

# Klimaatveranderingen in het Pleistoceen en Holoceen:

## de Kwartaire IJstijd – deel 1: het Pleistoceen

door Wim de Vries

*Civilization exists by climatological consent,  
Subject to change without notice*

Vrij naar Will Durant

### Inleiding

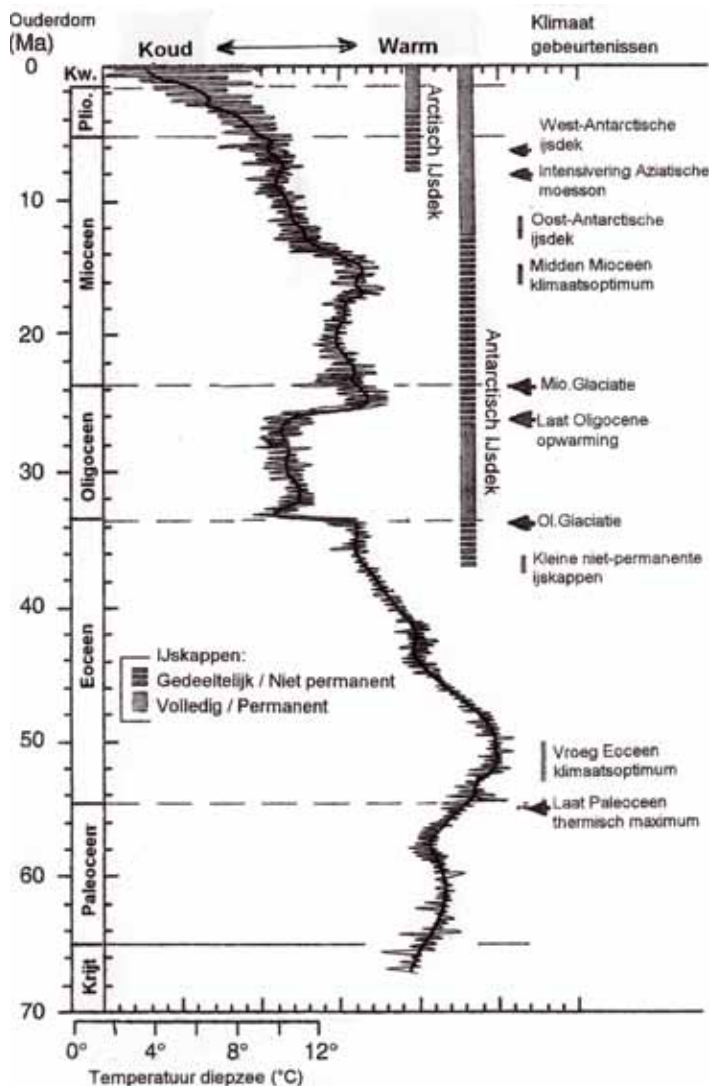
In brede kringen heerst de vanzelfsprekende mening dat het klimaat gelijkmatig is en weinig verandert. Daarbij wordt de suggestie gewekt dat de veranderingen die optreden uitsluitend te wijten zijn aan menselijke activiteit, met name door de productie van koolzuurgas. Maar niets is minder waar: het klimaat wisselt over een grote verscheidenheid aan tijdschalen en over een bereik dat zodanig groot is dat de voorspelde rampspoed dankzij menselijke bemoeienis daarbij in het niet verzinkt.

De Aardse klimaatvariëaties voltrekken zich over zowel heel korte perioden, van bijvoorbeeld minder dan een tiental jaren, als over heel lange tijdvakken van tientallen miljoenen jaren. Een uiterst spectaculaire ontwikkeling over een heel lange tijdschaal was de overgang van het wereldwijde warme klimaat aan het eind van het Eoceen (34 miljoen jaar geleden) – toen er palmen groeiden aan de noordkust van Siberië – naar het 'IJstijd'-klimaat van de afgelopen paar miljoenen jaren van de Aardgeschiedenis. Een belangrijke factor in de afkoeling was het moment, tijdens het Oligoceen, dat het huidige Antarctica dicht genoeg bij de Zuidpool was aangekomen, zodat zich een ijskap kon vormen op het continent. Een nieuwe fase van afkoeling vond plaats rond 3 miljoen jaar geleden, aan het einde van het Pliocene, toen de ijskap op Groenland ontstond.

De bekende temperatuurgrafiek van de afgelopen 55 miljoen jaar (schematisch afgebeeld in afb. 1) toont die spectaculaire verslechtering van het klimaat, maar laat ook zien dat de afkoeling niet gelijkmatig verliep, maar vele schommelingen vertoont. Ook blijkt uit deze grafiek dat de schommelingen groter zijn als de gemiddelde temperatuur op Aarde lager is. De laatste paar miljoen jaar kent de Aarde de laagste gemiddelde temperatuur van deze afkoelingsperiode en de grootste korte-termijnvariëaties in temperatuur.

Sinds de jaren '30 van de afgelopen eeuw is er grote belangstelling voor het klimaat van het Pleistoceen, de periode van de 'IJstijd', en het Holoceen, het tijdvak 'na de IJstijd'. (Voor de goede orde: de namen van de Kwartaire tijdvakken en de laatste tijdvakken van het Tertiair – de aanloop tot de 'IJstijd' – hebben geen enkele relatie met klimaatveranderingen. Zij verwijzen naar de verhouding tussen de aantallen soorten fossiele schelpdieren en zoogdieren die in deze perioden voorkwamen en de huidige levende vertegenwoordigers). Op veel plaatsen zijn nog sporen te vinden van de grote variëaties in het klimaat tijdens het Kwartaire, met name in de uitbreiding van de gletsjers. Waar nu helemaal geen ijs te bekennen is, kwamen in het verleden zeer uitgebreide gletsjers voor. Ook in Nederland vinden we de getuigenissen van de rand van de grote ijskap die zijn oorsprong had in Scandinavië, zoals de morenewallen van het klif van Gaasterland en het Rijk van Nijmegen. Tijdens de 'IJstijd' werden vooral noordelijk Europa, grote delen van Siberië en het noorden van Noord-Amerika tot over de Canadese grens meerdere malen bedolven onder een laag ijs van enkele kilometers dik. Daarnaast werden de gehele Arctische Oceaan en uitgestrekte gebieden van de noordelijke Atlantische Oceaan bedekt door een aaneengesloten plaat zeeijs. Afb. 2

Uit onderzoek werd snel duidelijk dat de Pleistocene 'IJstijd' geen aaneengesloten, enkele miljoenen jaren lange periode van lage temperaturen was, maar een afwisseling van zeer koude en warmere perioden, waarbij de gemiddelde temperatuur in een warme periode een paar graden Celsius hoger kon zijn dan tegenwoordig. Daarbij bleek dat de afwisseling van koude en warme tijden, vooral in het laatste half miljoen jaar,



Afb. 1. De 'Grote Afkoeling'; de verslechtering van het klimaat op Aarde sinds het begin van het Tertiair.

## De bepaling van paleotemperaturen: $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ -verhouding

Er bestaat geen thermometer die de temperaturen in het geologisch verleden kan meten; hiervoor is de hulp van zogenoemde proxy's noodzakelijk. Een proxy geeft niet een directe meting, maar een aanwijzing voor de hoogte van de temperatuur. Veel gebruikt is de verhouding van de isotopen van zuurstof in water.

### Atomen en isotopen

Een chemisch element bestaat uit atomen; een atoom kan voorgesteld worden als een bolletje met in het centrum een kleine kern die elektrisch positief geladen deeltjes bevat, de protonen; daaromheen draaien zeer kleine, elektrisch negatief geladen deeltjes, de elektronen. In een atoom zijn altijd evenveel elektronen als protonen. Protonen kunnen niet tegen elkaar liggen (ze stoten elkaar af, net als de gelijke polen van twee magneten), zij worden van elkaar gescheiden door neutronen, deeltjes die geen lading hebben. Het aantal protonen en neutronen bepaalt het atoomgewicht van een element; de massa van de elektronen is zo gering dat die te verwaarlozen is.

Een voorbeeld is waterstof, het eerste en lichtste element; dit heeft een kern met één proton en daaromheen draait één elektron, de massa is 1. Element nummer twee is helium: in de kern zijn twee protonen, om de kern draaien twee elektronen. De twee protonen worden gescheiden gehouden door twee neutronen; het atoomgewicht is dus 4. Op deze wijze zijn alle chemische elementen opgebouwd, waarbij het aantal neutronen sneller toeneemt dan het aantal protonen. Uranium bijvoorbeeld, een der zeer zware elementen, bevat 92 protonen (en dus ook 92 elektronen), en daarnaast 146 neutronen, het atoomgewicht is 238.

Er zijn veel elementen die atomen hebben met een verschillend aantal neutronen in de kern. Waterstof bijvoorbeeld bestaat voornamelijk uit één proton en één elektron. Maar van alle waterstofatomen heeft 0,015% naast het proton ook een

neutron in de kern; het atoomgewicht van deze waterstof is dus 2. Deze afwijkende atomen worden isotopen genoemd. Het is hetzelfde element, maar heeft door het verschil in massa net iets andere eigenschappen.

Zuurstof is element nummer 8 (dus 8 protonen); meer dan 99,7% van alle zuurstofatomen heeft 8 neutronen in de kern, de atomen van deze zuurstofisotoop worden aangeduid met  $^{16}\text{O}$ . Daarnaast heeft rond 0,2% van alle zuurstofatomen 10 neutronen in de kern, dit is de zuurstof-18 isotoop (aangegeven als  $^{18}\text{O}$ ). Dit isotoop is dus 1,25 maal zo zwaar als de  $^{16}\text{O}$ .

De isotopen van zuurstof worden gebruikt om temperaturen te schatten in het geologisch verleden.

Als zeewater verdampt, zal het 'lichtere' water met de  $^{16}\text{O}$ -isotoop sneller verdampen dan het 'zwaardere' water; het zeewater zal dus een hoger gehalte krijgen aan de zwaardere zuurstof-isotoop. Als de waterdamp later als sneeuw neervalt en zo bijdraagt aan een ijskap, dan bevat het ijs een hoger gehalte aan  $^{16}\text{O}$  dan gemiddeld (het ijs is, zoals dat wordt genoemd: 'verrijkt' aan  $^{16}\text{O}$ ); daarnaast wordt van het oceaanwater gezegd dat het 'verrijkt' is aan  $^{18}\text{O}$ . Deze verandering in de verhouding tussen de beide zuurstofisotopen in het zeewater wordt teruggevonden in de fossiele schelpen van de organismen die op dat moment leefden; vooral de schaalpjes van foraminiferen worden hiervoor gebruikt.

De verhouding tussen de twee zuurstofisotopen wordt aangegeven als  $\delta^{18}\text{O}$ , waarbij de waarde voor goed gemengd oceaanwater 0 (nul) bedraagt. Tijdens een glaciële periode is het oceaanwater 'zwaar' en kan de  $\delta^{18}\text{O}$ -waarde liggen tussen de +2,0 en +5,0; tijdens een interglaciële bereikt de  $\delta^{18}\text{O}$ -waarden tot -2,0. De variatie van  $\delta^{18}\text{O}$  is een maat voor de hoeveelheid ijs die er in die periode gelegen heeft en dus voor de temperatuur. Een verhouding die bij benadering geldt voor veel gebieden op Aarde die op een hogere breedtegraad dan 45° liggen is dat een 0,7‰ verandering in de  $\delta^{18}\text{O}$  een temperatuurverandering vertegenwoordigt van 1°C.

een opvallende regelmaat van 100.000 jaar laat zien. De klimaatgrafiek van een 100.000-jarige cyclus laat een lange periode zien van steeds voortschrijdende afkoeling, gevolgd door een snelle opwarming naar een korte periode van een warm klimaat, warmer dan heden. Afb. 3

Een 'Ijstijd' wordt gedefinieerd als een tijdvak in de Aardgeschiedenis waarin grote continentale ijsmassa's voorkomen. Het begin van onze huidige 'Ijstijd' – de Kwartaire Ijstijd – is niet goed aan te geven. Het moment dat de Antarctische ijskap ontstond, rond 33 miljoen jaar geleden, zou als begin gekozen kunnen worden, maar veelal wordt de veel latere vorming van de ijskap van het Noordpoolgebied, voornamelijk die van Groenland, ongeveer drie miljoen jaar geleden, als begin genomen. Het ijs van Antarctica en Groenland tezamen heeft op dat moment een oppervlakte van rond 15 miljoen km<sup>2</sup>; ongeveer 13% van het landoppervlak was bedekt door ijs. Zouden wij dát als criterium nemen voor een ijstijd, dan verkeert de Aarde op het ogenblik nog altijd in een 'Ijstijd'.

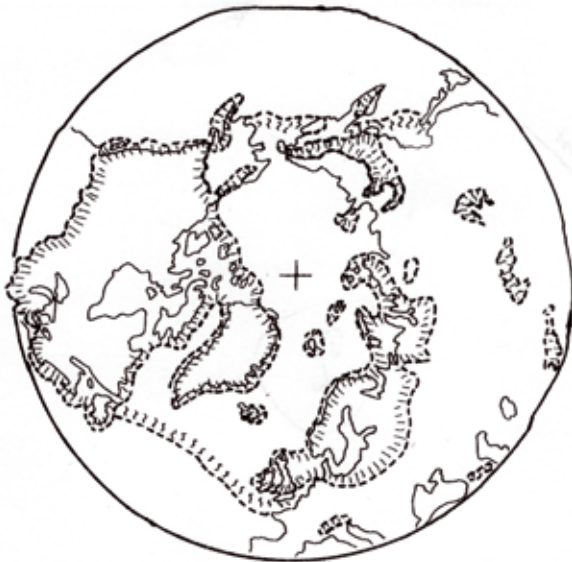
Onze 'Ijstijd' bestaat dus uit een afwisseling van koude fasen – waarin maximaal 37 miljoen km<sup>2</sup> van het continentale landoppervlak bedekt werd met een tot enkele kilometers dikke ijslaag – en warme perioden – waarin er op Aarde vrijwel geen landijs aanwezig was. Uitzondering is het oostelijk deel van Antarctica, waar de ijslaag sinds 33 miljoen jaar geleden vrijwel permanent is. We spreken van koude, 'glaciële' perioden, afgewisseld met warme, 'interglaciële' perioden. De koude periode van de afgelopen 100.000 jaar is dus niet de laatste 'Ijstijd', maar de laatste – Pleistocene – glaciële periode van de – Kwartaire – Ijstijd.

Op dit moment bevinden we ons in een interglaciële periode in het ritme van afwisselend koudere en warmere perioden. De Aarde zal, wat ook de bemoeienis van de mens zal uitrichten, naar het volgende glaciële gaan, dat over enkele tienduizenden jaren zijn dieptepunt zal bereiken.

### Milanković-variaties

Een verklaring voor de afwisseling van koude en warme perioden in een ijstijd was onmogelijk in Aardse processen te vinden. Het idee ontstond dat de basisoorzaak lag in de ingewikkelde relatie tussen de Aarde en de Zon. Want de stand van de Aarde ten opzichte van de Zon en de afstand tussen beide zijn niet stabiel: de Aarde heeft een elliptische baan om de zon, zij tolt om haar as, en de stand van de as wisselt door de tijd. Het is de grote verdienste geweest van de Servische wiskundige Milutin Milanković die met jarenlang rekenwerk (zonder computer) het verband legde tussen deze variaties en de verschillen in de door de Aarde ontvangen hoeveelheid zonnestraling. Afb. 4

Doordat de baan van de Aarde om de Zon geen cirkel is, maar een ellips, en de aardas niet loodrecht op het vlak van de aardbaan staat, hebben wij op Aarde seizoenen. Daarnaast heeft de aardas geen vaste oriëntatie, maar schommelt hij. Ieder van deze bewegingen varieert met een bepaalde, regelmatige periode; de 100.000-jaar cyclus is er een van. Al deze variaties geven verschillen in de hoeveelheid zonnestraling die de Aarde ontvangt en hebben dus invloed op het klimaat. Afb. 5 De drie bovengenoemde cycli – de Milanković-cycli – werken op het ogenblik goed samen: de 100.000-jaar cyclus is in de afgelopen 500.000 jaar belangrijk geweest als de begrenzing



Afb. 2. Boven: verbreding van de landmassen en uitbreiding van het zeeijs in het Arctisch gebied tijdens een glaciële periode. Onder: verbreding van het zeeijs tijdens de winter van 2004.

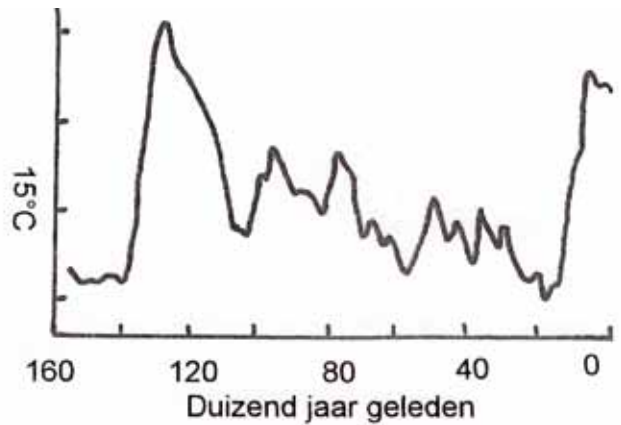
van de glaciële- en interglaciële perioden. De detailgolven van de grafiek van afb. 3 laten de invloed van tilt (de schuine stand van de aardas) en precessie (het schommelen van de aardas) zien. Zij zijn echter niet exclusief voor de recente aardgeschiedenis. Zij zijn een algemeen fenomeen en zijn in ieder geval te volgen door het gehele Mesozoïcum en Tertiair, niet als de variaties binnen een ijstijd – zo koud werd het toen niet – maar als klimaatvariaties die tot uiting komen in een regelmatige afwisseling van bijv. kalkige en mergelige lagen.

### Aardse invloeden op het klimaatsysteem

De wereldwijde temperatuurverschillen van de atmosfeer tijdens een glaciële–interglaciële cyclus kunnen rond de 20°C bedragen! Dat enorme verschil kan op geen enkele wijze worden verklaard door de Milanković-variaties alleen; die geven verschillen van slechts enkele graden. Hier schiet de Aarde te hulp met een aantal processen die de kleine Milanković-variaties in belangrijke mate kunnen versterken. Van groot belang zijn onder meer:

#### 1. De verdeling van warmte over het aardoppervlak door oceaanstromingen.

Als de oceaanstromingen alle delen van de oceanen bereiken, dan wordt de gehele Aarde gelijkmatig opgewarmd. Worden bepaalde delen van oceanen echter niet bereikt (doordat er een continent 'in de weg zit'), dan veroorzaakt dat plaatselijk afkoeling, waarvan



Afb. 3. Vereenvoudigde klimaatkromme van een cyclus van een koude en warme periode. De figuur is opgebouwd uit verschillende curven, de meest opvallende is de 100.000-jaar cyclus; de kleinere golven bestaan uit een 41.000-jaar cyclus (de sterkte daarvan bedraagt ongeveer de helft van die van de 100.000-jaar cyclus), en de 19.000-jaar cyclus, die een sterkte heeft die rond de drie kwart van die der 41.000-jaar cyclus bedraagt.

de invloed zich kan uitstrekken over de gehele Aarde.

#### 2. De onregelmatige verdeling van land en zee.

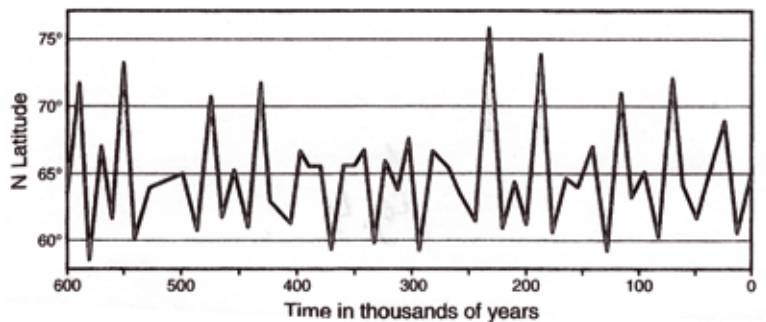
Land houdt warmte niet vast, maar geeft het snel weer af aan de ruimte, terwijl de zee veel warmte kan opnemen en vasthouden.

#### 3. De positie van landgebieden nabij de polen van de Aarde.

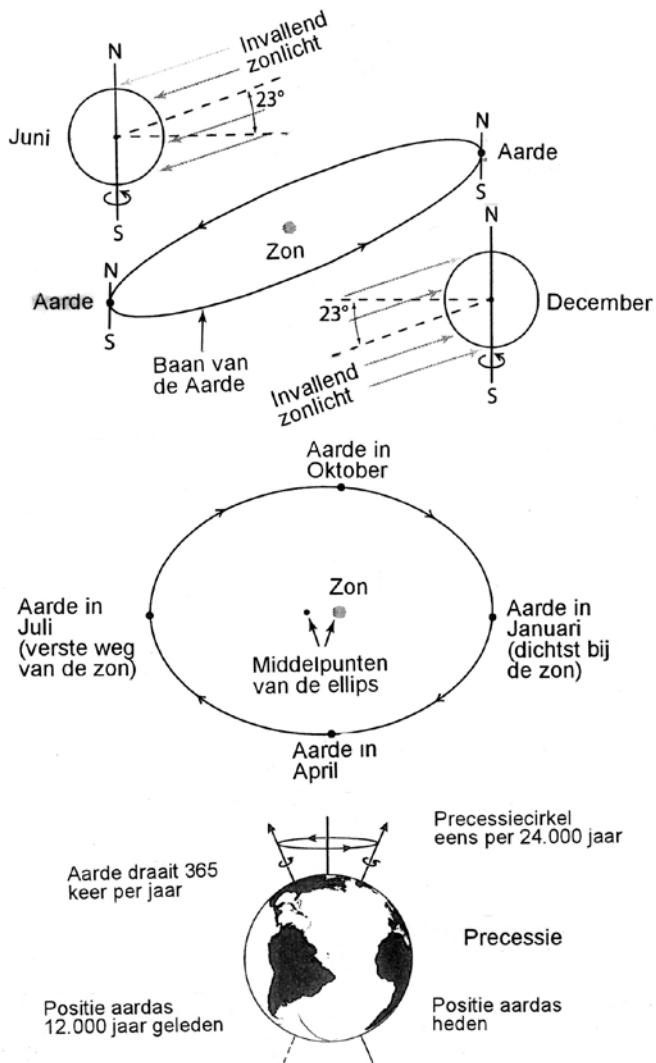
Alleen als er een landgebied ligt nabij een pool, dan kan er sneeuw accumuleren en kan er een permanente ijskap worden gevormd. Voorwaarde is daarbij de nabijheid van open zee, waardoor er voldoende vocht in de lucht kan worden aangevoerd voor sneeuwval.

#### 4. Van heel groot belang is het gegeven dat een beginnende ijskap de mogelijkheid bezit om steeds sneller aan te groeien.

Van een groeiende ijskap komt een steeds groter gedeelte boven de sneeuwgrens te liggen, zodat een steeds groter gebied met 'eeuwige' sneeuw bedekt wordt. Noodzakelijk is een voldoende aanvoer van sneeuw. Doordat ijs van het dikste deel van een ijskap naar de randen 'stroomt', zal een ijskap zich steeds verder uitbreiden. Het ijs is een bron van koude en zorgt ervoor dat er over een groot gebied rond de ijskap een koud klimaat gaat heersen. De koude wordt versterkt door het zogenoemde albedo van een sneeuw- en ijsveld: het witte oppervlak kaatst de zonnestraling terug, zodat veel minder zonnestraling ten goede komt aan de verwarming van het aardoppervlak en van de atmosfeer. Afb. 6

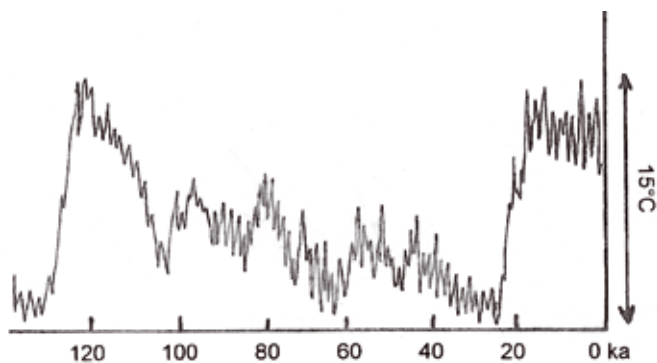


Afb. 4. De grafiek van de instraling van de zon zoals die werd berekend door Milankovic. De lijn van de grafiek geeft de zogenoemde 'equivalent breedtegraad' aan, ofwel de hoeveelheid zonnestraling die op 65° noorderbreedte op een bepaald moment, bijv. 230.000 jaar geleden werd ontvangen, vergeleken met de hoeveelheid die op het ogenblik op 65° NB wordt ontvangen. De hoge pieken in de curve geven dus de glaciële tijdvakken aan.



### Kortdurende verstoringen van de glaciële-interglaciële cycli tijdens het Pleistoceen

Een bijzonder belangwekkend onderzoek vond plaats in het begin van de jaren '70 van de afgelopen eeuw. Toen bleek na de bestudering van een boorkern uit de ijskap van Groenland dat het temperatuurverloop van de laatste glaciële periode helemaal niet de min of meer vloeiend golvende curve toonde van de Milanković-effecten (vooral veroorzaakt door precessie en excentriciteit). Integendeel, het Aardse klimaat toonde veelvuldige, zeer snelle wisselingen van veel kortere tijdsduur, vooral naar koude perioden.



Afb. 6. Schematisch, maar gedetailleerd temperatuurprofiel van de afgelopen glaciële periode. Tussen de 'toppen' van de grafiek van de 100.000-jaar elliptische is de invloed van vele variaties met een kortere cyclustijd te zien.

Afb. 5. De variaties in de baan van de Aarde om de Zon.

1. De rotatie van de Aarde staat niet loodrecht op het vlak van de baan om de zon, maar maakt een hoek die op het ogenblik  $23,5^\circ$  bedraagt. Deze hoek varieert echter op een regelmatige wijze tussen  $24,5^\circ$  en  $21,5^\circ$ . Neemt deze hoek toe, dan neemt het temperatuurverschil van de seizoenen toe, bij een geringere hoek zijn de verschillen minder groot. Deze schommeling van de aardas, de 'tilt', heeft een cyclustijd van ruim 40.000 jaar (veelal aangeduid als de 41.000 jaar cyclus).

2. De baan van de Aarde om de zon is geen cirkel, maar een ellips, met de zon in een van de brandpunten. De Aarde ontvangt op het ogenblik op het verst verwijderde punt 6,8% minder zonnestraling dan op het punt het dichtst bij de zon (het verschil in afstand bedraagt heden 5,1 miljoen km op een gemiddelde afstand van 150 miljoen km). De mate van excentriciteit wisselt in de loop van de tijd van vrijwel een cirkel (excentriciteit = 0,005) tot licht elliptisch (0,07); bij deze laatstgenoemde waarde van de maximale excentriciteit ontvangt de Aarde op het punt van de baan dat het verste verwijderd is van de zon rond de 23% minder zonnestraling dan in de cirkelvormige baan. De cyclustijd van de wat sterkere ellips naar de meer cirkelvormige baan bedraagt 100.000 jaar. Er is nog een variatie gevonden in de aardbaan die een cyclustijd heeft van ruim 400.000 jaar. Deze cyclus, waarvan we de oorzaak niet kennen, geeft wel duidelijke verschillen in de minimumtemperatuur van de 100.000 jaar durende glaciële cycli.

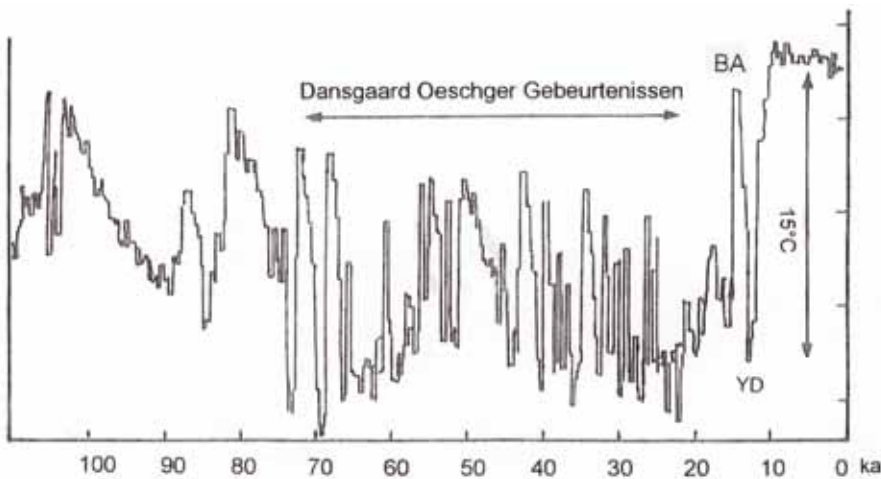
Daarnaast verplaatst de Aarde zich door het jaar ook over haar baan, wat inhoudt dat, in de loop van de tijd, het tijdstip dat de Aarde zich op een bepaald punt op haar baan bevindt, zoals het begin van de zomer of van de winter, en de equinoxen of eveningen (als de zon recht boven de evenaar staat), alsmede het midzomer- en midwinterpunt - de solstia of zonnewendes -, verschuiven over de baan. Dit geeft in de loop van de tijd verschillen in de ontvangen zonnestraling door verschillen in de afstand van de Aarde tot de zon.

3. De aardas heeft geen vaste oriëntatie, maar roteert om een as die verticaal staat op de ecliptica (dit is het vlak van de omloopbaan van de Aarde om de zon). Dit maakt dat niet alleen de solstia en equinoxen in de loop van de tijd verschuiven over de elliptische baan, maar dat ook de oriëntatie van de Aarde ten opzichte van de zon in de loop van de tijd verandert. Op het ogenblik bevindt de Aarde zich op de kortste afstand van de zon tijdens de winter op het noordelijk halfrond; 11.000 jaar geleden viel de kortste afstand van de Aarde tot de zon tijdens de zomer op het noordelijk halfrond. Deze zogenaamde 'precessie van de equinoxen' heeft een cyclustijd van ruim 19.000 jaar. Deze cyclus van de tolbeweging van de aardas heeft een belangrijke invloed op het klimaat.

In de periode tussen 70.000 en 15.000 jaar geleden is aan de hand van variaties in de zuurstofisotopenverhoudingen een opvallende opeenvolging van heel korte en snelle wisselingen gevonden; de variaties in temperatuur bedroegen tot rond de  $10^\circ\text{C}$ . Er worden een 20-tal van deze korte afkoelingsperioden onderscheiden, zij worden de *Dansgaard-Oeschger gebeurtenissen* genoemd. Deze temperatuurvariaties werden voorheen aangeduid met stadialen en interstadialen. Er is lange tijd gezocht naar een verklaring voor het ontstaan van deze opvallend snelle en kortstondige afwijkingen. Afb. 7

Reeds voor de ontdekking van deze snelle variaties was bekend dat, onder meer aan het einde van het laatste glaciële, de algemene trend van verwarming plotseling werd onderbroken door een korte periode van sterke afkoeling en snelle opwarming.

Tussen 18.000 en 14.500 jaar geleden was het op Groenland relatief koud, daarna volgde een periode van snelle opwarming, de *Bölling-Allerød* periode. Deze duurde maar kort, ongeveer 1800 jaar. Daarna, 12.700 jaar geleden, begon een plotselinge, zeer snelle afkoeling naar de zogenaamde Jongere Dryas periode (YD in afb. 7), genoemd naar een Alpiene plant: *Dryas octopetala*, de achtster of zilverwortel, die in die periode in onze streken migreerde naar zeeniveau. De Jongere Dryas duurde 1350 jaar en had temperaturen die beduidend lager lagen dan heden. 's-Zomers was het maar 4 tot  $6^\circ$  kouder, maar de gemiddelde jaartemperatuur op Groenland was  $17^\circ\text{C}$  lager dan die van vandaag, wat betekent dat de temperatuur 's-winters rond de  $25^\circ\text{C}$  lager was dan die van heden. De afkoeling nam slechts enkele decennia in beslag, maar de opwarming voltrok



Afb. 7. Temperatuurprofiel van het afgelopen glaciaal met de Dansgaard-Oeschgergebeurtenissen. Aangegeven zijn de warme Bølling-Allerød periode (BA) en de uitzonderlijk koude fase van de Jongere Dryas (YD)

zich nog veel sneller: rond 11.500 jaar geleden herstelde de temperatuur zich mogelijk binnen een decade met ongeveer 10°. De temperatuurverschillen tussen de Bølling-Allerød en de Jongere Dryas zijn ook gevonden in Scandinavië, wat een aanwijzing is dat deze wisselingen veroorzaakt werden door gebeurtenissen in de noordelijke Atlantische Oceaan.

### De grote oceanstromingen en het klimaat

De afkoeling van de Jongere Dryas wordt algemeen gezocht in een verstoring van het patroon van stromingen in de oceanen en wel specifiek van het stoppen van de Golfstroom in de noordelijke Atlantische Oceaan.

De Golfstroom is een onderdeel van een wereldwijd transportstelsel van oceaanwater. Warm, zout water, dat wordt aangevoerd vanuit het Caribische gebied, koelt af op zijn weg naar het noorden; daardoor krijgt het water een steeds grotere dichtheid tot het moment waarop het water zo zwaar wordt dat het wegzakt naar de oceanbodem. Een deel van de Golfstroom zakt naar beneden bij de zuidkust van IJsland, het andere deel stroomt veel verder, ten oosten langs IJsland tot in de Witte Zee bij de noordpunt van Noorwegen, waar het wegzakt naar de diepte. Dit wegzakkende water vormt de 'Noord-Atlantische diepwatermassa'. Het stroomt over de zeebodem naar het zuiden en komt in de Zuidelijke Oceaan bij de kust van het Zuidpoolgebied weer naar het oppervlak. Deze Atlantische circulatie is een deel van de zogenoemde 'Great Ocean Conveyor' - de wereldwijde 'grote oceaan-transportband'. Het is een belangrijk mechanisme voor de verdeling van warmte over de aardbol en heeft een grote invloed op het klimaat. De Golfstroom-tak langs Noorwegen is verantwoordelijk voor het zeer gematigde klimaat van noordwestelijk Europa.

Oceanstromingen hebben door de gehele geologische geschiedenis een heel belangrijke rol gespeeld in de verdeling van warmte over de aardbol.

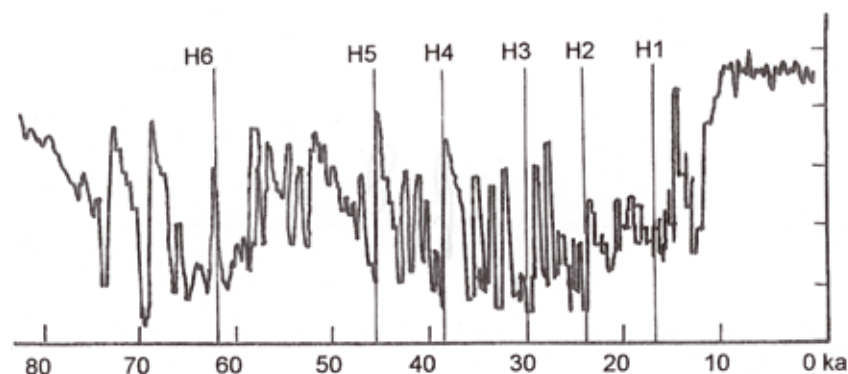
Het wereldwijde warme klimaat van het Mesozoïcum en het eerste gedeelte van het Tertiair (zie afb. 1) had de Aarde te danken aan een intensieve uitwisseling van warmte in de (sub-)tropische gordels. Door de grote opening tussen de beide Amerikaanse continenten en tussen Afrika en Europa (de Tethys Oceaan), was in die periode een wereldwijde circulatie van oceaanwater mogelijk. In de loop van het Tertiair kwam een einde aan dit patroon van oceanstromingen, toen de vulkanische 'landbrug' ontstond tussen Noord- en Zuid-Amerika en daarnaast de Tethys werd gesloten door de nadering van Afrika naar Europa en het naar het noorden bewegende Arabische blok. Heden ten dage is er geen wereldwijde uitwisseling van warmte via oceanstromingen vanuit de tropische of subtropische gebieden. Wel is de Aarde op dit moment, met de sterke stroming om de Zuidpool, in het bezit van een belangrijke bron van koude: dit water is zeer koud door de invloed van de ijskap van het Zuidpoolgebied en de geringe uitwisseling met andere oceanstromingen. De circum-Antarctische stroming is ontstaan toen Tasmanië en Zuid-Amerika losraakten van Antarctica, rond de 30 miljoen jaar geleden.

Met dit in gedachten gaan wij terug naar de zeer snelle afkoeling van het klimaat van de warme Bølling-Allerød naar de koude Jongere Dryas. Hiervoor is een catastrofale gebeurtenis nodig. Een vrij algemeen geaccepteerde verklaring is dat de 'transportband' van warm oceaanwater in de noordelijke Atlantische Oceaan werd onderbroken. De oorzaak is een plotselinge toevloed van zoet water in dat deel van de Atlantische Oceaan. In die periode lag langs de zuidrand van de Canadese ijskap een rij smeltwatermeren. Een daarvan, het zeer grote Agassizmeer, midden in het continent, is aan het begin van de Jongere Dryas grotendeels leeggelopen. Het waterniveau in het meer daalde in zeer korte tijd met 30 meter. De enorme vloed aan zoet water is naar het oosten gestroomd, langs de zuidrand van de ijskap, door de St.-Lawrence-rivier en verder langs Newfoundland de noordelijke Atlantische Oceaan in. Deze stroom verdunde het zoute oppervlaktewater, waardoor het water minder zwaar werd en niet meer naar de oceanbodem kon wegzakken. De Golfstroom stakte en daarmee ook de warmtetoevoer naar de Noorse Zee. Door de afkoeling die daarop ontstond, nam de sneeuwval in het noorden van Europa sterk toe en begon de grote Europese ijskap te groeien. Er vormde zich in een later stadium ook zeeijs over een uitgestrekt gebied. Ijskap en zeeijs zorgden, tezamen met de toename van de albedo, voor een nog sterkere afkoeling van noordelijk Europa en het noorden van Noord-Amerika.

Waarschijnlijk stroomde de Golfstroom in die periode vanuit het Caribische gebied recht naar het oosten de centrale Atlantische Oceaan over.

### Kortstondige verstoringen van het Noord-Atlantisch klimaat

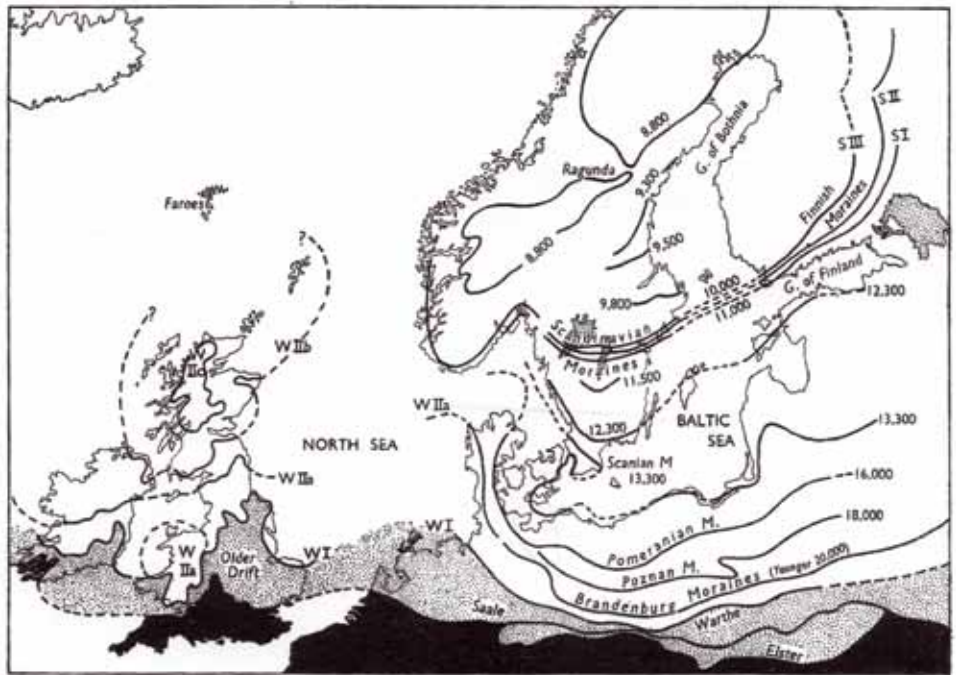
Na de ontdekking van de plotselinge overgang van de Bølling-Allerød naar de koudere Jongere Dryas, zijn bodemsedimenten van de Atlanti-



Afb. 8. De 'Heinrich-armada's' in het temperatuurprofiel van de laatste helft van de afgelopen glaciële cyclus. Het laatste scherpe negatieve dal links van de H1-lijn is de koudeperiode van de Jongere Dryas.

Afb. 9. Kaart van de uitbreiding van de glaciaties van het Pleistoceen en de fasen van 'terugtrekken' en de stationaire fasen van de rand van de laatste ijskap tot in het Holoceen. Als de rand van de ijskap enige tijd op eenzelfde positie blijft vormt zich een duidelijke eindmorenewal.

Glacialen: Elster = Mindel; Riss = Saale = Older Drift; Würm = Weichsel = Newer Drift. Warthe is het begin van het Würm = WI, ouderdom 10.000 jaar; WIib is 12.800 jaar oud; WIic is een uitbreiding van het ijs in de Schotse Hooglanden van ongeveer dezelfde ouderdom als de Scandinavische morenen.



sche Oceaan tussen Newfoundland, Ierland en Spanje onderzocht. Tussen de 'gewone' kalkmodder met klei en fijn zand zijn laagjes gevonden van grover terrigeen materiaal (tot grof zand), dat soms opvallend grofkorrelig was (zelfs met keien). Daarbij was er een karakteristieke afname van de dikte van de laagjes van rond een decimeter dicht bij de Canadese oostkust tot millimeters nabij de Britse Eilanden. Deze laagjes werden geïnterpreteerd als materiaal dat zich in het gletsjerijs bevond en uit smeltende ijsbergen op de oceaانبodem terecht is gekomen. Het idee ontstond dat er met grote regelmaat brokken van het front van de Canadese Laurentide ijskap afbraken die dan als de wagons van een trein achter elkaar door de Hudson Straat naar het oosten wegdreven tot ver de Noordelijke Atlantische Oceaan op. Er zijn een zevental van deze zogenoemde 'Heinrich-gebeurtenissen' herkend; zij vonden plaats tussen de 60.000 en 17.000 jaar geleden. Afb. 8 'Heinrich ijs-armada's' ontstaan doordat smeltwater onder het ijs door over de rotsbodem stroomt, waarbij in Canada het smelten van de ijskap aan de onderzijde ook wordt geholpen door de radioactieve warmteproductie van de granieten van het Canadese Schild. Het smeltwater verzamelt zich ergens onder het ijs om na verloop van tijd plotseling, in één keer, aan de rand van de ijskap te voorschijn te komen, waardoor enorme stukken van de ijsrand meegesleurd worden.

Heinrich-armada's komen verspreid voor in de periode van de Dansgaard-Oeschgergebeurtenissen, maar er zijn meer Dansgaard-Oeschgergebeurtenissen gevonden dan Heinrich-gebeurtenissen. De Dansgaard-Oeschgergebeurtenissen hebben, in tegenstelling tot de Heinrich-gebeurtenissen, geen duidelijke sedimentlaagjes in de zeebodem achtergelaten. Zij zijn in eerste instantie aangetoond door variaties in de zuurstof-isotopen. Zij hebben minder grote temperatuurdalingen veroorzaakt dan de Heinrich-gebeurtenissen. De laatste van de Heinrich-gebeurtenissen vond plaats rond 17.500 jaar geleden; de verstoring van de watercirculatie in de noordelijke Atlantische Oceaan veroorzaakte een 3000 jaar durende koude periode met telkens weerkerende grote uitbreidingen van zeeijs in de noordelijke Atlantische Oceaan. Tijdens de daarop volgende Bølling-Allerødperiode was de oceanische transportband weer hersteld en verdween het zeeijs, dat weer terugkeerde tijdens de Jongere Dryas periode.

Ook de Dansgaard-Oeschgergebeurtenissen worden verklaard door plotselinge toevloeden van smeltwater die de oceaanstromingen van de noordelijke Atlantische oceaan hebben beïnvloed en daarbij ook het klimaat. De effecten zijn gevonden in variaties in isotopensamenstelling van onder meer het Groenlandse ijs.

Zoals hierboven beschreven zijn Heinrich-gebeurtenissen te herkennen aan laagjes detritisch terrigeen sediment op de zeebodem; Dansgaard-Oeschgergebeurtenissen hebben

nauwelijks sedimentaire sporen achtergelaten, maar zijn toch ook in de bodem van de noordelijke Atlantische Oceaan teruggevonden door variaties in het gehalte aan detritische korrels in het diepzeesediment. Deze zijn gevonden in Pleistocene en Holocene sedimenten.

Het gegeven dat Dansgaard-Oeschgergebeurtenissen regelmatig en veelvuldig voorgekomen zijn, geeft aan dat het stromingspatroon in de noordelijke Atlantische Oceaan blijkbaar gemakkelijk te verstoren is door een relatief geringe verandering; de Golfstroom stopt dan of wordt afgebogen naar een zuidelijker richting en daarmee wordt de warmtevoer naar noordwestelijk Europa onderbroken. Op het ogenblik bevindt de noordelijke Atlantische Oceaan zich in de 'circulatie-mode' - van het Caribische gebied tot ver in het noordelijk deel van de Atlantische Oceaan waar het oppervlaktewater naar de bodem wegzakt om na een lange reis naar het zuiden bij het Zuidpoolgebied weer boven te komen. Aangenomen wordt dat slechts een geringe verstoring - zoals de aanvoer van een relatief geringe hoeveelheid smeltwater - voldoende is om het patroon van de stroming om te laten slaan in de 'stationaire mode' van een Dansgaard-Oeschgergebeurtenis. Op zijn beurt zal deze toestand dan ook gemakkelijk weer kunnen omslaan naar de circulatietoestand.

Het einde van het Pleistocene IJstijdvak en het begin van het Holoceen wordt op het vasteland van noordelijk Europa gekenmerkt door het verdwijnen van de grote landijskap (op het ogenblik zijn alleen de ijskappen van Groenland en het Zuidpoolgebied nog overgebleven van de uitgestrekte Pleistocene ijsvelden).

Een klassieke studie van het 'terugtrekken' van de ijskap in noordelijk Europa heeft fraai in kaart gebracht hoe de morenevelden en -ruggen de momenten van stilstand of gering vooruitschuiven van de ijsrand vertegenwoordigen. Zij tonen de veelvuldige haperingen in de warmtetoename en zelfs het optreden van wat koudere tijdvakken tijdens de periode van het algemene verdwijnen van de laatste ijskap. Afb. 9

Dit is deel 1 van een tweeluik over het klimaat in het Pleistoceen en het Holoceen. Deel 2 verschijnt in het maantnummer van volgend jaar.