt er in dezelfde vorm weer uit. Planten zijn een mooi voorbeeld, want die ademen koolstofdioxide in en zuurstof uit. Uiteindelijk sterft een organisme en komen de overblijfselen ook weer terug in de omgeving, maar vaak niet in de vorm die het oorspronkelijk had. Als leven zich in een afgesloten hok zou bevinden, dan zou het na verloop van tijd ophouden te leven, want dan zou het al het materiaal dat als eten gebruikt kan worden, hebben opgemaakt. Een kringloop zorgt voor de aanvoer van nieuw 'eetbaar' materiaal. Op Aarde zijn er veel kringlopen, op veel schalen, die een sleutelrol hebben vervuld en nog steeds vervullen in de evolutie van leven. Maar hoewel de planetaire kringloop plaatsvindt op een veel langere tijdschaal dan de biologische kringloop, zou de aarde zonder planetaire kringloop uiteindelijk onleefbaar worden.

KUNSTENAARSOOG – Digging in the dark

– Nora van Klingeren

Mensen zijn van nature nieuwsgierig en willen weten wat ze nog niet weten. Grote vragen over het leven, over het ontstaan van het heelal, van zwarte gaten, van het leven op aarde; ze kunnen zomaar in hun hoofd opdoemen. In een poging deze vragen te beantwoorden, gaat de mens op onderzoek uit.

Dat onderzoek is net als graven in een mijn. Eeuwen geleden hakten mijnwerkers zich overal op de wereld een weg door de aarde op zoek naar elementen als zilver, kobalt of koper. Vaak deden ze dat in het donker en onder erbarmelijke omstandigheden. Een gigantische inspanning die te vergelijken is met de werkwijze van onze wetenschappers die op zoek zijn naar kennis. Ook zij graven, spitten, graven opnieuw en spitten weer verder, op zoek naar antwoorden op die grote vragen. Want als het gaat om het gebruik van de aarde; op welke vraag zou jij dan een antwoord willen vinden?

[pag.30] Een mijn verbeeld in lagen, waarbij de verschillende kleuren zijde verwijzen naar de verschillende mineralen die in de mijn gedolven worden en de gaten verwijzen naar de smalle doorgangen voor de mijnwerkers.

– Nora van Klingeren, 2025, wol en Oezbeekse zijde samen vervult.



2 Het systeem aarde

2.1 De ontregelde aarde

– Inge Loes ten Kate en Jos Verhoeven

De kringlopen op aarde zijn sterk met elkaar verbonden. Ze hielden zichzelf en het leven op aarde in evenwicht, maar raken steeds meer ontregeld door menselijk handelen.

De ruimtevaart heeft het denken over onze planeet als één systeem een sterke stimulans gegeven. Door de bemande ruimtevluchten konden we voor het eerst de aarde op afstand zien: een blauw-groen gekleurd hemellichaam (zie pag. 32). De ruimtevaart zorgde er ook voor dat we onze planeet met de andere planeten konden vergelijken, waardoor het duidelijk werd dat de aarde een unieke plek in ons zonnestelsel inneemt (zie ook hoofdstuk 1).

Als we de aarde als één systeem bezien, kijken we naar mondiale kringlopen, de stromen van elementen tussen de vier sferen die er op onze planeet zijn: de biosfeer (levende en dode materie), de atmosfeer (de lucht boven de aarde), de hydrosfeer (de oceanen, zeeën, meren en rivieren), en de geosfeer (de gesteenten in de hele aarde) met als onderdeel daarvan de lithosfeer (de gesteenten in de aardkorst en een deel van de aardmantel). Hierbij wordt per chemisch element bekeken hoe levenloze bouwstenen worden omgevormd tot levende materie en



De aarde gezien vanaf de maan door astronaut William Anders van Apollo 8, december 1968 (bron: NASA).

hoe deze vervolgens, vooral door afbraak en ademhaling, weer opnieuw beschikbaar komen. Levensprocessen zijn hierbij de drijvende kracht.

In de geologie is het concept van kringlopen die de gehele aarde omvatten opgekomen in de jaren dertig van de twintigste eeuw. Met name in de Sovjet-Unie werden al berekeningen gemaakt over de uitwisseling van koolstof tussen atmosfeer, lithosfeer, biosfeer en hydrosfeer. Deze schattingen bleven lange tijd erg onnauwkeurig door de nog beperkte kennis over de stromen van biologische en chemische materie binnen de ecosystemen op het land en het ontbreken van een beeld van de ruimtelijke verdeling van verschillende typen ecosystemen op aarde. Dat veranderde in de jaren vijftig, toen satellieten het

mogelijk maakten om het aardoppervlak op een betrouwbare manier in kaart te brengen. Er kwamen wereldwijde onderzoeksprogramma's waarin de processen in de belangrijkste landecosystemen werden gemeten: productie door planten, consumptie door dieren en afbraak door micro-organismen. Ook in de oceaan en de gesteenten werd veel gericht onderzoek gedaan naar de stromen van koolstof, stikstof en andere elementen. Vanaf de jaren tachtig werden de overzichten van de belangrijkste mondiale kringlopen steeds completer. Wetenschappers vatten het idee op dat ecosystemen op aarde één geheel vormen. De biogeochemie, het grensgebied tussen biologie, geologie en chemie, ontwikkelde zich daarbij sterk.

Gaia

Het is geen wonder dat de Britse chemicus James Lovelock in die periode de Gaia-hypothese lanceerde, vernoemd naar de Griekse godin van de aarde. Hij stelde dat de aarde functioneert als een superorganisme: de atmosfeer en alle levende organismen die zich op aarde bevinden, vormen samen één geheel en de samenstelling is zo gereguleerd dat er leven op kan voortbestaan. Die zelfregulering zou er onder meer voor zorgen dat de temperatuur van de lucht en de oceanen en de concentraties van gassen in de atmosfeer binnen bepaalde waarden blijven. Daardoor kunnen de chemische en biologi-



James Lovelock (1919-2022) was een veelzijdige, dwarse denker. Hij heeft veel onderzoek gedaan naar de aanwezigheid van vervuilende stoffen in de atmosfeer zoals ozon en stikstofdioxide (© Publiek domein).

sche kringlopen van levende organismen blijven bestaan. Lovelock publiceerde hierover in 1979 het boek *Gaia, een nieuwe kijk op het leven op aarde*. Dit boek werd een bestseller, maar riep ook veel discussie op.

Vooraf veel biologen vonden de vergelijking met de regelsystemen binnen een levend organisme veel te ver gaan. De regulering van de lichaamstemperatuur in zoogdieren komt bijvoorbeeld tot stand door tal van duidelijk aanwijsbare terugkoppelingsmechanismen, waarbij sensoren in het lichaam via signaalstoffen lichamelijke reacties op gang brengen die de temperatuur van het lichaam constant houden. Dergelijke meet- en regelsystemen, die vrij precies werken en een korte tijdschaal (minuten tot dagen) hebben, zijn er niet op het niveau van de gehele aarde, omdat processen op die grote schaal zo'n lange duur hebben dat snel schakelen niet mogelijk is. Wel is het zo, dat de omstandigheden op aarde door de aanwezigheid van leven veel constanter zijn dan op andere planeten. Ook daar zitten terugkoppelingsmechanismen achter, maar die werken op een heel andere schaal in ruimte en tijd dan de processen binnen een organisme. Fysisch-chemische evenwichtsreacties, oceaanstromen en levensprocessen spelen een belangrijke rol in deze terugkoppeling.

Zuurstofbalans

Een voorbeeld is de zuurstofconcentratie in de atmosfeer. Deze concentratie, 21 procent, moet niet te veel dalen of stijgen want anders komen dieren, met name zoogdieren zoals de mens, in gevaar. Als er meer dan 21 procent zuurstof in de atmosfeer zit, kan er gemakkelijk spontane ontbranding ontstaan maar willen mensen kunnen ademen dan moet er minimaal 19,5 procent zuurstof in de lucht zitten. De hoeveelheden zuurstof die worden gebruikt bij de ademhaling van alle organismen op aarde zijn ongeveer in evenwicht met de hoeveelheden die door alle planten tezamen (inclusief algen in de oceaan) worden geproduceerd via fotosynthese. Toch kunnen er tijdelijk dips in de zuurstofconcentratie ontstaan wanneer er grote regionale bosbranden uitbreken. Op de langere termijn worden zulke dips echter afgevlakt door chemische evenwichten in de oceaan: oxidatie en reductie van ijzer in de oceaan, waarbij bacteriën betrokken zijn, kunnen zuurstof produceren als reactie op zo'n 'dip' in de atmosfeer (zie

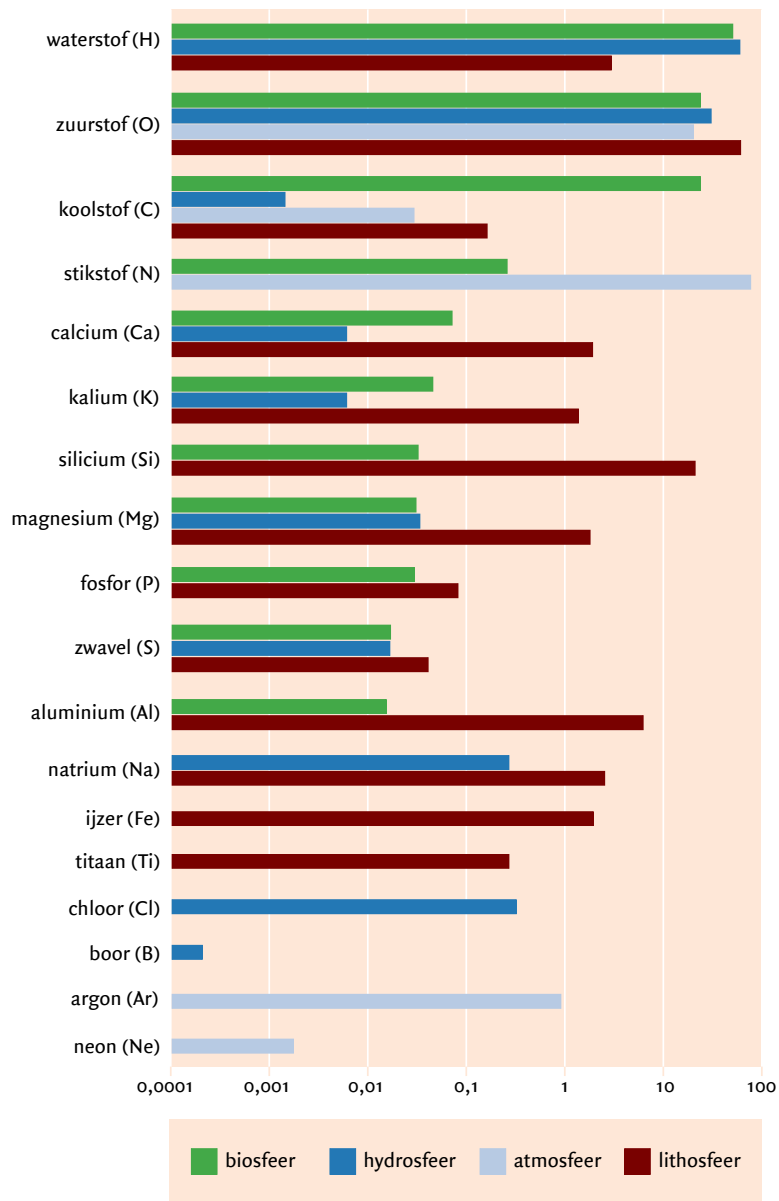
ook paragraaf 2.3). Er zijn veel meer van dergelijke terugkoppelingsmechanismen, waarvan de meeste nu wel bekend zijn maar waarover de kennis nog steeds toeneemt. Het idee van de aarde als een planetair ecosysteem met een door het leven onderhouden complexe samenhang tussen biogeochemische processen die leiden tot evenwicht en stabiliteit, wordt inmiddels breed omarmd door geologen, chemici én biologen.

Mondiale kringlopen

Binnen de mondiale kringlopen kijken we naar verschillende voor het leven belangrijke elementen en de uitwisseling daarvan tussen alle sferen. De belangrijkste elementen zijn koolstof (C), waterstof (H) en zuurstof (O). Deze drie elementen maken meer dan 99 procent van de atomen in de biosfeer uit (zie figuur 4). Het leven kan echter niet zonder een heel regiment aan andere elementen dat de laatste 1 procent opvult. Dit bestaat onder andere uit stikstof (N), dat 0,27 procent van de biosfeer uitmaakt, calcium (Ca), kalium (K), silicium (Si), magnesium (Mg), fosfor (P), zwavel (S) en aluminium (Al), elk tussen de 0,016 en 0,073 procent, en tot slot ijzer (Fe), dat in onze bloedlichaampjes zit en minder dan 0,0001 procent van de biosfeer uitmaakt.

Deze elementen bevinden zich ook in de andere sferen, maar in heel andere relatieve hoeveelheden. De atmosfeer bijvoorbeeld bestaat voor 78 procent uit stikstof (inactief – zie hoofdstuk 5) en voor 21 procent uit zuurstof (zie paragraaf 2.3). Koolstof is hierin aanwezig als koolstofdioxide (CO₂) met slechts 0,04 procent. De hydrosfeer bestaat, niet verrassend, voor 99,4 procent uit water (elementen H en O), en dan nog voor ongeveer 0,6 procent uit natrium (Na) en chloor (Cl), verantwoordelijk voor het grootste deel van het opgeloste zout. De andere elementen zijn eveneens in opgeloste vorm aanwezig, inclusief koolstof. Het overgrote deel van de totale hoeveelheid stikstof in het hele aardsysteem bevindt zich in de geosfeer (ruim 73 procent), maar stikstof is maar een fractie van de totale samenstelling van de geosfeer. In de lithosfeer komt juist een brede groep van andere elementen in grote hoeveelheden voor die voor het leven van belang zijn, zoals ijzer, calcium, kalium, silicium, magnesium, zwavel, aluminium en fosfor.

UIT WELKE ATOMEN DE SFEREN ZIJN OPGEBOUWD (%)



Langzame en snelle kringlopen

Kringlopen zorgen ervoor dat elementen vanuit de ene sfeer beschikbaar komen in andere sferen. Mondiale kringlopen kunnen plaatsvinden op zeer verschillende tijdschalen. Kringlopen waarbij de geosfeer betrokken is, hebben over het algemeen een lange tot zeer lange tijdschaal. Geologische kringlopen worden gedreven door processen zoals vertering, uitspoeling, sedimentatie op de oceanbodem, oceaanstroming, vulkanisme, transport door waterstromen op het land en gebergtevorming. In deze fysisch-chemische processen komen elementen vanuit de lithosfeer vrij in de hydrosfeer en de atmosfeer. Ook biologische processen spelen een grote rol in de geologische kringlopen. Zij dragen bij aan vertering, sedimentatie en de vorming van gesteenten. Dit gebeurt op zeer grote ruimte- en tijdschalen: het kan vele miljoenen jaren duren voor een koolstofatoom dat is opgelost uit kalkgesteente in het hooggebergte, weer volledig recycleert naar een nieuw gevormd gebergte. In deze kringloop is het koolstofatoom eerst via rivieren in de oceaan terechtgekomen, daar opgenomen in skeletjes van diverse soorten organismen zoals schaaldieren, schelpen of plankton, vervolgens bezonken naar diepe oceaansedimenten en uiteindelijk na miljoenen jaren weer boven de zeespiegel komen te liggen door gebergtevorming.

Biologische kringloop

Biologische kringlopen tussen biosfeer, hydrosfeer en atmosfeer kunnen op veel kleinere schaal plaatsvinden, zowel in ruimte en tijd. In een tropisch regenwoud gaan bijvoorbeeld binnen enkele jaren grote hoeveelheden koolstof, stikstof, zuurstof en zwavel rond. Ook de waterkringlopen kunnen een snelle omlooptijd hebben. Vloeibaar water komt als regen op de continenten terecht en stroomt via rivieren terug naar de oceaan. Overal verdampt water tot wolken, waaruit het

[LINKS] Figuur 4 De biosfeer bestaat grotendeels (99,7 procent) uit koolstof, waterstof en zuurstof, met op de vierde plaats stikstof. De volgorde van de elementen is naar talrijkheid in de biosfeer. In de atmosfeer, hydrosfeer en lithosfeer zijn de verhoudingen totaal anders. De figuur toont ook elementen die niet in deze uitgave worden toegelicht. De y-as toont de elementen, de x-as heeft een logaritmische schaal, de concentratie van elementen zonder balkje is lager dan 0,0001 procent (© Stichting BWM).

weer neerslaat in zee en op het land. De waterkringloop beperkt zich echter niet alleen tot de hydrosfeer en atmosfeer (zie paragraaf 2.2 en figuur 5).

Water is cruciaal voor al het leven en speelt een hoofdrol in de biosfeer. Daarnaast verandert het via verwerking en mineraalomzetting de samenstelling van het gesteente aan het aardoppervlak, en doet het ook nog eens mee in de langdurige geologische kringloop. Water speelt een zeer belangrijke rol in de subductie van tektonische platen in de aardmantel (zie hoofdstuk 1). Het beïnvloedt de viscositeit ('stroperigheid') van gesteente. Hoe meer water hoe lager de viscositeit, dus hoe vloeibaarder het gesteente wordt en hoe makkelijker het gesteente de mantel in duikt. Het is zelfs maar de vraag of subductie zonder water mogelijk zou zijn. Via deze processen komt het water in de aardmantel terecht, waar het via vulkanisme na miljoenen jaren weer de atmosfeer in wordt gepompt.

Naarmate de ideeën voor de gehele aarde als één ecosysteem zich ontwikkelden, kwam er steeds meer aandacht voor biogeochemische kringlopen op mondiale schaal. De levensprocessen leiden tot enorm omvangrijke kringloopstromen van koolstof, waterstof, zuurstof, stikstof en fosfor tussen de biosfeer en de levenloze materie zoals gesteenten en oceanen. Hoe verder de kennis over biogeochemische processen vordert, hoe duidelijker het wordt dat de mens de mondiale kringlopen sterk verstoort.

Kringloop van biologische processen: verbranding en opbouw

– Inge Loes ten Kate en Jos Verhoeven

In biologische processen wordt veelal zonne-energie omgezet in chemische energie die vervolgens via verbranding (ademhaling) weer wordt omgezet in levenloze bouwstenen zoals koolstof, waterstof, zuurstof en stikstof. Het eerste proces heet reductie, het tweede proces oxidatie.

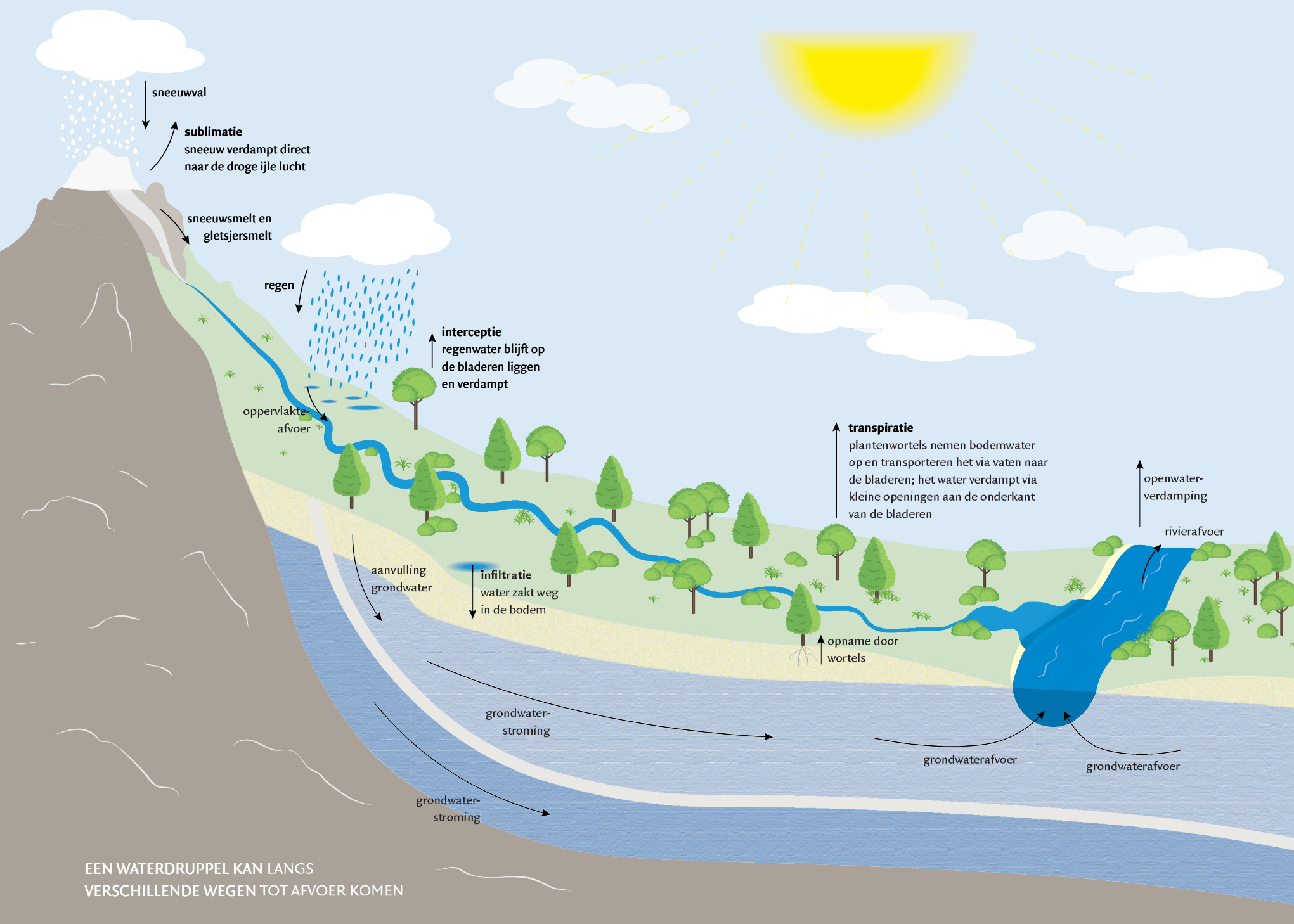
Al het leven, ook het onze, ontleent zijn energie aan deze zogeheten fotosynthese waarbij micro-organismen met groene pigmenten en planten met bladgroen het zonlicht omzetten in

suikers en daarvan afgeleide organische koolstofverbindingen.

Drie verschillende elementen worden bij de opbouw van levende materie gereduceerd, namelijk koolstof, stikstof en zwavel. Het gaat hierbij om de volgende processen:

- *Reductie van koolstof (C) door fotosynthese.* Koolstof bevindt zich in de vorm van koolstofdioxide in de atmosfeer. Onder invloed van zonne-energie wordt deze koolstofdioxide in aanwezigheid van water omgezet in suikers en zuurstof. Vrijwel uitsluitend groene planten, algen en bacteriën met lichtgevoelige pigmenten kunnen dit.
- *Reductie van stikstof (N) door stikstofbindende bacteriën.* De grootste voorraad van stikstof zit in de atmosfeer, maar in een niet-reactieve vorm. Stikstofbindende bacteriën nemen de stikstof op uit de atmosfeer en kunnen die reactief maken. Ze zetten deze stikstof om in aminozuren, de bouwstenen voor alle eiwitten. De reactief gemaakte stikstof is ook nodig voor het erfelijk materiaal zoals DNA en RNA.
- *Reductie van zwavel (S).* Zwavelbacteriën en vaatplanten kunnen sulfaat in water en bodems reduceren om zwavelhoudende aminozuren te vormen. Deze aminozuren zijn noodzakelijk bij de synthese van complexe driedimensionale structuren van eiwitten.

De vijf belangrijkste elementen die een rol spelen bij de opbouw van levende materie – koolstof, waterstof, stikstof, zuurstof en zwavel – hebben een mondiale cyclus met een atmosferische component. Ze kunnen zich via de atmosfeer snel over de gehele aarde verplaatsen en zeer efficiënt worden gerecycled. Deze eigenschap zou wellicht aan de basis kunnen staan van de grote verscheidenheid van levende materie op aarde en zeker van de verspreiding ervan. Fosfor wordt in de kringloop niet geoxideerd en gereduceerd, en heeft geen atmosferische component, maar is wel een belangrijk element in levende materie (zie hoofdstuk 6).



EEN WATERDRUPPEL KAN LANGS VERSCHILLENDE WEGEN TOT AFVOER KOMEN

- gesteente
- bodem met bodemvocht
- scheidende laag
- laag met afgesloten grondwater
- laag met 'vrij' grondwater
- rivier

2.2 De waterkringloop

– Marc Bierkens

Het water op aarde is voortdurend in beweging. Dit geldt vooral voor het vloeibare water en het water in de atmosfeer die onderdeel zijn van een kringloop.

De waterkringloop ontstaat doordat de zon de aarde opwarmt. Het zonlicht zorgt dat het zeewater warm wordt, verdampt en in de atmosfeer boven de oceaan terecht komt. Een gedeelte van dat water zal boven de oceaan wolken vormen en uitregenen. Maar boven de oceaan is de verdamping gemiddeld groter dan de neerslag. Het verschil komt via de atmosferische circulatie (de weerpatronen) boven land terecht.

De aanvoer van vocht naar land zorgt daar voor extra vocht in de atmosfeer. In stijgende en/of afkoelende lucht vormt dat vocht wolken, waaruit het als regen of sneeuw op het land valt. Ook boven het land schijnt de zon en ook daar verdampt dus water. De neerslag boven land – regen, hagel en sneeuw samen – is gemiddeld groter dan de verdamping, het verschil wordt via rivieren en grondwater afgevoerd naar de oceanen. Dit maakt de cirkel rond. Overigens zijn er vele wegen waarlangs een regendruppel uiteindelijk in de zee of de oceaan terecht komt en hoe lang zo'n druppel erover doet, hangt sterk van die route af (zie figuur 5).

Nu is de afvoer vanaf het land naar de oceaan niet elk jaar en voor elke plaats op aarde precies gelijk aan de aanvoer vanuit de oceaan naar het land. Als de afvoer kleiner is dan de aanvoer neemt de hoeveelheid water op het land toe, bijvoorbeeld door meer waterberging in grondwater, meren, sneeuw, ijs en bodems. Of andersom, als de afvoer groter is dan de aanvoer neemt de waterberging op het land af en

[pag. 40-41] *Figuur 5 De waterkringloop op land. In de winter is er vaak meer neerslag dan verdamping, waardoor de voorraden sneeuw, grondwater en bodemvocht groeien en de rivierafvoeren groot zijn. In de zomer is er meer verdamping dan neerslag, slinkt de watervoorraad en daalt de afvoer. In begroeide gebieden levert transpiratie verreweg de grootste bijdrage aan de totale verdamping (bron: Gezond water, niet vanzelfsprekend, 2024 (© Stichting BWM).*

wordt het daar droger. Maar als we dit over vele jaren over de hele aarde uitmiddelen, dan zou de afvoer van het land via rivieren en grondwater gelijk moeten zijn aan de aanvoer vanaf de oceaan naar het land via de atmosfeer. Door klimaatverandering en het watergebruik van de mens raakt de waterkringloop echter uit balans en veranderen zowel de stromen als de waterberging op het land.

2.3 De zuurstofkringloop

– Mariëtte Wolthers

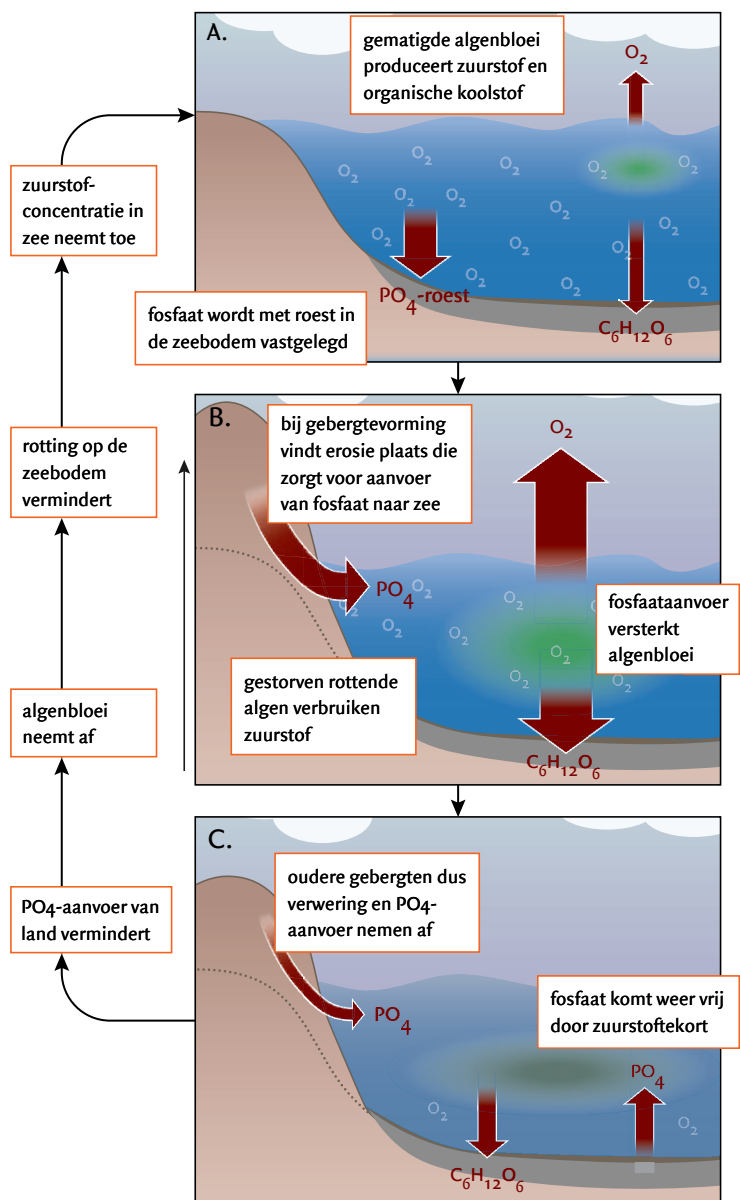
De atmosfeer van de vroege aarde was zuurstofloos en werd door toenemende biologische activiteit zuurstofrijk. Door een veelvoud aan terugkoppingsmechanismen tussen de geosfeer, biosfeer, hydrosfeer en atmosfeer is de zuurstofconcentratie in de atmosfeer al honderden miljoenen jaar vrij constant. In de oceanen is het een heel ander verhaal.

De atmosfeer van de jonge aarde was zuurstofloos. Vanaf 2,4 miljard jaar geleden werd de atmosfeer langzaam zuurstofrijker, maar het duurde honderden miljoenen jaren voordat de zuurstofconcentratie in de atmosfeer aantoonbaar toenam. Rond 2,2 miljard jaar geleden was de zuurstofconcentratie in de atmosfeer tien tot duizend keer lager dan het huidige niveau van 21 procent. De diepe oceaan bleef nog ruim een miljard jaar langer zuurstofloos. Met grote schommelingen nam de atmosferische zuurstofconcentratie stapsgewijs toe tot rond de 21 procent, een niveau dat vierhonderd miljoen jaar geleden bereikt werd en sindsdien constant gebleven is.

De oorzaak van de zuurstoftoename was de start van fotosynthese – de productie van zuurstof en organische koolstofverbindingen uit kooldioxide en water onder invloed van zonlicht – door met name cyanobacteriën. De fotosynthese startte waarschijnlijk al zo'n drie miljard jaar geleden. Daar zijn geologische bewijzen voor, zoals de concentraties van zuurstofgevoelige elementen in afzettingen uit die tijd.

Lange tijd was de langzame stijging van de zuurstofconcentratie ondanks die vroege zuurstofproductie een raadsel en waren er discussies over het tijdstip waarop de fotosynthese begon. Inmiddels weten we dat de atmosfeer en de hydrosfeer nog lang zuurstofloos bleven

DE STABILISERENDE ZUURSTOFCYCLUS



door reacties zoals het roesten van ijzer in zee en aan het aardoppervlak. Die reacties verbruikten het vroeg gevormde zuurstof gelijk weer. Pas toen de zuurstofproductie sneller ging dan dit zuurstofverbruik werd de atmosfeer zuurstofrijker.

De atmosferische zuurstofconcentratie is nu al vierhonderd miljoen jaar stabiel door een veelvoud van terugkoppelingen tussen de verschillende geologische, biologische, hydrologische en atmosferische kringlopen. In figuur 6 is deze stabiliserende cyclus vanuit het perspectief van de fosfaat- en koolstofkringlopen weergegeven, als onderdeel van het complexere geheel. Fosfaat is een noodzakelijke component in de fotosynthese en dus de zuurstofproductie, maar is in de oceanen vaak in limiterende concentraties aanwezig voor fotosynthese, omdat het in de zeebodem wordt vastgelegd in ijzeroxide of twel roest (zie figuur 6a).

In jonge gebergten die op het land ontstaan door tektonische activiteit, vindt veel vertering plaats (zie figuur 6b). Hierdoor wordt (onder andere) extra fosfaat naar zee afgevoerd, waar het algenbloei veroorzaakt zodat de zuurstofproductie in eerste instantie stijgt. Maar de algen sterven af, zinken en gaan rotten. Dit proces verbruikt zuurstof en veroorzaakt zuurstofloze omstandigheden in zee. Hierdoor lost het fosfaathoudende roest in de zeebodem op en komt er fosfaat vrij, wat de algenbloei weer versterkt (zie figuur 6c). Uiteindelijk, op de langere geologische tijdschaal, wordt het dode algenmateriaal in de zeebodem opgeslagen, nemen de rottingsprocessen af en daalt daarmee de zuurstofconsumptie. Op land vermindert de vertering van de niet meer zo jonge gebergten, waardoor de fosfaataanvoer naar zee afneemt (zie figuur 6c). De zuurstofconcentratie in het oceaanwater neemt weer toe, fosfaat wordt weer vastgelegd in de zeebodem en de algenbloei neemt af (zie figuur 6a). De stabiliserende cyclus begint weer van voren af aan, waardoor de zuurstofconcentratie in de atmosfeer op peil blijft.

[LINKS] Figuur 6 De stabiliserende zuurstofcyclus in 3 fases (a, b, c) (© Stichting BWM).



KUNSTENAARSOOG – Ourobouros

– Nora van Klingeren

Kringlopen zijn stromende bewegingen die oneindig voortgaan. Het denken over oneindigheid is vermoedelijk zo oud als de mensheid. Met de uitspraak *panta rhei* benadrukte de Griekse filosoof Heraclitus ongeveer vijfhonderd jaar voor Christus al dat ‘alles stroomt’. Met de aanvullende uitspraak *panta einai kyklika* stelde Heraclitus ook dat ‘alles cyclisch’ is.

De oude Grieken gebruikten het beeld van Ourobouros om oneindigheid te symboliseren: een slang die in zijn eigen staart bijt om het proces van vervelling in gang te zetten en zo plaats te maken voor een nieuwe en, afhankelijk van de levensfase, grotere huid. Een grotere dan wel opgefriste huid. Geldt dat ook voor onze omgang met de aarde? Krijgen wij als vanzelf een nieuw velletje of bijten we iets te hard in onze staart? En gaat daarmee een deel van de cirkel, en daarmee de oneindigheid, verloren?

[LINKS] De verschillende lagen van deze Ourobouros symboliseren de mondiale kringlopen van koolstof, stikstof en fosfor. Drie kringlopen samengebracht binnen een net (de slangen huid), gemaakt van draad van op het strand aangespoelde visnetten.

– Nora van Klingeren, 2025, wol en zijde samen vervult.

3 De mondiale koolstofkringloop

3.1 De koolstofkringloop is verstoord

– Jos Verhoeven

De mondiale koolstofkringloop is verstoord en dat veroorzaakt een versterkt broeikas-effect. Hierdoor stijgt de temperatuur op aarde. Hoe is dat zo gekomen?

Een van de belangrijkste kringlopen op aarde is die van het element koolstof (C). Het is ook de best bestudeerde mondiale kringloop. Deze belangstelling komt voort uit de steeds hogere concentraties van koolstofdioxide (CO₂) en methaan (CH₄) in de atmosfeer. Beide zijn belangrijke broeikasgassen die de uitstraling van warmte tegenhouden; zonder dit broeikas-effect zou de temperatuur op aarde gemiddeld 33 graden lager zijn (zie kader Hoe werkt het broeikas-effect?). De atmosferische concentratie van koolstofdioxide is sterk gestegen sinds het begin van de industriële revolutie in 1850. Destijds was de concentratie 280 ppm (*parts per million*). Dat wil zeggen dat van elk miljoen moleculen in de atmosfeer er 280 koolstofdioxide-moleculen zijn. Sinds 1956 zijn er continue metingen gedaan op het eiland Mauna Loa op Hawaï. Het meetpunt ligt in een toren op een 3300 meter hoge berg, zodat lokale invloeden van verkeer en plantengroei zeer beperkt zijn. Ook de ligging van Hawaï midden in de Stille Oce-

aan, ver van de continenten Amerika en Azië, draagt hieraan bij. In figuur 7 is te zien dat de concentratie koolstofdioxide op Mauna Loa gestaag gestegen is van 315 ppm in 1957 tot 425 ppm in 2025. De lijn vertoont een zaagtand doordat de concentratie in het voorjaar en de zomer daalt en in de herfst en winter stijgt. Dit komt door twee wereldwijde biologische kringloopprocessen. De eerste is de fotosynthese: de omzetting van koolstofdioxide en water in zuurstof en organische koolstofverbindingen met behulp van zonlicht. De tweede is verbranding: het afbreken van die koolstofverbindingen met behulp van zuurstof. De zaagtand is de optelsom van die twee processen. De fotosynthese is in de herfst en winter veel lager dan in de lente en zomer, terwijl de verbranding het hele jaar door min of meer gelijk is.

Hoe werkt het broeikas-effect?

– Peter Kuipers Munneke

Broeikasgassen houden warmte vast op aarde. Sterker nog, zonder broeikasgassen zou het op aarde ruim 30 graden kouder zijn dan nu. Het is dus maar goed dat ze er zijn. Maar hoe meer broeikasgassen er zijn, hoe warmer het is. Vandaar dat er afspraken zijn gemaakt om de menselijke uitstoot van broeikasgassen te stoppen zodat de aarde niet verder opwarmt. Het broeikas-effect is dé belangrijkste link tussen de koolstofkringloop en het klimaat op aarde. Hoe zit dat precies?

Licht van de zon schijnt op de aarde. Bewolking en het aardoppervlak reflecteren een deel van dat licht weer terug naar de ruimte. Een ander deel wordt geabsorbeerd door de aarde, waardoor die opwarmt. De aarde zendt die warmte weer terug naar de ruimte, in de vorm van infraroodstraling. De moleculen van de broeikasgassen absorberen die straling waardoor ze gaan trillen. Als ze ophouden met trillen, zenden ze de warmte weer uit. Voor een deel de ruimte in, maar ook – en dat is cruciaal – voor een deel terug naar het aardoppervlak. Op die manier blijft warmte gevangen in de atmosfeer.

Alle moleculen trillen bij heel specifieke frequenties. Verge-

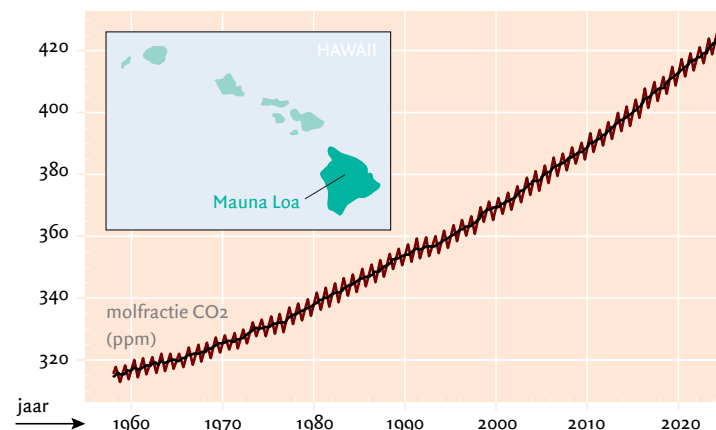
lijk het met een stemvork, die trilt met een vaste frequentie als je hem aanslaat. Die frequentie wordt bepaald door de vorm van de stemvork. Het speciale van broeikasgassen is nu dat de trillingsfrequentie van hun moleculen precies overlapt met de frequenties van de infraroodstraling die het aardoppervlak uitzendt. Daardoor kunnen broeikasgassen infraroodstraling opnemen door te gaan trillen, en kunnen ze die trilling ook weer terug omzetten in infraroodstraling.

In de atmosfeer van de aarde zitten maar heel weinig broeikasgassen. Als je vijfhonderdduizend moleculen lucht neemt, dan zitten daar iets meer dan tweehonderd moleculen koolstofdioxide (CO_2) tussen, en maar één methaanmolecuul (CH_4). Toch spelen die broeikasmoleculen een cruciale rol voor ons klimaat. Dat komt doordat alle andere moleculen in de lucht, zoals zuurstof (O_2) en stikstof (N_2), helemaal niets bijdragen aan het broeikaseffect. Vergelijk het met een kleurstof. Je hebt maar één druppel inkt nodig om een heel glas water te kleuren.

Een van de belangrijkste gevolgen van het broeikaseffect is dat bij een hogere concentratie broeikasgassen meer warmte gevangen blijft, en dus minder warmte de aarde verlaat. Momenteel stijgt de temperatuur op aarde en daalt de temperatuur van de allerbuitenste schil van de atmosfeer, bevestigende metingen.

Bij elke verdubbeling van de concentratie broeikasgas neemt de temperatuur op het aardoppervlak 2,5 tot 4 graden toe. Hierbij houden we rekening met terugkoppelingen in het klimaatstelsel zoals sneeuw die smelt als het warmer wordt. Daardoor wordt het aardoppervlak donkerder en absorbeert het nóg meer zonlicht. Veel van zulke terugkoppelingen hebben te maken met de koolstofkringloop en met de rol die bodems, vegetatie en de oceaan daarin spelen. Daarmee is het broeikaseffect dé schakel tussen de koolstofkringloop en het klimaat. Alle processen in de koolstofkringloop beïnvloeden al honderden miljoenen jaren het klimaat. Op dit moment is de menselijke verstoring van de koolstofkringloop veruit de belangrijkste oorzaak voor de huidige opwarming.

ATMOSFERISCH CO_2 GEMETEN OP MAUNA LOA, HAWAII



Figuur 7 Atmosferisch koolstofdioxide gemeten op Mauna Loa, Hawaii, van 1957 tot 5 januari 2025 (bron: National Oceanic Atmospheric Administration, © Stichting BWM).

Fotosynthese en verbranding

De mondiale kringloop van koolstof verloopt tussen de atmosfeer, de hydrosfeer, de lithosfeer en de biosfeer (voor uitleg van de sferen, zie hoofdstuk 2). Fotosynthese en verbranding zijn daarin de twee belangrijkste biologische processen. Fotosynthese vindt plaats in groene planten op het land en in micro- en macroscopische algen in de bovenste tweehonderd meter van de oceaan. De planten, een soort biologische zonnepaneeltjes, zetten koolstofdioxide en water met behulp van zonlicht om in zuurstof en suikers en daarvan afgeleide organische koolstofverbindingen.

De omgekeerde reactie is de verbranding door alle levende organismen, waarbij koolhydraten en vetten worden geoxideerd. Die energierijke verbindingen worden door alle levende organismen met behulp van zuurstof omgezet in koolstofdioxide, water en energie. Voor fotosynthese is zonne-energie nodig terwijl bij verbranding energie vrijkomt, die door organismen gebruikt wordt voor hun levensprocessen – voortplanting, beweging, spijsvertering – waarbij de energie uiteindelijk vaak vrijkomt in de vorm van warmte. Met de verbranding van ons voedsel genereren wij onze lichaamswarmte en ook bij de ver-

branding van brandstoffen als hout of steenkool komt warmte vrij. Bij al deze verbrandingsprocessen ontstaat koolstofdioxide, dat in de atmosfeer terecht komt. Wij ademen het uit en ook uit de uitlaat van auto's komt dit gas.

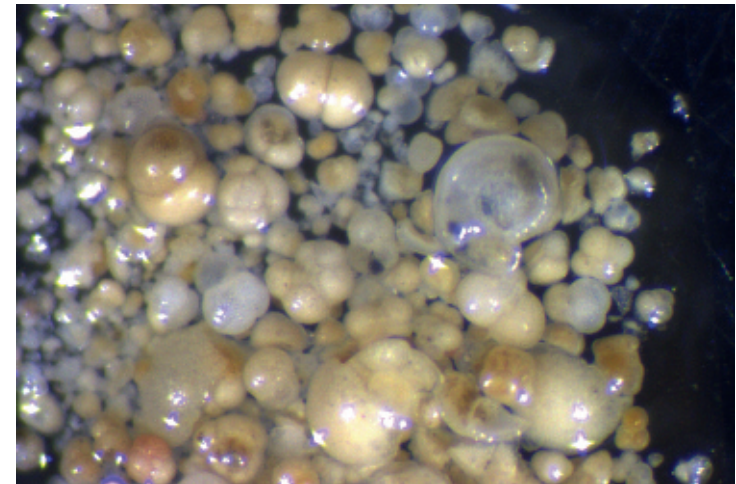
Het bij de fotosynthese gevormde organische materiaal vormt de basis voor de voedselpiramide: planteneters (herbivoren) consumeren plantaardig voedsel en worden vervolgens zelf gegeten door roofdieren. Aan het eind van de voedselpiramide staan de afbrekers, schimmels, bacteriën en andere micro-organismen die de nog overblijvende grondstoffen weer terugbrengen in de atmosfeer of de hydrosfeer. Ook daarbij komt koolstof in de vorm van koolstofdioxide uiteindelijk weer in de atmosfeer terecht.

In tabel 2 staan de belangrijkste totale voorraden koolstof in de mondiale kringloop aangegeven. Duidelijk is te zien dat de lithosfeer met 65 miljoen petagram (1 Pg = duizend miljard kilo) verreweg de

Onderdelen van systeem aarde	Koolstofvoorraad
Lithosfeer	65.000.000 Pg
<ul style="list-style-type: none"> • waarvan beschikbaar voor verwerking • fossiele brandstoffen 	<p>4.900 Pg</p> <p>635 Pg</p>
Hydrosfeer (oceanen)	38.000 Pg
<ul style="list-style-type: none"> • anorganisch (HCO_3^- en CO_3^{2-}) • organisch 	<p>37.000 Pg</p> <p>1.000 Pg</p>
Atmosfeer (data 2013)	820 Pg
Biosfeer (landecosystemen)	2.640 Pg
<ul style="list-style-type: none"> • vegetatie • bodem 	<p>840 Pg</p> <p>1.800 Pg</p>

1 petagram (Pg) = 1 gigaton (G) = duizend miljard (10^{12}) kilogram = 10^{15} gram
Bron: IPCC AR5 (2013)

Tabel 2 Koolstofvoorraad in de belangrijkste onderdelen van systeem aarde.



Overzicht van foraminiferen, aangetroffen op de zeebodem bij circa 3 km diepte, ten zuiden van de Azoren. Het doorzichtige foram 'slakkenhuisje', rechts van het midden, is circa 0,25 mm in doorsnede. Foto genomen tijdens PHOSFLUX Expeditie van het Koninklijk Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee in mei 2025 (© Abby Matthias en Diana Sousa, expeditieleden).

grootste voorraad koolstof bevat, het meeste daarvan in kalkgesteenten die grotendeels niet aan het aardoppervlak liggen. Kalk is calciumcarbonaat (CaCO_3), een verbinding van calcium (Ca) met koolstof (C) en zuurstof (O). Die enorme koolstofvoorraad is vooral gevormd door eencellige algen en eencellige foraminiferen (zie foto) die het calcium en het carbonaat in het water gebruikten om kalkskeletjes te maken. Toen ze stierven zakten die skeletjes naar de zeebodem, waar het kalkgesteente ontstond. Meercellige organismen zoals schelpen en koralen, droegen hier ook aan bij, maar in mindere mate. Verder bevat de hydrosfeer grote hoeveelheden koolstof in de vorm van carbonaat- en bicarbonaationen.

Opgeslagen koolstof komt snel vrij

De meeste koolstof zit dus in gesteenten, voornamelijk kalksteen, maar een deel zit ook in andere sedimenten: dat zijn de fossiele brandstoffen veen, bruinkool, steenkool, aardgas en aardolie. Deze voor-

raad koolstof in veen, steenkool, aardgas en olie is met 'slechts' 635 petagram weliswaar veel kleiner dan die in kalkgesteenten, maar de erin opgeslagen koolstof komt veel sneller vrij in de atmosfeer omdat de mens die gebruikt als brandstof. Zoals in ons lichaam de verbranding van ons voedsel uiteindelijk water en koolstofdioxide voortbrengt – we ademen het uit – zo produceert de verbranding van fossiele brandstoffen ook water en koolstofdioxide. Die komt via de schoorsteen van fabrieken en huizen of via de uitlaat van auto's en vliegtuigen in de atmosfeer terecht en dat leidt tot een stijging van atmosferisch koolstofdioxide.

De totale hoeveelheid koolstof in de atmosfeer is de afgelopen 170 jaar gestegen en bedraagt momenteel ongeveer 820 petagram. De totale hoeveelheid koolstof in de vegetatie op het land is van dezelfde orde van grootte, 840 petagram, terwijl de totale hoeveelheid koolstof in de landbodems meer dan twee keer zo groot is: 1800 petagram.

Geochemische processen

Het schema van de geochemische mondiale koolstofkringloop (zie figuur 8) laat zien dat door verwerking van kalkgesteenten bicarbonaat en carbonaat vrijkomt. Heel geleidelijk wordt dit in opgeloste vorm via rivieren naar de oceaan vervoerd, waar het door organismen, zoals eencelligen, schelpdieren en koraal, in kalk voor hun skelet wordt omgezet. Dit materiaal zakt uiteindelijk naar de oceaانبodem en kan na zeer lange tijd door gebergtevorming weer boven water uitgetild worden, waardoor de kringloop sluit. Deze geologische processen kunnen honderden miljoenen jaren duren. De verwerking van kalkgesteente verhoogt de hoeveelheid opgeloste anorganische koolstof in de oceanen. Die is in de loop van de geologische geschiedenis heel hoog geworden en overtreft de totale hoeveelheid koolstof in levende en dode organismen in de oceanen. De daarbij ontstane carbonaat en bicarbonaat kunnen via chemische evenwichten omgezet worden in koolstofdioxide.

Tegelijkertijd kunnen bij verwerking van silicaatgesteenten (zoals zanden en granieten) koolstofdioxidemoleculen juist worden vastgelegd. Er zijn dus twee geochemische verweringsprocessen die qua koolstofdioxide tegen elkaar inwerken. Dat heeft op lange geologische tijdschalen een stabiliserend effect gehad op de concentratie koolstofdioxide in de atmosfeer.

Al dergelijke geologische processen werken zeer traag en ze houden elkaar op de lange duur min of meer in evenwicht. Daarentegen zijn de biologische kringloopstromen juist relatief snel en omvangrijk: de hoeveelheid materiaal die per tijdseenheid wordt omgezet ligt veel hoger dan bij geologische stromen. Een vrij kleine onbalans kan daardoor toch vrij grote schommelingen in atmosferisch koolstofdioxide veroorzaken.

De hoeveelheid koolstofdioxide in de atmosfeer is in nauwelijks tweehonderd jaar bijna verdubbeld en door verbranding van fossiele brandstoffen gaat dat steeds sneller. Is al die extra koolstofdioxide in de atmosfeer gebleven, of ook elders terechtgekomen?

Berging van koolstofdioxide in de oceaan

De grootste voorraad koolstof op aarde zit in kalksteen in de lithosfeer. De uitwisseling van koolstofdioxide tussen de atmosfeer en de oceanen vindt plaats in twee richtingen. Het gaat hierbij om diffusie, de verplaatsing van stoffen van een plek met een hoge concentratie naar een plek met een lage concentratie. Dit proces wordt mede gestuurd door een reeks van chemische reacties die tezamen het carbonaatevenwicht wordt genoemd (zie kader Het carbonaatevenwicht tussen atmosfeer en oceaan).

Zuurdere oceaan

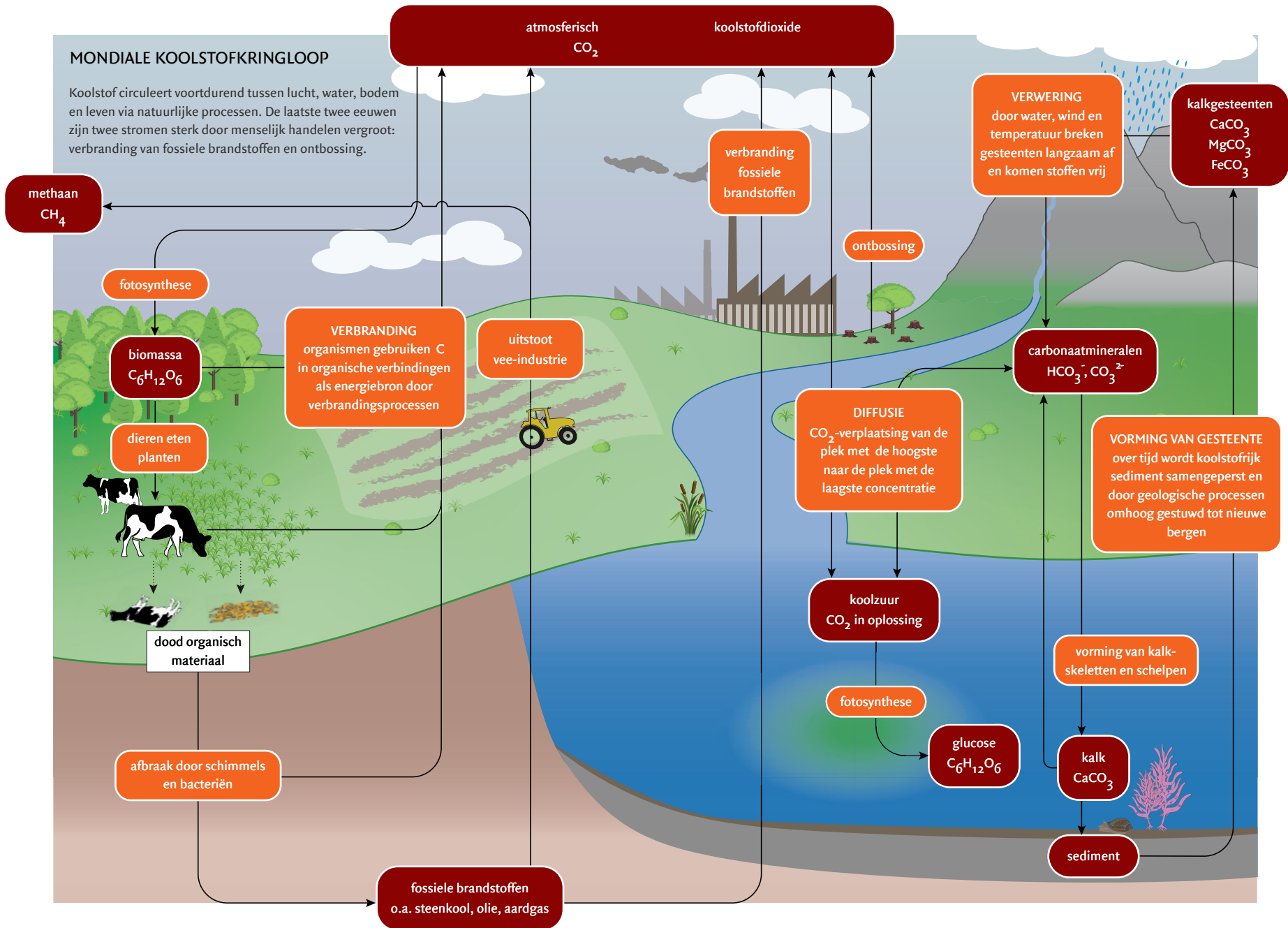
Sinds 1850 heeft de steeds toenemende atmosferische koolstofdioxideconcentratie geleid tot een continue netto diffusiestroom van dit koolstofdioxide naar de oceaan. Het is berekend dat 30 procent van de totale hoeveelheid koolstofdioxide die door verbranding naar de atmosfeer is gegaan, door diffusie in de oceaan terecht is gekomen. Van alle koolstofdioxide op aarde zit maar liefst 98 procent in de oceanen, voor het grootste deel als carbonaat en bicarbonaat.

Dat heeft ons weliswaar behoed voor een nog sterkere opwarming dan die we al hebben ondergaan, maar heeft ook een negatieve invloed op de oceanen. Het oceaانwater verzuurt er namelijk door. Dit verzuringsproces, dat nog steeds gaande is, is schadelijk voor schaal-

[pag. 56-57] *Figuur 8 De mondiale koolstofkringloop: hoe koolstof stroomt door de atmo-, hydro-, bio-, en lithosfeer* (© Stichting BWM).

MONDIALE KOOLSTOFKRINGLOOP

Koolstof circuleert voortdurend tussen lucht, water, bodem en leven via natuurlijke processen. De laatste twee eeuwen zijn twee stromen sterk door menselijk handelen vergroot: verbranding van fossiele brandstoffen en ontbossing.

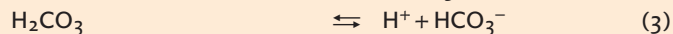
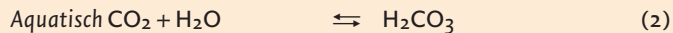
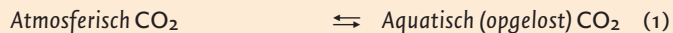


Het carbonaatevenwicht tussen atmosfeer en oceaan

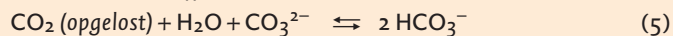
– Jos Verhoeven

Wanneer de concentratie koolstofdioxide in de atmosfeer stijgt, gaat er ook meer opgelost worden in het water net onder het oceaanoppervlak (1). Dit opgeloste koolstofdioxide vormt met water koolzuur (2), dat kan opsplitsen in waterstofionen en achtereenvolgens in bicarbonaat (3) en carbonaat (4). Bij een stijgende atmosferische concentratie van koolstofdioxide treedt diffusie loodrecht op het wateroppervlak op die leidt tot oplossing van CO₂, omzetting via koolzuur in bicarbonaat, carbonaat en verzuring van het water.

Deze diffusie vindt plaats op het grensvlak tussen lucht en water. Hierbij speelt ook de turbulentie van het water aan de oppervlakte een belangrijke rol. Door wind en golfslag is het oceaanwater in de bovenste honderd meter dermate in beweging, dat deze laag zeer goed gemengd is met de atmosfeer. Water komt in deze ondiepe zone steeds weer opnieuw voor korte tijd aan het oppervlak terecht, waar de diffusie plaatsvindt. Water dieper dan honderd meter staat veel minder in contact met de atmosfeer.



Samenvattende bufferreactie:



dieren, koralen en andere organismen die een kalkskelet opbouwen. Calciumcarbonaat ontstaat in de oceaan niet vanzelf maar wordt geproduceerd door organismen, met behulp van bepaalde eiwitten (enzymen). Nu het oceaanwater zuurder wordt, slaat kalk niet meer neer maar lost het op, en dat maakt de productie van kalkskeletten moeilijker.

Hoewel de diepere delen van de oceaan minder met de atmosfeer in contact staan dan de bovenste honderd meter, leiden de grote mondiale oceaanstromingen toch tot een zekere mate van uitwisseling. Deze stromingen zijn van groot belang voor het leven op aarde, omdat zij de diepe oceaan voorzien van zuurstof, terwijl ze voedingsstoffen voor planten meenemen naar het oppervlak. De stromingen komen tot stand doordat het water nabij de poolgebieden sterk afkoelt, waardoor het zwaarder wordt en naar diepere lagen zakt. In de tropische gebieden wordt het zeewater juist opgewarmd en stijgt het naar het oppervlak. Zo ontstaat een continue stroom van kouder water van de Poolzee langs de oostkust van Noord-Amerika naar het zuiden, en van warm water langs de westkust van Afrika en Europa naar het noorden. Deze laatste stroom, de Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) kennen we als de warme Golfstroom (zie paragraaf 3.2).

Als de aarde in de toekomst zeer sterk opwarmt, zouden de mondiale oceaanstromingen kunnen afzakken of zelfs tot stilstand kunnen komen. Het water in de Poolzee koelt dan te weinig af om nog naar beneden te zakken, de oceaan wordt een stilstaande watermassa en de uitwisseling van zuurstof en nutriënten komt tot stilstand. Ongeveer 250 miljoen jaar geleden, bij de overgang tussen de twee geologische tijdperken Perm en Trias, heeft het stilvallen van de oceaan-circulatie geleid tot de grootste massa-extinctie ooit door gebrek aan zuurstof en nutriënten en waarschijnlijk ook door de massale vorming van het giftige gas waterstofsulfide (H₂S).

Ook in de oceanen zijn er twee verschillende biologische processen actief die koolstof vastleggen. Het eerste is fotosynthese door microscopisch kleine algen, het fytoplankton, in de bovenste tweehonderd meter van de oceaan. De totale fotosynthese in de oceaan is vergelijkbaar met die op het land. Het tweede biologische proces is het vastleggen van calciumcarbonaat door organismen die kalkskeletten vormen.

Deze beide biologische processen zijn kwantitatief wel belangrijk, maar wat ze niet kunnen, is extra koolstof vastleggen als reactie op de verhoogde concentratie in koolstofdioxide in de atmosfeer. De groei van fytoplankton wordt niet beperkt door koolstofdioxide maar door nutriënten als stikstof, fosfaat en ijzer. Kalkvorming door schelpdieren wordt alleen maar moeilijker bij een verhoogde concentratie koolstof-

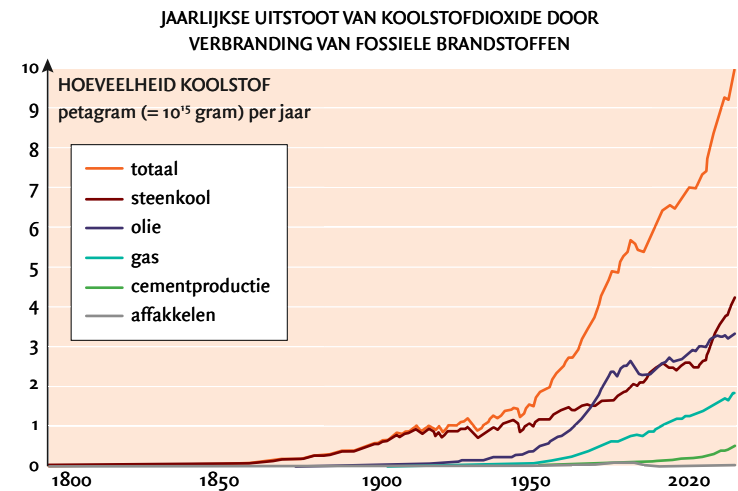
dioxide, door de verzuring van het oceaanwater. Wel is de diffusie van koolstofdioxide en de opslag ervan als bicarbonaat kwantitatief verreweg de belangrijkste factor bij de berging van extra koolstof in de oceaan. Deze opslagcapaciteit is in principe onbegrensd en wordt bepaald door de evenwichtsconstanten van de verschillende reacties in het carbonaatevenwicht (zie kader Het carbonaatevenwicht tussen atmosfeer en oceaan). Beperkende factor is in eerste instantie de enorme traagheid van het diffusieproces. Zelfs als de stijging van de concentratie koolstofdioxide nu zou stoppen, duurt het nog meer dan duizend jaar voordat de atmosfeer en de oceaan weer in evenwicht zijn.

Berging van koolstofdioxide op het land

De koolstofkringloop in ecosystemen op het land loopt via twee grote voorraden, de vegetatie en de bodem (zie tabel 2, pagina 52). Terwijl de belangrijke mondiale koolstofkringloop tussen atmosfeer en oceaan vooral gereguleerd wordt door diffusieprocessen in de bovenste honderd meter van het zeeoppervlak, gaat het in landecosystemen om de uitwisseling van koolstofdioxide tussen atmosfeer, vegetatie en bodem. De vegetatie legt door fotosynthese atmosferisch koolstofdioxide vast. De helft ervan wordt door de planten zelf verbrand. De andere helft vormt plantaardige biomassa die beschikbaar is voor andere levende organismen. Herbivoren consumeren het plantenmateriaal en gebruiken dat voor hun levensprocessen, waarbij koolstofdioxide weer in de atmosfeer vrijkomt. Wat niet wordt opgegeten sterft af en wordt dan afgebroken door schimmels en bacteriën, die daarbij het dode materiaal als energiebron gebruiken en ook weer koolstofdioxide aan de atmosfeer teruggeven. In principe houden de processen van fotosynthese en de totale verbranding door planten, dieren en micro-organismen elkaar daarbij min of meer in evenwicht.

Verstoring door de mens

Sinds het begin van de industriële revolutie (omstreeks 1850) is de mondiale koolstofkringloop verstoord geraakt door menselijke invloeden. De concentratie koolstofdioxide in de atmosfeer is gestegen van 280 ppm in 1850 tot 425 ppm in 2025 (zie figuur 11). De belangrijkste oorzaak van deze stijging is de verbranding van fossiele brandstoffen als steenkool, olie en aardgas. Onderzoekers kunnen de bijdrage



Figuur 9 Totale hoeveelheid koolstof per jaar uit fossiele brandstoffen tussen 1800 en 2025 (© Stichting BWM).

van deze delfstoffen gedurende de laatste eeuwen nauwkeurig inschatten doordat er goede getallen bestaan over de winning ervan (zie figuur 9). De instroom van koolstof naar de atmosfeer steeg vanaf 1850 in honderd jaar 2 petagram per jaar in 1950 en vervolgens naar 7 petagram per jaar in 2000 en naar 10 petagram per jaar in 2017. In 2020 daalde de uitstoot onder invloed van de coronapandemie, maar om de mondiale klimaatverandering af te remmen is een veel sterkere daling nodig.

Ontginning van natuurlijke ecosystemen

De tweede oorzaak van de verstoring van de mondiale koolstofkringloop is de wereldwijde ontginning van natuurgebieden zoals bossen en vennen voor de landbouw. In 1850 was de jaarlijkse ontginning, die vooral plaatsvond in de gematigde klimaatzones, al goed voor een instroom van 0,5 petagram koolstof per jaar naar de atmosfeer (zie ook figuur 10). In de loop van de twintigste eeuw nam deze instroom toe, vooral na de Tweede Wereldoorlog. Steeds meer tropische gebieden werden ontgonnen, eerst in Azië, later ook in Amerika en Afrika. Grote oppervlakten tropisch regenwoud werden gekapt en hoogvenen ge-

draineerd voor plantages van oliepalmen of weidegebied.

De koolstofmodellen van het Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) zijn de afgelopen decennia steeds verder geperfectioneerd, waardoor veel meer inzicht is ontstaan. Momenteel is het mogelijk om niet alleen getallen te krijgen maar ook aan te geven hoe betrouwbaar die getallen zijn. Een belangrijke conclusie is dat de mondiale koolstofkringloop in de laatste honderdvijftig jaar zeer ernstig verstoord is geraakt. De jaarlijkse stijging van de hoeveelheden koolstof in de atmosfeer (4 petagram) en in de oceanen (2,3 petagram) veroorzaakt steeds duidelijker waarneembare effecten van klimaatopwarming (het broeikas effect) en oceaanzuurzuring. Dit alles bedreigt het systeem aarde in steeds ernstiger mate.

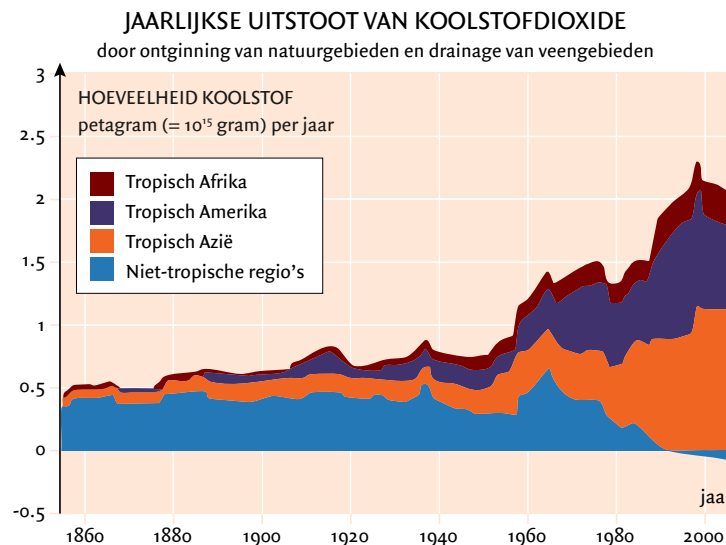
De effecten van koolstofdioxide, methaan en lachgas

– Jos Verhoeven

Bij discussies over klimaatopwarming wordt vooral de nadruk gelegd op het broeikasgas koolstofdioxide. Maar ook methaan (CH₄) en lachgas (N₂O) dragen bij aan de opwarming en ook daarvan zijn de concentraties tussen 1850 en 2020 sterk gestegen, zo blijkt uit metingen in het poolijs (zie figuur 11). Het is wel opmerkelijk hoe stabiel de atmosferische concentraties zijn geweest gedurende de elfduizend jaar vóór 1850.

Het opwarmende effect per gasmolecuul verschilt sterk voor deze drie broeikasgassen. Methaan en lachgas warmen per molecuul de aarde minstens 25 en 298 keer zo sterk op als koolstofdioxide, gerekend over een periode van honderd jaar (zie figuur 12). Het maakt dus nogal uit of er meer methaan of meer koolstofdioxide bijkomt. Om het totale opwarmende effect van de drie broeikasgassen te kunnen uitrekenen, gebruikt men het begrip *global warming potential* (GWP). Hierbij is ook rekening gehouden met de snelheid waarmee de gassen in de atmosfeer wor-

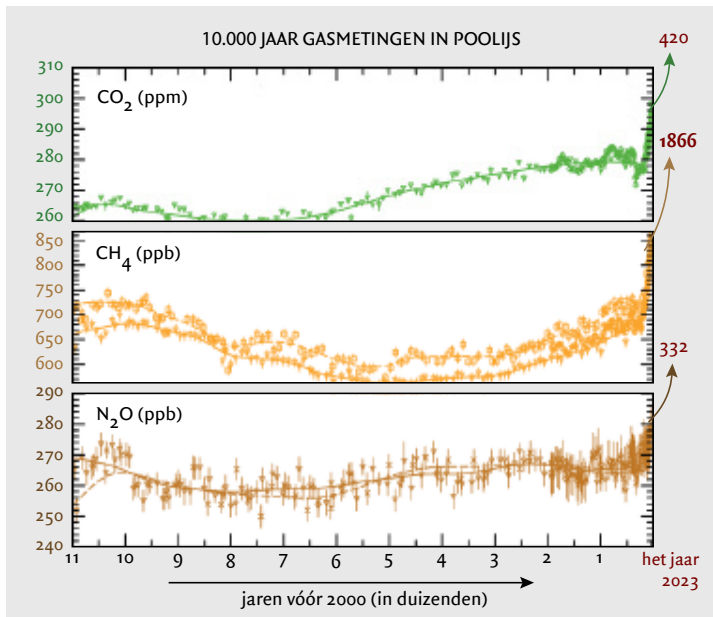
[RECHTS] Tabel 3 De bijdrage van de drie broeikasgassen aan de klimaatopwarming (bron: FAO, IPCC).



Figuur 10 Jaarlijkse wereldwijde instroom van koolstof naar de atmosfeer door ontginning van natuurgebieden en drainage van veengebieden. In niet-tropische regio's is door de terugkeer van bos weer meer koolstof vastgelegd (bron: IPCC, 2021 © Stichting BWM).

	Toename* (ppm)	GWP (CO ₂ - equivalent)	Opwarming (CO ₂ - equivalent)	Percentage**	Veehouderij (CO ₂ - equivalent)
CO ₂	135	1	135	72,68 %	12,2
CH ₄	1,15	29	33	17,7 %	19,2
N ₂ O	0,06	298	18	9,6 %	10,4
Totaal			186	100 %	41,8

GWP = global warming potential (potentieel opwarmend effect). CO₂ = koolstofdioxide. CH₄ = methaan. N₂O = lachgas. * Stijging van de concentratie van het betreffende gas in de atmosfeer tussen 1850 en 2020. ** Aandeel van het betreffende gas in de totale opwarming. Voor uitleg zie Kader De effecten van koolstofdioxide, methaan en lachgas.



Figuur 11 Atmosferische concentraties van CO₂, CH₄ en N₂O in de afgelopen elfduizend jaar. De getallen rechts naast de grafiek zijn de concentraties in 2023, in ppm (parts per million) en ppb (parts per billion) (bron: IPCC-AR6) © Stichting BWM).

den afgebroken. Het GWP van koolstofdioxide is gesteld op 1.

De laatste kolom in tabel 3 beschrijft de bijdrage van de mondiale veehouderij aan de opwarming. Voor het berekenen van deze getallen zijn veel data van de wereldvoedsel- en landbouworganisatie FAO gebruikt. In de bijdrage van koolstofdioxide zijn alle fossiele grondstoffen meegenomen die in de veehouderij gebruikt worden, ook voor de productie van kunstmest, de landbewerking, het vervoer van krachtvoer en de machinale melkproductie. De veehouderij stoot relatief veel methaan uit. Dit wordt geproduceerd in magen van de koe. Een koe produceert per dag 200 tot 500 gram methaan. Ook de lachgasproductie is aanzienlijk, door de grote toevoer van stikstofmeststoffen.

Tabel 3 laat zien dat de veehouderij een grote bijdrage levert aan alle drie de broeikasgassen. Elk broeikasgas levert 10 tot 20 koolstofdioxide-equivalenten per jaar op. De totale opwarming door de veehouderij is maar liefst 42 koolstofdioxide-equivalenten, dit is ruim 20 procent van de totale opwarming wereldwijd sinds 1850. Verminderen van de vleesproductie kan dus een belangrijke bijdrage leveren aan het afremmen van de opwarming.

3.2 De warme Golfstroom kan ermee ophouden

– Henk Dijkstra

Oceanografen zijn al enige tijd ongerust over een mogelijke sterke afzwakking van de warme Golfstroom deze eeuw. Dit zou aanzienlijke gevolgen kunnen hebben voor het klimaat in West-Europa. Het wordt dan kouder en droger in Nederland, terwijl de gemiddelde temperatuur op aarde verder oploopt.

In 1751 ontdekte Henry Ellis, de kapitein van een Brits slavenschip, dat het diepe oceaانwater in de Atlantische Oceaan nabij de evenaar ongeveer 4 graden Celsius was, ijszig koud dus. Deze waarneming werd later verklaard door het bestaan van oceaانstromingen. De belangrijkste stroming in de Atlantische Oceaan is de warme Golfstroom, ook aangeduid als de Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) (zie figuur 12). De AMOC transporteert vanaf 26 graden noorderbreedte, ter hoogte van Florida, ongeveer vijftigmaal het huidige energiegebruik van de hele mensheid (1 petawatt) noordwaarts.

Deze warmte wordt afgeleverd tot ver in het noorden, zodat de gemiddelde temperatuur op het noordelijk halfrond ongeveer 1,5 graad warmer is dan op het zuidelijk halfrond. Naast warmte transporteert de AMOC ook zout door de Atlantische Oceaan. Omdat er op gematigde breedten meer verdamping is dan neerslag, arriveert zout oppervlaktewater in de noordelijke Atlantische Oceaan. Daar koelt het af, wordt zwaarder, zinkt naar de diepte en stroomt zuidwaarts. Het diepe water op de evenaar is dus koud omdat het uit het noorden komt.

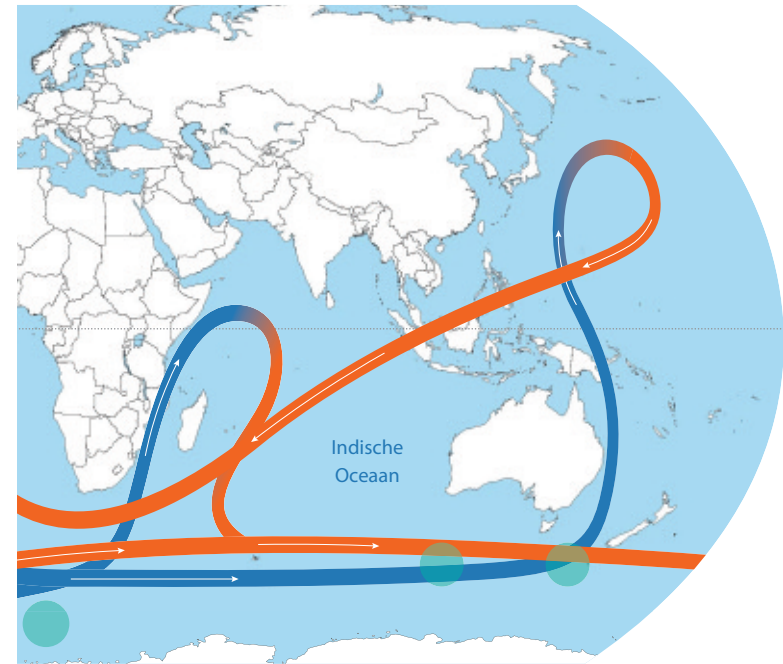
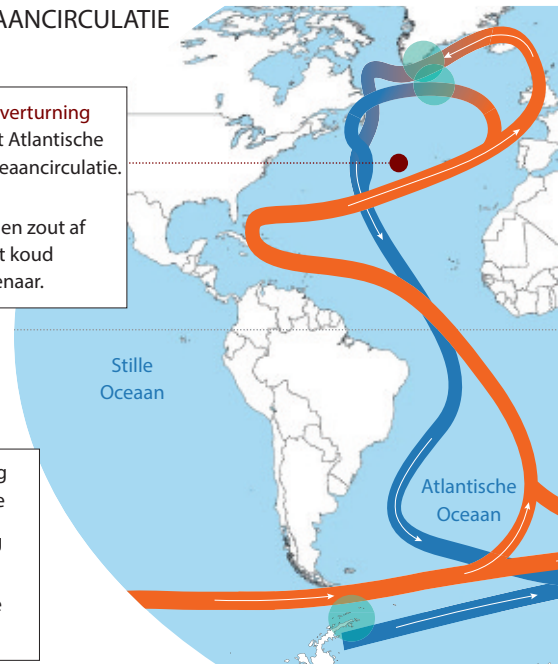
De AMOC is gevoelig voor verstoringen door de toevoer van zoet

DE MONDIALE OCEAANCIRCULATIE

De **Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)** is het Atlantische deel van de mondiale oceaancirculatie.

De **AMOC** levert warmte en zout af in het noorden en brengt koud bodemwater naar de evenaar.

-  warme stroming aan oppervlakte
-  koude stroming op grote diepte
-  punt van afgifte warmte



Figuur 12 *Golfstroombanden laten de bewegingen van AMOC zien* (© Stichting BWM).

water, bijvoorbeeld door het smelten van landijs op Groenland. Dat komt door een positieve terugkoppeling tussen de oceaancirculatie en het zouttransport. Een toename van smeltwater maakt het water lichter, waardoor de AMOC afzwakt. Daardoor neemt het zouttransport naar het noorden af en dat maakt het water in het noorden nog lichter. Klimaatmodellen laten zien dat de AMOC binnen honderd jaar zelfs tot stilstand kan komen door deze terugkoppeling.

Sinds 2004 wordt de sterkte van de AMOC gemeten op 26 graden noorderbreedte, maar deze periode is te kort om trends te ontdekken. Historische reconstructies laten zien dat de sterkte van de AMOC de afgelopen 75 jaar met 15 procent is afgenomen. Een Deense onderzoeksgroep schatte in 2023 op grond van deze reconstructies dat de warme Golfstroom rond 2057 sterk kan afzwakken. De onzekerheidsmarge is echter 30 jaar. En critici trekken de conclusies van het onder-

zoek in twijfel vanwege de onzekerheid in de gebruikte observaties.

Mocht de klimaatverandering de AMOC sterk afzwakken, dan zullen de maatschappelijke gevolgen ontwrichtend zijn. Terwijl de aarde elders opwarmt – ijskappen smelten en de zeespiegel stijgt – zal West-Europa afkoelen. Deze regionale afkoeling is ook afhankelijk van de mondiale opwarming, maar in het ergste geval daalt de wintertemperatuur met 3 graden per tien jaar. En dat terwijl Nederland zich voorbereidt op verhoging van de gemiddelde temperatuur. Een afzwakking van de AMOC zal ook leiden tot een extra verhoging – tot wel 1 meter – van de zeespiegel aan de Nederlandse kust. Doordat de AMOC afzwakt, neemt de oceaan ook minder koolstofdioxide op, waardoor de mondiale opwarming toeneemt en de AMOC nog meer afneemt.

Onderzoekers werken aan een betere reconstructie van de warme Golfstroom over de afgelopen 150 jaar en aan gedetailleerdere representatie in klimaatmodellen. Ook willen ze beter bepalen wat de kans is dat de warme Golfstroom voor het einde van deze eeuw afzwakt.

3.3 Wat als de bevroren ondergrond ontdooit?

– Ko van Huissteden

Sinds een paar decennia staat de bevroren bodem in de poolgebieden van het noordelijk en zuidelijk halfrond in het middelpunt van de wetenschappelijke en publieke belangstelling. Niet voor niets: hier liggen grote hoeveelheden organisch koolstof opgeslagen. Wanneer die vrijkomen, kan het wereldwijde klimaat sterk veranderen.

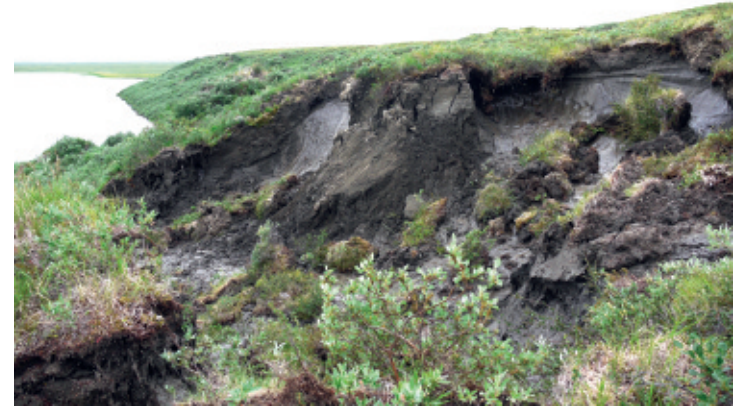
Op de poolgebieden van het noordelijk en zuidelijk halfrond is het zo koud dat de ondergrond permanent is bevroren. Alleen de bovenste laag ontdooit in de zomer. Die zogeheten permafrost komt voor in gebieden waar de gemiddelde jaartemperatuur onder de 0 graden ligt. Een kwart van het landoppervlak van het noordelijk halfrond heeft permafrost, naast Antarctica op het zuidelijk halfrond.

Permafrost kan diep in de bodem doordringen; in het noorden van Siberië tot ruim een kilometer. Vaak wordt bij permafrost gedacht aan een poolwoestijn of boomloze toendra, maar ook onder koude naaldbossen in het noorden kan de bodem bevroren zijn. Zelfs onder de zee bevindt zich permafrost, tijdens de ijstijd ontstaan in de ondiepe kustzeeën van het hoge noorden, toen de zeespiegel veel lager stond.

Waar permafrost precies voorkomt, hangt af van de warmtebalans van de bodem. Die wordt bepaald door de luchttemperatuur, zonnestraling, vegetatie, sneeuwdek, bodemeigenschappen, en de mate waarin de bodem met water is verzadigd. Ze bepalen of de permafrost overal aanwezig is of alleen lokaal. Belangrijke eigenschappen van permafrostbodems zijn het gehalte aan ijs en organische stof. Het gehalte ijs kan hoog zijn, vooral in bodems die bestaan uit veen of fijnkorrelig materiaal. Het organisch materiaal bestaat uit veen. Daarnaast uit fossiele plantenresten die begraven zijn in lössafzettingen (leem en fijn zand) uit de ijstijd, en in jongere rivierafzettingen.

De lage temperaturen in de permafrostbodem conserveren dit organisch materiaal.

In de bovenste 3 meter van de permafrost ligt zo'n 1300 gigaton organische koolstof opgeslagen. Dat is ruim anderhalf keer zoveel als de



Ontdooiende permafrost in lössafzettingen in Noordoost-Siberië, aan de rand van een dooimeer (© Ko van Huissteden).

hoeveelheid koolstof die aanwezig is in de atmosfeer, waar de koolstof in de broeikasgassen koolstofdioxide en methaan zit. Als organisch materiaal ontdooit door de opwarming van de aarde wordt het door bacteriën omgezet in de drie broeikasgassen koolstofdioxide, methaan en lachgas. Het is nog onduidelijk hoeveel organisch materiaal er omgezet zal worden en hoe snel, en hoeveel koolstofdioxide of methaan dat oplevert.

Het grootste gevaar is abrupte dooi. Die vindt plaats in gebieden met ijsrijke permafrost. Het vrijkomen van veel smeltwater leidt tot een sterke toename van erosie. Er ontstaan aardverschuivingen en poelen en meren, en zo worden in korte tijd grote massa's organisch materiaal blootgesteld aan versnelde vertering door bacteriën, met veel uitstoot van broeikasgassen. Ook komt er veel methaan vrij bij het ontdooien van onderzeese permafrost.

De schattingen van de broeikasgasuitstoot van dooiende permafrost lopen ver uiteen. De warmtebalans is ingewikkeld en abrupte dooi is slecht voorspelbaar. In het gunstige geval maakt de uitstoot van broeikasgassen uit permafrost het ons veel lastiger om klimaatdoelstellingen te halen, in het ongunstige geval vindt een snelle klimaatverandering plaats met catastrofale gevolgen. Dat laatste is zeker niet uit te sluiten.



KUNSTENAARSOOG – De aarde ontdooit

– Nora van Klingeren

Het schuiven van aardplaten levert in Alaska wonderschone natuur op: bergen, gletsjers, rivieren, bossen, toendra's en duizenden eilanden. Een onmetelijk groot stuk land waar het credo 'groot, groter, grootst' lijkt te zegevieren. Wat je ook beetpakt, alles is daar groot.

Inwoners van Alaska hebben echter serieuze zorgen. Hun grootste zorg is het ontdooien van de permafrost. Logisch, met uitzondering van wat eilanden en de zuidelijkste delen van de staat, is overal permafrost aanwezig. Het ontdooien daarvan leidt tot groot, groter, grootste consequenties voor hun leefgebied maar indirect ook ons leefgebied. Wat zouden we hiervan merken in Nederland? En baart dat je zorgen? Of heeft jouw grootste zorg betrekking op ons eigen leefgebied?

[LINKS] Verbeelding van een dwarsdoorsnede over het ontdooiende land met verschillende kleuren en patronen die staan voor de organische resten, de wit omkaderde gaten verwijzen naar het ontdooiende permafrost.

– Nora van Klingeren, 2020, wol en diverse soorten zijde samen vervult

4 De gevolgen van een verstoorde koolstofkringloop

4.1 Een cascade van effecten – Rik Leemans

De gevolgen van een verstoorde koolstofkringloop zijn groot. Klimaatverandering is een van de belangrijkste, maar niet de enige.

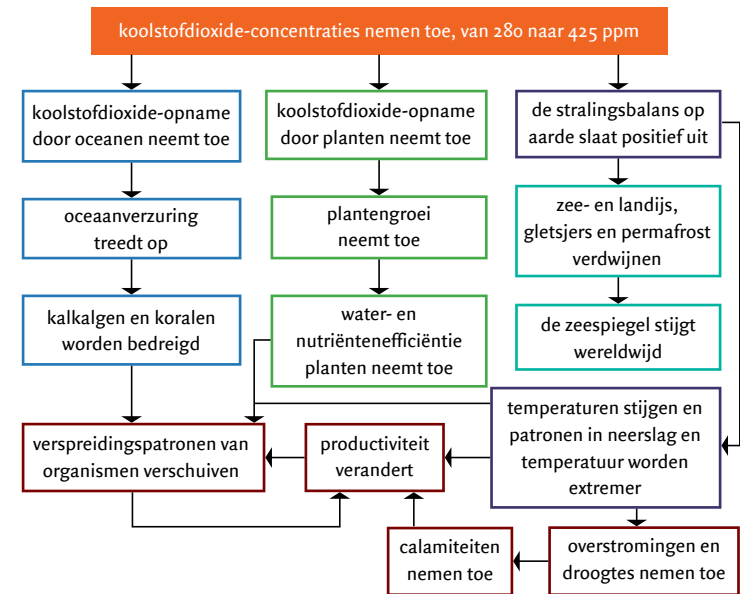
De laatste eeuwen is de mondiale koolstofkringloop sterk veranderd door menselijke ingrepen en invloeden. Een van de meest in het oog springende veranderingen is de toename van de concentratie koolstofdioxide in de atmosfeer sinds het midden van de negentiende eeuw door allerlei menselijke activiteiten zoals de verbranding van fossiele brandstoffen, cementproductie, ontbossing en veranderd landgebruik (zie paragraaf 3.1 en figuur 13).

Klimaatverandering is niet het enige directe gevolg van de gestegen koolstofdioxideconcentratie (zie figuur 13). Klimaatprocessen spelen zich hoofdzakelijk af in de atmosfeer, maar zijn in dynamische interactie met de hydrosfeer (zoet en zout water), de lithosfeer (gesteenten) en de biosfeer (alle levende organismen).

De atmosfeer

De wereldwijde uitstoot van koolstof in 2022 was 11,1 petagram (1 Pg = duizend miljard kilo) en is in 2023 waarschijnlijk nog iets toege-

DE TOEGENOMEN ATMOSFERISCHE KOOLSTOFDIOXIDE-CONCENTRATIES SINDS 1850 HEBBEN UITEENLOPENDE GEVOLGEN



Figuur 13 De stijgende concentratie koolstofdioxide in de atmosfeer heeft directe gevolgen (rood) voor de oceanen, de terrestrische biosfeer (inclusief landgebruik), de cryosfeer (ijs), en de atmosfeer (© Stichting BWM).

nomen. De atmosfeer ontvangt jaarlijks 9,6 petagram koolstof uit fossiele brandstoffen en 1,3 petagram koolstof door veranderingen in landgebruik zoals ontbossing en ontginning. Ruim de helft van die menselijke koolstofuitstoot wordt in hetzelfde jaar opgenomen door de biosfeer op het land – bossen, graslanden, akkerbouw – en door de oceanen. De resterende uitstoot draagt bij aan de toename van de concentratie koolstofdioxide in de atmosfeer.

Koolstofdioxide (CO₂) behoort samen met onder andere methaan (CH₄), ozon (O₃) en lachgas (N₂O) tot de broeikasgassen. Door de toegenomen concentraties broeikasgassen in de atmosfeer is de gemiddelde temperatuur in de twintigste eeuw al met ruim een graad toegenomen. Dit is het door-de-mens-versterkte broeikaseffect. Zo

gauw een broeikasgasmolecuul in de atmosfeer belandt, draagt het bij aan het broeikaseffect. Koolstofdioxide verblijft honderden jaren in de atmosfeer, methaan en lachgas enkele decennia. Wie zelf weinig uitstoot, draagt dus actief bij aan een langzamere opbouw van broeikasgasconcentraties.

In 2015 kwam de Conferentie van de Partijen (CoP) van het VN-klimaatverdrag in het Klimaatakkoord van Parijs overeen om het versterkte broeikas effect te beperken tot ruim onder de 2 graden en liefst onder de 1,5 graad. Alle landen van de CoP hebben dit doel onderschreven en ook hun nationale doelen voor uitstootvermindering bekend gemaakt. Onlangs is gebleken dat deze doelen onvoldoende zijn. Nu wordt gewerkt aan ambitieuzere doelen.

De opwarming van de atmosfeer leidt tot klimaatverandering. De laatste 125 jaar is duidelijk gebleken dat de polen het sterkst opwarmen, gevolgd door land. De oceanen bleven in eerste instantie iets achter, maar zijn in de laatste decennia ook duidelijk sterk opgewarmd. Het IPCC stelde in zijn meest recente rapport dat de door de mens veroorzaakte opwarming nu eenduidig is en dat de gevolgen daarvan overal zichtbaar zijn.

Om de gevolgen van klimaatopwarming realistisch in te schatten, moeten zowel temperatuur, neerslag als verdamping worden meegenomen. Waterdamp, vocht en neerslag zijn belangrijke factoren in het klimaatsysteem. Hoeveel waterdamp de lucht kan bevatten, is afhankelijk van de temperatuur: lucht kan bij 20 graden Celsius bijvoorbeeld tweemaal zo veel waterdamp bevatten als bij 10 graden Celsius. De lucht kan waterdamp opnemen wanneer de relatieve luchtvochtigheid lager is dan 100 procent. Wordt de relatieve luchtvochtigheid hoger dan 100 procent, bijvoorbeeld bij een dalende temperatuur in hogere luchtlagen, dan condenseert het water, worden wolken gevormd en gaat het regenen.

Door de opwarming van de aarde wordt de waterkringloop intensiever: verdamping en neerslag nemen toe, vooral in gebieden die nu al een wateroverschot hebben. Droge gebieden worden door een grotere verdamping waarschijnlijk nog droger en de neerslag daar wordt minder voorspelbaar. Ook het groeiseizoen verandert. In Nederland begint het groeiseizoen tegenwoordig drie weken vroeger dan rond 1900 en het eindigt anderhalve week later. In droge gebieden wordt

het groeiseizoen juist korter door langere droogteperiodes. Neerslag is helaas minder goed te voorspellen dan temperatuur en klimaatveranderingen zullen per regio verschillen.

De oceanen

De oceanen stoten jaarlijks wereldwijd 80 petagram koolstof uit, maar nemen ook eenzelfde hoeveelheid op. Daarnaast absorberen de oceanen jaarlijks ook nog eens 2,8 petagram koolstof van menselijke uitstoot. De absorptie van koolstofdioxide gaat eenvoudigweg via diffusie naar het zeewater. Het zuur dat hierbij gevormd wordt, draagt bij aan de langzame verzuring van de oceanen (zie kader Het carbonaatenwicht tussen atmosfeer en oceaan). Dit is slecht nieuws voor organismen die schelpen of kalkskeletten hebben, zoals kalkalgen, zee-sterren, mosselen en koralen. In een zuurdere omgeving wordt het voor die organismen lastiger om kalk aan te maken, waardoor hun overleving wordt bedreigd.

Het carbonaation (CO_3^{2-}) dat bij de verzuring wordt gevormd, is belangrijk voor het leven in de oceanen. Algen nemen het op uit het zeewater en gebruiken het in combinatie met zonlicht voor hun fotosynthese waarbij ze de koolstof in dit molecuul omzetten in koolwaterstofverbindingen zoals suikers. Dit is het begin van de voedselketen in de oceanen, waarbij koolstof als organisch materiaal wordt opgenomen en uiteindelijk via allerlei wegen naar de bodem zinkt en voor lange tijd wordt vastgelegd.

De oceanen hebben een belangrijke rol in het klimaatsysteem. Verschillende oceaanstromingen transporteren warmte naar andere gebieden en grotere diepten. De laatste decennia is door metingen duidelijk geworden dat ook de oceanen warmer zijn geworden, en niet alleen aan de oppervlakte maar ook in de diepzee. De wereldwijde oceanen nemen ongeveer 95 procent op van alle extra warmte die door het versterkte broeikas effect wordt gegenereerd. Dit heeft grote gevolgen voor het oceaandleven, voor de verspreiding van soorten, voor de interacties met het klimaatsysteem (bijvoorbeeld meer verdamping vanaf het oceaanooppervlak), voor het ontstaan van stormen en orkanen, en voor de stijging van het zeeniveau.

De biosfeer op land

Koolstofdioxide is zeer belangrijk voor plantengroei, omdat het direct wordt opgenomen door planten en via fotosynthese wordt omgezet in organische bouwstoffen zoals suikers. Koolstofdioxide is de basis voor de voedselketens op land. Als de concentratie koolstofdioxide in de atmosfeer toeneemt, krijgen planten meer koolstofdioxide aangeboden en zullen ze harder gaan groeien. Als er geen andere beperkingen zijn, dan neemt de plantengroei met circa 30 procent toe bij een verdubbeling van de concentratie koolstofdioxide. Dit wordt het koolstofdioxidebemestingseffect genoemd.

Smelten van landijs

De opwarming van de atmosfeer heeft directe gevolgen voor land- en zee-ijs. Hogere temperaturen versnellen het smelten van dit ijs. Dit vindt overal ter wereld plaats. Gletsjers worden in de meeste berggebieden kleiner; alleen in de hoogste delen van de Andes en Himalaya zijn ze nog stabiel. Het smelten van gletsjers heeft lokaal invloed op de waterbeschikbaarheid in de rivieren. Tijdens het versneld smelten zal er meer water afgevoerd worden, maar als de gletsjer gesmolten is, wordt zo'n rivier afhankelijk van de lokale neerslagpatronen.

Ook de grote landijsmassa's op Groenland en Antarctica zijn gevoelig voor de temperatuurstijgingen. Satellietmetingen laten zien dat Groenland de laatste decennia jaarlijks 270 gigaton ijs verliest. Dit verhoogt de huidige gemiddelde mondiale zeespiegelstijging van 3 mm per jaar met 0,8 mm.

Momenteel is de belangrijkste factor in de stijging van de zeespiegel niet het smelten van landijs, maar uitzetting van het oceaanwater door hogere temperaturen. Op termijn zal het smelten van landijs wel een steeds belangrijker factor worden in het stijgen van de zeespiegel. Het IPCC geeft aan dat de zeespiegelstijging de laatste decennia al sneller gaat en aan het eind van de eenentwintigste eeuw wereldwijd ruim 1 meter kan zijn. Door de onzekerheden omtrent landijs kunnen stijgingen tot enkele meters vooralsnog niet worden uitgesloten. In tegenstelling tot landijs draagt zee-ijs níet bij aan de stijging van het zeeniveau als het smelt. Toch is ook zee-ijs een belangrijke factor in het klimaatsysteem. Ijs reflecteert zonlicht, waardoor boven en onder het ijs en de sneeuw de temperatuur daalt. Een wateroppervlak

– open oceaanwater of een smeltwaterpoel – daarentegen absorbeert zonlicht, warmt op en versterkt op deze manier lokaal het smelten van het ijs.

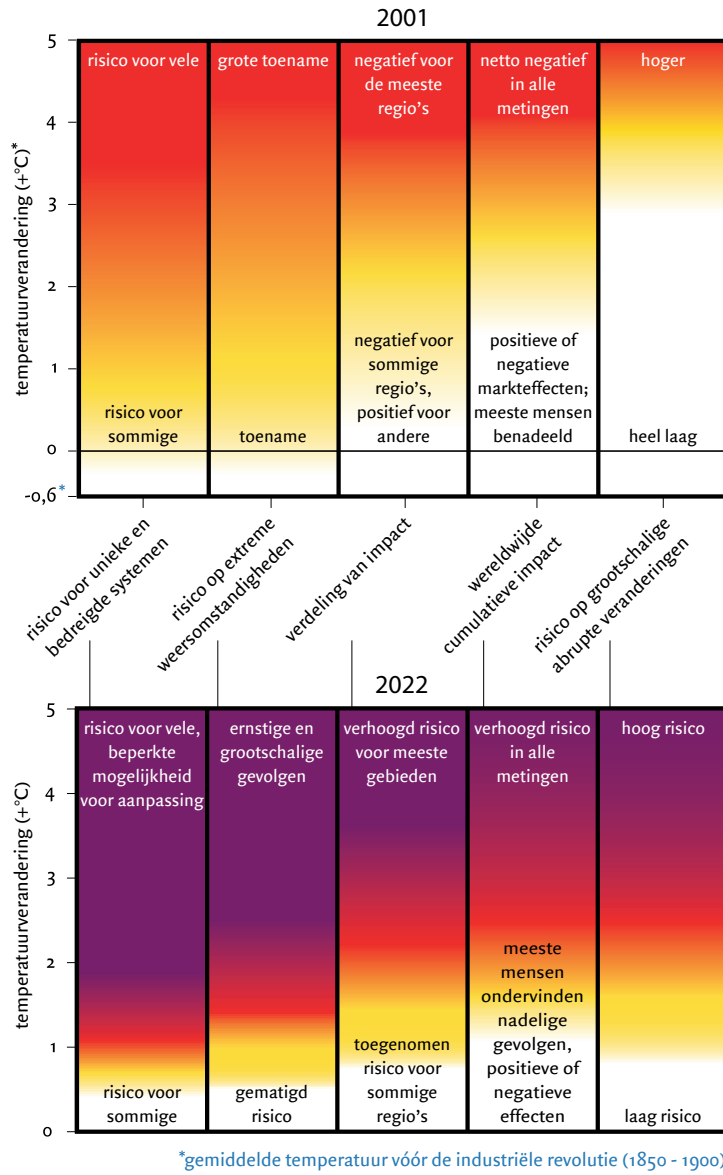
Indirecte effecten van verhoogde concentraties koolstofdioxide

Het IPCC heeft al in 2001 een overzicht gemaakt van gevaarlijke of ontoelaatbare klimaatverandering. Het woord 'gevaarlijk' wordt genoemd in de doelstelling van het VN-klimaatverdrag dat stelt dat een gevaarlijke invloed van de mens op het klimaatsysteem moet worden voorkomen. In 2001 liet het IPCC in het zogeheten *burning ember*-diagram ('brandende sintel') voor het eerst zien welke risico's mondiale opwarming met zich meebrengt (zie figuur 14). Het deed dit aan de hand van vijf verschillende klimaateffecten: unieke ecosystemen en landbouwgebieden; weersextremen; regionale effecten; mondiale effecten; kantelpunten. Toen het diagram voor de eerste keer bekend werd gemaakt in 2001 was er nauwelijks een overtuigende onderbouwing. Bij een latere update in 2014 waren er veel meer effecten beschreven. Het originele diagram was veel te behoudend. In de update van 2014 is er een extra kleur (paars: zeer gevaarlijke risico's) toegevoegd. Dit diagram is de wetenschappelijk onderbouwing van het Klimaatakkoord van Parijs waarbij de aarde niet warmer mag worden dan 2 graden. Hieronder zijn de verschillende klimaateffecten kort samengevat.

1. Unieke ecosystemen en landbouwgebieden

Ecosystemen en landbouwgebieden zijn sterk afhankelijk van het klimaat. Veranderingen in temperatuur, verdamping en neerslag veranderen ook de mondiale vegetatiepatronen. In gebieden die droger worden, wordt bos eerder grasland, in gebieden met voldoende vocht en warmte neemt de boomgroei juist toe en zal naaldbos op een gegeven moment vervangen worden door loofbos. Deze veranderingen worden momenteel al waargenomen. De meest kwetsbare ecosystemen, die bedreigd worden of verdwijnen bij 1,5 graad opwarming, liggen aan de kust: delta's hebben last van zeespiegelstijging en weersextremen, koraalriffen hebben last van bleking en verzuring. Maar ook ecosystemen in hooggebergtes, waar gletsjers smelten, staan onder druk. De meest kwetsbare landbouwgebieden liggen in lage-inko-

IPCC-RAPPORTEN LATEN STEEDS ERNSTIGERE GEVOLGEN ZIEN
VAN KLIMAATVERANDERING



menslanden waar de economie sterk afhankelijk is van handelsgewassen zoals koffie of cacao, en de aanwezigheid van geschikte groeicondities. IPCC's laatste schatting laat zien dat bij een opwarming boven de 2 graden Celsius aanpassen onmogelijk is of erg duur.

In een Europees onderzoeksproject ATEAM (Advanced Terrestrial Ecosystem Analyses and Modelling) zijn met verschillende scenario's van landgebruik en klimaat de regionale effecten ingeschat voor ecosystemen, biodiversiteit en bodems, en voor sectoren als landbouw, water en toerisme. In mediterrane gebieden nemen natuurbranden toe en neemt de beschikbaarheid van water af. In de Alpen en Pyreneeën komt de biodiversiteit verder onder druk te staan en worden de wintersportmogelijkheden minder.

De onderzoekers van ATEAM verwachtten die effecten pas aan het einde van de eenentwintigste eeuw, maar de effecten zijn al werkelijkheid geworden. Hun klimaatscenario's waren gebaseerd op geleidelijke veranderingen, terwijl de waargenomen effecten nu vooral te wijten zijn aan weersextremen. De interacties tussen de klimaateffecten op unieke systemen en die van weersextremen versterken de kwetsbaarheid.

2. Weersextremen

Klimaatverandering gaat niet alleen over de geleidelijke veranderingen van weerpatronen maar ook over het ontstaan van extreem weer. De opwarming leidt tot minder koude periodes en tot meer hittegolven. De hittegolf in de zomer van 2003 in West-Europa ging gepaard met ruim 70.000 slachtoffers en een onverwachte veendijkbreuk in het Utrechtse Wilnis. Veendijken bleken na honderden jaren dienst ineens erg kwetsbaar voor langdurige droogtes. In de afgelopen jaren stegen de temperaturen in de grote megasteden in India's zomers regelmatig tot boven de 45 graden Celsius en dat zal in de nabije toekomst in meer megasteden gebeuren. De leefbaarheid in

[LINKS] *Figuur 14 Het burning ember-diagram van het IPCC visualiseert de risico's van klimaatverandering op unieke systemen (koraalriffen en kustgebieden), extreem weer, regionale effecten, mondiale effecten en kantelpunten. Weinig risico = wit. Toenevend risico = geel-oranje. Gevaarlijk risico = rood. Heel gevaarlijk = paars. De drie diagrammen tonen voortschrijdend inzicht in 'aanleidingen tot bezorgdheid' (bron: IPCC © Stichting BWM).*



deze steden staat op het spel.

Droogtes, overstromingen, natuurbranden en stormen worden frequenter, intensiever en minder voorspelbaar. Die kunnen zeer lokaal zijn en plotseling opkomen, zoals in 2024 de overstromingen in Valencia (Spanje) en de natuurbranden in Los Angeles (Verenigde Staten). De totale schade van extreem weer lijkt steeds groter te worden. Ook hier nemen de risico's sterk toe boven een temperatuurstijging van 1,5 graden Celsius.

3. Regionale effecten

Regionale effecten van de klimaatopwarming zijn de relatief groot-schalige effecten op landbouw en andere economische sectoren. Zo liet de Amerikaanse econoom en Nobelprijswinnaar William D. Nordhaus zien dat een kleine opwarming in de geïndustrialiseerde landen leidt tot extra groei, maar in lage-inkomenslanden de economie direct beperkt. Hierdoor zullen de landen die historisch en ook nu de grootste uitstoot hebben veroorzaakt, de minste negatieve gevolgen onder-vinden. Rijke en innoverende landen kunnen zich ook beter aanpas-sen. Het omslagpunt waarbij gevaarlijke situaties ontstaan, lag eerst boven 2,0 graden Celsius, maar het IPCC heeft dat recent aangepast naar 1,5 graden.

4. Mondiale effecten

Onder de mondiale effecten valt de zeespiegelstijging, die momen-teel lijkt te versnellen. De kwetsbaarheid voor deze stijging kan per re-gio verschillend uitpakken en hangt af van de kustvorm en mogelijk-heden voor aanpassingen. Zo kan Nederland zich met zijn technische kennis waarschijnlijk wel aanpassen aan een stijging van enkele me-ters, terwijl Bangladesh het veel moeilijker zal hebben.

Door de grote regionale verschillen zijn mondiale gevolgen moei-lijk te bepalen. Hoe kwantificeer je de mondiale gevolgen? Zeeniveaustijging is relatief eenvoudig: de netto toename is de stijging of daling van de zeebodem plus de zeespiegelstijging bij een gemiddelde eb en vloed. Veranderingen in de mondiale koolstofvastlegging hangen af

[LINKS] [Auto's weggespoeld en bedekt met modder na verwoestende overstroming in de straten van de Spaanse stad Valencia in oktober 2024](#) (© Shutterstock).

van de respons van allerlei ecosystemen. De economische effecten zijn nog moeilijker te schatten omdat rijkdom niet evenredig is verdeeld over de wereld. Het IPCC plaatst het omslagpunt waarbij de risico's toenemen en aanpassingsmogelijkheden afnemen nu op 2 graden Celsius.

5. Kantelpunten

Het laatste risico betreft mogelijke kantelpunten (zie paragraaf 4.2). In de oorspronkelijke modellering ging het IPCC ervan uit dat die zich niet zouden voordoen in de eenentwintigste eeuw. Door nieuw onderzoek komt het IPCC daarop terug: als de aarde 2 graden opwarmt, bereiken veel systemen een kantelpunt.

Demping van klimaatverandering

Om de gemiddelde mondiale temperatuurstijging ruim onder de 2 graden te houden, is het noodzakelijk om de atmosferische concentraties van broeikasgassen te stabiliseren. Hiervoor moet de uitstoot van koolstofdioxide en de andere broeikasgassen snel worden gereduceerd. Het IPCC geeft aan dat de totale cumulatieve uitstoot sinds 1850 lineair gerelateerd is aan de mondiaal gemiddelde temperatuurstijging. Dit verband kan gebruikt worden om het nog voor-de-mens beschikbare koolstofbudget te bepalen om binnen een klimaatdoelstelling te blijven.

De totale koolstofuitstoot tot 2014 was 480 petagram. Voor een temperatuurstijging van maximaal 2 graden Celsius moet de totale uitstoot beperkt blijven tot 795 petagram koolstof. In 2014 zaten we daar 315 petagram vanaf. Sindsdien is er elk jaar 12 petagram koolstof bijgekomen, in totaal 120 petagram. Momenteel hebben we dus nog maar 195 petagram over. Met de huidige uitstoot betekent dit dat de wereld nog achttien jaar op het huidige niveau mag doorgaan en dat de uitstoot daarna nul moet worden. Deze berekening is behoudend omdat de andere broeikasgassen niet zijn meegenomen. Als ze wel worden meegenomen, is het budget 10 procent kleiner en gaan er nog 19,5 petagram en twee jaar vanaf.

Dezelfde berekening kan worden uitgevoerd voor een opwarming van maximaal 1,5 graden. De cumulatieve uitstoot mag dan slechts 589 petagram zijn, wat betekent dat het budget al in 2023 is opge-

bruikt: 589 minus 480 minus 120 is 11 petagram.

In het Klimaatakkoord van Parijs is daarom een uitstoot van netto nul gram broeikasgas gedefinieerd. Dat betekent dat de actuele uitstoot van de mens zou moeten worden geneutraliseerd door vastlegging van koolstofdioxide elders. Dit kan betekenen dat koolstofdioxide wordt afgevangen en getransporteerd naar lege gasvelden, de zogeheten *carbon capture and storage* (CCS). Soms wordt er nog een stap aan toegevoegd door synthetische brandstoffen of plastics te maken van koolstofdioxide.

Herbebossing

Koolstofdioxide kan ook worden vastgelegd in bossen door vermindering van ontbossing en meer herbebossing. Gebruik van biomassa als energiebron is in principe koolstofdioxideneutraal en als het vrijgekomen koolstofdioxide ook nog eens wordt afgevangen en vastgelegd kan theoretisch een groot potentieel voor negatieve uitstoot aanbeoordeld worden. Een nadeel van deze methoden is dat er veel land en water nodig is om de noodzakelijke hoeveelheid koolstof vast te leggen of de biomassa te laten groeien. Dit heeft nadelige gevolgen voor de biodiversiteit omdat hierbij vaak uitheemse, snelgroeiende boomsoorten worden gebruikt met weinig variatie in de ondergroei.

De mondiale antropogene uitstoot daalt nog nauwelijks. Zoals de bovenstaande berekeningen laten zien mag er weinig of geen koolstofdioxide meer worden uitgestoten en moet er veel worden vastgelegd. De noodzakelijke technologieën, zoals ondergrondse opslag van koolstofdioxide en herbebossing, staan nog in de kinderschoenen en moeten snel verbeterd worden. De modellen waarmee uitstoot- en klimaatscenario's worden ontwikkeld, gaan er echter van uit dat deze technologieën al op grote schaal gebruikt worden. Zonder deze technologieën kan het Klimaatakkoord van Parijs in de modellen niet gehaald worden. De scenario's zijn dan ook te hoopvol. Hetzelfde geldt voor klimaat- of koolstofneutrale activiteiten.

Internationale politici

Internationale politici zullen moeten bepalen hoe de hoeveelheid koolstof die nog uitgestoten kan worden voor een maximale temperatuursverhoging van 1,5 of 2,0 graden moet worden verdeeld. Daarin

kunnen ze rekening houden met landen met de grootste mogelijkheden voor uitstootvermindering, met volgende generaties, met landen met een lage uitstoot per hoofd van de bevolking of landen die zich nog moeten ontwikkelen en daarin moeten worden bijgestaan. In de laatste VN-klimaatconferenties (vanaf 2022) waren de verregaande verminderingen van de uitstoot en de financiële tegemoetkomingen voor landen die minder kunnen opbrengen, nog zeer controversieel. De Verenigde Staten wijzen bijvoorbeeld naar China als het land met de grootste absolute uitstoot, terwijl in de periode 2020-2024 een derde van de Chinese uitstoot te wijten was aan door Amerikanen geconsumeerde producten. Broeikasgassen houden zich niet aan nationale grenzen. Om klimaatrisico's beheersbaar te houden moet de mondiale opwarming worden beperkt, zoals internationaal is afgesproken, tot maximaal 2 graden.

Als dit niet lukt, dan zullen we ons aan de gevolgen moeten aanpassen, maar helaas de mogelijkheden om ons aan te passen zijn beperkt of te duur. De gevolgen zijn de laatste decennia al voelbaar: intense natuurbranden, droogtes, hittegolven en overstromingen.

4.2 Kantelpunten of niet?

– Max Rietkerk

Stellige waarschuwingen over kantelpunten zijn alarmistisch, maar de onmiskenbaar rampzalige klimaatverandering maakt klimaatactie altijd urgent, kantelpunten of niet.

Kantelpunten komen voor in systemen met twee stabiele, relatief onveranderlijke toestanden, waarvan de ene abrupt en onomkeerbaar kan omslaan naar de andere. Klimaatwetenschappers kennen die eigenschappen toe aan grootschalige subsystemen binnen het mondiale klimaatsysteem. Denk bijvoorbeeld aan de Amazone, die kan omslaan van tropisch regenwoud naar een gedegradeerd savanneachtig landschap, aan de ijskappen op de polen die abrupt en onomkeerbaar kunnen afsmelten, of aan de mondiale oceaanstromingen aangedreven door de AMOC (zie paragraaf 3.2), die er onverhoeds mee kan ophouden zodat niet langer warm tropisch oceaanwater noordwaarts wordt gevoerd.

Voorbodes

Als de veerkracht van een systeem afneemt, wordt dat vaak gezien als de voorbode van een kantelpunt. Veerkracht kun je meten door de hersteltijd van een systeem na verstoring te bepalen: hoe langer de hersteltijd, hoe lager de veerkracht. Die methode kan worden toegepast op variabelen die de toestand van een systeem aangeven. Een afname van de veerkracht van een systeem gaat gepaard met een vertraging van die variabelen: het duurt langer om weer in de oorspronkelijke evenwichtssituatie te komen. Omdat er altijd verstoringen of fluctuaties in een systeem voorkomen, is aan de hand van tijdreeksen van variabelen te meten hoe snel het systeem daarop reageert. Variabelen zijn bijvoorbeeld de hoeveelheid biomassa in ecosystemen, de dynamiek van ijsdikte van het poolijs en het verloop van temperatuur en zoutgehalte van het water in oceaanstromingen. Vertragingen daarin kunnen gezien worden als voorbodes van een kantelpunt. Zo zijn er vertragingen gevonden in de fluctuaties van biomassa in het tropische regenwoud in de Amazone en van poolijsdikte van de ijskap op Groenland. En in de AMOC zijn afnames gevonden van zoutgehaltes en temperatuur van het oceaanwater én vertragingen in de fluctuaties van deze toestandsvariabelen.

Alarm

Dit leidt in de wetenschappelijke literatuur en in de media regelmatig tot groot alarm. Deze systemen zouden veerkracht verliezen en daarmee afsteveneren op een kantelpunt en er zelfs heel dichtbij zijn. Het laatste, meest bedreigende voorbeeld is de voorspelling dat de AMOC en daarmee de warme Golfstroom een kantelpunt nadert en waarschijnlijk al in 2050 of zelfs eerder zou kunnen instorten als gevolg van klimaatverandering. Dat zou desastreuze gevolgen hebben, zoals een temperatuurdaling van 5 tot 15 graden in Europese steden, oprukkend poolijs tot in de Noordzee en in Europese havens (zie ook paragraaf 3.2).

Maar vertragende fluctuaties hoeven geen voorbodes te zijn van een naderend kantelpunt. Ze kunnen ook optreden zonder dat er überhaupt zo'n kantelpunt bestaat. Er zijn ook alternatieve verklaringen voor die vertragingen, zoals geleidelijke en omkeerbare veranderingen, die genegeerd worden bij dit soort voorspellingen. Zelfs als je

aanneemt dat er een kantelpunt bestaat, dan nog zijn de gevonden vertragingen onbetrouwbare voorbodes omdat je hun exacte afstand tot een kantelpunt niet kunt aangeven.

Alarmisme

Het staat vast dat de aarde en haar klimaat ernstig zijn ontregeld en we ondervinden daarvan regelmatig de rampzalige gevolgen, zoals extreem weer. Maar de grote onzekerheid over het bestaan van kantelpunten en het naderen ervan maakt dat stellige waarschuwingen omtrent kantelpunten alarmistisch zijn. Alarmisme helpt de bereidheid tot klimaatactie niet verder én brengt de wetenschappelijke geloofwaardigheid in gevaar. Terwijl nu al blijkt dat maatregelen om klimaatverandering te verminderen door drastische koolstofdioxide-reductie sowieso dringend noodzakelijk zijn vanwege de onmiskenbaar gevaarlijke klimaatverandering, kantelpunten of niet.

KUNSTENAARSOOG – Kantelpunten

– Nora van Klingeren

Als dochter van een architect was een kaartenhuis bouwen een logische activiteit voor mij. Voorzichtig en met verstand stapelen, anders stort het bouwsel in elkaar.

Een kaartenhuis is een logische associatie bij de veertien kantelpunten die door het IPCC benoemd zijn. Elk kantelpunt is een kritieke drempel die bij overschrijding leidt tot grote en onomkeerbare gevolgen.

Sommige kantelpunten liggen mogelijk wat verder in de toekomst, andere liggen dichterbij. Het ijs bij West-Antarctica is zo'n mogelijk kantelpunt. Veertien kantelpunten, één systeem aarde. Hoe houden we het kaartenhuis overeind?

[pag. 88 BOVEN] Kantelpunt van de Amazone verbeeld. Tweezijdig werk en daarom ook scheef en gekanteld. Links de huidige situatie waarin de kanoër nog rustig kan peddelen. Rechts is de savannevorming niet meer te stoppen.

– Nora van Klingeren, 2025, wol en zijde samen vervult.

[pag. 88 ONDER] Kantelpunt van het ijs bij West-Antarctica verbeeld. Tweezijdig werk en daarom ook scheef en gekanteld. Links de huidige situatie met het ijs en de gletsjer rustend op de zeebodem. Rechts dobberen de gletsjerresten in de oceaan.

– Nora van Klingeren, 2025, wol en zijde samen vervult.



5 De mondiale stikstofkringloop

5.1 Van schaars goed naar overvloed

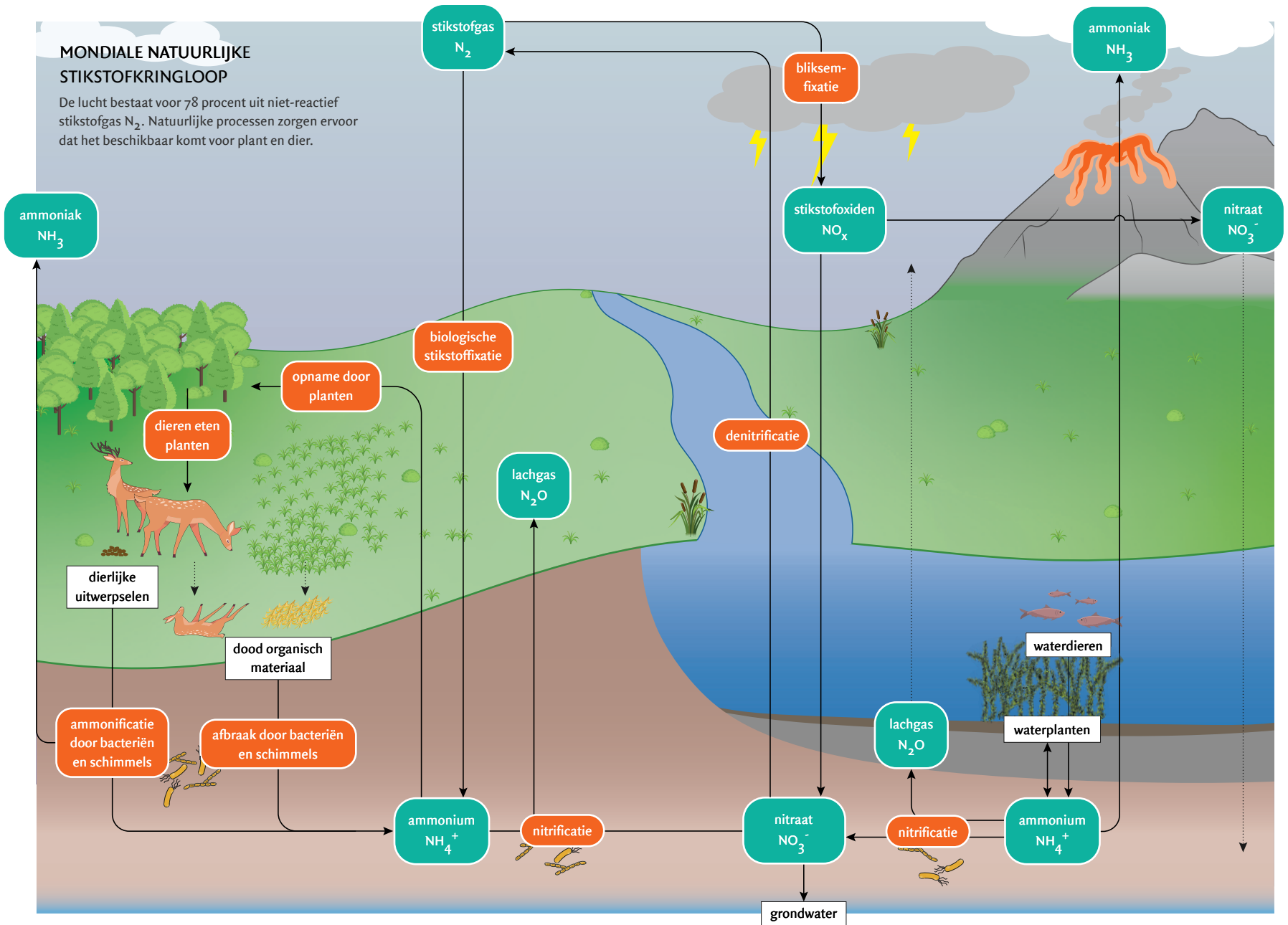
– Jan Willem Erisman

Een paar eeuwen terug was reactief stikstof – de vorm die organismen kunnen benutten – een schaars goed op aarde. De mens heeft daar grote veranderingen in teweeggebracht. Door de verbranding van fossiele grondstoffen en biomassa én door de productie van kunstmest sinds de Tweede Wereldoorlog. Daardoor is tweemaal zoveel stikstof beschikbaar gemaakt op aarde. Dat had positieve gevolgen voor de economie en de wereldwijde voedselproductie, maar flink negatieve gevolgen voor de natuur, de biodiversiteit en het klimaat.

Het chemische element stikstof (N) is essentieel voor alle levende organismen. Het is een belangrijk bestanddeel van aminozuren, eiwitten, vitamines en DNA. Bovendien bestaat 78 procent van de atmosfeer uit stikstofgas (N_2). Stikstofgas is echter niet beschikbaar voor de meeste levende organismen, het is een niet-reactieve of inerte vorm van stikstof. Wij ademen stikstofgas in en weer uit, zonder dat ons lichaam het opneemt of er schade van ondervindt. Veel belangrijker voor het leven zijn de zogeheten reactieve vormen van stikstof (Nr) zoals ammonium (NH_4^+) en nitraat (NO_3^-). Dieren en planten kunnen Nr opnemen en gebruiken om er eiwitten, vitamines of DNA van te bouwen.

MONDIALE NATUURLIJKE STIKSTOFKRINGLOOP

De lucht bestaat voor 78 procent uit niet-reactief stikstofgas N_2 . Natuurlijke processen zorgen ervoor dat het beschikbaar komt voor plant en dier.



Er zijn drie natuurlijke manieren waarop het niet-reactieve stikstofgas wordt omgezet in opneembaar, reactief stikstof. De eerste en belangrijkste is de biologische route. Micro-organismen zetten stikstofgas om in ammoniak (NH_3), dat planten vervolgens kunnen opnemen. De stikstofbindende bacteriën leven vrij in de bodem of gaan een alliantie aan met planten zoals de vlinderbloemigen die speciale organen – wortelknolletjes – bezitten waarin de bacteriën huizen.

Maar ook bliksem, de tweede natuurlijke manier, levert een bijdrage. Bij een inslag wordt stikstofgas in het laagste deel van de atmosfeer omgezet in stikstofdioxiden (NO_x) die in de lucht of op het aardoppervlak omgezet worden naar nitraat, een vorm die planten gemakkelijk kunnen opnemen.

Ten derde maken vulkaanuitbarstingen opgeslagen reactief stikstof vrij uit de aardkorst, waar het in de vorm van ammoniak is opgeslagen. Hierbij komt ammoniak vrij.

Samen produceren deze drie natuurlijke processen naar schatting ongeveer 65 teragram N per jaar in ecosystemen op het land, ofwel 65 maal 10^{12} gram stikstof. De micro-organismen nemen hierbij maar liefst 90 procent voor hun rekening.

Ook in de oceanen vindt stikstofomzetting plaats en wel door bacteriën. Zij produceren 140 teragram actief stikstof (ammonium) per jaar. Dit is dus meer dan twee keer zoveel als de micro-organismen op het land. Een deel van dit stikstof wordt vastgelegd in sedimenten doordat organisch materiaal naar de bodem zinkt, terwijl de rest uiteindelijk door weer andere bacteriën wordt omgezet in lachgas (N_2O) – een zeer sterk broeikasgas – en het niet-reactieve stikstofgas (N_2) die in de atmosfeer terecht komen. De natuurlijke stikstofkringloop is dan weer rond.

Als reactief stikstof eenmaal is gebonden in levende materie, zoals in eiwitten en DNA, dan blijft het daar gedurende het leven van het organisme, maar het moet wel steeds aangevuld worden. Als organismen sterven, worden de eiwitten, aminozuren, vitamines en DNA omgezet in ammonium. Dit kunnen planten opnieuw opnemen of bacteriën zetten het om naar nitraat, dat planten vervolgens kunnen opnemen. Op deze manier blijft gebonden stikstof geruime tijd in de kring-

loop en doorloopt het die meerdere keren voordat bacteriën het uiteindelijk omzetten in stikstofgas. In deze biologische stikstofkringloop spelen gespecialiseerde groepen bacteriën de hoofdrol.

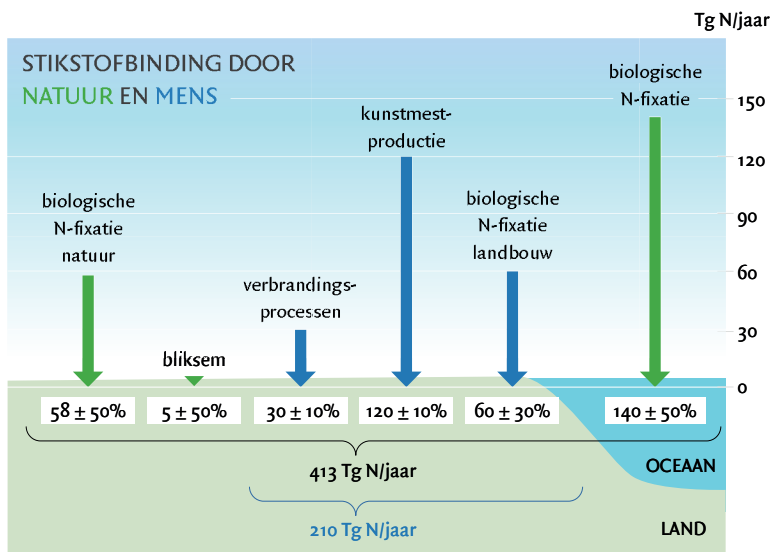
Antropogene bronnen van reactief stikstof

Reactief stikstof is altijd de meest beperkende voedingstof in de landbouw geweest. Boeren die hun gewasproductie willen verhogen, hebben behoefte aan een betere biologische binding en recycling van stikstof. Veehouderij werd daarom gebruikt voor de bemesting van akkers waar voedsel kon worden geproduceerd. Of boeren teelden stikstofbindende gewassen zoals peulvruchten, klaver en (soja)bonen op hun land. Deze planten werken samen met bacteriën die stikstofgas reactief kunnen maken door het om te zetten naar ammoniak. Dit is echter een traag proces en levert slechts beperkte hoeveelheden actief stikstof aan de biosfeer. Vanaf 1840 werd in Europa guano geïmporteerd – afgegraven uitwerpselen die vogels eeuwenlang deponeerden op rotsen – en als bemesting gebruikt. Tegen de twintigste eeuw werd echter duidelijk dat in dichtbevolkte gebieden deze traditionele methoden niet konden voldoen aan de groeiende vraag naar voedsel.

In 1908 ontdekte de Duitse chemicus Fritz Haber hoe je stikstofgas chemisch kunt omzetten naar ammoniak, door het onder hoge druk te zetten en met een katalysator te binden aan waterstofgas. Vijf jaar later slaagde landgenoot Carl Bosch erin dit laboratoriumsysteem op industriële schaal te laten werken. Het eerste doel van het zogeheten Haber-Boschproces was niet de verhoging van de landbouwproductie maar de fabricage van grote hoeveelheden munitie voor de Eerste Wereldoorlog. Pas na de Tweede Wereldoorlog zou dit proces grootschalig worden toegepast voor de productie van kunstmest. Uiteindelijk kregen beiden de Nobelprijs voor hun bijdrage aan de verhoging van de voedselproductie.

Ongeveer veertig jaar na de uitvinding werd het Haber-Boschproces op grote schaal geïntroduceerd als de primaire component van de Groene Revolutie in de landbouw. Vrijwel onmiddellijk begon de wereldwijde voedselproductie exponentieel te stijgen en daarmee ook de menselijke bevolking. Tegen de jaren zeventig werd kunstmatige ammoniakproductie belangrijker dan de wereldwijde biologische stik-

[pag. 90-91] Figuur 15 *De mondiale stikstofkringloop.* (© Stichting BWM).



Figuur 16 Wereldwijde vastlegging van reactief stikstof (N) in geoxideerde en gereduceerde vorm tot 2010. Groene pijlen vertegenwoordigen natuurlijke bronnen, blauwe pijlen antropogene bronnen (bron: cijfers naar Fowler et al, 2013, biologische fixatie naar Galloway et al, 2021).

stofbinding. Industrieel geproduceerde ammoniak is nu overvloedig beschikbaar en betaalbaar in de westerse wereld. Er wordt geschat dat zonder de extra ammoniak uit kunstmest slechts drie miljard mensen genoeg voedsel zouden hebben met de huidige diëten en landbouwpraktijken. De wereldbevolking telt nu acht miljard mensen. Zonder kunstmest zou het absoluut onmogelijk zijn geweest om de groei van de voedselproductie gelijke tred te laten houden met de groei van de wereldbevolking in de twintigste eeuw.

Verstoring

De mondiale stikstofkringloop is net zo sterk verstoord door menselijk handelen als de koolstofkringloop (zie hoofdstuk 3). Wereldwijd is ongeveer driekwart van de antropogene stikstofproductie afkomstig van de kunstmestproductie, en een kwart van de verbranding van fossiele brandstoffen en biomassa (in de vorm van stikstofoxiden). De

mondiale stikstofbinding is door menselijke invloed verdubbeld.

De toevoeging van antropogeen stikstof aan de kringloop heeft grote negatieve consequenties voor de kwaliteit van water, lucht en bodem. Met name in regio's met veel landbouw, industrie en verkeer zijn de concentraties ammoniak en stikstofoxiden in de lucht verhoogd. Deze luchtverontreiniging slaat neer op de bodem en heeft grote invloed op de biodiversiteit in gevoelige natuurgebieden. Dit leidt tot een veel grotere beschikbaarheid van het normaliter schaarse element stikstof. In Europese loofbossen veroorzaakt de langdurige extra stikstoftoevoer een verhoogde fotosynthese en dus groei van stikstofminnende planten en bomen en een grotere opslag van koolstof, nog bovenop de extra groei door de verhoogde concentratie koolstofdioxide in de atmosfeer. Hoewel dit moeilijk precies te kwantificeren is, worden de verstoringen van de koolstofkringloop voor een deel gecompenseerd door extra stikstofopslag in bossen.

Regionale effecten

In regio's met veel landbouw komt extra stikstof onbedoeld terecht in natuurlijke aquatische ecosystemen zoals beken, meren, rivieren, estuaria en zoet-zoutovergangen in riviermondingen. Nitraten spoelen uit mest in de bodem naar oppervlaktewateren en verhogen daar de productie van algen, die zo hard groeien dat het water troebel kan worden en ondergedoken waterplanten minder licht krijgen. Als deze algen afsterven, ontstaan er zuurstofarme omstandigheden waardoor waterplanten en vissen doodgaan. Deze zogeheten eutrofiëring heeft dus enorme effecten op de aquatische biodiversiteit.

Ook ecosystemen op het land (terrestrische ecosystemen) hebben het zwaar te verduren door stikstofbelasting, vooral vanuit de lucht. Stikstofminnende planten zoals brandnetels en bramen profiteren hiervan en verdringen planten die minder stikstof nodig hebben. Daarnaast verzuurt de bodem, waardoor belangrijke nutriënten zoals calcium en magnesium uitspoelen en niet meer beschikbaar zijn voor plantengroei. Ook spoelt aluminium op den duur uit en dat is toxisch in het grondwater.

In feite wordt het hele voedselweb aangetast door deze eutrofiëring. De biodiversiteit neemt af doordat stikstofminnende planten andere planten overwoekeren. De hoeveelheid insecten neemt af, waar-

door vogels minder voedsel hebben. En doordat de bodem verzuurt, is er ook minder kalk in het ecosysteem waardoor vogels breekbare boten krijgen.

De negatieve effecten van de verstoringen in de stikstofkringloop zijn vooral zichtbaar op regionale schaal. In Nederland zijn heidevelden vergrast en kwetsbare hoogveengebieden minder divers geworden. In de Golf van Mexico komen periodes van zuurstofloosheid en massale vissterfte voor.

Mondiale effecten

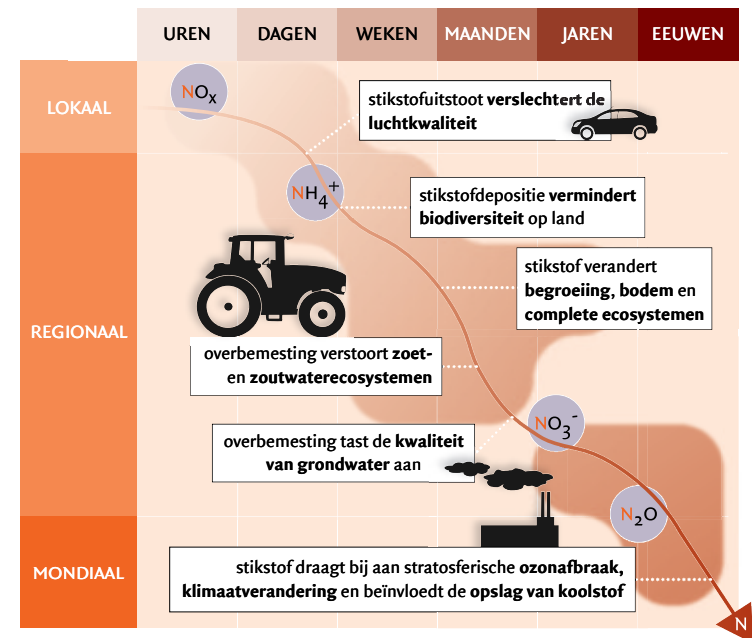
Bij de productie van kunstmest en bij het gebruik ervan in gras- en akkerbouwlanden komt lachgas (N_2O) vrij, een driehonderd maal sterker broeikasgas dan koolstofdioxide. Dit heeft een wereldwijd effect. Lachgas versterkt niet alleen het broeikas effect, maar levert ook een bijdrage aan de afbraak van ozon in de stratosfeer (de luchtlag rondom de aarde op tien tot vijftig kilometer hoogte). Dit laatste heeft een direct effect op de menselijke gezondheid omdat meer ultravioletstraling de aarde bereikt en het risico op huidkanker groter wordt. Maar ook stikstofoxiden, ammoniak en de fijnstofverbindingen die gevormd worden in de lucht hebben negatieve gevolgen voor de gezondheid van de mens. Ze verhogen de kans op luchtwegaandoeningen, longkanker en hart- en vaatziekten.

Cascade van stikstofeffecten

Door mensen en natuurlijk geproduceerd reactief stikstof veroorzaakt een cascade van schadelijke effecten doordat hetzelfde stikstofmolecuul meerdere effecten kan hebben (zie figuur 17).

Zo leidt stikstofoxide uit de verbrandingsmotoren van auto's en vliegtuigen niet alleen tot luchtverontreiniging in de atmosfeer. Nadat het stikstofmolecuul vanuit de lucht is neergeslagen op de grond (stikstofdepositie) verzuurt het water en bodem, en bemest het grasland, bossen en kustecosystemen. Vervolgens kan het stikstofmolecuul na afbraak in water door bacteriën opnieuw in de atmosfeer terecht komen als lachgas en bijdragen aan de opwarming van de aarde en de afbraak van ozon in de stratosfeer.

Zolang reactief stikstof in het milieu blijft, zal dit cascade-effect doorgaan. Naarmate het stikstofmolecuul zich verder in de cascade



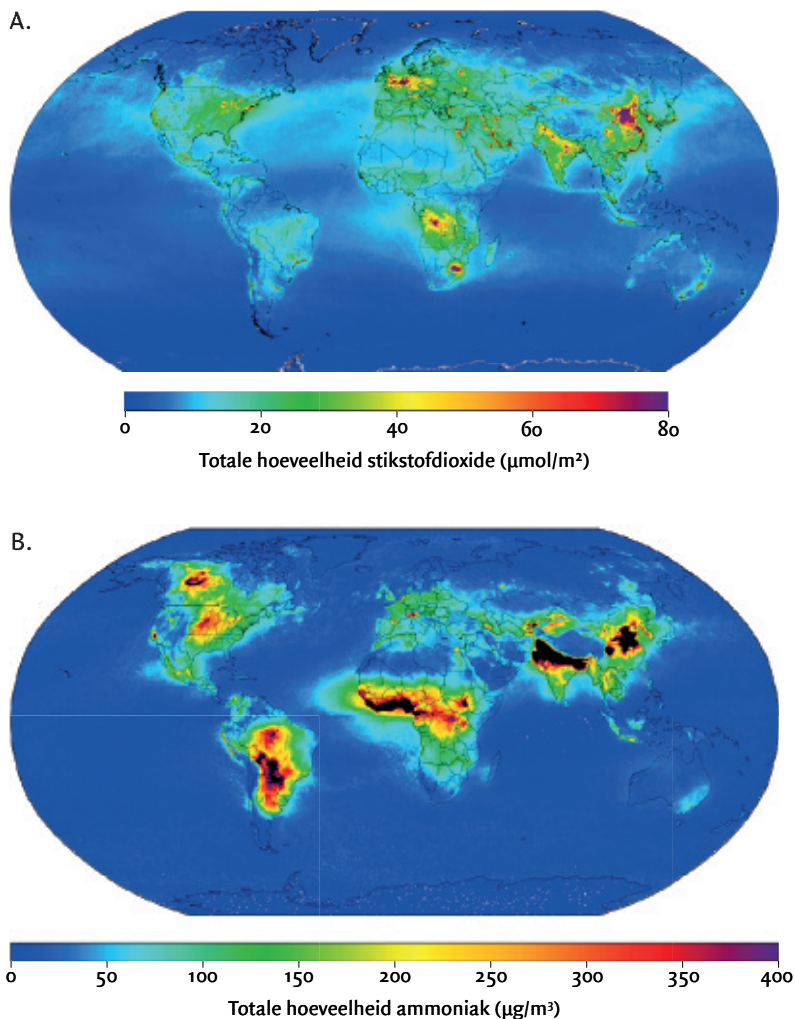
Figuur 17 De stikstofcascad (bron: Erisman et al, 2015 © Stichting BWM).

beweegt, wordt de oorspronkelijke bron onherkenbaar door de vele omzettingen en interacties. Aan het eind van de kringloop zetten bodem- en waterbacteriën reactief stikstof weer om in niet-reactief stikstof, de zogeheten denitrificatie, en is de kringloop weer bij het begin.

Satellietwaarnemingen van atmosferisch stikstof

Satellietbeelden laten heel goed zien waar op de wereld stikstofuitstoot een probleem is (zie figuur 18). De stikstofoxiden zijn illustratief voor gebieden met veel industrie, transport en andere verbranding van fossiele brandstoffen. Ammoniak is representatief voor gebieden met intensieve landbouw en veel veeteelt, maar ook voor bosbranden zoals in Centraal-Afrika. Hieruit blijkt duidelijk dat er wereldwijd gebieden met hoge stikstofbelasting zijn, maar ook gebieden waar die zeer laag is.

SATELLIETWAARNEMINGEN VAN STIKSTOFOXIDE EN AMMONIAK IN DE ATMOSFEER



Figuur 18 Satellietwaarnemingen van atmosferisch stikstof. A Concentraties van stikstofdioxiden (NO_x), in 2021 gemeten met de satelliet Tropomi. B Concentraties van ammoniak (NH_3), in 2023 gemeten met de satelliet IASI-C (© Stichting BWM).

De toekomst van de mondiale stikstofproblematiek

De wereldwijde stikstofproblematiek werd pas echt goed publiekelijk bekend doordat een internationale onderzoeksgroep in 2009 het concept van de negen planetaire grenzen lanceerde in het Britse wetenschappelijke tijdschrift *Nature*. De groep liet zien dat stikstof op wereldschaal een van de belangrijkste milieuproblemen is en dat de grens voor reactief stikstof waarbij natuur, lucht en water effecten beginnen te ondervinden met een factor vier wordt overschreden: er is vier keer meer reactief stikstof aanwezig dan toelaatbaar is voor de omgeving.

Kunstmestgebruik voegt het meeste reactieve stikstof toe op bijna alle continenten. Latijns-Amerika vormt daarop de uitzondering, daar is grootschalige sojaproductie de belangrijkste bron van reactief stikstof. Azië is anno 2025 goed voor 50 procent van het wereldwijde gebruik van reactief stikstof.

De regio's waar het meeste reactieve stikstof werd geproduceerd zijn in zestig jaar wel drastisch veranderd. In 1961 produceerden Azië en Europa nog het meeste reactieve stikstof, in 2020 waren dat Azië en Latijns-Amerika. In Azië stijgt het stikstofgebruik per hoofd van de bevolking sterk. Hetzelfde geldt voor Latijns-Amerika. In Noord-Amerika, Oceanië en Europa was het stikstofgebruik per hoofd van de bevolking het hoogst, maar wel al decennia gestabiliseerd. Afrika heeft verreweg het laagste niveau.

Tussen 2020 en 2050 zal 99 procent van de wereldwijde bevolkingstoename plaatsvinden in Azië en Afrika. We groeien dan van acht naar tien miljard mensen. Die toename zal de vraag naar voedsel, en daarmee de hoeveelheid reactief stikstof op aarde, verder vergroten. Het is vrijwel zeker dat het milieu in Azië en Afrika daaronder gaat lijden.

Aanpak van de stikstofproblematiek

Met de groei van de wereldbevolking en de daaraan gekoppelde toename van voedselproductie en fossiele-brandstofgebruik is stikstofbelasting inmiddels een probleem in veel en grote gebieden op de wereld (zie figuur 18). Dat betekent dat er nu wereldwijd maatregelen nodig zijn om de stikstofverliezen naar het milieu te beperken. Dit begint met het vaststellen van grenzen waarbinnen de stikstofuitstoot beperkt moeten worden. De natuur kan met een bepaalde hoeveel-

heid extra reactief stikstof omgaan, maar dat is sterk afhankelijk van de kwetsbaarheid van het ecosysteem ter plekke. Als je de grenzen hebt vastgelegd, kun je bepalen welke stikstofreductie nodig is om de milieubelasting voldoende te beperken. Daar zijn verschillende manieren voor. Hoe meer maatregelen je neemt aan het begin van de stikstofcascade (zie figuur 17), hoe effectiever de oplossing zal zijn.

Eerst moet worden ingezet op vermindering van de productie van reactief stikstof. Bijvoorbeeld door in de landbouw geen kunstmest toe te passen, geen stikstofrijk krachtvoer te gebruiken en duurzame energie te gebruiken in plaats van fossiele brandstoffen. Wat er niet ingaat komt er ook niet uit. Vervolgens kan de efficiëntie van bepaalde processen worden verhoogd, waardoor je minder fossiele energie of kunstmest nodig hebt.

Tot slot kan een land inzetten op *end of pipe*-technieken. Een voorbeeld is de creatie van bufferstroken (zie kader Bufferstroken). Ook de driewegkatalysator in auto's is een bekend voorbeeld. Die zet stikstof-oxiden om in onschadelijk stikstofgas.

Bufferstroken

– Jos Verhoeven

De problematische eutrofiëring van beken, rivieren en kustwateren in gebieden met intensieve landbouw kan gericht worden bestreden door de natuurlijke bufferfunctie van beken en wetlands te versterken. Als het agrarische landschap nog enigszins intact is, liggen er tussen landbouwpercelen en beken vaak nog brede oeverzones met bos. Dergelijke natte zones nemen nitraat en fosfaat op uit het afstromende water, en verbeteren daardoor de waterkwaliteit. In veel regio's in Europa, Noord-Amerika en China worden dergelijke bufferzones opnieuw aangeplant of hersteld. Het in acht nemen van een brede strook grenzend aan een beek – ongeveer tien meter – die niet voor landbouw gebruikt wordt, geeft al goede resultaten. Voorbeelden zijn te vinden in het stroomgebied van de Mississippi en ook in Zuid-Zweden, waar bufferzones en wetlands gereconstrueerd worden om

stikstofstromen naar de Oostzee te verminderen. Nitraten kunnen in zulke bufferzones worden omgezet in stikstofgas doordat de omstandigheden voor denitrificatie er erg gunstig zijn. Hiermee is de stikstofcirkel weer rond.

De Nederlandse stikstofproblematiek

Nederland zit al sinds 2019 in een stikstofcrisis. Hoewel de stikstofbelasting van natuurgebieden al vele jaren een aanhoudend probleem was, maakte een rechterlijke uitspraak in dat jaar duidelijk dat de overheid niet kon voldoen aan de Europese Vogel- en Habitatrichtlijn. De overmatige stikstofbelasting van beschermde natuurgebieden bleek een probleem te zijn voor toekomstige plannen en projecten. Het Programma Aanpak Stikstof (PAS), dat deze belasting moest aanpakken, was gebaseerd op de veronderstelling dat toekomstige stikstofemissies zouden afnemen door het stikstofbeleid. Vergunningen voor toekomstige plannen en projecten werden alvast vrijgegeven zonder dat de toekomstige emissiedaling verzekerd was. Dit gebrek aan zekerheid was de reden waarom het Europese Hof Nederland op de vingers tikte: het PAS-beleid was onvoldoende om de natuur te beschermen. Als gevolg daarvan mocht de overheid alleen nog vergunningen verlenen wanneer de stikstofuitstoot daadwerkelijk was afgenomen. Pas als de Nederlandse overheid meer maatregelen zou nemen om het algehele niveau van de stikstofdepositie in ons land te verlagen zou er meer ruimte komen voor nieuwe projecten.

Dat is ook niet zo gek. Nederland is een dichtbevolkt land met een sterk ontwikkelde agrarische sector. Meer dan de helft van ons landoppervlak is in agrarisch gebruik. Van de 1,8 miljoen hectare landbouwgrond wordt ongeveer tweederde gebruikt als grasland en voor voedergewassen, en eenderde voor akkerbouw, sierteelt en vollegrondstuinbouw. Uit die getallen blijkt al dat veeteelt de belangrijkste bedrijvigheid is. Nergens ter wereld worden op zo'n klein oppervlak zoveel dieren gehouden. Eind 2024 telde het Centraal Bureau voor de Statistiek 82 miljoen kippen, 10,2 miljoen varkens, 3,5 miljoen koeien en 1,2 miljoen schapen en melkgeiten in Nederland. De bedrijfsvoering is uiterst intensief en gericht op maximalisering van de productie

tegen zo laag mogelijke kosten. Economisch gezien is de landbouw een belangrijke sector. Als je de voedingsindustrie meerekent, draagt de sector voor 7 procent bij aan het Bruto Nationaal Product. Opmerkelijk is wel dat tweederde van die productie naar het buitenland gaat.


De intensieve Nederlandse landbouw heeft een aantal problematische neveneffecten. De stikstofuitstoot via afspoeling van mest en ammoniakemissie uit stallen belast oppervlaktewater, grondwater en atmosfeer. Volgens de Europese Vogel en Habitatrichtlijn heeft Nederland de verplichting om Natura 2000-gebieden in stand te houden. Stikstofdepositie is een van de belangrijkste bedreigingen voor de kwaliteit van deze gebieden. Vooral droge en vochtige heidegebieden, schrale graslanden op zandgrond en eiken- en dennenbossen lijden eronder.

De totale stikstofemissies in Nederland zijn sinds 1990 afgenomen tot minder dan de helft van de oorspronkelijke waarden doordat binnen alle sectoren – van verkeer tot handel tot landbouw – maatregelen zijn genomen om de stikstofbelasting te beperken. Sinds 2010agneert deze daling echter omdat de landbouw de uitstoot niet verder weet te reduceren.

In juli 2021 is de Wet stikstofreductie en natuurverbetering in werking getreden. De wet vereist dat in 2025 minimaal 40 procent van de stikstofgevoelige natuur in Natura 2000-gebieden een gezond stikstofniveau heeft, in 2030 minimaal de helft en in 2035 minimaal driekwart. Vooral snog worden deze doelen niet gehaald. Het boek *Stikstof, de sluipende effecten op natuur en gezondheid* (Stichting Biowetenschappen en Maatschappij, 2021) gaat uitgebreid in op de stikstofproblematiek, de stikstofkringloop, de effecten en het beleid tot dan toe.

KUNSTENAARSOOG – I think...

– Nora van Klingeren

 p de reis met het zeilschip de Beagle maakte Charles Darwin een schets om zijn evolutietheorie te illustreren. Hij zag het leven als een stamboom met takken die zich door natuurlijke selectie handhaven, aanpassen of afsterven. *I think...* staat er in zijn aantekeningen. Uiteindelijk werd de stamboom steeds gedetailleerder ingevuld en werd het een *fact of life*, een stamboom waarop op basis van fysieke kenmerken alle soorten en ondersoorten met elkaar in verband gebracht en gerangschikt zijn.

Het effect van klimaatverandering, en vooral ook de invloed van stikstof, zorgt ervoor dat takken uitsterven. Bijvoorbeeld de dunbekwulp, die op 18 november 2024 uitgestorven is verklaard. En zo zijn er vele soorten. Darwin dacht: *I think...*, maar denken wij nog wel?

[pag.104] Het kleurrijke deel symboliseert de rijkdom en diversiteit van het leven op aarde. Het vlakkere gedeelte met veel grijs en wit verwijst naar de afsterving van organismen en koraal.

– Nora van Klingeren, 2025, *wol en zijde samen vervult*



6 De mondiale fosforkringloop

6.1 Zonder fosfor geen leven

– Caroline Slomp

Al het leven op aarde heeft het element fosfor nodig. Die stof is altijd beperkt aanwezig geweest. Totdat de mens dit element is gaan winnen uit mijnen voor de fabricage van kunstmest. Daardoor is te veel fosfor beschikbaar gekomen op aarde en is de fosforkringloop verstoord geraakt. Dit zorgt voor flinke milieuproblemen, zoals algenbloei en zuurstofloosheid in zoete en zoute wateren. Tegelijkertijd is de voorraad gemakkelijk winbare fosfaatertsen eindig. Dat betekent dat we de fosforkringloop weer moeten sluiten.

Fosfor (P) is voor planten en dieren, inclusief de mens, een essentieel element. Het zit in DNA, is cruciaal voor onze energiehouding en zit in de botten en tanden van dieren. Dieren nemen het op uit de voeding en hebben niet snel een tekort. Maar planten worden wel vaak in hun groei beperkt door fosforgebrek. Daarom bemesten boeren hun akkers en krijgen ze meer gewasopbrengst. Maar als een deel van de fosfor in die meststoffen weglekt naar rivieren, meren en de zee kan dat algenbloei stimuleren en zorgen voor problemen met de waterkwaliteit, de zogeheten eutrofiëring.

Het element fosfor werd in de zeventiende eeuw maar heel toevallig ontdekt door de Duitse handelaar en alchemist Hennig Brand. Hij

zocht jarenlang naar een manier om goud te maken en kookte daarvoor grote hoeveelheden urine in. Brand vond geen goud maar wel een witte substantie die licht gaf. Hij noemde de stof *phosphoros*, Grieks voor 'lichtdrager'.

Witte fosfor, zoals Brand die vond, is giftig en brandbaar. Vroeger werd het in lucifers verwerkt maar vanwege de giftigheid al gauw vervangen door andere verbindingen. Witte fosfor wordt ook gebruikt in oorlogswapens. Op stranden van de Oostzee spoelt af en toe witte fosfor uit munitie van de Tweede Wereldoorlog aan. Soms verwarren mensen de fosfor, die een gelige kleur kan hebben, met barnsteen. Ze rapen het op en stoppen het in hun broekzak. Dat is gevaarlijk want als fosfor droog is, ontbrandt het spontaan en kun je ernstige brandwonden oplopen. Daardoor heet het ook wel 'element van de duivel'.

Het meeste fosfor komt voor als fosfaat

Gelukkig is fosfor in de natuur vooral aanwezig als fosfaat. Dat is een verbinding van een fosforatoom met vier zuurstofatomen: PO_4^{3-} . Het leven op aarde kan niet zonder fosfaat als bouwsteen. Anders dan stikstofverbindingen heeft fosfaat in organismen en in de natuur nagenoeg altijd dezelfde vorm. Fosfaat is alleen in opgeloste en vaste vorm aanwezig en niet, zoals stikstof, ook als gas. Lastig genoeg zit het meeste fosfaat op aarde opgesloten in mineralen in gesteenten en bodems, vooral als apatiet, een calciumfosfaatmineraal.

Planten kunnen het fosfaat in apatiet en andere mineralen niet direct opnemen. Daarvoor moeten de mineralen deels oplossen in water oftewel verweren, en dat gaat niet altijd zo gemakkelijk. Maar gelukkig hebben veel landplanten daar iets op gevonden: ze werken daarvoor nauw samen met specifieke schimmels, zogeheten mycorrhiza, die met zuur fosfaatmineralen kunnen oplossen. De schimmels leveren zo fosfaat aan de plant in ruil voor koolstofrijke energieverbindingen. Daarmee hebben ze allebei voordeel. Ook bacteriën kunnen fosfaat uit mineralen mobiliseren. Fosfaat uit dood plantenmateriaal komt weer in opgeloste vorm vrij als het wordt afgebroken door micro-organismen en kan dan opnieuw gebruikt worden door planten. Omdat opgelost fosfaat in de bodem gemakkelijk bindt aan ijzer, aluminium of calcium, en ook met regenwater kan wegspoelen, moet de plant er snel bij zijn. Waar dat lukt, zie je een sterke kringloop van fosfaat in

de vegetatie. Zo kun je in tropische regenwouden op fosfaatarme bodems toch een weelderige plantengroei aantreffen: het meeste fosfaat zit in de planten en wordt hergebruikt.

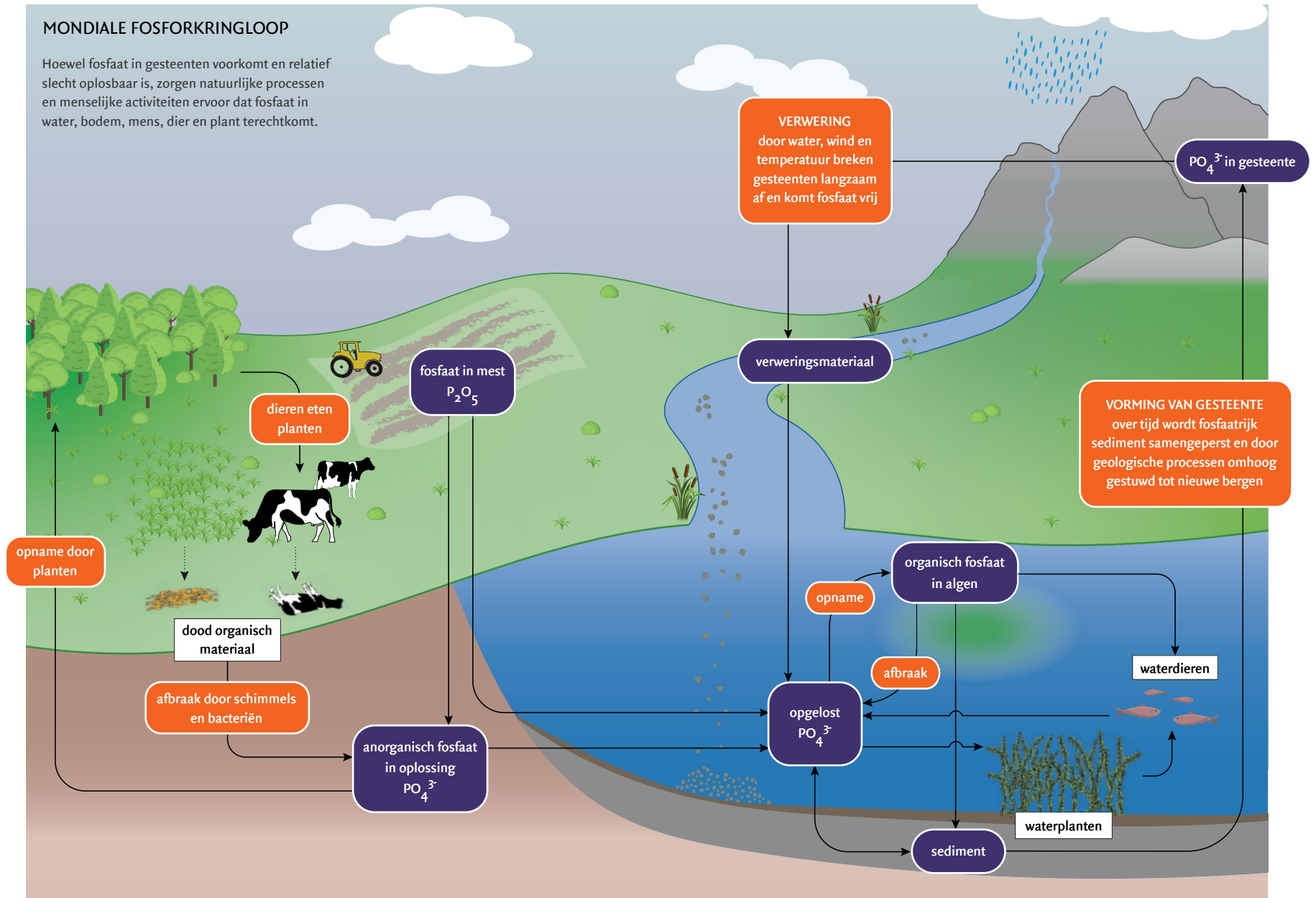
Fosfaat dat uit de bodem weglekt, kan in rivieren, meren en de zee terecht komen. De algen in die wateren hebben, behalve licht, ook weer opgelost fosfaat nodig voor hun groei. De concentraties opgelost fosfaat in niet-vervuilde oppervlaktewateren zijn vaak heel laag (minder dan 0,03 milligram per liter). Toch groeien er vaak algen. Dat gebeurt wanneer het fosfaat uit stervende algen direct door andere algen wordt opgenomen. Ook hier zie je een kringloop met hergebruik van fosfaat. Dat je algen in oppervlaktewateren vindt, is in principe goed: algen staan aan de basis van het voedselweb. Zonder algen geen krabben en geen kreeftjes, geen mosselen en geen vissen. Zonder fosfaat geen planten en geen leven, ook niet voor ons.

De mondiale fosforkringloop

Ook op wereldniveau is er een fosforkringloop (zie figuur 19). Fosfor komt als fosfaat van het land de zee in, vooral via rivieren maar ook via grondwater en, in droge gebieden, via woestijnstof. Maar het fosfaat verdwijnt ook weer uit de zee doordat het neerkomt op de zeebodem. In de oceaan dwarrelen altijd resten van dode algen als sneeuw naar beneden. Een klein deel bereikt de zeebodem en wordt daar als organisch materiaal begraven of door bodemdieren en micro-organismen afgebroken. Bij dat laatste proces komt opgelost fosfaat vrij, dat kan neerslaan in de vorm van fosfaatmineralen. Omdat de aardkorst, inclusief de zeebodem, over periodes van miljoenen jaren voortdurend verandert door platentektoniek kan wat eerst zeebodem was gebergte worden. Tijdens dat proces veranderen de afzettingen qua structuur en samenstelling, afhankelijk van onder andere hoge temperaturen en druk. Zo vind je in het kalksteen van de krijtrotsen van Dover nog herkenbare fossielen maar zie je die in marmer, een gesteente dat diep in de aarde gevormd wordt uit kalksteen, niet meer terug. Uiteindelijk komen fosfaatmineralen uit de zeebodem via gebergtevorming weer op het land terecht, waar ze met hulp van schimmels en micro-organismen weer vrijgemaakt worden voor planten en uiteindelijk dieren. De fosforkringloop op aarde is daarmee gesloten.

MONDIALE FOSFORRINGLOOP

Hoewel fosfaat in gesteenten voorkomt en relatief slecht oplosbaar is, zorgen natuurlijke processen en menselijke activiteiten ervoor dat fosfaat in water, bodem, mens, dier en plant terecht komt.



Fosfor begraven in de zeebodem

Een fosfaatmolecuul dat de oceaan bereikt, blijft daar gemiddeld tussen de tien- en veertigduizend jaar voordat het in de zeebodem verdwijnt. Het meeste fosfor wordt begraven in de vorm van organisch fosfaat en apatiet, een calciumfosfaat ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$). Dit ontstaat uit opgelost fosfaat dat vrijkomt uit organisch materiaal in de zeebodem en neerslaat met calcium in zeewater. De vorming gaat langzaam en de hoeveelheden apatiet in de zeebodem zijn vaak laag. Minder dan 0,05 procent van de oceaanbodem bestaat uit fosfor. Toch is die 'diffuse' begraving mondiaal het belangrijkste proces waarmee fosfor uit het systeem verdwijnt, het totale oceaanoppervlak is immers erg groot. Opgelost fosfaat kan in de zeebodem ook verbindingen aangaan met ijzer, het bindt bijvoorbeeld sterk aan ijzeroxiden. In sommige delen van de zee wordt het fosfaat in die vorm ook begraven. Maar, waar het zeewater of de zeebodem zuurstofloos is, worden de ijzeroxiden omgezet naar mineralen van ijzersulfiden. In dat laatste geval komt het fosfaat weer in oplossing. Deze processen vind je overigens ook in bodems van meren en rivieren. Aan een zeebodem is vaak te zien of dat soort reacties optreden: ijzeroxiden zijn bruin en vind je vaak dicht op de scheidslijn tussen sediment en water als daar zuurstof aanwezig is. Ijzersulfiden kleuren een (zee)bodem vaak zwart.

In kustgebieden met brak (licht zout) water ontstaan minder ijzersulfiden dan in gebieden met zeewater omdat in brak water minder sulfaat zit dat omgezet kan worden naar sulfide. Het ijzer dat 'overblijft' kan dan met fosfaat neerslaan in de vorm van een ijzerfosfaatmineraal. Het bekendste voorbeeld van zo'n mineraal is vivianiet. Het bijzondere van vivianiet is dat het bij blootstelling aan zuurstof een felblauwe kleur krijgt. Vivianiet werd door schilders als Rembrandt van Rijn en Johannes Vermeer weleens als pigment gebruikt. Maar gelukkig niet al te vaak, want als vivianiet volledig oxideert, wordt het kleurloos. Als je met vivianiet schildert, kan een blauwe hemel door oxidatie mettertijd veranderen in een grauwe lucht. Niet aan te raden dus.

[pag. 108-109] Figuur 19 *De mondiale fosforkringloop* (© Stichting BWM).



Fosforiet (© Shutterstock).

Een diversiteit aan ecosystemen in de oceaan

De oceaan is groot en er is veel ruimtelijke variatie in chemie en biologie, zowel in kustgebieden als in de diepzee. Binnen die variatie zijn veel bijzondere lokale en regionale ecosystemen te vinden waar processen plaatsvinden die geen effect hebben op de mondiale fosfaatbalans (zie figuur 19) maar daarmee niet minder belangrijk zijn.

Zo zijn algen niet de enige bewoners van de zee. Er is een enorme variatie aan kleine en grote dieren. Als die sterven, zinken en op de zeebodem terechtkomen, heeft dat grote gevolgen (zie paragraaf 6.2). Er zijn ook lokale en regionale processen die om hele andere redenen van belang zijn. Zo is er aan de oostkant van de Stille Oceaan en langs de kust van Noord- en Latijns-Amerika een extra sterke opwaartse stroming van nutriëntenrijk zeewater. In het oppervlaktewater zorgt dit voor exceptionele algengroei. Waar dat materiaal de zeebodem bereikt en fosfaat vrijkomt, zorgt dat lokaal voor sterke apatietvorming. Op sommige plekken kan het sediment zo aangroeien met fosfaat dat het 'fosforiet' genoemd wordt. Je kunt dat soort afzettingen ook op het land vinden. In dat geval zijn het versteende fosforietafzettingen die in het geologische verleden op de zeebodem gevormd zijn, miljoenen jaren geleden. Omdat het fosfaat in fosforietgesteente zo geconcentreerd is, is het een aantrekkelijk materiaal voor gebruik in landbouw en industrie.

Verstoring van de fosforkringloop door de mens

Aan het begin van de negentiende eeuw was de mondiale fosforkringloop nog gesloten. Gewassen groeiden met fosfaat dat van nature in de bodem zat, aangevuld met fosfaat uit dierlijke mest en menselijke urine en uitwerpselen. Maar met de snelle bevolkingsgroei en de toegenomen vraag naar voedsel in de negentiende eeuw, steeg de vraag naar fosfaat als meststof enorm. Eerst zochten mensen manieren om de fosfaatkringloop beter te sluiten. Ze gingen bijvoorbeeld de as van botten als bron van meststof gebruiken (zie kader Van soldaat tot bron van fosfaat). Maar ze keken ook verder buiten de deur.

Van soldaat tot bron van fosfaat

– Jelle Reumer

De fosfaatkringloop kende ooit een bizarre toepassing: het gebruik van mensenbotten als kunstmest. De botten en tanden van mens en dier bestaan grotendeels uit het mineraal hydroxyapatiet ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$), een vorm van calciumfosfaat. Ongeveer 70 procent van het gewicht van onze botten bestaat uit dit apatiet, dat onze botten en tanden sterk maakt. Maar fosfaat is ook belangrijk voor de groei van planten en dus voor landbouwgewassen. Bijgevolg zijn beenderen al eeuwenlang in gebruik als meststof in de akkerbouw. Dat heeft in de eerste helft van de negentiende eeuw tot een even bijzondere als bizarre nijverheid geleid. De stoffelijke resten van de duizenden gesneuvelden van de vele napoleontische veldslagen bleken aantrekkelijke handelswaar. Ze werden op industriële schaal opgegraven en fijngemalen tot kunstmest en filtermateriaal.

Tijdens de slag bij Waterloo in 1815 sneuvelden ongeveer twintigduizend manschappen en vele duizenden paarden. De meeste gesneuvelden werden ter plekke van hun kleding ontdaan en in massagraven begraven, dikwijls samen met de paarden. Tegenwoordig vinden archeologen ter plekke slechts heel af en toe een skelet. Als dat gebeurt, is dat zo uitzonderlijk dat het de krant haalt. Het antwoord op de vraag waar al die duizen-



Slag bij Waterloo, 18 juni 1815. Geschilderd door Jan Willem Pieneman in 1824. Te zien in het Rijksmuseum in Amsterdam (© Publiek domein).

den geraamten gebleven zijn, stond op 29 november 1822 in de *Groninger Courant*. ‘In den omtrek van Leipzig, Austerlitz, Waterloo en van alle plaatsen waar gedurende de bloedige oorlogen de grootste veldslagen voorvielen, zijn al de beenderen, van den held en van het paard dat hij bereed, opgezocht [en] aan den landman verkocht om zijne landerijen te mesten.’

De skeletten werden opgegraven en fijngemalen en ófwel direct over de akkers uitgestrooid als beendermeel, ófwel eerst tot beenderkool gebrand om bij de suikerraffinage als filtermateriaal te dienen. De behoefte aan kunstmest en beenderkool kwam voort uit handelsblokkades waardoor de aanvoer van rietsuiker uit het Caribisch gebied stagneerde. Hierdoor steeg de vraag naar Europese bietsuiker, de teelt van suikerbieten greep snel om zich heen. Als gevolg hiervan dreigden akkers uitgeput te raken. Bovendien moest de bruine bietenmelasse worden gefil-

terd om er witte suiker van te kunnen maken. Daartoe gebruikte men beenderkool, met een Latijns woord ook wel *spodium* genoemd. Overal in Europa verrezen suikerraffinaderijen en in de buurt daarvan werden speciale stenen ovens gebouwd om botten te verkolen op dezelfde manier als waarop houtskool werd en wordt gemaakt. Nadat het spodium als filtermateriaal was uitgewerkt, werd het alsnog gebruikt als meststof. Zo kwamen, al dan niet via een tussenstap in de suikerraffinage, de fijngemalen stoffelijke resten van tienduizenden betreurde gesneuvelden op de akkers terecht.

Het bleek een lucratieve handel, vergelijkbaar met die in guano (vogelmest). Alleen al in 1822 werd ruim 36.000 kubieke meter beenderen naar Engeland verscheept en over Engelse akkers uitgestrooid. In 1834 werd 350.000 kilo beenderen vanuit België naar Frankrijk geëxporteerd, in 1835 was dat al twee miljoen kilo en in 1836 drie miljoen kilo. Meestal mensenbotten, rijk aan fosfaat.

Guano en fosforiet als meststof

Ook guano werd als meststof ontdekt. Guano bestaat uit poep van dieren, zoals zeevogels en pinguïns. Het was in die tijd op veel rotsen en eilanden langs de kusten van Peru en Afrika te vinden. Guano is rijk aan stikstof, fosfaat en kalium, elementen die alle drie essentieel zijn voor planten. Vanaf de negentiende eeuw werd de guano door zeevaarders geoogst en geroofd. Op Dyer Island, voor de kust van Zuid-Afrika, lag destijds een laag van 6 meter pinguïnpoe; het eiland bestaat nu uit kale rotsen. De wereldwijde guanovoorraden waren eindig en konden op termijn niet voldoen aan de vraag.

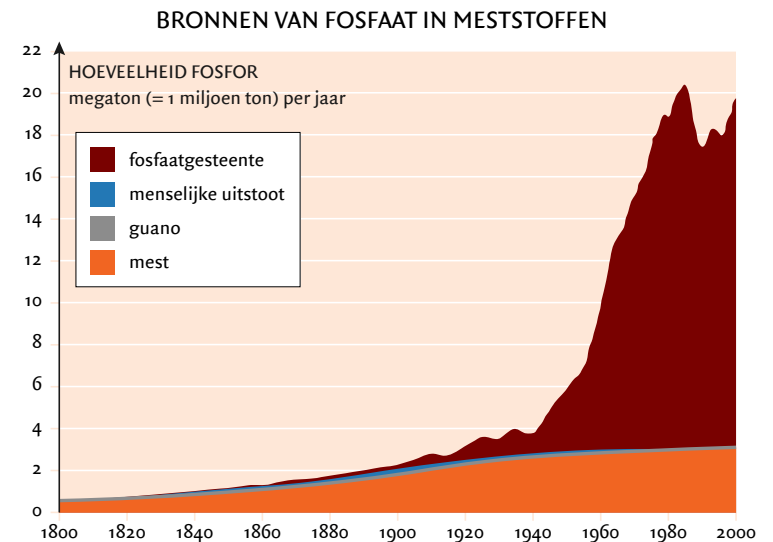
De grote verandering kwam met de grootschalige productie van kunstmest (zie hoofdstuk 5). Het fosfaat hierin komt uit fosforietafzettingen, waarbij het erts wordt opgelost met zwavelzuur. Uit het fosforzuur dat daarbij ontstaat, kun je geconcentreerde fosfaatmest (P_2O_5) maken. Het gebruik van fosfaatmest steeg na die ontdekking snel, vooral na 1950 (zie figuur 20). Ook werden op grote schaal fosfaathoudende wasmiddelen gemaakt. Met de opkomst van de wc, het met wa-

ter gespoelde toilet, werden urine en uitwerpselen niet meer als kostbare goederen behandeld maar simpelweg doorspoeld.

Eutrofiëring door mest en afvalwater

Fosfaat stroomde uit de bemeste akkers en velden naar het oppervlaktewater. Ook het fosfaatrijke afvalwater kwam daar terecht. Dat zorgde al snel voor grote waterkwaliteitsproblemen in rivieren, meren en zeeën, zoals grote algenbloei en stankoverlast als de algen gingen rotten. Tot omstreeks 1970 ontkende de wasmiddelenindustrie nog dat fosfaat de oorzaak van de problemen was tot in een veldexperiment het verband tussen de toevoeging van fosfaat en sterke algengroei onomstotelijk werd bewezen.

Dankzij betere afvalwaterzuivering en het gebruik van fosfaatvrije wasmiddelen komt er nu, vooral in Europa en Noord-Amerika, minder fosfaat uit afvalwater in het oppervlaktewater terecht. Maar wat het gebruik van meststoffen betreft is de praktijk weerbarstiger. Het blijkt



Figuur 20 Bronnen van fosfaat in meststoffen 1800-2000 (bron: Dana Cordell, Jan-Olof Drangert and Stuart White, *The story of phosphorus: Global food security and food for thought* (2009), <https://doi.org/10.1016/j.gloenucha.2008.10.009> © Stichting BWM).

moeilijk om het mestgebruik op akkers en grasland voldoende terug te dringen, uit zorg over een daling van de gewasopbrengst. Omdat het waterbeheer op landbouwgronden meestal gericht is op snelle afvoer, spoelt nog steeds veel fosfaat, zowel in opgeloste als vaste vorm, van het land af. In waterbodems van meren is ook veel fosfaat opgeslagen dat nog lange tijd vrij kan komen. En ook grondwater bevat fosfaat. Dat grondwater is vaak al jaren onderweg en draagt dus de geschiedenis van de fosfaatbemesting met zich mee. Dus zelfs als de fosfaatbron weg is, kunnen meren en grondwater nog decennialang fungeren als bron van fosfaat voor rivieren en zeeën.

De weg naar herstel van de waterkwaliteit

Ecosystemen kunnen veranderingen vaak wel opvangen, maar ze kennen ook kantelpunten. Helder water kan bij een hoge toevoer van nutriënten plotseling troebel worden. Dit proces is niet altijd makkelijk terug te draaien: het ecosysteem kan een kantelpunt gepasseerd zijn, waarna je niet zomaar terug kunt naar de oude situatie. Dit kan, afhankelijk van het ecosysteem, allerlei oorzaken hebben. Als vissen de bodem omwoelen, waardoor de daar opgeslagen nutriënten steeds maar vrijkomen, en de watervlooiën opeten, waardoor algen welig kunnen gaan groeien, kan het nodig zijn die vissen te verwijderen. In Nederlandse binnenwateren is om die redenen regelmatig de brasem weggevangen. In kustgebieden waar veel fosfaat de zee in lekt, kan een kantelpunt bereikt worden wanneer het diepere water zuurstofloos en rijk aan waterstofsulfide (H_2S) wordt. Waterstofsulfide ruikt naar rotte eieren en is giftig, dus is sowieso een stof om te vermijden. Maar waterstofsulfide zorgt er ook voor dat er minder fosfaat in de zeebodem begraven wordt. Dat komt doordat het sulfide reageert met ijzer in de bodem, zodat dit niet meer kan binden met fosfaat. Ook komt er meer fosfaat uit rottend organisch materiaal vrij. Het fosfaat wordt dan steeds opnieuw gebruikt door algen en cyanobacteriën (blauwalgen), die op hun beurt door hun eigen rottingsproces de zuurstofloosheid in het diepere water in stand houden. Het herstel van een systeem dat gevangen zit in zo'n vicieuze cirkel met een versnelde fosfaatkringloop is lastig.



Cyanobacteriën veroorzaken blauwgroene kleuring in de Baltische Zee (© ESA).

De Oostzee als voorbeeld

Een voorbeeld van zo'n systeem is de Oostzee. Omdat de Zweden in 1870 al begonnen met het meten van zuurstofconcentraties in zee weten we dat er rond 1900 in vrijwel de hele Oostzee zuurstof bij de bodem aanwezig was. Rond 1950 veranderde dat. In een steeds groter gebied werd het water waar het dieper was dan 70 meter zuurstofloos en rijk aan waterstofsulfide. Sindsdien zie je 's zomers in de hele Oostzee grote hoeveelheden cyanobacteriën (blauwalgen).

In 1980 besloten de landen rondom de Oostzee om maatregelen te nemen en de toevoer van nutriënten sterk terug te brengen. Hoewel dat inmiddels vrij goed is gelukt, zal het vanwege de lange verblijftijd van fosfaat in de zee en het sterke hergebruik door cyanobacteriën naar verwachting nog vele decennia duren voordat de Oostzee zich hersteld zal hebben.

De opwarming van de aarde speelt hierin ook een rol: zuurstof lost minder goed op in warm water dan in koud water. Verder heeft warm water een lagere dichtheid en drijft het op koud water. Dit vertraagt het transport van zuurstof in de Oostzee van het oppervlaktewater naar het diepere water, en daarmee het herstel van de waterkwaliteit. Om de waterkwaliteit te verbeteren, moet je dus ook rekening houden met andere factoren dan alleen de nutriënten-huishouding.

Opnieuw de fosforkringloop sluiten

Fosfor is onmisbaar voor de landbouw en ook voor industriële toepassingen zoals batterijen. Maar de voorraad gemakkelijk winbare fosforietertsen is eindig. Op dit moment komt kunstmest vooral uit mijnen in Marokko, China en de Verenigde Staten. Het is onduidelijk hoe groot de mondiale winbare fosfaatvoorraad in geologische afzettingen precies is. Maar dat er bij ongewijzigd beleid, binnen decennia tot een eeuw, fosfaattekorten zullen optreden, is vrijwel zeker.

Dit is een vreemde situatie: er is te weinig fosfaat voor de landbouw, maar in onze wateren hebben we te veel fosfaat. Soms gaan er dan ook stemmen op om het fosfaat terug te winnen uit die wateren of uit de zeebodem. Maar dat is lastig: de fosfaatconcentraties zijn te laag. Het is wel mogelijk om de fosforkringloop weer te sluiten, al is ook dat niet gemakkelijk. Daarvoor zijn allerlei maatregelen nodig en op termijn zelfs onvermijdelijk.

Alle verspilling van fosfaat, bijvoorbeeld voor de teelt van biobrandstoffen, moet worden vermeden. Fosfaat kan teruggewonnen worden uit dierlijke mest, bijvoorbeeld door het in speciale reactoren om te zetten in het fosfaatmineraal struviet. Dat heeft als voordeel dat het fosfaat daarna gerichter in de landbouw kan worden ingezet. Veel beter nog is het stimuleren van een circulaire landbouw, met maar heel beperkt gebruik van kunstmest, geen import van veevoer en een lokale of regionale bestemming van de producten en gewasresten. Ook is een verschuiving naar vooral plantaardige productie nodig. De reden is dat voor een vegetarisch dieet veel minder fosfaatmeststof nodig is dan voor een dieet met vlees. Als de bewoners van India, die meestal vegetarisch eten, massaal zouden overschakelen op het eten van vlees zou dat zorgen voor een drie keer hoger gebruik van fosfaatmeststoffen.

Mensen nemen maar een klein deel van het fosfaat dat in hun voedsel zit in hun lichaam op. Het meeste fosfaat wordt uitgescheiden, vooral via urine maar ook in de vaste uitwerpselen. Grote steden zijn grote fosfaatbronnen en het terugwinnen van dat fosfaat zou meer prioriteit kunnen krijgen. Er zijn technieken om fosfaat terug te winnen uit zuiveringsslib, bijvoorbeeld als het al eerder genoemde struviet en vivianiet, maar meestal wordt het slib samen met het fosfaat ergens gestort. Afvalwater kan het beste zo dicht mogelijk bij de bron gezuiverd worden. Ook vanwege toenemende watertekorten wereldwijd zou het verstandig zijn om met water gespoelde wc's te vervangen door systemen die het fosfaat direct opvangen. Naar schatting wordt wereldwijd maar 10 procent van het fosfaat uit afvalwater hergebruikt. Dat kan en moet veel beter.

Zoals de Franse schrijver Victor Hugo het in de roman *Les Misérables* in 1887 al schreef: 'Mest [...] is goud' en 'Alle menselijke en dierlijke mest die de wereld verspilt, zou, als het zou worden teruggegeven aan het land in plaats van in het water te worden geworpen, voldoende zijn om de wereld te voeden'.

6.2 Het belang van walvissen

– Frank Zanderink, Nynke Osinga en Caroline Slomp

Onze aarde bestaat voor 72 procent uit oceanen. Die bevatten ook een zeer groot deel van de mondiale biodiversiteit. Maar we weten veel meer over het leven op het land dan het leven in zee. Het is belangrijk om ook de mariene ecologische processen goed te doorgronden, omdat daar mede een sleutel ligt voor het keren van de achteruitgang van biodiversiteit en klimaatverandering.

Het huidige klimaatbeleid is sterk gericht op het terugdringen van de concentratie koolstofdioxide in de dampkring. Oceanen spelen een cruciale rol in die reductie. Fytoplankton zoals algen en cyanobacteriën, zet koolstofdioxide, water en nutriënten in de oppervlaktewateren om in organische stof en zuurstof. Het vormt daarmee niet alleen de basis van het voedselweb maar beïnvloedt ook de uitwisseling van koolstofdioxide en zuurstof met de atmosfeer.

Walvisachtigen zoals blauwe vinvissen, potvissen, dolfijnen en

bruinvissen, hebben hierin een belangrijke rol. Ze foerageren veelal in de diepte en bij het omhoog zwemmen nemen zij in hun kielzog nutriënten mee. Daarnaast komt de uitgescheiden walvismest (6000 tot wel 8000 kilogram mest per dag per blauwe vinvis) aan het wateroppervlak vrij door de lagere waterdruk daar én omdat walvispoep drijft. Walvissen transporteren dus nutriënten in verticale richting naar het wateroppervlak. Dit fenomeen staat bekend als de *whale pump*.

De poep die potvissen uitscheiden bevat tot wel tien miljoen maal de hoeveelheid ijzer die je vindt in eenzelfde hoeveelheid zeewater. Ijzer is een essentieel nutriënt voor fytoplankton, het draagt bij aan de opbouw van bladgroen waarmee fytoplankton met behulp van zonlicht koolstofdioxide omzet in zuurstof en suikers. Ook het fosfaat in de walvispoep – in een concentratie die zehonderdmaal hoger ligt dan die in het omgevingswater – kan het fytoplankton goed gebruiken voor de groei, evenals het stikstof – circa 550 maal de hoeveelheid van het omgevingswater. Groei van walvispopulaties leidt tot een hogere concentratie van fytoplankton in de zee en zet daarmee de koolstofdioxide-zuurstofpomp in een hogere stand. Door hun trektochten door de oceanen verplaatsen walvissen ook nutriënten naar zeegebieden waar minder voedingsstoffen in het water zitten.

Whale fall

Als een walvis sterft en het lichaam naar de bodem zinkt, gaan er weer nutriënten terug naar de zeebodem. Zo'n *whale fall* bezorgt organismen van de diepzee op zo'n plek jarenlang een feestmaal. De diversiteit aan bodemdieren en micro-organismen is daar vele malen groter dan in de nabije omgeving. Ook zal op zo'n plek de koolstof, stikstof- en fosfaatbalans radicaal veranderen en kan er, door de afbraak van het walvisvlees, zuurstofloosheid optreden. Walvisbotten zijn vaak nog decennialang op de diepzeebodem terug te vinden.

Op mondiale schaal tikt dit niet aan: er sterven jaarlijks naar schatting 69.000 walvissen. Als je uitrekent hoeveel koolstof, fosfaat en stikstof daarmee jaarlijks naar de diepzee getransporteerd wordt, is dat veel minder dan 0,1 procent van de hoeveelheid in zinkend algenmateriaal. Maar ecologisch zijn dit soort processen natuurlijk wel van groot belang omdat walviskarkassen op de zeebodem de biodiversiteit in de diepzee vergroten door het vormen van jarenlang plaatselijke nutriëntrijke oases.



Een potvis duikt naar de diepte (© Frank Zanderink).

6.3 Voedingstoffen van land naar zee uit balans

– Lex Bouwman

Stikstof en fosfaat die weglekken uit de voedselketen belasten het zoete en zoute water, met algenbloei en zuurstofloosheid als gevolg. Daarbij houden stuwdammen het element silicium (Si) tegen, waardoor de verhouding tussen stikstof, fosfaat en silicium verandert en kiezelalgen in oceanen – van groot belang voor het klimaat – minder goed gedijen.

Stikstof en fosfaat spelen een belangrijke rol in de mondiale voedselproductie en consumptie, en zijn tegenwoordig in verhoogde concentraties terug te vinden in zoete en zoute wateren over de hele wereld. De eerste en belangrijkste oorzaak is het wereldwijde gebruik van kunstmest voor de voedselproductie. Gemiddeld nemen gewassen maar veertig tot vijftig procent van de stikstof en fosfaat uit kunstmest op. In de dierlijke productie is de opname slechts vijf tot vijftien procent. Het niet opgenomen stikstof en fosfaat hoopt zich op in de bodem of spoelt uit naar sloten, rivieren en grondwater, waar het voor problemen zorgt. In sloten, rivieren en zeeën zorgt deze overmaat



Kwekerij van zeebrasem en zeebaars (© Shutterstock).

voor eutrofiëring: algenbloei en later zuurstofloosheid. In grondwater leidt het tot te hoge nitraatconcentraties waardoor het grondwater minder geschikt is als drinkwater.

Afvalwater en aquacultuur

Een tweede route loopt via het afvalwater van huishoudens, dat gezuiverd of ongezuiverd op het oppervlaktewater wordt geloosd. In veel West-Europese landen zijn bijna alle huishoudens aangesloten op een rioolsysteem met geavanceerde zuivering, dat tot 90 procent van de nutriënten verwijdert. In andere delen van de wereld neemt het aantal aansluitingen op riolering wel toe, maar blijft de afvalwaterzuivering vaak achter. Mondiaal wordt slechts 10 tot 20 procent van de nutriënten uit afvalwater verwijderd.

Een derde route, die de laatste tientallen jaren steeds belangrijker wordt, is aquacultuur, het kweken in water. De wereldwijde teelt van vis, schelp- en schaaldieren neemt snel in omvang toe omdat visserij niet aan de toenemende wereldvraag kan voldoen. De nutriënten in de uitwerpselen van vissen, schelp- en schaaldieren komen vaak direct in het omliggende zoete en zoute water en sediment terecht. Voorbeelden zijn de intensieve productie van zalm in estuaria in Chili en fjor-

den in Noorwegen, visproductie in de Mekongdelta en de garnalenteelt in Indonesië en andere landen in Azië (zie ook het boek *Waterlandbouw*. Stichting Biowetenschappen en Maatschappij, 2023). Op deze manier heeft menselijk handelen ervoor gezorgd dat de uitstroom van stikstof en fosfaat naar de hydrosfeer – rivieren, meren, zeeën – enorm is toegenomen.

Verstoring van de siliciumbalans

Niet alleen de toename van stikstof en fosfaat kan schadelijk zijn voor wateren, ook de verstoring van de verhouding tussen stikstof, fosfaat en silicium, eveneens een belangrijke voedingstof voor planten. Het element silicium is een belangrijke component van de aardkorst en komt vrij via vertering van gesteenten. In water wordt silicium gebruikt door kiezelalgen, die 50 procent van de biomassa in oceanen vormen en een grote rol spelen in de mondiale koolstofkringloop (zie hoofdstuk 3). Kiezelalgen zijn hoogwaardig voedsel voor zoöplankton en die weer voor organismen hoger in het voedselweb, zoals vissen en zoogdieren waaronder baleinwalvissen.

Vooral door het bouwen van dammen in rivieren, samen met de toenemende afvoer van stikstof en fosfor, treedt versnelde groei van kiezelalgen op in rivieren en stuwmeren. Veel van hun afbraakproducten, die rijk zijn aan silicium, bezinken en blijven achter in het sediment van stuwmeren, en worden niet verder naar de kust en de oceanen vervoerd. Dit heeft grote gevolgen, omdat hierdoor de productie van kiezelalgen in kustwateren wereldwijd afneemt, terwijl veel andere algensoorten zoals dinoflagellaten het juist goed doen door de overvloed van fosfor en stikstof. Deze algensoorten geven meer overlast door de vorming van uitgestrekte algenmatten, schuim en stank, en vormen minder hoogwaardig voedsel voor het zoöplankton dan kiezelalgen. Daarbij komt meer van hun biomassa in sediment terecht, wat kan leiden tot zuurstoftekorten in het water. Sommige algensoorten zijn zelfs giftig voor dieren en kunnen grote schade aanbrengen aan bijvoorbeeld aquacultuur.

De toenemende nutriëntenstroom en de verstoring van de siliciumkringloop leiden dus tot verstoringen aan de onderkant van de voedselketen en belemmeren het functioneren van ecosystemen in zoet en zout water.



KUNSTENAARSOOG – Aegir en de algen

– Nora van Klingeren

Soms is het goed om letterlijk afstand te nemen. NASA-beelden van de Oostzee laten spiraalvormige samenklontering van cyanobacteriën (blauwalgen) zien. De spiraal is een van de oudste pictogrammen die de mens gebruikte om het universum en de primaire beweging van het heelal mee aan te duiden. Omdat de spiraal geen begin en geen einde heeft, verbeeldt zij een continuüm. De spiraal in de Oostzee heeft niets van deze schoonheid. Het is de neerwaartse spiraal van het leven in zee.

Kan Aegir, de Noordse god van de zeevaart, niets doen? Heeft hij net als Odin één oog voor zicht en één oog voor kennis? Zie je dan nog wel diepte? Is de peilloze diepzwarte pupil te zien als toch het laatste stukje van de neerwaartse spiraal, zoiets als kijken in de loop van het pistool van 007? Of denk je dat het niet zo'n vaart loopt?

[LINKS] De Oostzee, waarin de strepen van de algen zichtbaar zijn en waar het oog van Aegir zichtbaar is met zijn speer.

– Nora van Klingeren, 2025, wol en zijde samen vervult.

EPILOOG

De ontstaansgeschiedenis van de aarde heb ik altijd moeilijk kunnen bevatten. ‘Planeten worden gevormd in donkere koude wolken in de ruimte’, lees ik in hoofdstuk 1; ga er maar aan staan. Of: ‘De planeet aarde is 4,6 miljard jaar geleden ontstaan’ – wie zich een voorstelling kan maken van 4,6 miljard jaar (4.600.000.000 jaar) moet het maar zeggen. Het ontstaan van leven op aarde blijft een wonder. Maar wonderen bestaan niet in de wetenschap. Die probeert juist voor alles logische verklaringen te vinden. En met resultaat. De voorgaande hoofdstukken in dit boek getuigen van de ongelooflijke vooruitgang in de natuurwetenschappelijke inzichten bij het begrijpen van de natuurlijke systemen. Het pijnlijke is wel dat ze bijna allemaal in mineur eindigen: de mens bedreigt het voortbestaan van het leven nu zelf. Of, zoals koningin Beatrix het met gevoel voor drama in 1988 in haar kersttoespraak zei: ‘Langzaam sterft de aarde en wordt het onvoorstelbare – het einde van het leven zelf – toch voorstelbaar’. Dat gaat aardwetenschappers dan natuurlijk weer veel te ver: het leven gaat wel door, maar een verstoring van het comfortabele leven van *Homo sapiens*, ja, dat is ook voor aardwetenschappers wel voorstelbaar. De mens heeft het systeem aarde verstoord. We hebben er tegenwoordig zelfs een geologische term voor, het antropoceen, het tijdvak waarin de impact van de mens op de natuur geologische proporties aanneemt.

De wijzers staan in het rood

Voor wetenschappers is het al langer duidelijk dat de moderne samenleving te veel van de natuur vraagt. Fosfaat, stikstof, koolstof, water, zand: waar we ook kijken, de wijzers staan in het rood. En daar begint voor veel collega's ook de onzekerheid over hun rol. Wat moet ik doen met deze kennis? Welke verantwoordelijkheid heb ik? Vele wetenschapscollega's richten zich op het beter begrijpen van het systeem aarde. We hebben ze keihard nodig want er is nog heel veel dat we niet begrijpen. Andere wetenschappers zijn van mening dat het hebben van overzicht een verantwoordelijkheid met zich meebrengt. Ze zoeken, vaak naast hun fundamenteel wetenschappelijke werk, naar manieren om hun kennis (en hun ongerustheid) te delen: met het bredere publiek, met beleidsmakers en andere beslissers, of met elkaar, door inter- en transdisciplinair samen te werken. Ze gaan langs zalen met theatercolleges, ze werken mee aan podcasts of – wat conventioneeler – ze werken aan het samenvatten van wetenschappelijke bevindingen via organisaties zoals het IPCC of diens evenknie voor biodiversiteit, het Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). Dat verdient alle lof.

Wetenschappers werken ook vaak samen met vormgevers om het onbevattelijke toch begrijpelijk te maken. Een stuk voor *Nature of Science* is tenslotte een ander genre dan een stuk geschreven voor een breder publiek. Een mooi voorbeeld is *earth overshoot day*, waarin de jaarkalender gebruikt wordt om de milieudruk van de mens op de planeet als geheel, maar ook voor specifieke landen afzonderlijk, te illustreren. *Earth overshoot day* laat zien op welke dag in het jaar we meer natuurlijke hulpbronnen gebruiken dan we ons kunnen veroorloven.

Vier aardbollen nodig

Earth overshoot day viel in 2024 op 1 augustus en in 2025 al op 21 juli. De milieudruk neemt dus nog steeds toe. Bovendien is de verantwoordelijkheid voor die milieudruk ongelijk verdeeld. 'Als iedereen zou leven als in Nederland zijn er vier aardbollen nodig', berichtte de NOS op maandag 1 april 2024, en dat was geen grap. In 2023 lag de Nederlandse *Overshoot Day* nog op 12 april. Door de jaarkalender te koppelen aan de milieudruk krijg je een makkelijk te begrijpen inzicht in de overdruk op onze omgeving, maar ook in de trend: voorlopig



Klimaatdemonstranten roepen op tot actie (© Shutterstock).

loopt de milieudruk alleen nog maar op. En verder is het dus beter om niet te spreken over 'de mens' maar om in het oog te houden dat landen en hun leefstijlen een zeer verschillende verantwoordelijkheid hebben voor de problemen waar wij nu voor staan.

Soms heeft wetenschappelijke vooruitgang ook onbedoelde neveneffecten. Door de ontdekking van kunstmest is de wereldbevolking enorm toegenomen. In zestig jaar kwamen er bijna vijf miljard mensen bij, domweg omdat we, dankzij de uitvinding van kunstmest (zie hoofdstukken 5 en 6), meer mensen konden voeden en beter in staat waren om de gezondheid van de wereldbevolking te garanderen.

Maar de vraag blijft natuurlijk of dergelijke informatie wezenlijk iets verandert. Hangt onze onmacht om de milieudruk te verlagen op een gebrek aan informatie (wat wetenschappers de 'information deficit' hypothese noemen)? Of is er iets diepers aan de hand? Zitten we vast in maatschappelijke systemen die voortdurend een beroep doen op (meer) natuurlijke hulpbronnen, en die onmachtig zijn om de kennis over de belasting van de aarde om te zetten in aanpassingen? Hier komt het belang van samenwerking tussen de natuurwetenschappen en de gamma- en geesteswetenschappen om de hoek kijken. We hebben immers wel een redelijk helder beeld van wat die toegenomen milieudruk verklaart.

Beroep op de natuur

De mens heeft altijd een beroep gedaan op de natuur. Helemaal niet gek, we maken er tenslotte onderdeel van uit. Maar er zijn historische momenten waarop die druk enorm is vergroot. De industriële revolutie is zo'n moment. Sinds de stoommachines, spoorlijnen en mijnbouw op gang kwamen is de koolstofkringloop wezenlijk veranderd. Tussen 1850 en 2025 is het aandeel van koolstofdioxide in de atmosfeer gestegen van 280 naar 425 ppm (zie hoofdstukken 3 en 4). Historici gaan vaak nog verder terug en wijzen op het enorme maatschappelijke effect van de ontdekkingsreizen van Columbus en anderen, vijfhonderd jaar geleden. In die tijd werd de bevolkingsgroei van het succesvolle Europa vertaald naar een imperialistische politiek waarbij Europese standaarden aan andere werelddelen werden opgelegd en hulpbronnen aan landen werden onttrokken ten behoeve van de ontwikkeling van Europese landen (die onderling ook weer oorlog voerden om de macht te krijgen over delen van de wereld). Vele lokale culturen die een stabiele omgang met de natuur kenden, werden actief gebroken en onderworpen. De enorme toename van de extractie van hulpbronnen werd ook nog eens filosofisch gelegitimeerd. 'The world is made for man, not man for the world', was een beroemde uitspraak van de zestiende-eeuwse filosoof Francis Bacon.

Maar wellicht zal die door historici toch vooral aan de tweede helft van de twintigste en de eerste decennia van de eenentwintigste eeuw worden verbonden. Sinds de jaren zeventig zijn we meer en meer doordrongen geraakt van onze *overshoot*. Door de opkomst van de grootschalige landbouw zijn we na de Tweede Wereldoorlog gaan slepen met stikstof en fosfaat. Cassave en soja komen in grote hoeveelheden vanuit het mondiale zuiden naar de rijke westerse landen en worden vooral verwerkt in veevoer. Dit heeft de productiviteit van de landbouw enorm verhoogd. Maar tegelijkertijd is de regionale ecologische balans sterk verstoord. De komende decennia zullen we deze trends moeten ombuigen. Het veronderstelt vooral een nieuw dieet, want het is met name de verspreiding van het eten van (rood) vlees dat verantwoordelijk is voor deze verstoorde balans. In toekomstig onderzoek kijken we hoe het voorstelbaar zou kunnen worden dat we straks een andere kwaliteit van leven gaan zien, met minder milieudruk en meer kwaliteit van leven. Nu nog onbevattelijk, straks wellicht prima voorstelbaar.

Korte tijdlijn

De natuurlijke systemen die centraal staan in dit boek kennen een onbevattelijk lange tijdlijn. Waar het gaat over maatschappelijke systemen treft mij juist de korte tijdlijn. Voor de babyboomgeneratie, geboren tussen 1945 en 1955, is de grote toename in milieudruk gebeurd tijdens hun leven. De foto's vanuit de Apollo 8 hebben niet de impact gehad die we er vaak aan toeschrijven. Ja, de aarde ziet eruit als een prachtig maar kwetsbaar blauw-groen balletje in een zee van ruimte. Dit *overview effect* wordt weliswaar vaak genoemd, maar heeft de grafieken niet weten om te buigen. Voor millennials, de generatie geboren tussen 1980 en 1996, geldt inmiddels iets soortgelijks. Het is bijna niet voor te stellen dat de jaarlijkse emissies van koolstofdioxide met meer dan 60 procent zijn toegenomen sinds de erkenning van een versnelde klimaatverandering uitmondde in de oprichting van het IPCC.

'Humans are too stupid to prevent climate change', zei de in de inleiding al aangehaalde wetenschapper James Lovelock in 2010. Het lijkt er wel op. Maar de sociaal-wetenschapper in mij maakt wel bezwaar tegen het gebruik van het woord 'mensen' hier. We kunnen veel preciezer zijn. Niet iedereen op de aarde heeft tenslotte evenveel bijgedragen aan de uitstoot van broeikasgassen. We kunnen en moeten ook kijken naar maatschappelijke belangen die onze politiek gevangenhouden en culturele strevingen die ons steeds weer verleiden tot de aankoop van nieuwe spullen. Is dat hoe de mens 'van nature' is? Of zijn die neigingen aangeleerd en aangepaard? Bij het beantwoorden van die vraag is het goed om in overweging te nemen dat het budget dat de industrie in 2024 mondiaal uitgaf om ons spullen of diensten aan te praten de onvoorstelbare omvang had van 1,78 biljoen (1.780.000.000.000) dollar. Het wonderlijkste is wellicht nog dat zoveel mensen de huidige tijd van massaconsumptie en verspilling van grondstoffen als normaal zien. Sterker nog, als een tijd die moet worden beschermd tegen de suggestie dat we 'moeten verduurzamen'. Maar hoe normaal is het eigenlijk om te rijden in steeds grotere auto's die de straten onveilig maken en het kinderen onmogelijk maken om buiten te spelen? Hoe normaal is het om industrieel geproduceerde dode dieren te eten of katoenen kleding uit verre landen te laten bezorgen die vervolgens, afgedankt, op de stranden van Ghana eindigt? Dat is wat wel 'de absur-

diteit van het heden' wordt genoemd. Juist door die te benoemen is het wellicht mogelijk om mensen los te weken van een problematisch wereldbeeld.

Lichter lopen op de planeet

Welke toekomst we met elkaar willen, zullen we moeten uitwerken. Maar niet alleen door te laten zien waar het misgaat maar vooral ook door te laten zien hoe een aantrekkelijke toekomst voorstelbaar kan zijn. Daarvoor zijn allerlei strategieën voorhanden. Een daarvan is het laten zien dat een duurzame toekomst al bestaat. Er zijn immers al allerlei initiatieven die wél passen binnen een duurzaam leven. Denk aan de houtbouw die nu, langzaam maar zeker, in Nederlandse steden en dorpen zichtbaar wordt. De Mária Telkeshof in Nijmegen, het STRAWA-gebouw in Rotterdam, de Dutch Mountains in Eindhoven, het nieuwe Veemarktterrein en het nieuwe station in Zwolle: straks wordt overal een andere manier van wonen zichtbaar en ervaarbaar. In Utrecht zijn de stationsfietsenstalling (met 12.000 plaatsen!) en de 'fietsstraten' een toeristische attractie. In steeds meer gastronomische restaurants concurreren topchefs om te laten zien hoe lekker vegan eten kan zijn. En zou er een verband zijn tussen de stress die veel mensen ervaren en de druk om mee te komen in het verwerven van materiële welvaart? Zou de harde agressie in de samenleving samenhangen met het gevoel steeds tekort te komen, nergens bevrediging meer te vinden? Ik sluit niet uit dat historici over vijftig jaar de periode van de *American dream* dateren van 1945 tot rond 2030. Die periode, die zo diep in ons bewustzijn verankerd zit, produceert nu zoveel problemen dat een correctie wel voor de hand ligt. We kunnen best wat lichter lopen over de planeet. Wat meer de tijd nemen. Wat beter om ons heen kijken. Alles wat beter verdelen. Aan wetenschappers daarbij ook de taak die aantrekkelijke mogelijke werelden voorstelbaar te maken.

Maarten Hajer

KUNSTENAARSOOG – Hoofd vol illusies

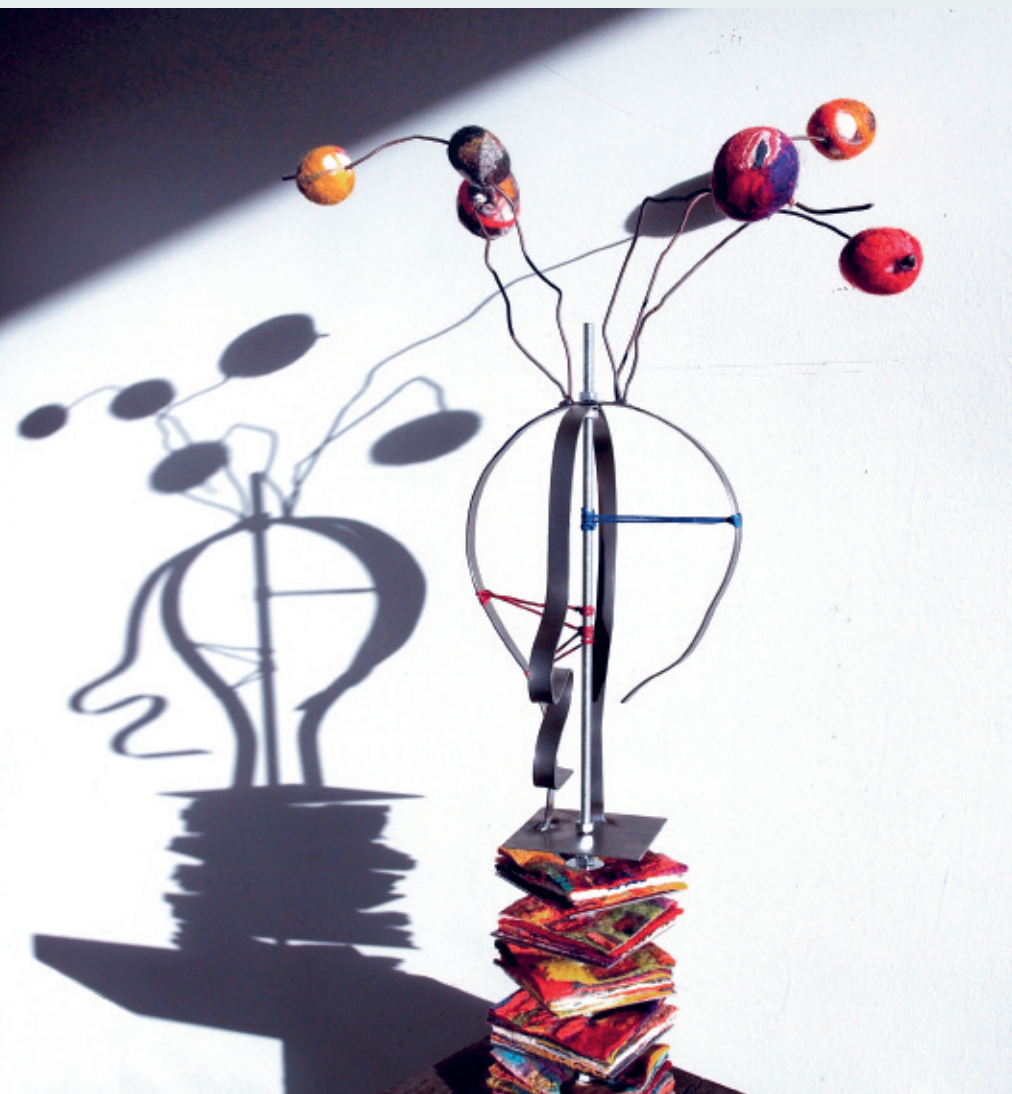
– Nora van Klingeren

Kunnen we klimaatgevolgen tegenhouden dan wel opvangen? Het is een wereldomvattende problematiek om het leven op aarde veilig te stellen: van gedrag tot economie, van infrastructuur tot waterhuishouding, van landinrichting tot voedselvoorziening en het opvangen van migratiestromen, en ga zo maar door.

Maar ook jij en ik kunnen dingen doen. Als consument hebben we macht, en consumenten samen hebben heel veel macht. Durf jij zonder meer te vertrouwen op de toekomst? En weet jij wat je kunt doen? Hebben we voldoende inzicht uitmondend in een plan, of is het een hoofd vol illusies?

[pag.134] Een stalen hoofd waar gedachten (stalen draadjes met een bal aan het einde) uit ontspruiten, rustend op een nek en torso van wol en zijde vervulden lapjes.

– Nora van Klingeren, 2019, staal en wol en zijde samen vervult.



MEER WETEN?

Lesmateriaal

Systeem aarde is een relevant onderwerp om te bespreken in de klas. Daarom heeft Stichting Biowetenschappen en Maatschappij bij dit boek een inspirerende en interactieve lesreeks ontwikkeld, waarvan de lessen ook afzonderlijk gebruikt kunnen worden. Geschikt voor onderbouwleerlingen op lesniveau havo-vwo. Gratis aan te vragen via www.biomaatschappij.nl.

Boeken

Ellen van Donk, Hans Komen, Ellen Weerman et al. Waterlandbouw. Kansen en keerzijden van natte teelten. Den Haag: Stichting Biowetenschappen en Maatschappij, 2023. Gratis te downloaden via www.biomaatschappij.nl.

Jan Willem Erisman, Wim de Vries, Ellen van Donk et al. Stikstof: De sluipende effecten op natuur en gezondheid. Den Haag: Stichting Biowetenschappen en Maatschappij, 2021. Gratis te downloaden via www.biomaatschappij.nl.

Kovan Huissteden en Jef Vandenberghe. Permafrost nu en in de ijstijd. Zeist: KNNV, 2022.

Peter Kuipers Munneke en Martijn van Calmthout. Alles smelt: De wereld van het ijs in een veranderend klimaat. Amsterdam: Uitgeverij LIAS, 2021.

James Lovelock. Gaia: A new look at life on earth. Oxford: Oxford University Press, 1979.

Bernard Wilkin and Robin Schäfer (editors). Bones of contention: The industrial exploitation of human bones in the modern age. Brussel: Algemeen Rijksarchief, 2024.

Susanne Wuijts, Roy Erkens, Ellen van Donk et al. Gezond water: Niet vanzelfsprekend. Den Haag: Stichting Biowetenschappen en Maatschappij, 2024. Gratis te downloaden via www.biomaatschappij.nl.

Video's

De Universiteit van Nederland heeft een serie gemaakt over klimaatverandering en de onderwerpen die gerelateerd zijn aan de onderwerpen in dit boek. Zie: www.universiteitvannederland.nl.

Het Klokhuis, het populairwetenschappelijk programma voor kinderen van de NTR maakte een programma over het ontstaan van leven: <https://www.hetklokhuis.nl/tv-uitzending/5011/ontstaan-van-leven>.

De rivieren van de rode planeet, een video van de Universiteit Utrecht over water op Mars:

<https://www.youtube.com/watch?v=5CL9fz2SNqg>.

In de documentaire *Breaking boundaries: The science of our planet* laten BBC-presentator David Attenborough en de Zweedse klimaatwetenschapper Johan Rockström zien hoe de mens de aarde over de grenzen heen duwt.

Websites

Het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) heeft diverse dossiers en informatieve berichten gemaakt over klimaatverandering: www.knmi.nl.

Op de site van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) is actuele informatie te vinden over stikstof en fosfor. Zie: www.rivm.nl/stikstof en www.rivm.nl/landelijk-meetnet-effecten-mestbeleid/fosfor-in-bodem-en-water.

De expeditieleden van de PHOSFLUX Expeditie hebben een Engelstalige blog over hun (onderzoeks)werkzaamheden op zee bijgehouden. Zie: www.nioz.nl/en/blog/the-phosflux-expedition.

Tentoonstellingen

Het Discovery Museum in Kerkrade heeft een 'belevingstour' *Revolutie Aarde* die gaat over de aarde en de rol van de mens.

Er zijn diverse plekken waar je in Nederland naar sterren en planeten kunt kijken zoals Sonnenborgh in Utrecht. Daar is nu de filosofische ontdekkingsreis *Op aarde, hoe lang draaien we nog door* te zien, geschikt voor iedereen vanaf 16 jaar en ouder.

AUTEURS

Prof. dr. ir. Marc F.C. Bierkens, hoogleraar Hydrologie aan de Universiteit Utrecht en onderzoeker bij Deltares, een onafhankelijk kennisinstituut op het gebied van water en ondergrond.

Prof. dr. Lex Bouwman, hoogleraar Nutriënttransport van land naar zee aan de Universiteit Utrecht.

Prof. dr. ir. Henk Dijkstra, hoogleraar Dynamische oceanografie bij het Instituut voor Marien en Atmosferisch onderzoek aan de Universiteit Utrecht.

Prof. dr. Jan Willem Erisman, hoogleraar Milieu en duurzaamheid aan de Universiteit Leiden.

Prof. dr. Maarten Hajer, hoogleraar Urban Futures & Futuring aan de Universiteit Utrecht.

Dr. Ko van Huissteden, emeritus universitair hoofddocent Aardwetenschappen aan de Vrije Universiteit van Amsterdam, en mede-eigenaar van adviesbureau VOF Kytalyk Carbon Cycle Research..

Prof. dr. Inge Loes ten Kate, universitair hoofddocent Planeetwetenschappen en astrobiologie aan Universiteit Utrecht en bijzonder hoogleraar aan de Universiteit van Amsterdam.

Ir. Nora van Klingeren, textielkunstenaar.

Dr. Peter Kuipers Munneke, universitair docent bij het Instituut voor Marien en Atmosferisch onderzoek Utrecht van de Universiteit Utrecht en sinds 2013 weerpresentator bij het NOS Journaal.

Prof. dr. Rik Leemans, emeritus hoogleraar Milieu-systeemanalyse aan de Wageningen Universiteit.

Dr. Nynke Osinga, onderzoeker zoogdieren bij de Stichting Rugvin.

Prof. dr. Max Rietkerk, hoogleraar Ruimtelijke ecologie en milieuverandering bij het Copernicus Instituut voor Duurzame Ontwikkeling aan de Universiteit Utrecht.

Prof. dr. Jelle Reumer, emeritus hoogleraar Vertebratenpaleontologie aan de Universiteit Utrecht en voorzitter van stichting Biowetenschappen en Maatschappij.

Prof. dr. Caroline Slomp, hoogleraar Geomicrobiologie en biogeochemie aan de Radboud Universiteit in Nijmegen en hoogleraar Marie-
ne biogeochemie aan de Universiteit Utrecht.

Prof. dr. Jos Verhoeven, emeritus hoogleraar Landschapsecologie aan
de Universiteit Utrecht.

Prof. dr. Mariëtte Wolthers, hoogleraar Aquatische geochemie aan de
Universiteit Utrecht.

Ir. Frank Zanderink, directeur van Stichting Rugvin.

REGISTER

- aarde
 - aardplaten, 26
 - continentale korst, 26
 - oceanische korst, 26
 - kern, mantel en korst, 17, 23, 24
- aardgas, 54, 60, 83
- aardse planeten, 17, 19, 27
- afvalwaterzuivering, 115, 119, 122
- Alaska, 70
- algen, 45, 59, 75, 95, 107, 116, 119, 123
 - bloei, 115
- aluminium, 95
- American dream, 132
- ammoniak, 92, 95, 97
- ammonium, 89
- AMOC, 59, 62, 65, 66, 67, 84
 - kantelpunt, 85
- Anders, William, 32
- Antarctica, 68, 76
- antropoceen, 127
- apatiet, 106, 110, 111, 112
- Apollo 8, 31, 32, 131
- aquatische biodiversiteit, 95
- ATEAM, 79
- atmosfeer, 12, 19, 20, 21, 22, 31, 43
 - elementen in de, 36, 37
- Bacon, Francis, 130
- bacteriën, 93, 106
- beenderkool, 113
- beendermeel, 112
- bicarbonaat, 53, 54, 55
- biobrandstoffen, 118
- biodiversiteit, 12, 95
- biogeochemie, 33
- biologische kringlopen, 37, 38
 - stikstof, 93
- biomassa, 83, 85
- biosfeer, 12, 20, 27, 31
 - elementen in de, 36, 37
- blauwalgen zie cyanobacteriën
- bodems, 68
- bodemverzuring, 95
- Bosch, Carl, 93
- brak water, 110
- bramen, 95
- Brand, Hennig, 105, 106
- brandnetels, 95
- brasem, 116
- broeikaseffect, 62
- broeikasgassen, 12, 50, 62, 69, 73, 82, 96
- buffering, 12
- bufferstroken, 100
- burning ember-diagram, 77, 78
- calcium, 95
 - carbonaat, 53, 58
 - fosfaat, 110, 112
- carbonaat, 53, 54, 55

- evenwicht, 55, 58, 75
- cascade-effect, 97
- CCS, 83
- consumptiemaatschappij, 131, 132
- convectie, 23
- CoP, 74
- culturele strevingen, 131
- cyanobacteriën, 116, 117, 119, 124, 125
- delfstoffen, 61
- differentiatie, 17
- diffusie van koolstofdioxide, 60
- dinoflagellaten, 123
- dooi, 69
- duurzame toekomst, 131, 132
- Dyer Island, 114
- earth overshoot day, 128
- ecosystemen, 11, 33, 35, 60, 77, 95, 111, 116, 119, 123
- elementen, 17, 36, 37
- erosie, 21, 27, 107
- eutrofiëring, 95, 100, 105, 122
- evenwichtssituatie, 85
- foraminiferen, 53
- fosfaat, 106, 107, 115
 - kringloop, 112
 - tekorten, 118
- fosfor, 12, 13, 105
 - kringloop, 105, 107, 108, 109, 112, 118
 - witte, 106
- fosforiet, 111, 114, 118
- fossiele brandstoffen, 61
- fotosynthese, 34, 38, 43, 49, 51, 75
- fytoplankton, 59, 119, 120
- Gaia-hypothese, 12, 33
- gasplaneten, 16
- geologische kringlopen, 12, 37
- geosfeer, 20, 21, 31
- gesteentekringloop, 25
- gesteentevorming, 37
- gletsjers, 76
- global warming potential (GWP), 64
- Golfstroom zie AMOC
- graniet, 54
- Groene Revolutie, 93
- Groenland, 76
- guano, 93, 114
- Haber, Fritz, 93
- Haber-Boschproces, 93, 94
- hagel, 42
- historische ontwikkeling, 130, 131
- hoogvenen, 61
- houtbouw, 132
- hydrosfeer, 12, 20, 22, 31, 123
 - elementen in de, 36, 37
- hydroxyapatiet, 112
- ijskappen, 76
- ijzer
 - fosfaat, 110
 - oxiden, 110
 - sulfiden, 110
- industriële revolutie, 60, 130
- information deficit, 129
- infraroodstraling, 50
- inslagkraters, 21
- Intergovernmental Panel for Climate Change zie IPPC
- IPBES, 128
- IPCC, 62, 74, 76, 77, 131
- kalk, 53, 96
- kalkgesteenten, 54
- kalkskelet, 58
- kantelpunt, 82, 84, 116
- kiezelalgen, 121, 123
- Klimaatakkoord van Parijs, 74
- klimaatconferenties, 84
- klimaatstelsel, 74
- klimaatverandering, 62, 72
 - mondiale effecten, 81
 - regionale effecten, 81
- klimaatverdrag, 77
- koolhydraten, 51
- koolstof, 12
 - instroom, 63
 - kringloop, 48, 54, 56, 60, 72
 - uitstoot, 73
 - verbindingen, 49, 75
 - voorraad, 52, 53, 55
- koolstofdioxide, 12, 51, 62, 63, 64, 65, 69, 73
 - bemestings-effect, 76
 - oceaandiffusie, 55, 60
- koraalriffen, 77
- kringlopen, 44, 45, 56, 90, 91
 - biologische, 37, 38, 59, 93
 - fosfaat-, 106, 112
 - fosfor-, 105, 107, 108, 109, 118
 - geologische, 12, 32
 - koolstof-, 123, 130
 - mondiale, 35, 40, 41, 44
 - planetaire, 11, 12, 20, 26
 - silicium-, 123
 - stikstof, 93
 - water-, 41
 - zuurstof-, 44
- kunstmest, 13, 93, 96, 114, 121
- kustgebieden, 77, 110, 116
- kustwateren, 123
- lachgas, 62, 64, 65, 69, 92, 96
- landbouw, 13, 77, 95, 116
- landijs, 76
- lithosfeer, 12, 20, 31
 - elementen in de, 36, 37
- löss, 68
- Lovelock, James, 33
- luchtvochtigheid, 74
- maatschappelijke belangen, 131
- magnesium, 95
- magnetosfeer, 15, 20, 23
- mariene ecologie, 119
- marketing, 131
- Mars, 18, 19, 20, 27
- massa-extinctie, 59
- mensenbotten, 112
- Mercurius, 18, 19, 20, 27
- meststof, 95, 112
- methaan, 50, 62, 64, 65, 69
- micro-organismen, 92
- milieudruk, 129
- Mississippi-delta, 96
- mondiale kringlopen, 35, 40, 41, 44, 56, 66, 90, 91, 107, 108, 109
- mycorrhiza, 106
- Natura 2000-gebieden, 102
- natuurgebieden, 61, 63, 95, 101
- neerslag, 74
- nitraten, 89
- nutriënten, 95, 112, 116, 120
- oceanen, 58, 74, 75, 111, 119, 120
 - biologische kringlopen, 59
 - bodem, 110
 - koolstofdifffusie, 55, 60

- stromingen, 59, 85
- verzuring, 62
- waterkwaliteit, 58
- oceaancirculatie, 66
- oeverzones, 100
- olie, 54, 60
- ontginning, 61
- ontstaan van de aarde, 15
- oorlogen, 113
- Oostzee, 117, 125
- oppervlaktewateren, 107, 122
- oxidatie, 38, 51
- ozon, 96
- PAS, 101
- permafrost, 68, 69, 70, 71
- planetaire grenzen, 99
- planetaire kringloop, 12, 15, 24, 25, 26
- plantages, 62
- platentektoniek, 21, 25, 27, 107
- polen, 74
- politiek, 83, 131
- poolijs, 85
- protoplaneten, 16
- reductie, 38, 51
- regen, 42
- regenwoud, 61, 107
- riolering, 122
- rotsplaneten, 17
- schimmels, 106
- sediment, 21, 37, 111
- sferen, 12, 20, 37
- Siberië, 68
- silicaatgesteenten, 54
- silicium, 123
- siliciumkringloop, 123
- skeletten, 113
- slib, 119
- sneeuw, 42
- steenkool, 54, 60
- stikstof, 12, 13
 - atmosferisch, 98
 - binding, 94, 98
 - cascade, 97
 - crisis, 101
 - depositie, 96
 - gas, 89
 - kringloop, 89, 90, 91, 93, 99
 - oxide, 95, 96, 97
 - reactief, 94, 98
- struviet, 118, 119
- stuwdammen, 123
- subductie, 26, 38
- suikerraffinage, 113
- suikers, 51, 75
- tektonische platen, 26
- temperatuur, 15
- terrestrische ecosystemen, 95
- terugkoppelingen, 34, 45
- tijdschalen, 37
- toiletgebruik, 115, 119
- urine, 119
- veengebieden, 54, 63
- veerkracht, 85
- veeteelt, 118
- vegetarisch dieet, 118
- veldslagen, 112
- Venus, 18, 19, 20, 27
- verbranding, 49, 51, 54
- verbrandingsmotor, 96
- verwering, 27, 37, 106, 123
- verzuring, 95
- vetten, 51
- viscositeit van gesteente, 38
- visserij, 122
- vivianiet, 110, 119
- vleesproductie, 118, 130
- voedselketens, 76
- voedselweb, 11, 95, 107, 119, 123
- vulkanisme, 21
- walvissen, 120
- wasmiddelen, 114
- water, 22
 - beheer, 116
 - berging, 42
 - damp, 20, 74
 - kringloop, 38, 40, 41, 42, 43
 - kwaliteit, 100, 115, 116, 118
 - zuurstofloos, 116, 117, 120
- waterstofsulfide, 116
- wc, 115, 119
- weersextremen, 79
- Wet stikstofreductie en natuurverbetering, 102
- wetlands, 100
- whale fall, 120
- whale pump, 120
- witte fosfor, 106
- woestijnstof, 107
- zalmkweek, 122
- zand, 54
- zee-ijs, 76
- zeespiegelstijging, 76, 81
- zonnestelsel, 15
- zoöplankton, 123
- zouttransport, 66
- zuurstofkringloop, 34, 43, 44
- zuurstofloos water, 116, 117, 120

