

Kan men twee keer in dezelfde rivier stappen?

Klimaatverandering door de tijd

Rede uitgesproken bij de aanvaarding van het ambt

van bijzonder hoogleraar Klimaatmodellering en klimaatanalyse

aan de Faculteit Geowetenschappen

van de Universiteit Utrecht

op vrijdag 29 februari 2008

door

Nanne Weber

Universiteit Utrecht



COLOFON

Uitgave

Universiteit Utrecht, 2008

Grafische verzorging

Geomedia – Faculteit Geowetenschappen – Universiteit Utrecht

Druk

AD druk – Zeist

Foto voorzijde. Een steenboog uit Utah (VS), ontstaan door winderosie. Dergelijke bogen, symbool van (meestal) niet-waarneembare verandering, kunnen ook ontstaan door erosie door regenwater en vorst, rivieren of zeestromingen. Foto van G.M.R. Duijnstee, met dank aan C. Looy en I. Duijnstee.

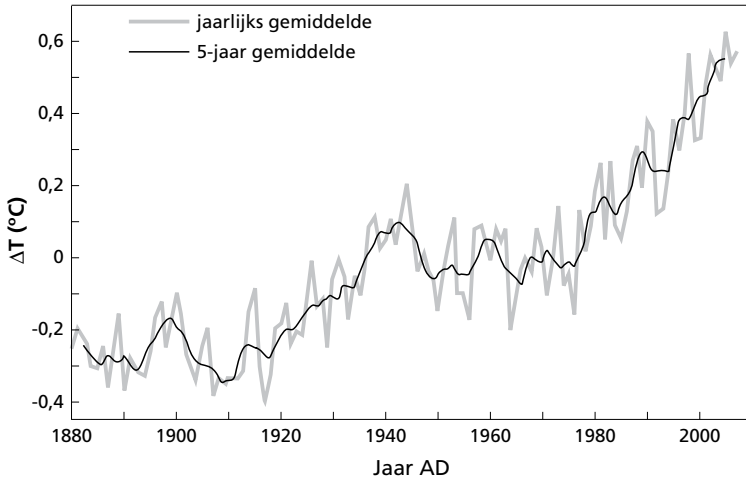
Foto achterzijde van M.Verzoo.

Mijnheer de Rector, leden van het bestuur van het Utrechts Universiteitsfonds, familie en vrienden, gewaardeerde aanwezigen,

Kan men twee keer in dezelfde rivier stappen? Dat is de vraag die ik U vandaag wil voorleggen. Als we bij zomaar een rivier gaan kijken, dan is er geen enkele reden om aan te nemen dat deze er morgen niet net zo bij zal liggen als vandaag. En we vergeten het snel als het gisteren of eergisteren anders was. Wordt het ooit nog mooi weer, zeggen we tegen elkaar als het een paar dagen geregend heeft. Krijgen we ooit nog een strenge winter met een Elfstedentocht? Gelukkig zijn er mensen die bijhouden wat het weer doet, of die het opschrijven wanneer een rivier overstroomt of droogvalt. Zo weten we wat hetzelfde blijft en wat anders is.

Het klimaat is tegenwoordig *hot*. Verandert het of niet? Om deze vraag te beantwoorden, kijken we meestal naar de wereldgemiddelde temperatuur. Het is niet zo dat je er in Nederland veel van merkt als het gemiddeld op aarde een beetje warmer of kouder wordt, maar de wereldgemiddelde temperatuur is een goede graadmeter voor de forceringen die op het klimaat inwerken en daarom kijken we ernaar. Deze mondiale temperatuur wordt berekend uit heel veel lokale metingen, die op sommige plaatsen al heel lang verricht worden. Het KNMI heeft bijvoorbeeld een meetreeks van de temperatuur in Nederland die in 1706 begint. Dat is bijzonder, want de meeste lokale reeksen beginnen veel later. Pas na 1880 wordt er op zoveel plaatsen op aarde gemeten, dat we een betrouwbaar beeld hebben van het verloop van de wereldgemiddelde temperatuur [fig. 1]. Zo kunnen we vaststellen dat het klimaat niet constant is, maar variabel, en dat het langzaam warmer wordt op aarde. Instituten, die zich met dit soort klimaatboekhouding bezighouden, brengen vaak een persbericht uit bij het afsluiten van een maand, een seizoen of een jaar. De jaartemperatuur haalt meestal wel de krant of het TV journaal. Het afgelopen jaar was weer warmer dan normaal, zoals de meeste jaren sinds 1990. Nieuwsredacties vinden dit belangrijk genoeg om te melden, en terecht.

Het is zeer waarschijnlijk dat de recente warme jaren toegeschreven kunnen worden aan de toegenomen concentratie van kooldioxide (CO₂) en de andere broeikasgassen methaan en lachgas. Deze gassen komen van nature voor in de atmosfeer en samen met waterdamp zorgen ze ervoor dat de atmosfeer langgolelige straling uitzendt. Hierdoor is het aardoppervlak warmer dan het zonder dit zogenaamde broeikas effect zou zijn. De toename in CO₂ wordt



7109

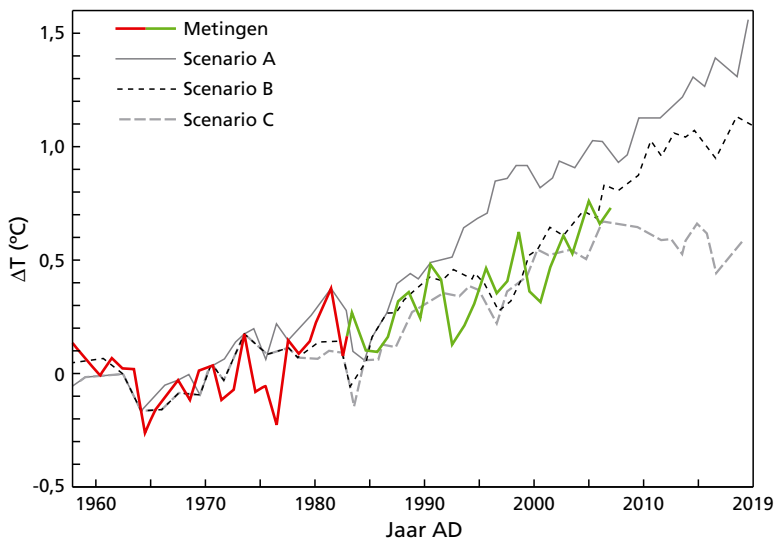
Figuur 1 – Het verloop van de wereldgemiddelde temperatuur (jaarlijkse en 5-jaar gemiddelde waarden), berekend uit lokale meetreeksen van meteorologische stations, scheepswaarnemingen en satellietgegevens. Te zien zijn afwijkingen ten opzicht van het gemiddelde over de periode 1951-1980. Bron: Hansen et al. (2006) en NASA Goddard Institute for Space Studies (jan. 2008).

veroorzaakt door de grootschalige verbranding van fossiele brandstoffen door de mens, die is begonnen tijdens de Industriële Revolutie. Ook methaan en lachgas nemen toe door menselijke activiteiten. De toename in deze broeikasgassen zorgt voor wat tegenwoordig het antropogene broeikaseffect genoemd wordt: een versterkte opwarming van het aardoppervlak.

Het klimaat en de mens

In tegenstelling tot wat U misschien denkt, is de wetenschappelijke aandacht voor het antropogene broeikaseffect niet iets van de laatste jaren. De Zweedse onderzoeker Arrhenius was er rond 1900 al mee bezig. Hij rekende als eerste uit wat het effect van een verdubbeling of halvering van de CO_2 concentratie op de temperatuur zou zijn en kwam uit op een opwarming of afkoeling van ongeveer 5 graden. Hij dacht hierbij in de eerste plaats aan natuurlijke CO_2 fluctuaties, die

het optreden van oude broeikasklimaten en ijstijden zouden kunnen verklaren, maar hij speculeerde erover of de antropogene CO₂ emissies voldoende groot waren om op den duur het klimaat te veranderen (Arrhenius, 1907). Zo'n dertig jaar later maakte de Brit Callendar de eerste ruwe schattingen van de feitelijke stijging van de CO₂ concentratie in de atmosfeer en hij toonde aan dat deze toename in overeenstemming is met schattingen van de productie van CO₂ door de verbranding van fossiele brandstoffen (Callendar, 1938). Callendar deed ook een voorspelling voor de toekomst: in de 22ste eeuw verwachtte hij een opwarming van 0,6 °C bij een stijging van de CO₂ concentratie met 30% ten opzichte van de pre-industriële waarde.



7109

Figuur 2 – Het door een klimaatmodel berekende verloop van de wereldgemiddelde temperatuur volgens de waargenomen forcering voor de periode 1958-1983 en volgens de drie scenario's A, B en C voor de periode 1984-2019. De gemeten temperatuur ten tijde van de berekeningen is aangegeven met een rode lijn. Bron: Hansen et al. (1988). Later zijn de gemeten temperaturen voor de periode 1984-2007 toegevoegd (groene lijn), zie ook Hansen et al. (2006).

Sinds 1958 zijn er zeer nauwkeurige en continue metingen van de CO₂ concentratie in de vrije atmosfeer, die een gestage toename laten zien. Dit resultaat, en de opkomst van krachtige computers, heeft een enorme impuls gegeven aan het wetenschappelijk onderzoek naar antropogene klimaatveranderingen. Hier ziet u een van de eerste berekeningen (Hansen et al., 1988) van het verloop van de wereldgemiddelde temperatuur onder invloed van de gemeten toename in CO₂ en andere broeikasgassen [fig. 2]. Het gebruikte model was destijds, begin 80-er jaren, zeer geavanceerd. Het houdt rekening met veel verschillende processen die de stralingsbalans beïnvloeden: de concentratie aan broeikasgassen, maar ook wolkenvorming, neerslag en sneeuw, transport van warmte door luchtstromingen en de interactie met het landoppervlak. Alleen de oceaan wordt nog heel simpel beschreven als een bak stilstaand water.

Voor de periode van 1984 tot 2019 gebruiken de auteurs drie verschillende toekomstscenario's. Scenario A gaat uit van exponentiële groei in de forcering, door bijvoorbeeld sterk toenemende emissies van CO₂. Scenario B gaat uit van lineaire groei en scenario C tenslotte houdt de forcering constant na het jaar 2000. De auteurs nemen ook vulkaanuitbarstingen mee in de forcering.

De figuur toont de door het model berekende wereldgemiddelde temperatuur voor de periode tot 1983, samen met de gemeten temperatuur, en de voorspellingen voor elk van de drie scenario's. Wat zien we hier nu? In de eerste plaats dat er behoorlijke variaties van jaar op jaar zijn in de temperatuur. Soms zijn het externe factoren die voor dit soort schommelingen zorgen, zoals de afkoeling die volgt op de uitbarsting van de vulkaan Agung in 1963. Het model volgt hier keurig de metingen. Soms worden klimaatvariaties veroorzaakt door interne processen, denk bijvoorbeeld aan de El Niño's die elke paar jaar optreden door een wisselwerking tussen de atmosfeer en de tropische Stille Oceaan en die voor een wereldgemiddelde opwarming zorgen zoals in 1983. Het model kent geen El Niño's door het ontbreken van een actieve oceaan. In de tweede plaats laat de figuur een stijgende trend in de temperatuur zien: deze neemt geleidelijk toe en dit wordt vooral zichtbaar na 1990.

Het mooie van deze modelvoorspelling is dat wij ondertussen zo'n vijftienvijftig jaar verder zijn in de tijd en dat wij de toekomst van toen met het verleden van nu kunnen vergelijken. Het gaat dan vooral om de trend. Het is immers niet te verwachten dat het model van jaar op jaar precies met de metingen in de pas zal lopen, omdat interne processen die klimaatvariaties veroorzaken niet lang

vooruit voorspelbaar zijn en de timing van een vulkaanruptie al helemaal niet vooraf bekend is. Scenario B werd destijds het meest waarschijnlijk geacht en dat is achteraf gezien juist gebleken. U ziet dat de trend in de metingen en het temperatuurverloop volgens scenario B dicht bij elkaar liggen (Hansen et al., 2006).

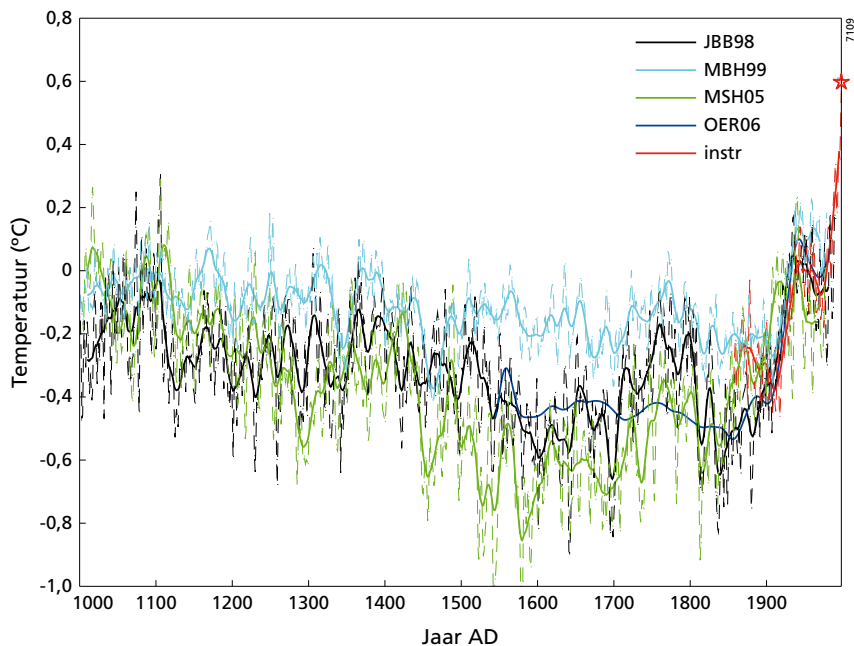
Het lijkt dus een uitgemaakte zaak dat de mens een rol speelt in de recente warme jaren. Toch formuleren klimaatonderzoekers dit graag iets voorzichtiger. De reden hiervoor is dat de huidige trend nog niet zo veel groter is dan de variaties. Als het model de trend een klein beetje overschat en tegelijkertijd vooral de langjarige variabiliteit van de temperatuur onderschat, dan komt het verhaal er anders uit te zien. Daarom noemt het IPCC, het klimaatpanel van de Verenigde Naties, het slechts 'zeer waarschijnlijk' dat de recente warme jaren toe te schrijven zijn aan het antropogene broeikas effect. Over tien of twintig jaar hebben we zekerheid, maar dat duurt nog even.

In de tussentijd kunnen we twee sporen volgen. Enerzijds is het belangrijk om nader te bekijken hoe ongewoon de recente warme jaren zijn, klimatologisch gezien. Anderzijds moeten we testen hoe goed onze modellen een klimaatverandering, zoals die voor de komende eeuw verwacht wordt, kunnen voorspellen. Ik zal nu kort op het eerste punt ingaan.

Recente jaren in het licht van het laatste millennium

Hoe ongewoon zijn de recente jaren? Om deze vraag te beantwoorden is het nuttig om de instrumentele gegevens uit te breiden naar het verleden met behulp van informatie uit historische bronnen of natuurlijke archieven zoals boomring reeksen, ijskernen of oceaan sedimenten. Deze indirecte informatie over het klimaat noemen we proxy gegevens. Verschillende onderzoeksgroepen hebben op basis van dergelijke informatie de temperatuurschommelingen van het afgelopen millennium gereconstrueerd. Als voorbeeld ziet u hier een aantal van hun resultaten [fig. 3]. Elke groep heeft de gemiddelde temperatuur van het Noordelijk Halfrond berekend uit een andere set van lokale proxy reeksen, wat de onderlinge verschillen verklaart (Juckes et al., 2006). Samen geven deze curven een redelijk beeld van het verloop van de temperatuur. Door de onderlinge verschillen krijgt U ook een beeld van de onzekerheid in dit soort reconstructies.

De figuur toont afwijkingen in de jaargemiddelde temperatuur ten opzichte van het gemiddelde over de eerste honderd jaar van de instrumentele metingen: het gaat om kleine schommelingen van tienden van graden. Het is duidelijk dat



Figuur 3 – Reconstructie van het verloop van de gemiddelde temperatuur van het Noordelijk Halfrond voor de periode 1000-1998 AD, op basis van verschillende proxy gegevens. Dit zijn boomring reeksen, documentaire gegevens en ijskernen, allen met een bijna-jaarlijkse resolutie (Jones et al., 1998 -zwart- en Mann et al., 1999 -blauw-); mariene kernen, meersedimenten en andere reeksen met lage resolutie gecombineerd met onder andere boomring reeksen (Moberg et al., 2005 -groen-); en gletsjerlengten (Oerlemans, 2006 -paars-). De instrumentele gegevens zijn eveneens aangegeven (rood). De figuur geeft afwijkingen ten opzichte van het gemiddelde over de periode 1866-1970 als 21-jaar lopend gemiddelde (dikke curven) en 3-jaar lopend gemiddelde (dun gestippeld). De rode ster markeert de gemiddelde temperatuur van 2003-2005.

de temperatuur meestal rond of iets onder het instrumentele gemiddelde lag, waarbij de meeste reconstructies uitgesproken koude perioden laten zien in de 15de tot 19de eeuw, bekend als de Kleine IJstijd. De 11de eeuw en de 20ste eeuw zijn beide relatief warm. Vroege klimaathistorici, zoals de Brit Hubert Lamb, hebben de oudste warme periode wel het Middeleeuws Klimaat Optimum genoemd (Lamb, 1982). Het is de tijd dat de Vikingen Groenland koloniseerden en men in Engeland wijn verbouwde. Hierbij baseerde Lamb zich, begin 80er jaren, vooral op Europese documentaire gegevens. Inmiddels is er veel meer informatie beschikbaar. Daarom weten we nu dat verschillende gebieden op het Noordelijk Halfrond op verschillende momenten in de tijd hun klimaatoptimum beleefden (Crowley en Lowery, 2000). Om deze reden springt de 11de eeuw er niet heel uitgesproken uit in het Noordelijk Halfrond gemiddelde en is de term ‘middeleeuws optimum’ in onbruik geraakt. Deze periode is echter onverminderd populair onder klimaatsceptici, die graag naar de vroege klimaathistorici verwijzen en in het middeleeuws optimum het bewijs zien dat de huidige klimaatverandering niet aan de mens toe te schrijven kan zijn. De vroege 20ste eeuw is weliswaar vergelijkbaar met de 11de eeuw, maar voor de late 20ste eeuw ligt dit anders. De laatste jaren liggen de gemeten temperaturen ver boven waarden die in het afgelopen millennium normaal waren. Dit geldt ook als rekening gehouden wordt met de onzekerheid in de temperatuurreconstructies. Naast reconstructies van de temperatuur zijn er ook reconstructies van de belangrijkste forceringsfactoren: vulkanische erupties, variaties in zonnintensiteit, en de menselijke factoren luchtvervuiling, landgebruik en broeikasgasconcentraties. Modelexperimenten hebben laten zien dat vulkanen en de zon, naast interne klimaatprocessen, de pre-industriële temperatuur schommelingen kunnen verklaren (Weber, 2005). Ook later spelen deze factoren nog een rol, maar in de tweede helft van de 20ste eeuw wordt de invloed van de mens steeds belangrijker (Hegerl et al., 2003).

U weet nu dat de warme jaren sinds 1990 echt ongewoon zijn. Niet alleen voor de afgelopen anderhalve eeuw van de instrumentele metingen, maar ook voor het afgelopen millennium. De rol van de mens is niet 100% zeker, maar wel zeer waarschijnlijk. Waar gaan we in de toekomst naar toe? Dat hangt erg af van het scenario dat we aannemen voor de concentratie aan broeikasgassen: hoe snel zal die stijgen en tot welke waarde? Callendar verwachtte in 1938 een toename in

de CO₂ concentratie met 30% in de 22ste eeuw. Deze waarde werd in 1996 al overschreden. De door hem berekende opwarming van 0,6 °C komt overigens dicht in de buurt van de feitelijke temperatuurstijging tijdens de vorige eeuw. Arrhenius dacht in 1907 dat een verdubbeling van de CO₂ concentratie in 3000 jaar bereikt zou worden. Tegenwoordig denkt men dat hiervoor maar 100 jaar nodig zal zijn. Het voorspellen van het gedrag van de mens is dus nogal lastig, zeker als we verder vooruit willen kijken dan de komende decennia. Het is wel weer vrij goed bekend wat er gebeurt met de CO₂ die wij nu in de atmosfeer brengen. Het merendeel daarvan verdwijnt binnen een paar honderd jaar in de oceanen, maar een klein gedeelte blijft nog heel lang in de atmosfeer. Dat kleine beetje extra CO₂ zou voldoende kunnen zijn om ervoor te zorgen dat de huidige mens over tienduizenden jaren nog steeds het klimaat beïnvloedt (Archer, 2005).

Het testen van klimaatmodellen

Ik kom nu op het tweede punt: hoe goed zijn de modellen die we gebruiken om naar het toekomstige klimaat te kijken? Hoe goed zijn de voorspellingen voor het klimaat in Europa, in de polaire gebieden of juist in de tropen? Gaan klimaatzones verschuiven? Wat betekent een klimaatverandering voor neerslagpatronen, rivierafvoer of bodemvocht? Zullen stormen heviger worden, of vaker voorkomen? Kortom, hoe goed simuleren modellen het klimaat in al zijn aspecten bij een klimaatverandering?

Laat ik eerst uitleggen wat een klimaatmodel eigenlijk is. Een klimaatmodel is een computerprogramma dat de stromingen in de atmosfeer en oceaan berekent uit algemene principes. Dit zijn de behoudswetten van massa en impuls, terwijl de verdeling van de temperatuur volgt uit de warmtevergelijking. Stroming en temperatuur zijn aan elkaar gekoppeld, want de stroming transporteert warmte en door temperatuurverschillen krijg je drukverschillen (de hoge en lage drukgebieden op een weerkaart) en dat geeft weer stroming. Het is veel werk om dit allemaal goed uit te rekenen, maar dat gaat wel rechttoe-rechtaan. Wat het hele verhaal ingewikkeld maakt is dat er onnoemlijk veel kleinschalige processen een rol spelen, zoals wrijving, verdamping en neerslag, chemische processen in de atmosfeer en oceaan, de interactie met het land oppervlak en met vegetatie, de vorming van land- en zeeijs. De beschrijving van deze processen is een mengsel

van empirische relaties en fundamentele fysische, chemische en biologische kennis. Deze beschrijvingen zijn uitvoerig getest aan de hand van metingen, maar we kunnen er niet helemaal zeker van zijn dat ze goed zullen werken in een veranderend klimaat. Juist deze kleinschalige processen zijn belangrijk voor de grootschalige circulatie en temperatuurverdeling.

Klimaatmodellen kunnen getest worden door een simulatie te maken voor het verleden klimaat en deze modelsimulatie te vergelijken met gereconstrueerde klimaatveranderingen. De klimaatgeschiedenis begint honderden miljoenen jaren geleden en de aarde heeft al veel verschillende klimaten meegemaakt, zowel extreem warme als koude perioden, langzame en abrupte overgangen en ook cyclische variaties. Lang geleden zijn er extreme broeikasklimaten geweest. De aarde zag er toen wel heel anders uit dan nu: de continenten lagen op andere plaatsen en de huidige gebergten waren er nog niet. Dat maakt het lastig het klimaat van toen te vergelijken met het huidige of toekomstige klimaat. Daarom wordt meestal naar het tijdvak van de afgelopen 2 à 3 miljoen jaar gekeken, waarin de aarde niet meer verandert. Dit tijdvak kenmerkt zich door een afwisseling van koude perioden met grote ijskappen op de continenten, de ijstijden of glacialen, en warme perioden, de interglacialen. Tijdens een glaciaal wordt het gemiddeld zo'n 5 graden kouder op aarde en er treden van tijd tot tijd grote temperatuursprongen op. Tijdens een interglaciaal is het klimaat stabiel. Welk verleden klimaat is nu het meest geschikt om een klimaatmodel mee te testen? We zoeken hiervoor naar een klimaat dat zoveel mogelijk lijkt op ons toekomstklimaat.

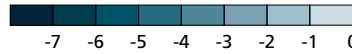
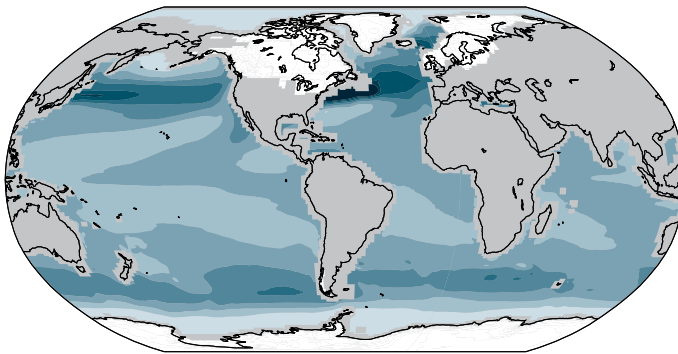
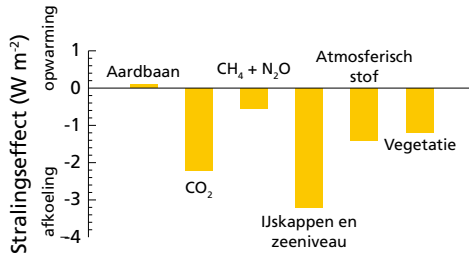
Op dit moment leven we in een warme periode, die ongeveer 10.000 jaar geleden begon, het Holoceen. Tijdens het vroege Holoceen en tijdens sommige eerdere interglacialen was het wat warmer dan nu. Dit komt door kleine veranderingen in de baan van de aarde rond de zon en in de stand van de aardas. Hierdoor verandert de verdeling van de hoeveelheid zonnestraling over de aarde en over de seizoenen. Dit zorgt voor relatief warme zomers op het Noordelijk Halfrond. Het was in deze perioden wel warmer dan nu, maar niet zoveel warmer als we voor de toekomst verwachten, en het was bovendien om andere redenen warm. Ook kenden deze klimaten geen snelle opwarmingsperioden zoals we die in de komende eeuw kunnen verwachten. Het zijn dus maar half goede analogen voor ons toekomstklimaat.

Hoe zit het met de koude perioden? Tijdens een ijstijd is de concentratie aan broeikasgassen sterk verlaagd. Dit komt door natuurlijke terugkoppelingsprocessen in het klimaat. Door de lage broeikasgasconcentraties wordt het nog kouder en de afkoeling tijdens een ijstijd is dus gedeeltelijk terug te voeren op een verzwakt broeikaseffect. Men zou het glaciële klimaat daarom kunnen zien als een soort spiegelbeeld van ons toekomstklimaat. Ook kent het glaciële klimaat snelle overgangen. Maar ja, koud in plaats van warm en we kunnen niet a-priori aannemen dat het klimaat symmetrisch reageert.

Een tijd lang is het zoeken naar ‘analogen’ erg in de mode geweest. Men hoopte vooral veel te leren over de regionale klimaatrespons in een veranderend klimaat door bijvoorbeeld naar het vroege Holoceen te kijken. Tegenwoordig is dit idee verlaten. ‘Men kan niet twee keer in dezelfde rivier stappen’ zei de Griekse filosoof Heraclites al. ‘Ander en nog ander water blijft eeuwig stromen, het gaat voorwaarts en weer terug’. Dit lijkt me duidelijk. Het klimaat verandert steeds en hetzelfde klimaat komt nooit terug. Helaas wordt dit door klimaatonderzoekers nogal eens als reden aangevoerd om dan maar helemaal niet naar het verleden klimaat te kijken en dat is niet terecht. Hoewel er in het verleden geen analogen zijn, biedt het verleden klimaat wel oefenstof. Begrijpen we waarom het klimaat verandert en welke mechanismen spelen daarbij een rol?

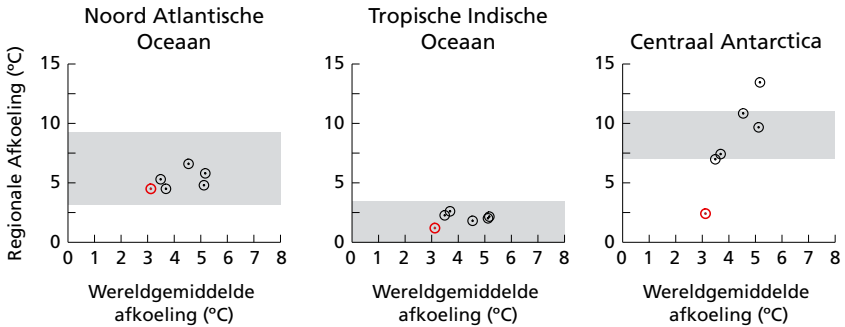
Er zijn twee paleoklimaten die veel gebruikt worden om modellen te testen. Het ene klimaat is een extreem koude periode van 21.000 jaar geleden, het Laatste

Figuur 4 – Het Laatste Glaciële Maximum: boven de forceringsfactoren, omgerekend naar het effect op de stralingsbalans. Dit zijn de instraling (aardbaan), de afname in kooldioxide CO₂ en in methaan en lachgas CH₄ en N₂O, en het verhoogde albedo door ijskappen en droogvallend land door veranderingen in zeeniveau. Dan zijn erg nog (slecht bekende) factoren als atmosferisch stof en vegetatieveranderingen. Midden de gereconstrueerde ijskappen en berekende veranderingen in zeewatertemperaturen. Onder de berekende regionale temperatuurveranderingen afgezet tegen de verandering in de wereldgemiddelde temperatuur voor drie gebieden: de noordelijke Atlantische oceaan, de tropische Indische oceaan en centraal Antarctica. De grijze balken geven schattingen van de temperatuurveranderingen voor elk gebied op basis van proxy gegevens. Elk bolletje staat voor een klimaatmodel, het rode bolletje is het KNMI model. Bron: Jansen et al. (2007).



Veranderingen in zeewater temperatuur (°C)

7109



Glaciale Maximum. Het andere klimaat is een warme periode van 6.000 jaar geleden, het midden Holoceen. Beide perioden zijn geadopteerd door PMIP, het Paleoclimate Modelling Intercomparison Project (Joussaume et al., 1999), een informeel samenwerkingsverband van klimaatonderzoekers die zowel met modellen als vanuit proxy gegevens het verleden klimaat bestuderen. Binnen dit internationale project zijn afspraken gemaakt over de forceringsfactoren voor beide perioden, zodat alle modelleergroepen precies hetzelfde experiment kunnen doen en de resultaten onderling vergelijkbaar zijn. Het klimaat tijdens beide perioden is goed in kaart gebracht door veel verschillende proxy gegevens met elkaar te combineren.

Het Laatste Glaciale Maximum

Het Laatste Glaciale Maximum is, zoals de naam al zegt, de koudste periode uit het laatste glaciaal. Ook bij het ontstaan van ijstijden spelen kleine veranderingen in de instraling een rol, die veroorzaakt worden door veranderingen in de aardbaan. Dit leidt eerst tot een afkoeling, en vervolgens tot de aangroei van ijskappen en de afname van broeikasgassen. Helaas zijn klimaatmodellen nog niet in staat al deze samenhangende processen tegelijkertijd te simuleren. Daarom wordt de oefening voor het Laatste Glaciale Maximum een beetje vereenvoudigd: we bieden het model glaciale instraling, ijskappen en broeikasgasconcentraties aan en berekenen hoe atmosfeer en oceaan daarop reageren. Hier ziet U een figuur [fig. 4] uit het vorig jaar verschenen Klimaatrapport van het IPCC (Jansen et al., 2007). Bovenaan zijn de forceringsfactoren samengevat. Voor alle factoren is uitgerekend wat het effect op de stralingsbalans is en zo kunnen ze onderling vergeleken worden. Het is opmerkelijk dat de instraling tijdens het glaciale maximum zelf nog maar een kleine rol speelt, terwijl lagere concentraties aan broeikasgassen en ijskappen ongeveer even belangrijk zijn. Daarnaast spelen atmosferisch stof en vegetatie een rol. Daaronder ziet U de ijskappen, zoals die uit geologische gegevens gereconstrueerd zijn, en de berekende verandering in zeewatertemperaturen. De temperatuur neemt overal af, echter met grote regionale verschillen. Onder het belangrijkste plaatje. Deze oefening is uitgevoerd met zes verschillende klimaatmodellen, waaronder een model van het KNMI. De door elk van de zes modellen berekende regionale temperatuurverandering is hier uitgezet tegen de wereldgemiddelde temperatuurverandering voor drie verschillende gebieden. Dit zijn het noord Atlantische gebied, de tropische

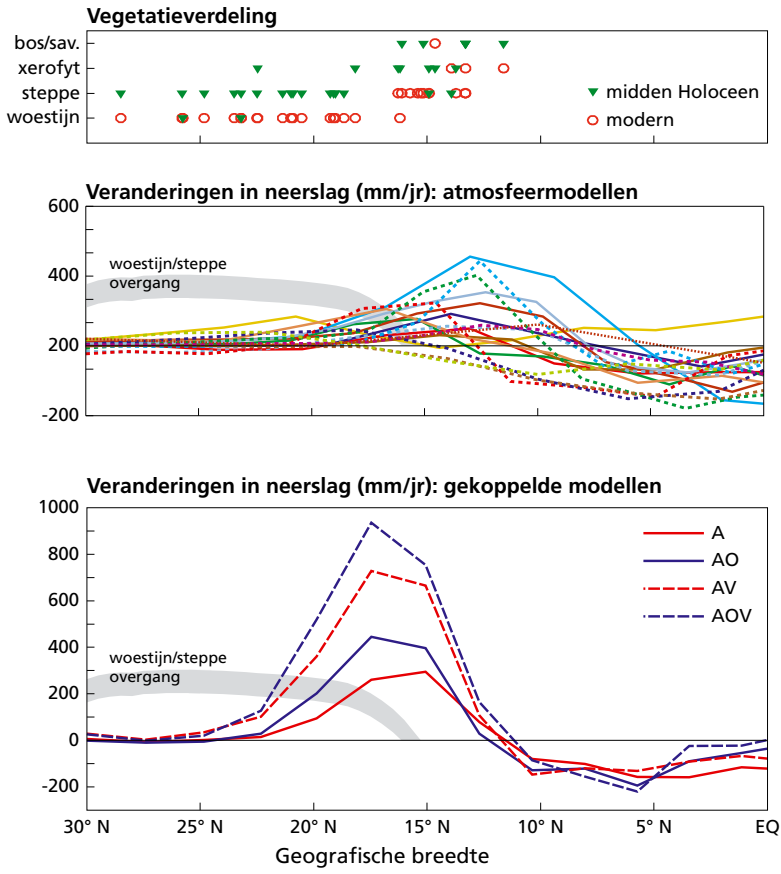
Indische oceaan en Antarctica. De grijze balken geven de werkelijke afkoeling, zoals die geschat is uit proxy gegevens. In het zuidpoolgebied zijn de door de modellen berekende temperatuurveranderingen of te hoog of te laag. Voor de andere twee gebieden gaat het goed.

Wanneer we overigens meer in detail naar het ruimtelijk patroon van temperatuurveranderingen boven bijvoorbeeld de Atlantische oceaan kijken, dan zien we grote verschillen tussen modellen onderling en tussen modellen en proxy gegevens (Kageyama et al., 2005). Dit ruimtelijk patroon wordt bepaald door verschillende processen: de aanvoer van koude lucht vanaf het Amerikaanse continent, de zee-ijs bedekking, warmte uitwisseling tussen de lucht en het zeewater en de circulatie in de Atlantische oceaan zelf. Modellen zijn nog niet in staat om de goede balans tussen al deze processen te vinden. Ook voor de Golfstroom en de diepe oceanocirculatie zijn er grote verschillen tussen de modellen onderling. Slechts enkele modellen reproduceren de glaciële circulatie, die zwakker geweest moet zijn dan haar moderne tegenhanger en ook instabieler (Weber en Drijfhout, 2007). Veel modellen laten juist versterkte zeestromingen zien. Ook hier volgt het signaal uit een subtiele balans tussen diverse factoren en verschillende modellen komen tot verschillende verklaringen (Weber et al., 2007). Het is dus niet duidelijk wat de oorzaak van de verzwakte circulatie is. We kunnen vaststellen dat modellen de grootschalige temperatuurrepons over het algemeen goed weergeven, maar dat ze moeite hebben met het simuleren van signalen waarbij veel verschillende processen op elkaar inwerken zoals bij veranderingen in het regionale klimaat of in de oceaniceringen.

Het midden Holoceen

We gaan nu naar een meer recente periode, het midden Holoceen. Deze periode kent warme zomers en een intense moessoncirculatie op het Noordelijk Halfrond. Het mechanisme hierachter is simpel. De moessoncirculatie wordt aangedreven door het land-zee temperatuurcontrast. De zee is in de zomer altijd koeler dan het land, omdat de seizoenscyclus in zeewatertemperaturen een paar maanden achter loopt op die in de landtemperaturen. Als de zomers dus relatief warm zijn, wordt het land-zee temperatuurcontrast groter en daarmee versterkt de moessoncirculatie en de daarbij horende neerslag.

Hier ziet U een figuur [fig. 5] uit het voorlaatste IPCC rapport (McAvaney et al., 2001). Het bovenste plaatje geeft de verdeling van verschillende vegetatie



Figuur 5 – Het bovenste plaatje geeft de verdeling van vegetatie types (woestijn, steppe, xerofyten en droog-tropisch bos met savanne) voor Noord Afrika (20° W tot 30° E) voor het midden Holoceen (groene driehoeken) en het moderne klimaat (rode cirkels). Het middelste plaatje geeft berekende veranderingen in neerslag voor hetzelfde gebied, ook is aangegeven hoeveel extra neerslag er nodig is om steppe te laten ontstaan in woestijngebieden. Het onderste plaatje toont resultaten voor alleen een atmosfeer (A), of een atmosfeer gekoppeld met vegetatie(AV) of een oceaan (AO), of een volledig atmosfeer-oceaan-vegetatie model (AOV).

types per geografische breedte voor Noord Afrika. Tegenwoordig vinden we hier overwegend woestijn. Alleen in de tropen (tussen 10-15° N) is er vegetatie in de vorm van steppe, savanne en bos. In het midden Holoceen was er sprake van een noordwaartse verplaatsing en uitbreiding van de vegetatiezones. Opvallend is vooral dat er steppe was waar nu woestijn is. We spreken wel van de 'groene Sahara', die zich uitstrekte van de lijn die loopt van de huidige Sahel in het westen tot Soedan in het oosten tot aan de kust van de Middellandse Zee. De gekleurde lijnen in het middelste plaatje geven het verschil in neerslag tussen het midden Holoceen en nu voor een groot aantal atmosfermodellen. De modellen simuleren meer neerslag tijdens het midden Holoceen, vooral in het tropische gebied tussen 10-15° N. De berekende toename in neerslag in dit gebied is in overeenstemming met de gereconstrueerde toename in vochtminnende vegetatie. Echter ten noorden van 20° N laten de modellen nauwelijks een toename in neerslag zien, terwijl geschat wordt dat er zo'n 200 tot 300 mm per jaar extra neerslag nodig is om een steppevegetatie te laten ontstaan in woestijngebieden. De noordwaartse uitbreiding van de vegetatiezones wordt hier duidelijk onderschat.

Het onderste plaatje geeft weer wat er gebeurt als de simulaties worden uitgevoerd met een atmosfermodel gekoppeld aan een vegetatiemodel of een oceaanmodel, of aan beide. Dit geeft een duidelijke versterking van het signaal. Dit komt door de recycling van vocht door de vegetatie en een betere beschrijving van het land-zee temperatuurcontrast door een actieve oceaan. Toch kunnen ook deze gekoppelde modellen de groene Sahara niet verklaren. Ook boven Europa vinden we een ander neerslagpatroon in het midden Holoceen (Masson et al., 1999). Het zuidoosten is natter en het noordwesten is droger dan nu. Sommige modellen reproduceren dit patroon, doordat hogere zeewatertemperaturen in de Middellandse Zee leiden tot nattere winters. Andere modellen laten een bijna tegenovergesteld patroon zien. We kunnen dus niet zeker zijn van het mechanisme.

Ook voor het midden Holoceen blijkt dat het dominante klimaatsignaal, een sterkere moesson, goed weergegeven wordt. De modellen doen het nog beter als vegetatie en een actieve oceaan meegenomen worden. Als we echter inzoomen op ruimtelijke details, zoals de noordwaartse uitbreiding van de moesson of de neerslag boven Europa, dan doen de modellen het niet zo goed en schiet onze kennis te kort.

Toekomstig onderzoek

Het zal duidelijk zijn dat er nog veel open vragen liggen als we naar het verleden klimaat kijken. Ik hoop U tegelijkertijd duidelijk gemaakt te hebben dat klimaatvoorspellingen voor de nabije toekomst niet geloofwaardig zijn zonder de toets van het verleden klimaat. Dat wil niet zeggen dat deze toets eenvoudig is, want een goede analoog is er niet en proxy gegevens zijn vaak multi-interpretabel en kennen grote onzekerheidsmarges. Voor de twee voorbeelden die ik heb laten zien, het Laatste Glaciale Maximum en het midden Holoceen, is binnen PMIP veel discussie nodig geweest. Het is niet triviaal om verschillende disciplines bij elkaar te brengen. Toch heeft deze oefening een duidelijk beeld opgeleverd van wat wij begrijpen van het klimaat en waar de hiaten liggen. Samenwerking levert overigens niet alleen de modelleurs inzicht en kennis op. Ook voor de interpretatie van proxy gegevens is het essentieel om modelresultaten te gebruiken. Dit maakt het mogelijk om verbanden tussen forcering en klimaatrespons te onderbouwen en om ruimtelijke patronen te begrijpen. De ervaring leert dat model-data vergelijkingsstudies bovendien een enorme impuls geven om te komen tot een kwantitatieve interpretatie van proxy gegevens en een synthese van verschillende soorten proxies.

Mijnheer de Rector, gewaardeerde aanwezigen,

De hiaten in onze kennis bieden kansen voor toekomstig onderzoek, zeker gezien de expertise die aan deze universiteit en bij het KNMI aanwezig is. Die bestrijkt het hele terrein van het modelmatige ‘global change’ onderzoek tot empirisch onderzoek aan proxy gegevens van het laatste millennium tot aan zeer oude broeikasklimaten. Deze combinatie van expertise is redelijk uniek en biedt perspectief voor verder onderzoek. Ik hoop hier met de leerstoel ‘Klimaatmodellering en klimaatanalyse’ gestalte aan te geven. Een aantal onderzoeksthema’s ligt voor de hand, waarvan ik er drie kort wil schetsen.

Het laatste millennium blijft natuurlijk mijn aandacht houden. Ik denk dan vooral aan klimaatvariaties in Europa en het Atlantische gebied, zoals de middeleeuwse warme periode en de Kleine IJstijd (van de Plassche et al., 2003; Palastanga et al., 2008). Ons beeld hiervan is nog lang niet compleet. Over het mechanisme hierachter bestaat nog veel onduidelijkheid. Is het de zon, vulkanen,

of toch de atmosferische circulatie? Ook de stabiliteit van de oceaan-circulatie (de Vries en Weber, 2005) is zeer relevant voor het Europese klimaat.

Een tweede thema betreft het eerder genoemde holocene neerslag patroon van vernatting van noordelijk Afrika en Zuid Europa, met tegelijkertijd een verdroging van noordwestelijk Europa. Vergelijkbare neerslagpatronen worden onderzocht door collega's van het departement Aardwetenschappen, die werken met miljoenen jaren lange proxy reeksen uit het gebied rond de Middellandse Zee. Het gaat hierbij om terrestrische en mariene afzettingen die veelal gerelateerd zijn aan rivieruitstroom. In deze proxy reeksen zijn cyclische patronen zichtbaar die gekoppeld kunnen worden aan instralingsvariaties. De hypothese is dat deze koppeling verloopt via fasen van vernatting en verdroging van het mediterrane klimaat, die vergelijkbaar zijn met de overgang van het klimaat van het midden Holoceen naar het moderne klimaat. Eerder hebben wij deze hypothese gedeeltelijk kunnen onderbouwen (Tuenter et al., 2004).

Bij het departement Fysische Geografie bestaat een lange traditie in het reconstrueren en modelleren van holocene riviersystemen. Het gebruik van rivierreconstructies en een hydrologisch model van rivieruitstroom biedt interessante perspectieven. In de toekomst hopen we dan ook in een gezamenlijk onderzoeksproject hierop door te gaan. Daarbij willen we modellen van het klimaat, riviersystemen en de circulatie in de Middellandse Zee combineren met verschillende proxy gegevens, namelijk lange tijdreeksen voor een aantal locaties en gedetailleerde ruimtelijke patronen voor het midden Holoceen. We denken hiermee antwoord te kunnen geven op de vraag wat het neerslagpatroon bepaald: speelt de moesson een hoofdrol of gaat het ook om andere processen, zoals winterdepressies op gematigde breedte.

Een derde thema is een broeikasklimaat van 55 miljoen jaar geleden, het Paleoceen-Eoceen Thermisch Maximum (PETM). Dit is een zeer warme periode, waarschijnlijk veroorzaakt door een catastrofale emissie van methaan uit de diepe oceaan. Methaan zet zich om in CO₂ in de atmosfeer en er is dus sprake van een echt broeikasklimaat vergelijkbaar met ons toekomstige klimaat. Juist dat gegeven maakt deze periode interessant, ook al is de vergelijking lastig omdat de aarde er toen wel iets anders uitzag dan nu. Collega's van de departementen Biologie en Aardwetenschappen werken aan de reconstructie van dit klimaat en

zij hebben aanwijzingen gevonden dat vooral de polaire gebieden zeer warm waren. Klimaatmodellen onderschatten deze polaire opwarming (Sluijs, 2006). Ook hier hoop ik vooruitgang te kunnen boeken door het bundelen van de krachten, namelijk kennis van het landoppervlak en de hydrologie vanuit de fysische geografie, klimaatmodellering vanuit het KNMI en de eerder genoemde klimaatreconstructies.

Ik heb al een paar keer terloops opgemerkt dat de modellen waarmee wij werken steeds veelomvattender worden. De aandacht voor de interactie tussen klimaat, het landoppervlak, vegetatie en de kringlopen van allerlei chemische elementen is enorm gestimuleerd door onderzoek naar het verleden klimaat. Onlangs heeft het KNMI het initiatief genomen tot de ontwikkeling van een nieuw model, EC-Earth, dat al deze interacties beschrijft. Verschillende Nederlandse en Europese onderzoeksgroepen dragen hieraan bij. Een van de eerste tests die met dit model uitgevoerd gaat worden is een simulatie van het PETM. Op dit moment is nog niet duidelijk of EC-Earth het beter zal doen dan oudere klimaatmodellen, maar deze simulatie biedt ons in ieder geval de mogelijkheid om processen te onderzoeken die oudere klimaatmodellen niet expliciet beschrijven. Te denken valt bijvoorbeeld aan veranderingen in de atmosferische chemie en de effecten hiervan op de stralingsbalans in een extreem warm klimaat met hoge broeikasgasconcentraties.

Promovendi en studenten

De hier geschetste onderzoeksprojecten vragen om promovendi met een brede blik, die er plezier in hebben om interdisciplinair te werken. Ik denk dat het belangrijk is om in het onderwijs al aandacht te besteden aan deze brede blik en de kennis aan te bieden die hiervoor nodig is. Voor promovendi die een uitdaging zien in de vele discrepanties die er nog zijn tussen proxy gegevens en modellen liggen er mooie en aansprekende resultaten in het verschiet.

Geachte dames en heren studenten,

U zult mij niet zo heel vaak tegenkomen, want ik bezet deze leerstoel in deeltijd. Het grootste deel van mijn tijd werk ik als senior onderzoeker bij het KNMI in De Bilt. Als ik er ben, en meestal is dat op woensdag, dan staat mijn deur uiteraard open. Schroom daarom niet mij in persoon of per email te benaderen

als u vragen heeft over het klimaat, klimaatmodellen of meetgegevens, of als u geïnteresseerd bent in een afstudeeronderzoek of stage naar aanleiding van de onderzoeksvragen die ik genoemd heb.

Dankwoord

Tot slot wil ik een aantal personen en instanties bedanken. In de eerste plaats is dat het Utrechts Universiteitsfonds, dat deze bijzondere leerstoel heeft ingesteld, en het College van Bestuur van de Universiteit Utrecht dat de instelling heeft bekrachtigd. Ook gaat mijn dank uit naar het KNMI, dat mij van harte de ruimte geeft om deze leerstoel te bekleden. Ik bedank mijn nieuwe collega's bij Fysische Geografie, voor het goede idee om deze leerstoel in het leven te roepen. Ik hoop dat dit het begin is van vele jaren van mooie samenwerking en ik hoop ook de nodige bruggen te bouwen naar andere geowetenschappers binnen en buiten de Faculteit, waaronder natuurlijk mijn collega's van het KNMI.

Ik ben veel dank verschuldigd aan PMIP voor de inspiratie en aanmoediging om deze onderzoeksweg in te slaan. Ik ben er trots op dat het gelukt is onze KNMI simulatie van het glaciële klimaat op tijd af te krijgen voor het vierde IPCC Klimaatrapport en dat ons paleo-klimaatonderzoek dus zichtbaar is in de 'global change' gemeenschap. Ik hoop hetzelfde te bereiken met onze EC-Earth simulaties – samen met alle groepen die hierbij betrokken zijn.

Het beklimmen van deze leerstoel was niet mogelijk geweest zonder de steun en vriendschap van velen, waarvan ik enkelen wil noemen. Na mijn promotie ontdekte ik de wereld van het klimaatonderzoek op het Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg, waar Hans von Storch mijn begeleider was. Ich möchte mich sehr bedanken bei Hans, damals mein 'post-doc Vater' im wahren Sinn des Wortes. Am MPI habe ich gelernt das Spaß und Wissenschaft zusammen gehen und ich danke alle damaligen KollegInnen dafür. Terug in Nederland concentreerde ik me al snel op paleo-klimaatonderzoek. In die begintijd heb ik veel steun ondervonden van Henry Hooghiemstra, Jef Vandenberghe en Johan Meulenkamp. Een woord van dank is op zijn plaats voor mijn projectmedewerkers van de afgelopen jaren, met name Pedro de Vries, Erik Tuenter en Gerard van der Schrier, voor hun bijdragen aan de vitaliteit van het paleo-klimaatonderzoek op het KNMI. Dank ook aan Sybren Drijfhout, voor onze langjarige samenwerking, en aan Hennie Kelder, voor een goed idee

op een moeilijk moment. Tenslotte zijn er Lucas Lourens en Frits Hilgen, altijd stimulerend en in voor een goed gesprek. Ik ben blij dat ik eindelijk ‘jullie’ Milankovitch cycli op Sicilië in het echt gezien heb.

Als laatste wil ik mijn ouders noemen, die er helaas niet meer zijn en die vandaag trots geweest zouden zijn, en Muuk, voor haar steun en liefde op dit pad door het leven.

Tenslotte

Ik kom nu aan het einde van mijn betoog en wil deze schrikkeloratie afsluiten met nog een citaat van Heraclites. Dit keer zegt hij ‘in dezelfde rivier stapt men en stapt men niet. We zijn en zijn niet’. De aandacht is nu verschoven van de rivier naar de mens. Ook de mens blijft niet hetzelfde, maar verandert steeds, en alleen al daarom is ons toekomstige klimaat uniek en zonder analoog in het verleden. De verdere interpretatie laat ik aan U allen over.

Ik heb gezegd.

Met dank aan Steven de Jong, Hans Middelkoop, Hein Haak, Geert Jan van Oldenborgh, Harry Geurts, Ellie Rhebergen en Muuk ter Schegget voor het welwillend-kritisch lezen van en luisteren naar eerdere versies van deze oratie.

Literatuur

- Archer, D., 2005. Fate of fossil fuel in geologic time, *J. Geophys. Res.*, 110, C09S05, doi:10.1029/2004JC002625.
- Arrhenius, S., 1907. *Das Werden der Welten*, Leipzig Akademische Verlagsgesellschaft, 208 pp.
- Callendar, G.S., 1938. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature, *Quart.J.Royal Met.Soc.*, 64, 223-237.
- Crowley, T.J., en T. Lowery, 2000. How warm was the Medieval Warm Period?, *Ambio*, 29, 51-54.
- Hanssen, J., I. Fung, A. Lacis, D. Rind, S. Lebedeff, R. Ruedy en G. Russell, 1988. Global climate changes as forecast by GISS three-dimensional model, *J. Geophys. Res.*, 93, 9341-9364.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D.L. Lea en M. Medina-Elizade, 2006. Global temperature change, *PNAS*, 103, 14288-14293.
- Hegerl, G.C., T.J. Crowley, S.K. Braum, K.-Y. Kim en W.T. Hyde, 2003. Detection of volcanic, solar and greenhouse gas signals in paleo-reconstructions of Northern Hemisphere temperature, *Geophys. Res. Letters*, 30, 1242-1246.
- Heraclites, ca. 500 vChr. DK91 (Harris 21) en DK49a (Harris 110). Uit: Diels, H.A., en W. Kranz, 1934. *Die Fragmente der Vorsokratiker*, en W. Harris, 2006. *Heraclitus, the complete fragments*.
- Jansen, E., et al., 2007. Palaeoclimate. In: *Climate Change 2007: the Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S. et al. eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK en New York, USA.
- Jones, P.D., Briffa, K.R., Barnett, T.P., en Tett, S.F.B., 1998. High-resolution paleoclimatic records for the last millenium: interpretation, integration and comparison to control-run temperatures, *The Holocene*, 8, 455-471.
- Joussaume, S., et al., 1999. Monsoon changes for 6000 years ago: results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP), *Geophysical Research Letters*, 26, 859-862.
- Juckles, M.N., M.R. Allen, K.R. Briffa, J. Esper, G.C. Hegerl, A. Moberg, T.J. Osborn en S.L. Weber, 2007. Millennial temperature reconstruction intercomparison and evaluation, *Climate of the Past*, 3, 591-609.
- Kageyama, M., A. Laine, A. Abe-Ouchi, P. Braconnot, E. Cortijo, M. Crucifix, A. de Vernal, J. Guiot, C.D. Hewitt, A. Kitoh, O. Marti, R. Ohgaito, B. Otto-

- Bliesner, W.R., Peltier, A., Rosell-Mele, G., Vettoretti, S.L., Weber, en MARGO Project Members, 2006. Last Glacial Maximum temperatures over the North Atlantic, Europe and western Siberia: a comparison between PMIP models, MARGO sea-surface temperatures and pollen-based reconstructions, *Quatern. Science Rev.*, 25, 2082-2102.
- Lamb, H.H., 1982. *Climate, history and the modern world*, Routledge, New York, 433 pp.
- Mann, M.E., Bradley, R.S., en Hughes, M.K., 1999. Northern Hemisphere temperatures during the past millenium: inferences, uncertainties and limitations, *Geophys. Res. Lett.*, 26, 759-762.
- Masson, V., R. Cheddadi, P. Braconnot, S. Joussaume, S. Texier en PMIP-participating-groups, 1999. Mid-Holocene climate in Europe: what can we infer from PMIP model-data comparisons?, *Climate Dynamics*, 15, 163-182.
- McAvaney, et al., 2001. Model Evaluation. In: *Climate Change 2001. The Scientific Basis. Contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Houghton, J.T., et al. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK, en New York, USA, 881 pp.
- Moberg, A., Sonechkin, D.M., Holmgren, K., Datsenko, N.M., en Karlen, W., 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high- resolution data, *Nature*, 433, 613-617.
- Oerlemans, J.H., 2006. Extracting a climate signal from 169 glacier records, *Science*, 308, 675-677.
- Palastanga, V., G. van der Schrier, S.L. Weber, T. Kleinen, T. Osborn en K. Briffa, 2008. Atmosphere and ocean dynamics: contributors to the European Little Ice Age? Submitted.
- Plassche, O. van de, G. van der Schrier, S.L. Weber, W.R. Gehrels en A.J. Wright, 2003. Sea-level variability in the northwest Atlantic during the past 1500 years: a delayed response to solar forcing?, *Geophys. Res. Letters*, 30, 17558-17561.
- Vries, P. de, en S.L. Weber, 2005. The Atlantic freshwater budget as a diagnostic for the existence of a stable shut-down of the meridional overturning circulation, *Geophys. Res. Letters*, 32, L09606, DOI 10.1029/2004GL021450.
- Sluijs, A., 2006. *Global change during the Paleocene-Eocene Thermal Maximum*, Proefschrift Universiteit Utrecht, 228pp.

- Tuenter, E., S.L. Weber, F.J. Hilgen, L.J. Lourens en A. Ganopolski, 2004. Simulation of climate phase lags in the response to precession and obliquity forcing, and the role of vegetation, *Climate Dyn.*, 24, 279-295. DOI 10.1007/s00382-004-0490-1.
- Weber, S.L., 2005. A timescale analysis of the Northern Hemisphere temperature response to volcanic and solar forcing, *Climate of the Past*, 1, 9-17.
- Weber, S.L., en S.S. Drijfhout, 2007. Stability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation in the Last Glacial Maximum climate, *Geophys. Res. Letters*, 34, L22706, doi:10.1029/2007GL031437.
- Weber, S.L., S.S. Drijfhout, A. Abe-Ouchi, M. Crucifix, M. Eby, A. Ganopolski, S. Murakami, B. Otto-Bliesner en W.R. Peltier, 2007. The modern and glacial overturning circulation in the Atlantic ocean in PMIP coupled model simulations, *Climate of the Past*, 3, 51-64.

Websites

EC-Earth: <http://eearth.knmi.nl>

Intergovernmental Panel on Climate Change: <http://www.ipcc.ch>

Paleoclimate Modelling Intercomparison Project: <http://pmip2.lsce.ipsl.fr/pmip2>