

Over klimaatverandering, CO₂ en geologische processen

door André A. Slupik
Natuurhistorisch Museum Rotterdam
slupik@nrm.nl

Klimaatverandering is misschien het meest besproken onderwerp in de media in het laatste decennium. Iedereen heeft inmiddels gehoord dat de aarde opwarmt, dat dit slecht is en dat dit verschijnsel in de toekomst rampzalige gevolgen zal hebben voor de natuur, voor het gehele leven op de planeet en voor de mensheid in het bijzonder. Door de jaren heen is er een toekomstig scenario ontstaan voor de aarde dat door de media, vele politici en milieuactivisten aan de publieke opinie wordt gepresenteerd. Kernpunten van dat scenario zijn: zeespiegelstijging, intensivering van natuurrampen zoals overstromingen door de rivieren en door zeeën, smelten van gletsjers, verwoestijning van grote gebieden, ontbossing, voedseltekort, drinkwaterschaarste, hongersnood, uitbraak van ziekten, uitputting van natuurlijke energiebronnen, oorlogen, uitsterven van grote aantallen soorten planten en dieren, etc. Met andere woorden een apocalyptisch beeld. Voor dit scenario wordt een overkoepelend begrip 'global warming' gebruikt (de wereldwijde opwarming), waarmee de zwart gekleurde toekomst wordt aangeduid die ons te wachten staat, maar ook bezorgdheid wordt geuit over de veranderingen. Het begrip *global warming* is in de media zeer negatief getint en met dit beeld worden we allen continu bestookt. Onlosmakelijk wordt er CO₂ aan de globale opwarming gekoppeld. Deze stof wordt gezien als grootste boosdoener in het geheel.

De gedachte achter hierboven geschetst scenario is als volgt: (1) kooldioxide is een broeikasgas, (2) door stijgende economische activiteiten worden er op steeds grotere schaal fossiele brandstoffen verbrand, waarbij veel kooldioxide in de atmosfeer vrijkomt, (3) dit leidt tot een verhoogde hoeveelheid CO₂ in de dampkring, waardoor (4) een versterkt broeikas effect ontstaat en vervolgens (5) de temperaturen op aarde in snel tempo zullen gaan stijgen met alle implicaties van dien.

Er wordt intensief over de gehele problematiek van *global warming* gediscussieerd door politici en milieuorganisaties, op nationaal en internationaal niveau, en door de media wordt dit alles (of deels) aan een breed publiek gepresenteerd. Er zijn diverse maatregelen besproken en er zijn al besluiten genomen om het proces van mondiale opwarming tegen te gaan om te voorkomen dat de desastreuze voorspellingen uit zullen komen. Politici nemen de verantwoordelijkheid en willen de aarde en de mensheid redden. *De belastingbetaler betaalt*.

Bij die gedachten achter *global warming*, de oorzaken daarvan en de besluiten over de te nemen maatregelen om de veranderingen tegen te gaan, wordt er verondersteld dat de mens schuldig is aan het proces en dat de hoeveelheid kooldioxide in de lucht alleen maar stijgt en het direct temperatuur op aarde beïnvloedt.

Dynamisch systeem

Niets is echter minder waar. Dit beeld is zeer vereenvoudigd en in grote mate onjuist. Klimaatveranderingen spelen zich af in de atmosfeer en op het aardoppervlak – en betreffen dus een deel van het systeem aarde. Het aardse systeem is een zeer gecompliceerd samengaan van processen in de lithosfeer, hydrosfeer, atmosfeer en biosfeer. Kennis van deze fundamentele processen en van hun wisselwerking is essentieel om te begrijpen hoe het gehele systeem werkt, aan welke veranderin-

gen de wereld nu onderhevig is en hoe de aarde in vroegere geologische tijden veranderde. Dankzij de geologische wetenschap is er al veel bekend. De gesteenten van de aardkorst vormen een immens museum, een archief als het ware dat we kunnen bestuderen en interpreteren om er de lange geschiedenis van onze planeet in af te lezen. Naarmate we de geschiedenis van de aarde beter leren kennen, begrijpen we steeds beter hoe het gecompliceerde systeem aarde functioneert. *Mente et malleo* is het motto van geologen, wat betekent 'met het verstand en met de hamer'. Geologen (lees: aardwetenschappers zoals petrologen, mineralogen, sedimentologen, stratigrafen, tektonici, geochemici, paleontologen, paleoklimatologen, paleo-ecologen, etc.) gebruiken de gegevens die bewaard zijn gebleven in de aarde, in de geologische 'record', in het gesteente. Die gegevens worden vervolgens geanalyseerd en geïnterpreteerd om de gebeurtenissen van het verleden te herleiden. Zo wordt inzicht in de toestand van de aarde van vroeger verkregen, en ook van het klimaat.

Dankzij geologisch onderzoek weten we dat continue veranderingen een fundamentele eigenschap zijn van het aardse systeem. We kunnen een term 'mondiale verandering' (*global change*) gebruiken om aan te geven dat het aardse systeem heel dynamisch is en vanaf het begin, ca. 4,6 miljard jaar geleden, onafgebroken aan veranderingen onderhevig is, met als voorbeeld gebergtevorming en erosie, verschuiving van continenten, zeeniveauctuaties.

Dynamisch klimaat

Het aardse klimaat wordt gevormd door de wisselwerking tussen het aardoppervlak en de atmosfeer. Beide worden opgewarmd door zonnestraling waarvan de intensiteit cyclisch varieert. Het klimaat wordt beïnvloed door de jaarlijkse omloop van de aarde rond de zon, door de verdeling van warmte in oceanen en veranderingen in de stromingen in oceanen, door stromingen van luchtmassa's, de positie van bergketens, en op de geologische schaal ook door gebergtevorming, de positie van de continenten, vulkanisme, geochemische processen waaronder de gesteentekringloop, erosie en biologische en biologisch-chemische factoren.

Dankzij de geologische wetenschap is bekend dat het klimaat gedurende het hele verleden door veranderingen gekenmerkt wordt. Deze veranderingen treden cyclisch op met een cyclische die kan variëren van tien jaar tot meer dan honderdduizenden jaren. Bovendien kunnen verschillende cycli elkaar gedeeltelijk overlappen. Langere klimaatcycli (met een duur van enkele honderdduizenden jaren tot tienduizenden jaren) worden veroorzaakt door buitenaardse, astronomische factoren en door variaties in de omloopbaan rond de zon, het toeren van de aardas en positie van de aardas ten opzichte van de zon. Kortere cycli hebben hun oorzaak in variërende zonneactiviteit en in lokale en regionale factoren. Let op: niet alle elementen van het klimaat en niet alle oorzaken van de veranderingen zijn tot nu toe volledig bekend.

Gedurende de aardse geschiedenis overheerste veelal een warmer klimaat dan het huidige, maar ook trad meermaals wereldwijde afkoeling op. Dit laatste leidde tot het ontstaan van ijskappen (gletsjers en landijs), die zich soms uitspreidden van de polen tot de keerkringzones. De ijstijd-episoden hebben

twee maal in het Proterozoïcum plaatsgevonden, in het Ordovicium, in het Laat-Carboon – Vroeg-Perm en in het Kwartair (de afgelopen 2,5 miljoen jaar), waarin warme en koude perioden elkaar snel afwisselden. Sinds ongeveer 12.000 jaar bevindt de aarde zich in de volgende fase van cyclische opwarming, waarvan het maximum waarschijnlijk op dit moment nog niet bereikt is. Ook op kortere, historische tijdschaal zijn er klimaat-schommelingen bekend. In het afgelopen millennium, na een warmere periode, begon een koude periode die duurde van het einde van de 13e eeuw tot halverwege de 19e eeuw. Dit was de zogenoemde 'kleine ijstijd'. Na deze koude periode is een warmere periode begonnen - die waarin we nu leven.

Actief kooldioxide

Kooldioxide – een stof met chemische formule CO₂ – is kleurloos en reukloos en is een natuurlijk bestanddeel van de aardse atmosfeer. De kooldioxide in de dampkring is voornamelijk afkomstig van de aarde zelf en komt vrij tijdens ontgassing van de planeet via vulkanisme en mid-oceanische ruggen. Een deel van CO₂ in de atmosfeer is afkomstig van kometen die in vroegere geologische tijden ingeslagen zijn. Vanaf de 20^{ste} eeuw is er een aanzienlijke toevoer van dit gas in de atmosfeer door antropogene activiteiten.

CO₂ heeft de eigenschap dat het kortgolvlige zonnestraling doorlaat, maar de lange golven van aardse warmtestraling absorbeert. De aangeslagen moleculen van kooldioxide stralen op hun beurt warmtestraling in alle richtingen uit, dus ook terug naar het aardoppervlak. Dit effect heet broeikas-effect. Er zijn meerdere gassen die dit gedrag vertonen en die van nature in de dampkring aanwezig zijn: waterdamp, methaan (CH₄), ozon (O₃) en lachgas (N₂O).

Het warmtebudget in de atmosfeer wordt voor 99,7% bepaald door de inkomende stralingsenergie van de zon. De resterende 0,3% van de warmte is afkomstig van de aarde zelf en ontstaat door verval van radioactieve stoffen, door getijdenbewegingen en door de verbranding van fossiele brandstoffen (die opgeslagen zonne-energie zijn) door de mens. De aarde is in stralingsevenwicht met de zon. Onze planeet straalt evenveel energie uit als zij van de zon ontvangt. Maar stralingsevenwicht is niet de enige factor die de temperatuur op aarde bepaalt. Als dat zo zou zijn, dan hadden we hier een gemiddelde temperatuur van -18°C, net zoals op de maan heerst. De gemiddelde temperatuur op aarde is hoger en bedraagt +15°C. Dit verschil van 33°C wordt veroorzaakt doordat de aarde geen kale planeet is, maar een hydrosfeer en biosfeer heeft en gehuld is in een dampkring waarin zich diverse gecompliceerde processen voordoen die de warmtehuishouding van onze planeet bepalen. Slechts een van die processen is het broeikas-effect. Overigens, waterdamp is de grootste 'boosdoener' als het om broeikas-effect gaat. Watermoleculen zijn voor 60 tot 70% verantwoordelijk voor de broeikasopwarming.

Kooldioxide wordt voortdurend aan de atmosfeer toegevoegd,

maar ook wordt het voortdurend aan de atmosfeer onttrokken. De toevoer en onttrekking zijn zeer variabel door de tijd heen en daardoor fluctueert de hoeveelheid CO₂ in de dampkring op de geologische tijdschaal (afb. 1). De onttrekking komt door de werking van biologische, chemische en geologische processen, die natuurlijke aardse 'pompen' vormen. Deze pompen werken continu en zorgen ervoor dat kooldioxide wordt vastgelegd in de sedimentaire gesteenten (afb. 2). Door deze pompen ontstaat fossiele biomassa (plantenmaterie die door geologische processen wordt begraven en in sedimenten opgenomen). Verder worden kalkafzettingen gevormd (accumulatie van in- of uitwendige skeletjes van waterorganismen) en worden de gesteenten aan het aardoppervlak verweerd, waardoor er een verweringsbodempom wordt gevormd (die uit kleimineralen bestaat waaronder kaolien). Deze pompen werken met verschillende snelheden maar continu en ze zijn bijzonder effectief. Naarmate de hoeveelheid kooldioxide in het systeem toeneemt, verlopen de processen intensiever. Bij hogere temperaturen en voldoende vochtigheid verloopt de verwerking van het gesteente heel snel. Ook de groei van de biomassa wordt onder deze omstandigheden intensiever, met als gevolg dat er meer en meer kooldioxide wordt opgenomen, verwerkt en gefixeerd in de afzettingen van de aardkorst.

De hoeveelheid kooldioxide in de atmosfeer wordt aangeduid met het aantal moleculen per volume-eenheid (per miljoen deeltjes): parts per million ofwel ppm. Op dit moment bedraagt de hoeveelheid CO₂ 390 ppm. Op pre-industrieel niveau (voor het jaar 1850) was dat 280 ppm. In procentuele verhoudingen betekent dit dat de hedendaagse hoeveelheid kooldioxide in de atmosfeer 0,039% bedraagt en op pre-industrieel niveau 0,028%, een toename van ca. 30%. Ten opzichte van het volume van de atmosfeer betekent dit een toename van 110 ppm: een stijging van 0,011% in de afgelopen anderhalve eeuw. In feite is de hoeveelheid kooldioxide in de atmosfeer in recente tijden heel laag, nietig zou je zeggen. Niettemin blijft dit gas heel belangrijk voor het functioneren van het aardse systeem, het is onmisbaar voor het leven en voor het verloop van de geochemische processen op aarde.

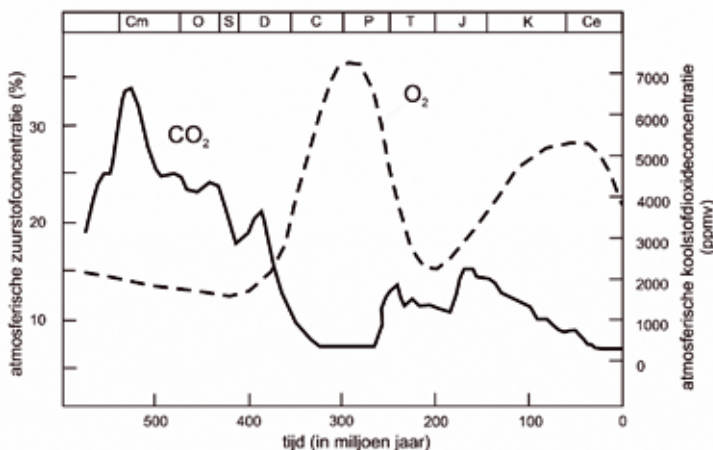
Kooldioxide heeft een belangrijke eigenschap. De oplosbaarheid in water is namelijk omgekeerd tot de temperatuur. Als de temperatuur van het zeewater stijgt wordt er minder CO₂ in dat water opgelost en dus komt er meer kooldioxide in de atmosfeer terecht. Als deze opwarmt op aarde door natuurlijke geologische processen en door astronomische invloeden krijgen we verhoogde CO₂-waarden in de atmosfeer.

Conform de simplistische gedachte van velen dat kooldioxide in de dampkring direct de temperatuur op aarde beïnvloedt, zijn er verschillende maatregelen bedacht om hoeveelheden van dat gas te verminderen. Een van die maatregelen is ondergrondse opslag van CO₂ in gebruikte gas/olievelden. Technologisch gezien is dit een hoogstandje van (geo)techniek, maar ik vraag mij hierbij af of ooit, als het aardse systeem door natuurlijke geologische en astronomische processen op langere termijn gaat afkoelen, de in de ondergrond opgeslagen kooldioxide terug naar de atmosfeer gepompt zal worden om het systeem op temperatuur te houden?

Afb. 1. Concentratie van kooldioxide en zuurstof in de atmosfeer tijdens het Phanerozoïcum.

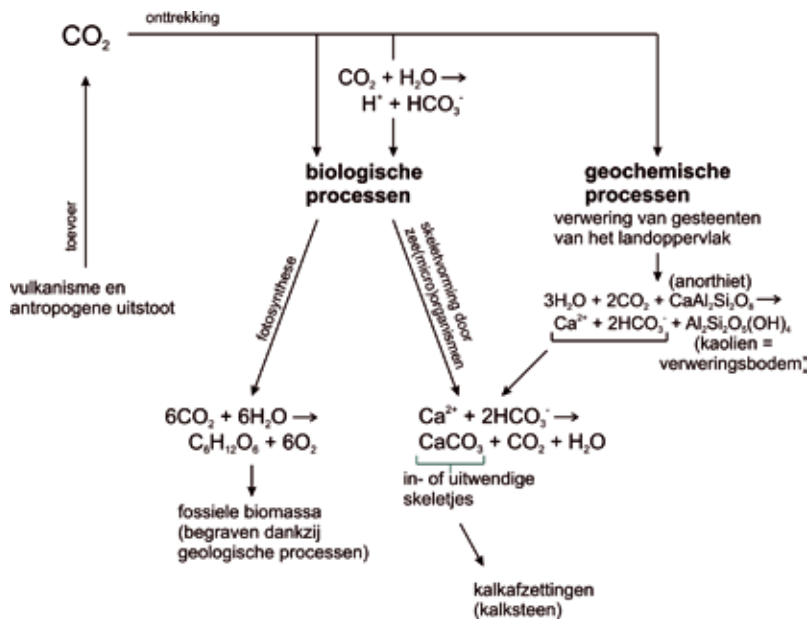
Gedurende de laatste 600 miljoen jaar wordt de aardse atmosfeer gekenmerkt door afname van de kooldioxideconcentratie. Het meest opvallend is de daling van de hoeveelheid CO₂ en de stijging van het zuurstofpercentage in de dampkring tijdens het Carboon, toen de landplanten tot explosieve groei kwamen, met als gevolg enorme zuurstofproductie en intensieve onttrekking van kooldioxide aan de atmosfeer. Cm – Cambrium; O – Ordovicium; S – Siluur; D – Devoon; C – Carboon; P – Perm; T – Trias; J – Jura; K – Krijt; Ce – Cenozoïcum.

(Volgens Manuel Sintubin, 2009: De wetenschap van de aarde. Over een levende planeet. Uitgeverij Acco Leuven/Den Haag).



De gedachten van velen om 'de thermostaat van de aarde' te kunnen beïnvloeden en dicht te draaien zijn op zich absurd en vloeien voort uit onwetendheid over de aardse dynamiek en al

die gecompliceerde processen die er een rol spelen. Maar daarvoor hebben we geologen. Ik blijf mij laten leiden door *Mente et malleo*.



Afb. 2. Schematisch overzicht van het mondiale systeem dat de hoeveelheid kooldioxide in de atmosfeer reguleert. Voorafgaand aan biologische processen met betrekking tot de vorming van kalkskeletjes van zeeorganismen zijn er bicarbonaationen (HCO₃⁻) in het zeewater nodig. Deze ionen worden geproduceerd bij een reactie tussen opgelost kooldioxide en water (reactie in het diagram boven de biologische processen). De verweringsreactie van anorthiet (bij de geochemische processen) is slechts een van de voorbeelden van de werking van de 'geochemische pomp' van de aarde.

CD-bespreking

De Junior Bèta Canon. 5 audio-cd's, totale luisterduur 350 min. Uitgeverij LuisterWijs, november 2009 ISBN 9789089930200, adviesprijs: € 14,95

De Junior Bèta Canon is een vervolg op de door de Volkskrant en Meulenhoff in 2008 uitgegeven publicatie *'De bètacanon. Wat iedereen moet weten van de natuurwetenschappen'*. Deze werd destijds samengesteld in reactie op het gebrek aan bèta-onderwerpen in de historische canon, waarin de 17^e-eeuwse Nederlandse wis- en sterrenkundige Christiaan Huygens dreigde te worden overgeslagen.

De recent uitgegeven Junior Bèta Canon – een verzameling luistercolleges – is gericht op kinderen vanaf ca 11 jaar, maar ook volwassenen kunnen er plezier aan beleven. De uitgever LuisterWijs – onderdeel van NDC/VBK uitgevers – wil met deze canon en vergelijkbare uitgaven vooral een jonge doelgroep enthousiast maken voor wetenschappelijke informatie. Vijftig onderwerpen worden in de Junior Bèta Canon uitgediept, waarbij de themareeks van de genoemde 'canon voor volwassenen' wordt gevolgd, van DNA tot cognitie, het getal nul tot de kernbom en het Periodiek Systeem tot Einstein.

Ook de aardwetenschappen komen in de Junior Bèta Canon aan bod. De geo-geïnteresseerde komt aan zijn trekken bij meerdere onderwerpen, zoals plaattektoniek, Darwin/evolutie, klimaat/weer, catastrofes (over grootschalige klimaatveranderingen), oceaanstromingen en onze voorouders/de mens. Zoals bijna onontkoombaar bij het populariseren van (natuur-) wetenschappelijke onderwerpen, is het niet altijd gelukt de nuance te behouden, zoals bij de vergelijking van plaattektoniek met stukken aardkorst die drijven "op een vloeibare magma-oceaan". Jammer dat bij het thema 'tijd' de geologische tijdschaal helemaal buiten beschouwing wordt gelaten en uitsluitend voor een natuurkundige benadering – met zonnejaren en de atoomklok – wordt gekozen.

De originele intro's op elk thema, door de van het kinderprogramma Sesamstraat bekende 'razende reporter' Frank Groothof, zijn een leuke afwisseling op het rustige betoog van de wetenschappers die erop volgt. Met originele vondsten zoals de

in de moderne tijd geëvolueerde turbo-egel (die zich tegen snelwegen heeft weten te beschermen), de speaker-krekel (met geluidboxen op zijn rug om boven de muziek uit te komen) en de prehistorische dame Lucy die 'helaas' de blender moet missen. De inleidende stukjes met de veel en snel babbelende razende reporter – een figuur die overigens al voorkomt in de geweldige educatieve Kluitman-serie *Waanzinnig om te weten* – zijn zo nu en dan wel behoorlijk lawaaiig. De overdracht van wetenschap moet tegenwoordig blijkaar gepaard gaan met een ongelofelijke hoeveelheid herrie. Zo komt je ook in het hoofdstedelijk museum voor wetenschap & techniek Nemo een brei van geluid tegemoet, waarbij je je afvraagt hoe je in zo'n geluidschao nog iets kunt leren. Ook de samenstellers van de Junior Bèta Canon doen mee aan deze trend.

Bij beluistering van de cd's komt steeds de behoefte in mij op een vraag te stellen. Maar de cd raast door. Bijvoorbeeld: waren die Romeinse cijfers echt "zo dom en onhandig", zoals wordt beweerd? Moet je zo iets niet in de tijd plaatsen? En zit het geheugen echt alleen in je hoofd? Er is toch ook zo iets als een fysiek, lichamelijk geheugen? Ook wordt het doen van aannamen, gemeengoed in wetenschappelijke arbeid, genegeerd, net zo als de aan wetenschap verbonden ethiek. Een lesje in wetenschapsfilosofie zou in de canon niet overbodig geweest zijn. Ook of juist in de junior canon! En wat is de beperking van het opnemen van onderwerpen als geheugen, cognitie en taal in het bètadomein?

Zo nu en dan bekriipt me een ongemakkelijk gevoel dat de samenstellers van deze luistercolleges zich te erg in de wereld van een kind verplaatsen en daarmee de luisteraartjes juist tekort doen. Kinderen worden aangesproken alsof ze onmogelijk zouden overleven in een wereld zonder elektriciteit en mobieltjes. Zo wordt gesuggereerd dat de oermens, die die elektrische apparaten moet ontberen, wel heel zielig is. Terwijl het omgekeerde misschien wel waar is. Een beetje relativeren van de moderne tijd met alle 'gemakken' en 'verdiensten van de wetenschap' zou hier en daar wel op z'n plaats zijn.

Annemieke van Roekel