



## AARDE EN KLIMAAT

EEN HOORCOLLEGE OVER  
DE GEOLOGISCHE GESCHIEDENIS  
EN TOEKOMST VAN ONZE PLENEET

door Salomon Kroonenberg

### Inhoudsopgave

#### College 1. De woestijnaarde I

- H1. Waarom hier land en daar zee? Waarom hier gebergten en daar vlak?
- H2. Plaattektoniek en de drie klimaatextremen
- H3. Pangea in het Perm: woestijnen, rode zandstenen, lage zeespiegel, laag CO<sub>2</sub>

#### College 2. De woestijnaarde II

- H4. Nederlands aardgas: geschenk van de woestijnaarde
- H5. Zoutpijlers: ook een geschenk van de woestijnaarde
- H6. De Perm-Trias uitsterframp. De broeikasaarde

#### College 3. De broeikasaarde I

- H7. Het uitedrijven van Pangea. Snelle zeespiegelstijging
- H8. Nederlandse aardolie: geschenk van de broeikasaarde
- H9. Reservoir gesteenten. Bentheimer zandsteen

#### College 4. Broeikasaarde II

- H10. De broeikasaarde
- H11. De koolstofcyclus en de kalksteenvorming
- H12. De Krijt-Tertiair meteorietinslag

#### College 5. De ijstijdaarde I

- H13. Van broeikasaarde naar ijstijdaarde
- H14. De Milankovic - klimaatcycli
- H15. Waarom Milankovic gelijk had

#### College 5. De ijstijdaarde II

- H16. De ijstijdaarde
- H17. De tijd van homo sapiens
- H18. Wat nu?

### Aanbevolen literatuur



## SALOMON KROONENBERG

Salomon Kroonenberg is sinds 1996 hoogleraar geologie aan de Technische Universiteit Delft en houdt zich daar vooral bezig met hoe delta's en andere sedimentaire systemen zich gedragen bij een veranderende zeespiegel. Daarvoor was hij veertien jaar hoogleraar geologie bij de Landbouw Universiteit Wageningen en de eerste tien jaar van zijn loopbaan werkte hij in diverse geologische functies in Suriname, Swaziland en Colombia. Hij studeerde en promoveerde aan de Universiteit van Amsterdam. Van 2000 tot 2005 was hij voorzitter van de Raad voor Aarde en Klimaat van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen. In 2008 ontving hij een ereprofessoraat van de Moskouse Staatsuniversiteit.

In zijn boek *De menselijke maat – de aarde over tienduizend jaar* (Uitgeverij Atlas, 2006, herziene en uitgebreide editie 2008) relativeert hij de rol van de mens op aarde en betoogt hij dat er in de huidige klimaatdiscussie onvoldoende rekening wordt gehouden met langetermijnveranderingen. Het boek kreeg veel media-aandacht en werd in 2007 bekroond met de Eureka prijs voor het beste populair-wetenschappelijke boek. Het is vertaald in het Duits, een Turkse editie is in voorbereiding.

Kijk voor meer informatie op [www.salomonkroonenberg.nl](http://www.salomonkroonenberg.nl)

STUDIUM GENERALE TU DELFT

# Synopsis van het hoorcollege AARDE EN KLIMAAT

## Inleiding

Wie de aarde bewerkt moet weten hoe de aarde werkt. Het is al een oude kreet, maar het is nog steeds waar. Nog steeds wordt de mens verrast door tsunami's, erupties, stormen, plotselinge klimaatomslagen, aardverschuivingen en instortende tunnels. Zo slecht kennen we de aarde. Nog steeds praten wij over de aarde alsof het alleen maar een supermarkt is voor het bevredigen van onze behoeften. We belijden *people, planet, profit* maar met *planet* bedoelen we de aarde alleen in de menselijke maat, niet in de maat van de aarde zelf.

De aarde heeft een eigen leven, dat al vier en een half miljard jaar duurt, terwijl de mens nog maar honderdvijftigduizend jaar bestaat. Alle rampen waar wij bang van zijn, en zelfs nog veel grotere, hebben in het verleden al eens plaatsgevonden, door natuurlijke oorzaken: tweehonderd meter hogere en honderd meter lagere zeespiegel, een broeikasarde met meer dan twintig keer zoveel koolzuurgas in de atmosfeer als nu, een twintig maal zo snelle zeespiegelstijging als nu. Voor de aarde is dat allemaal niets nieuws, alleen wij mensen denken dat wat ons nu overkomt iets bijzonders is. De mens is maar een onbetekenend ongelukje in een onverschillige natuur. Net zoals we afgestapt zijn van de maakbare mens en de maakbare samenleving, moeten we afstappen van de maakbare natuur.

In deze serie college's wil ik duidelijk maken hoe de aarde écht werkt. Ik laat zien hoe de energie van binnenuit de aarde, de zonne-energie en het leven het aanzicht van de aarde in de loop der geschiedenis radikaal hebben veranderd. Dat doe ik aan de hand van de drie klimaatextremen die de aarde de laatste 250 miljoen jaar heeft meegemaakt: de *woestijnaarde* (redhouse earth), de *broeikasarde* (greenhouse earth) en de *ijstijdaarde* (icehouse earth), je zou kunnen zeggen, de aarde in rood, groen en wit. Wie de college's heeft gevolgd, begrijpt dat de ecologische voetstap van de mens in een oogwenk weer is uitgewist.

## College 1. De woestijnaarde I

### H1. Waarom hier land en daar zee? Waarom hier gebergten en daar vlak?

Wie denkt dat klimaatverandering pas is begonnen sinds het in de krant staat, doet er goed aan zich in de geschiedenis van de aarde te verdiepen. Dan ontdek je al gauw dat er zelfs in de laatste vijf procent van de aardse geschiedenis, de laatste 250 miljoen jaar, veel grotere extremen in klimaat zijn opgetreden dan we ons nu voor kunnen stellen. Dat is in de eerste plaats te danken aan de plaattektoniek.

Plaattektoniek is een betrekkelijk recent begrip. Men vroeg zich vroeger wel af waarom op de ene plaats zee lag en op de andere land. Men vond fossielen in de bergen, en sporen van opheffing en dalen van het land, zoals bij Pozzuoli in Italië, en daarom was het overheersende idee dat het land uit het water opstijgt en dan weer wegzinkt: verticale bewegingen, maar geen horizontale. Gebergten waren het gevolg van de afkoeling van de aarde. Als de warmte die via de vulkanen uit het binnenste van de aarde naar buiten kwam was uitgewerkt, zou de aarde afkoelen, krimpen en daardoor gaan rimpelen: dat waren de gebergten.

### H2. Plaattektoniek en de drie klimaatextremen

De Duitse meteoroloog Alfred Wegener legde in het begin van de twintigste eeuw de basis voor het idee dat continenten niet vastliggen maar over het oppervlak van de aarde bewegen. Hij toonde onder andere aan dat er een ijskap op de samengedreven zuidelijke continenten had gelegen. Hij werd in het begin niet erg geloofd, niet alleen omdat hij geen verklaring had voor de mechanismen die daarvoor verantwoordelijk waren, maar ook omdat hij niet bij het old-boys network van de geologen hoorde.

Sinds de exploratie van de oceaانبodem in de zestiger jaren weten we dat hij gelijk had. De aardkorst en het bovenste deel van de aardmantel bestaan uit een twaalftal lithosferische platen van 100-150 km dik, die over een plastische laag daaronder bewegen, de asthenosfeer. Een lithosferische plaat kan bestaan uit continentale korst, oceanische korst of een combinatie van die twee. Nieuwe oceaankorst wordt gevormd langs de midoceanische ruggen (sea-floor spreading), zoals de Mid-Atlantische rug, die precies de contou-

ren van de oostkust van Zuid-Amerika en de westkust van Afrika volgt. Het is als het ware de rits waarlangs die twee uit elkaar gedreven zijn. Oude oceaankorst verdwijnt weer naar de diepte in subductiezones, zoals de Ring van Vuur rondom de Stille Oceaan, die verantwoordelijk is voor aardbevingen, vulkanisme en gebergtevorming, zoals in de Andes. De platen bewegen met een snelheid van 2-10 cm per jaar, net zo snel als je nagels groeien.

De woestijnaarde in het Perm (300-250 miljoen jaar geleden), was te danken aan het feit dat de platen toen allemaal naar elkaar toegedreven waren (Wegener's supercontinent Pangea), de broeikasarde in het Krijt (120-66 miljoen jaar geleden) aan het snelle uiteendrijven van Pangea, en de ijstijdaarde (35 miljoen jaar geleden tot nu) aan de vertraging van dat uiteendrijven en de vorming van nieuwe gebergten. De details daarvan zullen we hieronder bespreken.

### **H3. Pangea in het Perm: woestijnen, rode zandstenen, lage zeespiegel, laag CO<sub>2</sub>**

Pangea was niet het begin van de plaattektoniek: als je verder terugkijkt zie je dat daaraan voorafgaand de platen juist allemaal naar elkaar toe waren gedreven, waarbij Amerika aan de oostkant op Europa botste, Afrika ook op Europa botste, en Siberië tegen Rusland botste. Daardoor ontstonden gebergten als de Ardennen, de Eifel, het Centraal Massief, het Scandinavisch gebergte, de Oeral, de Appalachians en nog vele andere. Pangea was eigenlijk maar een kortstondige zaak.

Maar het had een diepgaande invloed op het klimaat. Hoe verder van de zee, hoe zwakker de invloed van de oceaan op het klimaat. In Nederland hebben wij een oceanisch klimaat met koele zomers en milde winters, in Rusland een continentaal klimaat met veel grotere contrasten tussen zomer en winter. In het supercontinent Pangea heerste ook een supercontinentaal klimaat. Nederland lag toen even ver van de zee als de Gobiwoestijn nu. Bovendien lag Nederland ten gevolge van de plaattektoniek niet op de huidige breedtegraad, maar ter hoogte van de Sahara. Vandaar dat er een extreem woestijnklimaat heerste.

We kunnen dat nog zien aan het soort gesteenten die in die tijd zijn ontstaan: heel veel rode zanden die in grote woestijnduinen zijn afgezet zoals nu in de Sahara. Die zie je bijvoorbeeld aan de zuidkust van Engeland, in Spanje, in de Grand Canyon, in Argentinië, in China. Overal ter wereld lijken die rode zandstenen op elkaar, want bijna overal was woestijn, De rode zandstenen zijn een kenmerk voor een extreme periode van global change: de redhouse earth, de woestijnaarde. Er was wel een ijsskap op het zuidelijk halfrond, de zeespiegel stond laag, en er waren niet bijzonder hoge concentraties broeikasgassen zoals CO<sub>2</sub> in de atmosfeer.

## **College 2. De woestijnaarde II**

### **H4. Nederlands aardgas: geschenk van de woestijnaarde**

Nederland is vlak, wij hebben geen bergen. Maar als je een verticale doorsnede van Nederland maakt zie je dat de ondergrond heel erg geaccidenteerd is. Bij ons liggen de bergen onder de grond. Nu eens komt de ene laag dicht bij het oppervlak, dan weer de andere. De rode zandstenen van het Perm komen nergens aan het oppervlak, maar ze zitten wel in de ondergrond. Ons aardgas zit in de poriën van de duinzanden uit het Perm. Voor aardgas heb je drie dingen nodig: een moedergesteente, een reservoirgesteente, en een deklaag. Het moedergesteente van ons aardgas zijn de steenkoollagen uit het Carboon. Door de druk van de bovenliggende lagen werd het aardgas (hetzelfde als mijngas) omhooggeperst tot het een poreus gesteente vond waarin veel ruimte was voor gas: de rode zandsteen, het reservoirgesteente. De deklaag wordt gevormd door dikke zoutlagen.

### **H5. Zoutpijlers: ook een geschenk van de woestijnaarde**

Het ontstaan van die zoutlagen hangt weer samen met de plaattektoniek. Een supercontinent als Pangea is in principe instabiel. Als de convectiestromen die de continenten bij elkaar gedreven hebben hun warmte niet meer kwijt kunnen, veranderen ze van richting, zodat de continenten weer uiteendrijven. De eerste tekenen van spanning ontstonden in het noorden, in een smalle slenk die van Nederland naar de Barents-zee liep. Daarlangs kon de zee diep binnendringen in het hart van het continentale Permische bekken, dat

reikte van Engeland tot Polen. Later werd de doorgang weer afgesloten, en door het nog steeds heersende woestijnklimaat dampte het zeewater helemaal in. Zo werden de duinzanden bedekt met een laag zout. Die zoutlaag fungeerde niet alleen als afsluitende laag van de gasreservoirs, maar werd ook bij latere bewegingen in de aardkorst omhooggestuwd. Daarbij ontstonden zoutpijlers die tot vrijwel aan het oppervlak reikten, en daaruit winnen wij nu zout door het ondergronds op te lossen.

## **H6. De Perm-Trias uitsterframp**

Het Perm is het laatste tijdvak van het Paleozoïcum, de periode van het Oude Leven. Het einde van het Perm en het begin van de Trias, het eerste tijdvak van het Mesozoïcum, het Midden Leven, plaatsten we op vrijwel precies 250 miljoen jaar geleden. Het was het moment van de grootste uitsterframp die de aarde heeft gekend. Negentig procent van alle organismen in zee, en zeventig procent van de landdieren kwamen daarbij om.

Het merkwaardige is dat we nog steeds niet weten wat daarvan de oorzaak was. Er is geen enkele harde aanwijzing dat er toen óók een grote meteoriet op aarde is gevallen, zoals aan het einde van de broeikasaarde. Wel was het een periode van de uitstroming van gigantische hoeveelheden basalt in Siberië, maar het valt niet goed in te zien hoe die verantwoordelijk zou kunnen zijn voor zo'n dramatische uitsterframp. Er zijn ook wel andere perioden geweest met zoveel basaltvorming, zonder dat het leidde tot uitstervingen. Snelle zeespiegelveranderingen, plotselinge uitstoot van broeikasgassen, of juist een snelle afname daarvan zijn erbij gehaald, maar eigenlijk weten we het nog niet.

Wat wel duidelijk is, is dat die ramp niet het einde betekende van de woestijnaarde, want na de ramp ging ook in de Trias de afzetting van rode zanden gewoon door. Pas de plaattektoniek heeft aan de woestijnaarde een eind kunnen maken.

## **College 3. De broeikasaarde II**

### **H7. Het uiteendrijven van Pangea. Snelle zeespiegelstijging**

De instabiliteit die al aanleiding gaf tot het binnendringen van de zee en de zoutmeren in het Perm werd daarna alleen nog maar groter. Uiteindelijk brak Pangea in grote continentale platen uiteen, die met grote snelheid van elkaar weg begonnen te drijven. Dat was het begin van de continenten zoals wij ze nu kennen. De snelheid waarmee dat gebeurde was veel groter dan nu, misschien zelfs wel vijf keer zo snel. Dat had een aantal belangrijke gevolgen voor zeespiegel en klimaat.

De oceanen van nu zijn niet overal even diep. Bij de mid-oceanische ruggen zijn ze niet meer dan 2500 m diep, maar hoe verder je daar vandaan komt, hoe dieper ze worden. Dat komt omdat bij de ruggen de korst warm is, en hoe verder er vandaan, hoe meer de korst afkoelt en krimpt. Door dat krimpen van de korst worden de oceanen dus ook dieper. Maar bij de snelle sea-floor spreading in het Mesozoïcum, met name in de Jura en het Krijt, was er heel veel warme oceaankorst en nog niet veel afgekoelde oceaانبodem, en daarom waren de oceanen ondiep. Bovendien waren er toen geen ijskappen, dus al het water moest in de oceanen. Door die twee factoren was de zeespiegel in die tijd wel 200 meter hoger dan nu. Grote delen van het land stonden toen onder water, misschien wel zestig procent van het huidige landoppervlak.

### **H8. Nederlandse aardolie: geschenk van de broeikasaarde**

Het was niet altijd duidelijk waar de continenten van elkaar los zouden breken. De Noordzee is een van de mislukte spreidingszones uit het Jura-tijdperk, wat te zien is aan het vulkanisme op de Noordzeebodem, en in Nederland de Zuidwalvulkaan op de bodem van de Waddenzee.

In de nauwe binnenzeeën tussen de uiteendrijvende continenten krioelde het van het leven, en vooral van plankton, eencellige organismen. Het was overal warm, en er werden heel veel voedingsstoffen van het ondergelopen land de zee in gespoeld, zoveel dat als het plankton afstierf er niet genoeg zuurstof in het water zat om het af te breken. Daardoor leken veel zeeën toen op de huidige Zwarte Zee. De bodem van de zee was zuurstofloos en vol organische resten die niet verteerden. Zo ontstonden de moedergesteenten van aardolie, onder andere in de Noordzee en in vele gebieden in de pas geopende Atlantische Oceaan.

## H9. Reservoir gesteenten, Bentheimer zandsteen

Door de snelle zeespiegelstijging kwam steeds meer land onder water te staan. De stranden van die zee bewogen steeds meer landinwaarts. In de ondergrond van Nederland zijn veel van die strandzanden uit Jura en Krijt bewaard gebleven: het zijn de reservoirgesteenten van de aardolie in West Nederland, het Waddenzeegebied, en ook in het Nedersaksische bekken bij Schoonebeek in Oost Nederland. Dezelfde zandstenen werden als Bentheimer zandsteen voor de bouw gebruikt, zoals het Paleis op de Dam. Toen de zee nog verder steeg werden de strandzanden met klei bedekt, die de afsluitende laag voor de oliereservoirs vormden.

## College 4. De broeikasarde II

### H10. De broeikasarde

Toen in het Krijt de sea-floor spreading op zijn snelst was en de zeespiegel het hoogst, zag de aarde er totaal anders uit dan nu. Nergens waren ijskappen, en ook op de polen was het gematigd tot subtropisch klimaat. De temperatuurcontrasten tussen de polen en de evenaar waren veel minder groot dan nu, en ook de oceanen waren warm tot op de bodem. Overal was het land bedekt met bossen, er groeiden broodvruchtbomen op Groenland, er liepen eendebekdinosauriërs rond in Alaska, en in Siberië kroelde het van de krokodillen. Het was een waar paradijs: de broeikasarde. En ook dat kwam door de plaattektoniek. Bij het snelle uiteendrijven van de continenten was er zoveel vulkanische activiteit langs de midoceanische ruggen, dat er veel meer koolzuurgas werd uitgestoten dan nu. Er zat naar schatting wel twintig keer zoveel CO<sub>2</sub> in de atmosfeer als nu. De broeikasarde is geen schrikbeeld van de toekomst, het is een feit uit het verleden, en voor de aarde is dat dus niets nieuws. Alleen voor ons. Hoewel er wel land op de zuidpool lag, was het door de hoge concentratie broeikasgassen te warm voor de vorming van een ijskap op Antarctica. De planten vonden het heerlijk, het was de tijd dat de bedektzadigen, de bloeiende planten, een razend-snelle evolutie ondergingen, en de naaktzadigen zoals naaldbomen overvleugelden.

### H11. De koolstofcyclus en de kalksteenvorming

Het koolzuurgas kwam via de verwerking van gesteenten op het land in opgeloste vorm in de rivieren terecht, en die brachten het naar zee. Samen met het calcium uit de gesteenten vonden eencellige organismen in de zee zo'n rijkdom aan voedingsstoffen, dat zij het koolzuurgas als carbonaat in hun kalkskeletjes opnamen. Daardoor ontstonden enorm dikke kalkpakketten. Die kalken zijn op veel plaatsen in de wereld evenzeer kenmerkend voor de broeikasarde van het Krijt als de rode zandstenen voor de woestijnaarde van het Perm. Ook de Krijtrotsen van Engeland en Noord-Frankrijk horen daartoe, de Kanaaltunnel werd er doorheen geboord, en ons Limburgse Krijt, ook een zeer zuivere kalksteen, is er ook een voorbeeld van. We hebben de cementindustrie dus eigenlijk aan de broeikasarde te danken.

### H12. De Krijt-Tertiair meteorietinslag

Maar aan dit paradijs kwam een abrupt einde met de grote meteorietinslag rond 66 miljoen jaar geleden. De bewijzen daarvoor zijn overweldigend. Vrijwel overal op aarde waar de overgang van het Krijt naar de volgende periode ontsloten is vinden we een dun kleilaagje, waarin hoge gehalten van iridium zitten, een op aarde zeldzaam edelmetaal dat veel in meteorieten voorkomt. Ook zitten er bolletjes gesmolten gesteente en extreem gedeformeerde kwartskorrels in. Een inslagkrater van de juiste leeftijd ligt in Yucatan in Mexico, en op Haïti liggen acht meter dikke tsunamiazettingen die bij de inslag zijn ontstaan. De inslag moet een klap van 11 op de schaal van Richter gegeven hebben. Vermoedelijk is zoveel stof de lucht in geblazen, dat de zon lang niet tot het aardoppervlak kon doordringen, de fotosynthese stopte, planten doodgingen, en daarmee het voedsel voor een groot deel van de landdieren zoals de dinosauriërs, en ook voor veel mariene organismen. Het was een van de grootste milieurampen die de aarde heeft getroffen. Maar toch ging na het neerdwarrelen van het stof de kalkafzetting weer door: de door de plaattektoniek aangestuurde broeikasarde bleef nog een tijdje doorwerken, en ook nu betekende het einde van een tijd-

perk nog niet het einde van het toen heersende klimaat.

## College 5. De ijstijdaarde II

### H13. Van broeikasperiode naar ijstijdaarde

Dat het broeikasperiodeperk toch ten einde liep was dus niet het gevolg van die meteorietinslag, maar van het feit dat de spreiding van de oceaanbodembodem steeds langzamer ging, het vulkanisme afnam, en er dus minder CO<sub>2</sub> de atmosfeer in werd geblazen. Ook werd de uitwisseling van warmte tussen de evenaar en de polen moeilijker. Australië en Zuid-Amerika dreven steeds verder naar het noorden weg van Antarctica, dat daardoor geïsoleerd raakte. Een sterke zeestroom ontwikkelde zich rond het zuidpoolcontinent, en vanaf 34 miljoen jaar geleden zien we de eerste dropstones op de oceaanbodembodem liggen: stenen die uitgesmolten zijn uit de onderkant van een gletsjer die in zee is uitgestroomd: de eerste duidelijke aanwijzing dat er toen een ijsskape op Antarctica lag. Tegelijk zien we de zeespiegel dalen omdat de oceaanbodembodem verouderde, kromp en daardoor dieper werd, en ook omdat continenten begonnen te botsen en onder elkaar schoven, zodat er minder landoppervlak overbleef. Nieuwgevormde gebergten zoals de Himalaya brachten grote veranderingen teweeg in de atmosferische circulatie. Op het land werd het droger, voor het eerst in de geschiedenis ontstonden en grote grasvlakten zoals de steppen en de savannen. Rond twee miljoen jaar geleden begon de ijstijdaarde.

### H14. De Milankovic -klimaatcycli

Beweren dat er een ijstijd is geweest lijkt nu vanzelfsprekend, maar vroeger was dat beslist niet zo. Er staat niets over de ijstijd in de Bijbel. Louis Agassiz was de eerste die dat idee in het begin van de 19e eeuw wereldkundig maakte, op grond van zwerfstenen in de Alpen en krassen op rotsen ver van de toenmalige gletsjers. Later vond men dat er wel vier ijstijden geweest zijn in de Alpen, en tegenwoordig onderscheiden wij er twintig in de laatste twee miljoen jaar: een per honderdduizend jaar.

De Servische ingenieur Milutin Milankovič gaf de aanzet tot de verklaring van die regelmatige klimaatcycli. Hij stelde zich als levenstaak uit te rekenen wat de invloed van de andere hemellichamen in ons zonnestelsel was op de baan van de aarde om de zon. Daaruit leidde hij drie cycli af. De baan van de aarde varieert in 100 000 jaar van bijna cirkelvormig tot licht elliptisch. De hoek die de aardas maakt met de baan van de aarde om de zon varieert in 41 000 jaar van 21,5° naar 24,5°. Een derde cycliciteit ontstaat doordat de aardas een tolbeweging van ongeveer 23 000 jaar maakt, waardoor die niet altijd naar de Poolster wijst, maar een cirkel beschrijft in het firmament. Het samenspel van die drie cycli zou de oorzaak van de ijstijden zijn. Maar net als Wegener werd aan zijn werk weinig geloof gehecht.

### H15. Waarom Milankovič gelijk had

Pas toen boorkernen uit de oceanen beschikbaar kwamen in de zestiger jaren bleek dat de verhouding van zuurstofisotopen in kalkskeletjes precies de door Milankovič berekende curve volgden. Dat werkt zo. Zuurstof heeft twee isotopen, zuurstof-16 en zuurstof-18. De laatste heeft twee extra neutronen in de atoomkern, en is daardoor een tikje zwaarder. Bij verdamping aan het zeeoppervlak gaan daardoor de zuurstof-16 atomen net ietsje gemakkelijker mee dan de zuurstof-18 atomen. Als de waterdamp condenseert en neerslaat op een ijsskape wordt er dus voor lange tijd extra zuurstof-16 aan het zeewater onttrokken, en wordt het zeewater rijker aan zuurstof-18. Eencellige organismen zoals foraminiferen slaan zuurstof in hun kalkskelet op in dezelfde verhoudingen als in het zeewater. Ijstijd-foraminiferen zijn daarom rijker aan zuurstof-18 dan die uit een warme tijd. Dat werd geregistreerd in die boringen.

Latere boringen in de ijskappen van Antarctica en Groenland bevestigen dat beeld, want ook daar zijn de variaties in zuurstofisotopen af te lezen. Zowel in de diepzee als in de ijskappen vond men cycliciteiten van 100 000, 41 000 en 23 000 jaar. Daarmee was de astronomische oorsprong van de ijstijden bewezen. Opvallend is dat ook CO<sub>2</sub> gehoorzaam de astronomische temperatuurcycli volgt. Volgt, ja, en niet stuurt!

## College 6. De ijstijdaarde II

### H16. De ijstijdaarde

De sneeuwgrens is de grens waarboven het hele jaar door sneeuw blijft liggen. Bij de evenaar ligt die op 4800 m, in de Alpen op 2800 m, in Noord-Noorwegen op 1000 m hoogte, en bereikte het aardoppervlak ergens in de Noordelijke IJszee. Een ijskap ontstaat op het noordelijk halfrond als de sneeuwgrens het aardoppervlak raakt op een plaats waar land aanwezig is. Nu kan dat dus niet, maar in de ijstijd lag de sneeuwgrens wel 1000 m lager dan nu. Toen raakte de sneeuwgrens het land, en konden zich ijskappen vormen in Noord-Noorwegen en Noord-Canada, die tot vier kilometer dik werden en zich duizenden kilometers naar het zuiden uitstrekten, tot in Nederland toe.

Op het hoogtepunt van een ijstijd ziet de aarde er totaal anders uit dan nu. Een kwart van het landoppervlak was met ijs bedekt (nu maar tien procent), het klimaat was veel droger, op veel plaatsen had het tropisch regenwoud plaats gemaakt voor savannen, de Sahara rukte duizend kilometer naar het zuiden in de tegenwoordige Sahel. De zeespiegel lag soms wel 120 meter lager dan nu, en er ontstonden vele landbruggen die nu weer onder water liggen, zoals tussen Alaska en Siberië. De warme golfstroom bereikte Nederland niet, die maakte al bij Portugal rechtsomkeert. Er zat maar ongeveer 180 ppm (delen per miljoen) koolzuurgas in de atmosfeer, de helft van nu. Op veel plaatsen zoals in Nederland was de ondergrond bevroren, en veel rivieren hadden een vlechtend karakter in plaats van meanderend zoals nu.

### H17. De tijd van homo sapiens

Onze soort homo sapiens bestaat ongeveer 150 000 jaar. Wij hebben de voorlaatste en de laatste ijstijd meegemaakt, en de warme periode daartussenin. In die laatste warme periode het Eemien, zo'n 120 000 jaar geleden, stond de zeespiegel zes meter hoger dan nu. Amersfoort lag toen aan zee, dat is geen schrikbeeld voor de toekomst, maar een feit uit het verleden, net als de broeikas aarde. Waarschijnlijk is een flink deel van de Groenlandse ijskap toen afgesmolten. Maar er zat niet bijzonder veel koolzuurgas in de atmosfeer, zo'n 280 ppm, net zoveel als in vorige warme perioden, net zoveel als voor de industriële revolutie. Koolzuurgas en zeespiegel lopen dus niet parallel.

In de laatste ijstijd was ons leefmilieu een poolwoestijn, onze voorvaders woonden op de bodem van de droge Noordzee, 40 m onder het huidige wateroppervlak. Wij joegen op mammoeten tot er geen meer over was. Aan het einde van de ijstijd joeg een zeespiegelstijging van soms vier meter per eeuw, twintig keer zo snel als nu, ons het land op. Onze eigen natuur van nu overwinterde in Spanje, en kwam aan het einde van de ijstijd naar het noorden terug met een snelheid van 150 km per eeuw, bijna drie keer zo snel als we nu zien door de recente opwarming van de aarde. We hebben het allemaal meegemaakt, maar we zijn het grondig vergeten.

### H18. Wat nu?

Het Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC), het klimaatpanel van de Verenigde Naties, waarschuwt ons voor de opwarming van de aarde. Dat baseert het IPCC op de toename van de concentratie broeikasgassen in de atmosfeer door menselijk toedoen. Dat wij sinds de industriële evolutie het gehalte aan koolzuurgas hebben doen toenemen tot ver buiten de normale range van warme perioden (nu ~385 ppm in plaats van de normale ~280 ppm) staat buiten kijf. Of dat ook onherroepelijk tot opwarming leidt is echter de vraag. Puur op grond van de natuurkundige wetten zou dat het geval moeten zijn. Maar er zijn zoveel positieve en negatieve terugkoppelingsmechanismen, en er zijn zoveel andere factoren waar we heel weinig van afweten dat het niet verstandig is ons beleid alleen maar af te stemmen op het koolzuurgas in de atmosfeer.

De Kleine IJstijd tussen 1300 en 1850 lijkt vooral een gevolg van de lage zonneactiviteit in die periode. Tussen 1945 en 1975 steeg het koolzuurgasgehalte maar daalde de temperatuur: toen was iedereen bang voor de komende ijstijd. Ook die daling correleert beter met de zonneactiviteit dan met het koolzuurgas, al begrijpen we niet goed waarom. Ook de laatste tien jaar stijgt de temperatuur niet meer, terwijl het CO<sub>2</sub> wel door blijft stijgen. Als het inderdaad weer kouder zou worden, zouden we dan extra koolzuurgas in de atmosfeer pompen om het klimaat constant te houden? Of zouden we dan toch maar zuinig blijven met



energie omdat straks de fossiele brandstoffen op zijn? En de klimaatverandering accepteren? En waarom accepteren wij die nu dan niet? Pas je maar aan, want het klimaat verandert altijd.

## Aanbevolen literatuur

Hét standaardboek over aarde en klimaat is *Earth's Climate, Past and Future* van William F. Ruddiman, W.H. Freeman, New York, ISBN 0-71167-3741-8 (2001).

Nederlandstalige boeken:

Harry Otten. *Klimaat in Beweging*. Uitgeverij Tirion, Baarn (2006) ISBN 90-52106509.

Salomon Kroonenberg, *De menselijke maat – de aarde over tienduizend jaar*. Atlas, Amsterdam (2006; 2008: 12e druk, herziene en uitgebreide uitgave) ISBN 9789045006819

Artikelen van de auteur o.a.: (te downloaden van [www.salomonkroonenberg.nl](http://www.salomonkroonenberg.nl))

Vijf miljard jaar klimaatsgeschiedenis. *Natuur en Techniek* 65, maart 1997, 3:33-40

De aarde in rood, groen en wit. *Geografie* 14, 2005, 6, 6-9.

Koelt het klimaat weer af? *De Standaard*, 13 mei 2008

Belangrijke websites met verdere verwijzingen naar boeken en artikelen over het klimaat:

[www.knmi.nl](http://www.knmi.nl) (vele nuttige links over het klimaat van Nederland)

[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch) (de officiële website van het klimaatpanel van de VN)

[www.realclimate.org](http://www.realclimate.org) (klimaatverontrusten)

[www.degroenerekenkamer.nl](http://www.degroenerekenkamer.nl) (Nederlandse klimaat- en milieucritici)

[www.platteland-in-perspectief.nl](http://www.platteland-in-perspectief.nl) (website van het kritisch tijdschrift Spil)

[www.sepp.org](http://www.sepp.org) (klimaatcritici)

[www.climateaudit.org](http://www.climateaudit.org) (klimaatcritici)

[www.climatesci.org](http://www.climatesci.org) (klimaatcritisch)

## COLOFON

Home Academy Publishers geeft hoorcolleges uit op cd, als download en streaming. Interessante onderwerpen, van geschiedenis tot natuurwetenschappen, voorgedragen door de meest boeiende sprekers. Zo kunt u kennis opdoen in de auto, in de trein, op de fiets of thuis op de bank.

Kijk verder op [WWW.HOME-ACADEMY.NL](http://www.HOME-ACADEMY.NL)

UITGAVE Home Academy Publishers  
Saturnusstraat 60 unit 70  
2516 AH Den Haag  
Tel: 070 - 3607613  
E: [info@home-academy.nl](mailto:info@home-academy.nl)

Deze uitgave is tot stand gekomen i.s.m. **Studium Generale TU Delft**

OPNAME Sandro Ligtenberg (Delft, januari & februari 2009)  
STEM INLEIDING F.C. van Nispen tot Sevenaer  
MUZIEK Cok Verweij  
MASTERING Frits de Bruijn

© Copyright 2009 Home Academy Publishers, Den Haag  
ISBN 978 90 8530 036 6  
NUR 77, 78

Allerechten voorbehouden. Behoudens de in of krachtens de Auteurswet van 1912 gestelde uitzonderingen, mag niets uit deze uitgave worden verveelvoudigd, uitgeleend, verhuurd, uitgezonden, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door (foto)kopieën, opnamen of enig andere manier, zonder voorafgaand schriftelijk toestemming van de uitgever.