Over opmerkelijke publicaties over klimaat en weer

Aarnout van Delden
IMAU
Universiteit Utrecht
Princetonplein 5
3584 CC Utrecht

a.j.vandelden@uu.nl

oorspronkelijk gepubliceerd in Meteorologica
(http://www.nvbm.nl/Meteorologica/index.html)

Inhoud

De stabiliteit van het klimaatsysteem	**3**
Stormachtig weer na einde grootste ijstijd	**6**
Meer Katrina's door menselijke invloed?	**8**
Sterke afname zee-ijs op het noordelijk halfrond	**11**
Levende planten produceren het broeikasgas, methaan	**13**
Meteorologie in 30 jaar niet alleen verdiept maar vooral verbreed	**16**
De oceaancirculatie en abrupte klimaatverandering	**19**
Hitte en Droogte in een Broeikasklimaat	**22**
Het Internet als bibliotheek	**26**
Zeespiegelstijging: wat staat Nederland te wachten?	**28**
De verbreding van de tropen	**31**
Hoe de Sahara droog werd	**34**
Lage temperaturen in de stratosfeer en warme Nederlandse winters	**37**
Toename helderheid lucht nabij aardoppervlak in Europa	**42**
Fouten in de representatie van straling in klimaatmodellen	**46**
Wolken zijn een belangrijke en onzekere factor in klimaatverandering	**49**
Hoe goed bekend is de sterkte van het broeikaseffect?	**52**
Waar blijft de energie van het versterkte broeikaseffect?	**56**

De stabiliteit van het klimaatsysteem

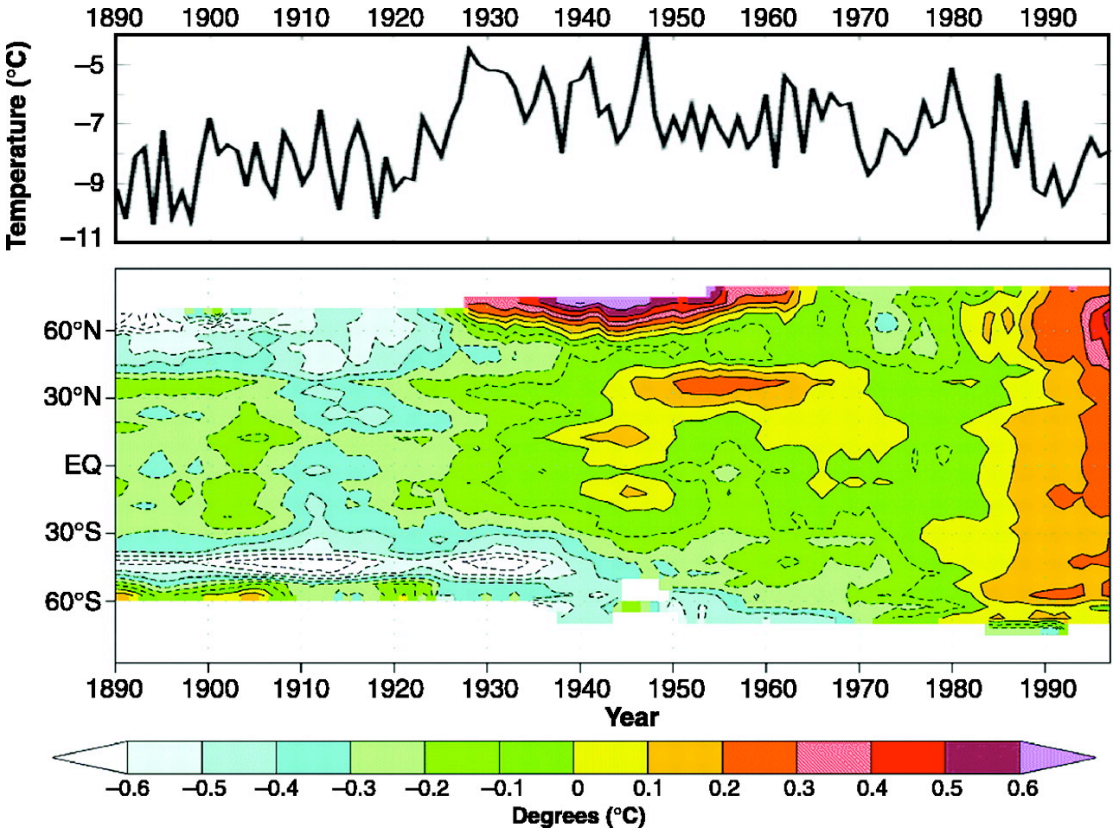
Aarnout van Delden (IMAU) (maart 2005)
Meteorologica, 1-2005, 27.



De wereldgemiddelde temperatuur bij het aardoppervlak is in de afgelopen eeuw met ongeveer 1°C gestegen, Zo'n temperatuursverandering is, naar algemeen wordt aangenomen, in een periode van minstens 900 jaren daarvoor niet is voorgekomen. Er is sterk wetenschappelijk bewijs om aan te nemen dat de temperatuurstijging van de afgelopen eeuw het gevolg is van de waargenomen gelijktijdige spectaculaire stijging van het CO_2-gehalte van de atmosfeer, waardoor het broeikaseffect van de atmosfeer zou zijn versterkt.

De uitstoot van CO_2 door de mens heeft geleid tot een stijging van CO_2-gehalte van 280 ppm voor het industriële tijdperk tot 379 ppm nu. De toename van het atmosferisch CO_2 is nu 3 ppm per jaar, terwijl dat enkele decennia geleden ongeveer 1.8 ppm per jaar was. Wijst dit op een verzadiging van de CO_2-opnamecapaciteit van de oceaan, of zijn we meer aan het produceren?

Door het versterkte broeikaseffect zullen de klimaatzones in Europa geleidelijk naar het noorden opschuiven, waardoor wij in Nederland wellicht het klimaat van Frankrijk krijgen terwijl men in Spanje het droge kimaat van Noord Africa krijgt. Het is de vraag of deze ontwikkeling nadelig is voor de maatschappij. Volgens een artikel geschreven door Paul Epstein en James McCarthy in de *Bulletin of the American Meteorological Society* van december 2004, is de verstoring van het klimaatsysteem door de mens zo sterk dat we ons meer zorgen moeten maken over een ophande zijnde plotselinge klimaatverandering van veel grotere orde. We mogen ons dus niet in slaap laten sussen door de geruststellende boodschap van de Gaia hypothese die stelt dat de biosfeer een stabiliserende invloed heeft op het klimaatsysteem en dus dempend zal werken op de door de mens veroorzaakte storingen.



Figuur 1. Waargenomen zonaal gemiddelde temperatuur bij het aardoppervlak (°C) als functie van de breedtegraad en de tijd met daarboven een grafiek van de temperatuur bij het aardoppervlak in Upemavik (Noord-West Groenland, 72°47'N, 56°10'W) in hetzelfde tijdvak. Zie de sterke opwarming in de jaren twintig van de vorige eeuw ten noorden van 60°N en ook de globale opwarming aan het eind van de eeuw, hoewel dit laatste dus niet zo duidelijk wordt waargenomen in Upemavik (Science 28 Maart 2003, p. 2005-2010).

Aanwijzingen voor de mogelijk grote abrupte klimaatverandering zijn de sterke temperatuurstijging in de buurt van Groenland in de jaren 20 en dertig van de vorige eeuw (zie figuur 1), het zoeter worden van de Noord Atlantische oceaan in laatste 40 jaar, het op grote schaal verdwijnen van zeeijs langs de noordoost kust van Groenland, de toename van de hoeveelheid smelt in de zomer op Groenland en het afbreken en verdwijnen van grote ijsplaten in Antarctica. In 2002, bijvoorbeeld, verdween daar in enkele weken tijd meer dan 5000 km^2 aan ijs dat zich 12000 jaar had gehandhaafd. Het is volgens de auteurs mogelijk dat er binnenkort een einde komt aan een periode van 10000 jaar van klimaatstabiliteit waarin the beschaving zich kon ontwikkelen. Epstein en McCarthy beweren dat het klimaatsysteem in de afgelopen decennia meer extremen heeft vertoond en dat dit typisch is voor een “onstabiel systeem”. Met “onstabiel” bedoelen ze waarschijnlijk dat de atmosfeer door de mens zo sterk uit “evenwicht” is gebracht dat we serieus rekening moeten houden met de kans op een abrupte overgang naar een ander evenwicht dat even waarschijnlijk is als het huidige evenwicht. In de jaren 70 van de vorige eeuw werd aangetoond dat de aarde bij identieke externe condities (zoals zonnestraling) geheel met ijs bedekt kan raken. Epstein en McCarthy houden zo’n scenario voor mogelijk binnen afzienbare tijd. Welke kant het opgaat is echter onzeker. Mogelijk wordt het veel warmer, als grote hoeveelheden methaan (een sterk broeikasgas) vrijkomen op hoge breedte bij het op grote schaal ontdooien van permafrost, maar ook veel kouder als de thermohaline circulatie in de oceaan zwakker wordt of zelfs omkeert.

De klimaatmodellen kunnen ons niet helpen bij het verschaffen van meer zekerheid over de toekomstige ontwikkelingen op dit gebied. Dit is onlangs nog eens pijnlijk duidelijk geworden uit een op grote schaal uitgevoerd computermodel-experiment (Stainforth, et al., 2005). Bij dit experiment werden ruim tweeduizend simulaties gedaan met het Engelse klimaatmodel met verschillende begincondities en verschillende instellingen van de empirische coefficienten, waarbij het CO_2-gehalte van de atmosfeer na 30 jaar werd verdubbeld. De voorspellingen voor de ontwikkeling van de temperatuur bij het aardoppervlak als gevolg van deze verandering in het CO_2-gehalte varieeren van rond de 0°C tot ongeveer +10°C in 15 jaar. De gevoeligheid van het model voor de kleine verschillen is dus enorm.

De beleidsmakers mogen zich, volgens Epstein en McCarthy, echter niet verschuilen achter deze wetenschappelijke onzekerheden en daardoor een afwachtende houding aannemen ten aanzien van maatregelen die leiden tot de beperking van de uitstoot van broeikasgassen.

Literatuur

Epstein, P.R., en J.J. Epstein, 2004: Assessing climate stability. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 85, 1863-1870.

Stainforth, D.A., et al., 2005: Uncertainties in predictions of climate response to rising levels of greenhouse gases. **Nature**, 433, 403-406.

Stormachtig weer na einde grootste ijstijd

Aarnout van Delden (IMAU) (juni 2005)
Meteorologica, 2-2005, 25.



Hoffman (links) en Pierrehumbert (rechts)

Vanuit verschillende perspektieven (geologische en fysische) komen er steeds meer aanwijzingen dat de aarde tussen 600 en 700 miljoen jaar geleden volledig of bijna volledig met ijs was bedekt. Deze hypothese staat bij geologen sinds het einde van de jaren 80 bekend onder de naam “Snowball Earth”. De Russische klimaatwetenschapper, M. Budyko, had in 1969 al gewezen op de theoretische mogelijkheid van een totaal verijsde aarde. Met behulp van een eenvoudig energiebalans klimaatmodel, liet hij zien dat door de onstabiele koppeling tussen het hoge reflectievermogen (albedo) van ijs en sneeuw, de temperatuur van de atmosfeer en het totale sneeuw en ijsbedekking op aarde, een permanente en volledige ijsbedekking tot gevolg kan hebben. Volgens de berekeningen van Budyko, gebeurt dit in versneld tempo als het ijs tot op breedtegraden lager dan 30° reikt. Budyko liet ook zien dat grote veranderingen in instraling van de zon niet nodig zijn om in een ijstijd terecht te komen. Sterker nog, een ijstijd kan zich handhaven bij de huidige instraling van de zon. Latere studies in de jaren 70 en 80 met meer geavanceerde klimaatmodellen hebben dit beeld bevestigd. Empirisch bewijsmateriaal kwam van geologen die glaciale afzettingen aantroffen op plaatsen die ook in die tijd (650 miljoen jaar geleden) dichtbij de evenaar moeten hebben gelegen. De rol van continentverschuiving is echter nog steeds een punt van discussie. Een ander punt van discussie onder klimaatwetenschappers (geologen, biologen en natuurkundigen) is de vraag wat het einde van deze grote ijstijd heeft veroorzaakt en wat daarbij precies is gebeurd.

Bij een totale ijsbedekking zijn er geen biologische processes die de hoeveelheid kooldioxide in de atmosfeer beïnvloeden. Ook de afvoer van kooldioxide uit de atmosfeer door het verweren van gesteente stond tijdens de grote ijstijd op een laag pitje. Wel was er een voortdurende, maar langzame, aanvoer van kooldioxide naar de atmosfeer via vulkanisme. Hierdoor kon zich over miljoenen jaren ongeveer 0.12 bar aan kooldioxide in de atmosfeer verzamelen (meer dan 350 keer de huidige concentratie). Volgens Paul Hoffman en Daniel Schrag (http://www.eps.harvard.edu/people/faculty/hoffman/) is bij deze drempelwaarde van de kooldioxideconcentratie het positieve effekt op de temperatuur van de atmosfeer van het zogenaamde broeikaseffect van kooldioxide sterker dan het negatieve effekt van de ijs-albedo terugkoppeling. Het ijs ging na enkele miljoenen jaren diepvriesomstandigheden over de hele aarde weer smelten, het eerst bij de evenaar.

De naweëen van de grote ijstijd waren heftig. In het sediment onder de ondiepe gedeeltes van de oceaanen zijn onlangs enorme rimpelingen geconstateerd die volgens de aardwetenschappers, Allen en Hoffman, waarschijnlijk het gevolg zijn van grote

zeegolven die alleen mogelijk zijn bij hoge, lang aanhoudende windsnelheden die waarschijnlijk vlak na de grote ijstijd optraden onder invloed van de grote temperatuurverschillen tussen de tropen en de nog verijsde aarde op hogere breedtegraden. Allen en Hoffman geven toe verre van deskundig te zijn om iets te kunnen zeggen over het ontstaansmechanism van deze golven. Ze besluiten hun artikel in Nature met een oproep aan klimaatwetenschappers om deze heftige omstandigheden na te bootsen met een klimaatmodel (een zogenaamd "General Circulation Model").

Maar intussen is de vooraanstaande klimaatwetenschapper, Raymond Pierrehumbert, nog niet klaar met de vraag naar de exacte drempelwaarde van de kooldioxideconcentratie die nodig is om een einde te maken aan de "Snowball Earth". Volgens zijn berekeningen met een "General Circulation Model" moet de drempelwaarde veel hoger liggen dan de waarde (0.12 bar) die Paul Hoffman op zijn internetsite noemt. Pierrehumbert beweert dat zelfs 3.2 bar aan kooldioxide niet genoeg is om het smelten van "Snowball Earth" in gang te zetten. Zo'n hoge kooldioxideconcentratie is zeer onwaarschijnlijk. Pierrehumbert twijfelt daarom aan de juistheid van de "Snowball Earth" hypothese.

Literatuur

Allen, P.A., en P.F. Hoffman, 2005: Extreme winds and waves in aftermath of a Neoproterozoic glaciation. **Nature**, 433, 123-127.

Budyko, M.I., 1969: The effect of solar radiation variations on the climate of the earth. **Tellus**, 21, 611-619.

Pierrehumbert, R.T., 2004 High levels of atmospheric carbon dioxide necessary for the termination of global glaciation. **Nature**, 429, 646-649.

Meer Katrina's door menselijke invloed?

Aarnout van Delden (IMAU) (september 2005)
Meteorologica, 3-2005, 29.

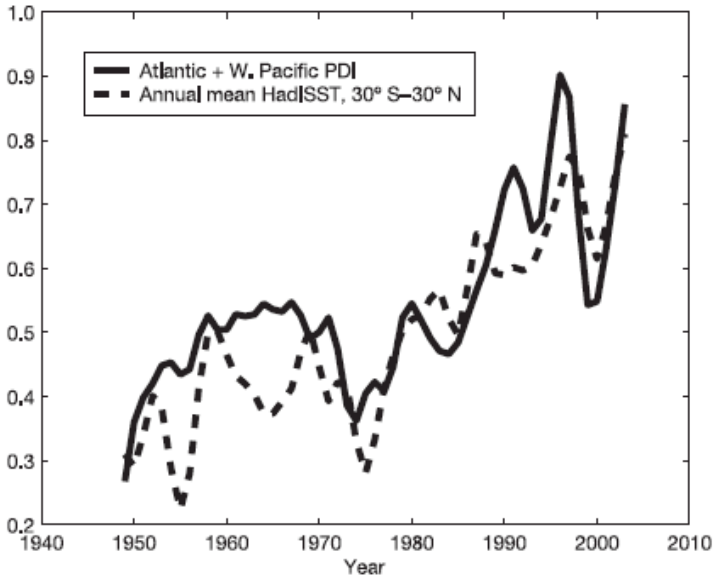


New Orleans na "Katrina"

In de nacht van 29-30 augustus 2005 kwam orkaan Katrina nabij New Orleans aan land en veroorzaakte in die stad en de wijde omgeving grote schade. Katrina was de op twee na zwaarste orkaan die in de laatste 100 jaar de Verenigde Staten heeft getroffen, Als de statistiek van Professor Kerry Emanuel van het prestigieuze Massachausetts Institute of Technology klopt, zal dit scenario zich in de toekomst vaker herhalen. In een, met veel gevoel voor timing, op 4 augustus j.l. in *Nature* gepubliceerd artikel laat Emanuel zien dat er een goede correlatie bestaat tussen de zeewater temperatuur en de verwoestende werking ("Power Dissipation Index", of "PDI") van een tropische cyclonen. Emanuel definieert de PDI als volgt.

$$PDI = \int_0^{\tau} V_{\max}^3 \mathrm{d}t$$

Hierin is $V_{\max}$ de maximale doorstaande (1 minuut gemiddelde) wind op 10 m hoogte en τ de levensduur van de cycloon. De maximale doorstaande wind wordt al sinds de jaren 1940 iedere 6 uur gerapporteerd en gedocumenteerd door de National Hurricane Center in Miami. Van deze gegevens heeft Emanuel gebruik gemaakt om zijn PDI te berekenen. Een toenemende PDI betekent dus een toename van de intensiteit (grote $V_{\max}$) van cyclonen, maar kan ook duiden op een toename van de levensduur van cyclonen. Sinds de jaren 1980 is er een duidelijke toename van zowel de gemiddelde zeewatertemperatuur in het gebied waar tropische cyclonen ontstaan en groeien, en de gemiddelde PDI (zie figuur 1). De PDI van tropische cyclonen in de Atlantische oceaan is zelfs verdubbeld sinds 1975. Emanuel veronderstelt dat dit een signaal is van het door de mens geïnduceerde broeikaseffect.



Figuur 1. Jaarlijks geaccumuleerde PDI voor de noordwestelijke Stille Oceaan en the Noord Atlantische Oceaan. De PDI is vermenigvuldigd met een faktor $5.8.10^{-13}$. De zeewatertemperatuur (stippellijn) is een gemiddelde over het gebied tussen 30°Z en 30°N. De waarde van de PDI is bijna verdubbeld in de laatste 30 jaar, terwijl de zeewatertemperatuur met ongeveer een halve graad is gestegen.

Bij collega's bestaat er flinke twijfel over de houdbaarheid van de conclusies van Emanuel. Volgens de ervaren orkaanonderzoeker William Gray van Colorado State University zijn de windmetingen waar Emanuel zich op baseert onderling niet consistent en bevatten ze grote fouten omdat het slechts ruwe schattingen zijn uit vliegtuigmetingen en satellietbeelden. Rechtstreekse metingen van de windsnelheden zijn nauwelijks gedaan. Omdat de PDI evenredig is met de *derde* macht van de windsnelheid, werkt de fout in de windsnelheid zeer hard door in de fout in de PDI. Gray verwijst het artikel van Emanuel dan ook naar de prullenbak met de weinig diplomatieke woorden, "it's a terrible paper, one of the worst I've ever looked at".



Kemphanen Gray (links) en Emanuel (rechts).

Zowel Gray als Emanuel staan bekend als wetenschappers die de media niet schuwen. Gray is vaak tegendraads, bot en wat brommerig. Emanuel is uitdagend en ook bot. In 1986 begon Emanuel aan een jarenlang durende kruistocht tegen de toen heersende theorie over de groei van tropische cyclonen met het doel om zijn eigen theorie geaccepteerd te krijgen. De oude theorie staat bekend als "Conditional Instability of the Second Kind" ("CISK") en is het werk uit 1964 van niemand minder dan Jules Charney en Arnt Eliassen, beide onderzoekers die tussen 1947 en 1980 het gezicht waren van de dynamische meteorologie. Jules Charney stond aan de wieg van de numerieke

weersverwachting (in 1950), was de eerste (in 1947) die een goede theorie bedacht over het ontstaan van frontale depressies op de gematigde breedte, legde het fundament onder de theorie van de grootschalige golfvoortplanting van de troposfeer naar de stratosfeer (in 1961) en forceerde in 1979 een doorbraak in het inzicht in de dynamica van blokkades (hogedrukgebieden die de westelijke stroming blokkeren). Jules Charney was bovendien de begeleider van Emanuel bij zijn promotieonderzoek. In 1995 diskwalificeert Emanuel de theorie van Charney en Eliassen nietemin met de weinig vleiende woorden, "the theory of CISK has been an influential and lengthy dead-end road in atmospheric science".

Het is Emanuel gelukt zijn theorie, die tegenwoordig bekend staat als "Wind Induced Surface heat Exchange" (WISHE), geaccepteerd te krijgen door het IPCC (intergovernamental Panel on Climate Change), maar de term CISK is nog lang niet verdwenen uit het vocabulair van de gemiddelde orkaanonderzoeker.

Literatuur

Emanuel, K., 2005: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. **Nature**, 436, 686-688.

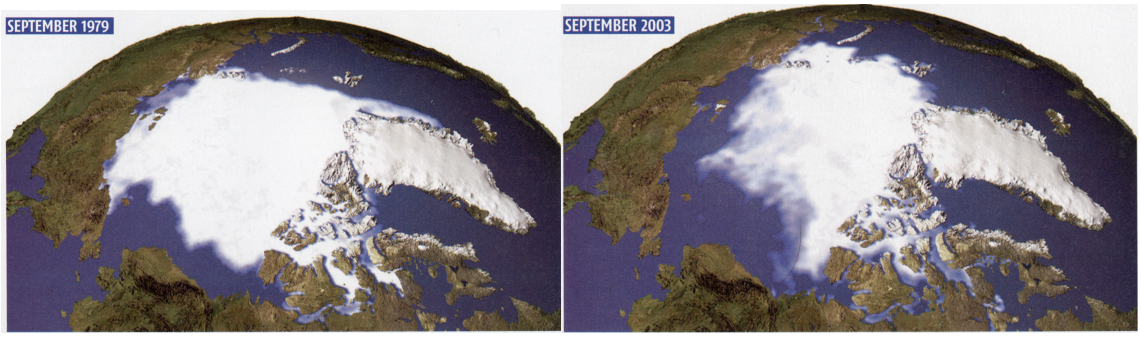
Sterke afname zee-ijs op het noordelijk halfrond

Aarnout van Delden (IMAU) (december 2005)
Meteorologica, 4-2005, 26.



Figuur 1. De Mendenhall gletsjer dichtbij Juneau, de hoofdstad van Alaska, met op de voorgrond in het water spelende kinderen tijdens de hittegolf in augustus 2005.

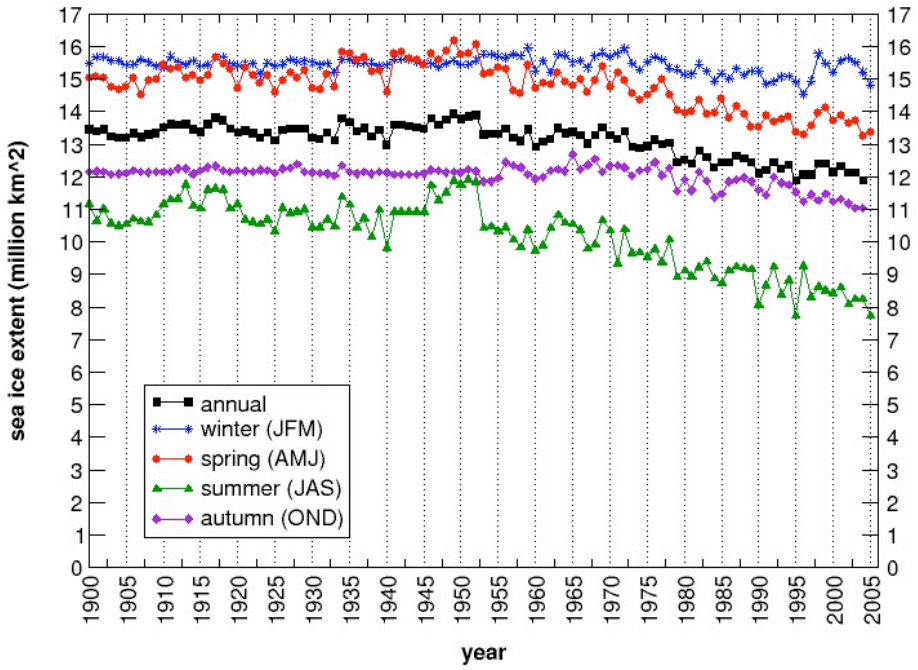
In de polaire gebieden op het noordelijk halfrond zijn de gevolgen van de mondiale opwarming sterk zichtbaar. In Alaska was de zomer van 2005 één van de warmste sinds mensenheugenis (figuur 1). Ook het zee-ijs van de Arctische oceaan ondervindt de gevolgen van de klimaatveranderingen (figuur 2), net als het sneeuwdek op het land. Japanse onderzoekers (Rikiishi et al., 2004) hebben aangetoond dat het maximale oppervlak dat met sneeuw is bedekt in januari en februari in de jaren 80 en 90 van de vorige eeuw met 3 miljoen vierkante kilometers is afgenomen. Dat is een afname van 6%.



Figuur 2. Zee-ijsbedekking in september 1979 (links) en in september 2003 (rechts) (bron: New Scientist, 8 oktober 2005, p. 12)

Zee-ijs is bevroren zeewater dat op de oceaan drijft. Op het noordelijk halfrond is in de winter ongeveer 15 tot 16 miljoen vierkante kilometers oceaan bedekt met zee-ijs. Meer dan de helft van dit ijs verdwijnt in het smeltseizoen dat van april tot september

duurt. Het gemiddelde zee-ijsoppervlak op het noordelijk halfrond in de zomer (juni, juli, augustus) is geleidelijk afgenomen van 11 miljoen vierkante kilometers 50 jaar geleden naar 8 miljoen vierkante kilometers in de zomer van 2005 (figuur 3). Ook in het voorjaar is er in deze periode een belangrijke afname van ijsoppervlak waargenomen. Wat het ijsoppervlak betreft, lijkt er in de winter niet veel te zijn veranderd in deze periode, maar dit is misleidend want alles wijst erop dat de ijs*dikte* ook in de winter is afgenomen. Naar schatting is de dikte van het permanente zee-ijs afgenomen van 3 meter naar minder dan 2 meter. Sommigen vrezen dat het Arctische zee-ijs over 50 jaar de zomer niet meer overleeft waardoor het voortbestaan van ijsberen, die op het ijs leven en rusten, in gevaar komt. Met het verdwijnen van het zee-ijs zal de Arctische oceaan veranderen van een helder witte reflector van zonnestraling die 80 % van de straling naar de ruimte terugzendt in een zonnecollector die 80% van de inkomende zonnestraling absorbeert. De opwarming van de polaire gebieden zal hierdoor worden versterkt. In de winter, als er nauwelijks straling is zal vooral de afname van de isolerende werking van het ijs de opwarming versterken.



Figuur 3. Jaargemiddelde en seizoensgemiddelde oppervlak van het zee-ijs op het noordelijk halfrond vanaf 1900 (http://arctic.atmos.uiuc.edu/cryosphere/).

De vraag is echter welk mechanisme verantwoordelijk is voor deze ontwikkelingen. Rigor et al. (2002) hebben een verband gelegd met de *daling* van de langjarig gemiddelde luchtdruk op zeeniveau over het centrale gedeelte van de Arctische oceaan (6 hPa per decade in de winter en 2 hPa per decade in de zomer) in de laatste paar decades van de vorige eeuw. Dit ging gepaard met een versterking van de westen winden bij het aardoppervlak rond de pool waardoor meer dik pakijs uit de Arctische oceaan door de Groenlandzee tussen Groenland en Spitsbergen naar de Noord Atlantische oceaan kon worden gedreven om aldaar in versneld tempo weg te smelten.

De vraag is nu of de waargenomen luchtdrukdaling boven de noordpool samenhangt met de toegenomen concentraties broeikasgassen en met de afname van de ozonconcentratie in de stratosfeer. Beide effecten kunnen de verklaring zijn voor de versterking van de polaire vortex (cyclonale circulatie) in de stratosfeer boven de pool in

de late winter en in het vroege voorjaar. Deze verandering dringt ook door tot het aardoppervlak. Dit verklaart de dramatische afname van de zee-ijsbedekking in de zomer echter niet. Ook in de zomer is de dalende tendens in de luchtdruk aan het aardoppervlak over een periode van 20 jaar waargenomen. De dynamische koppeling tussen oppervlakte temperatuur en de circulatie vormt wellicht een andere verklaring. Dit zou betekenen dat er een positieve (onstabiele) terugkoppeling aan het werk is. Een relatief hoge temperatuur aan het aardoppervlak gaat in theorie samen met relatief lage druk. Dit gaat gepaard met een sterkere westen wind, minder ijs, hogere temperatuur, nog minder ijs, verdere verhoging van de temperatuur, verdere drukdaling, enzovoorts. Uit de recente publicaties over dit thema valt op dat er nog weinig fundamenteel inzicht is in het belang van deze koppeling.

Literatuur

Rigor, I. G., J. M. Wallace, and R. L. Colony (2002), Response of sea ice to the Arctic Oscillation, **J. Climate, 15**, 2648–2663.

Rikiishi, K., E. Hashiya and M. Imai (2004), Linear trends of the length of snow-cover season in the Northern Hemisphere as observed by satellites in the period 1972-2000. **Annals of Glaciology, 38**, 229.

Rothrock, D. A., and J. Zhang (2005), Arctic Ocean sea iced volume: What explains its recent depletion? **J. Geophys. Res., 110**, C01002, doi:10.1029/2004JC002282.

Stroeve, J.C., M.C. Serreze, F. Fetterer, T. Arbetter, W. Meier, J. Maslanik and K.Knowles (2005), Tracking the Arctic's shrinking ice cover: Another extreme September minimum in 2004. **Geophys.Res.Lett. 32**, L04501, doi:10.1029/2004GL021810.

Levende planten produceren het broeikasgas, methaan

Door Aarnout van Delden (IMAU) (maart 2006)
Meteorologica, 1-2006, 31.



Bossen produceren methaan

In een opmerkelijk artikel in *Nature* van 12 januari j.l. worden experimenten beschreven die aantonen dat levende vegetatie methaan naar de atmosfeer emiteert. Omdat methaan in de atmosfeer infrarode aardstraling absorbeert draagt dit effect bij aan het natuurlijke broeikaseffect. De experimenten zijn uitgevoerd door o.a. Thomas Röckmann, tegenwoordig hoogleraar bij het IMAU (Universiteit Utrecht).

Plantenfysiologen kunnen maar nauwelijks geloven dat deze bron van methaan nooit eerder is waargenomen en vragen zich nu af of, en wat, ze nog meer over het hoofd zien. Frank Keppler, de eerste auteur van het artikel in Nature, geeft toe dat de methaanemissie van levende planten, die is gemeten in een kasje van 18 liter in het laboratorium van de Universiteit van Heidelberg, zeer gering is en dus moeilijk te meten, maar onmiskenbaar. Eerst werdt het ontstaan van organische gassen in verse en afgestorven bladeren van loofbomen onderzocht, en vervolgens in levende planten zoals gras en maïs. De levende planten vertoonden een 10 tot 100 maal grotere methaanuitstoot dan het afgestorven plantenmateriaal. De methaanuitstoot neemt toe met toenemende temperatuur.

Op grond van deze experimenten schat men dat de planten op het aardoppervlak tussen 63 en 243 miljoen ton methaan per jaar produceren. De geschatte totale productie aan methaan is daarmee ongeveer 600-700 miljoen ton. Dit betekent dat ruim 10 tot 30% van de huidige methaanemissie door planten uitgestoten wordt. Tweederde daarvan is afkomstig uit de tropen omdat daar de meeste biomassa ontstaat.

De methaanconcentratie in de atmosfeer is de afgelopen 150 jaar bijna verdrievoudigd. De bekendste vorm van methaan is aardgas. Het speelt een belangrijke

rol in de energievoorziening, maar dit veroorzaakt slechts een deel van de toename. Het overgrote deel van de toename is toe te schrijven aan bronnen van biologische oorsprong zoals rijstbouw, veeteelt en afbraakprocessen in afval. De vorming van methaan vindt in al deze gevallen plaats in zuurstofloze omstandigheden.

Het mechanisme rond de zuurstofrijke vorming van methaan in planten is nog lang niet duidelijk, al zijn er wel enige aanwijzingen. Het zijn voornamelijk de celwandbestandelen pectine en lignine die de methaan leveren.

Met de ontdekking van de nieuwe methaanbron zal het totale atmosferische budget van methaan opnieuw onder de loep moeten worden genomen. Klimaatwetenschappers moeten nu concluderen dat het atmosferisch broeikasgasbudget nog lang niet begrepen wordt. In ieder geval gaan Frank Keppler en Thomas Röckmann door met het onderzoek naar het budget van methaan in de atmosfeer. Naast verdere laboratoriumexperimenten willen de wetenschappers ook veldstudies en satellietwaarnemingen inzetten met als doel een antwoorden te vinden op belangrijke vragen rond de rol van methaan in het huidige en verleden klimaat op Aarde.



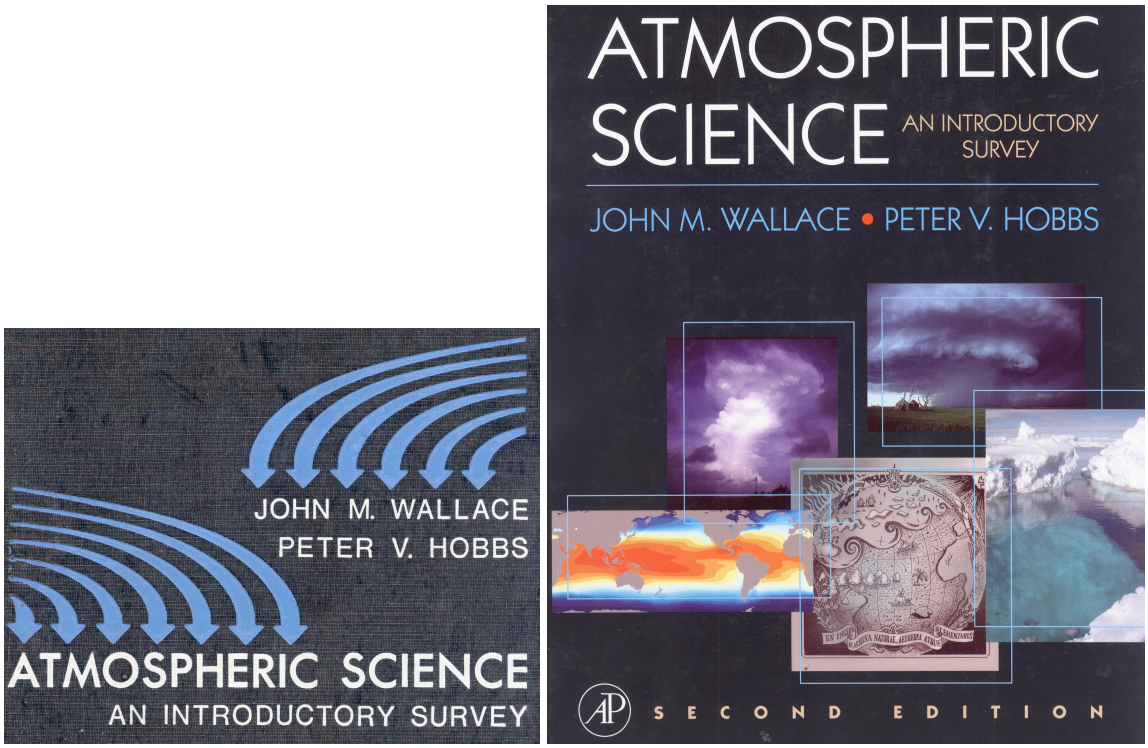
Frank Keppler, geochemicus aan de Universiteit van Heidelberg en eerste auteur van het besproken artikel.

Literatuur

Keppler, F., J.T.G. Hamilton, M. Brass & T. Röckmann, 2006: Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. **Nature, 439**, 187-191.

Meteorologie in 30 jaar niet alleen verdiept maar vooral verbreed

Aarnout van Delden (IMAU) (juni 2006)
Meteorologica, 2-2006, 27-28.

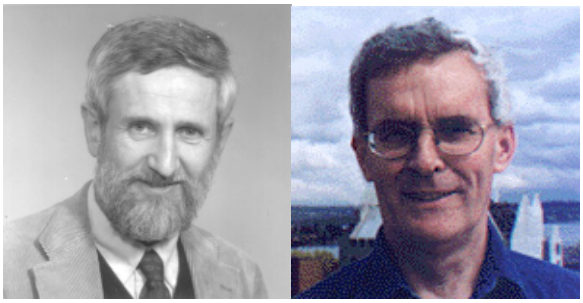


De kaft van de eerste editie (links) en van de tweede editie (rechts)

Onlangs is een tweede geheel vernieuwde editie verschenen van het inmiddels klassieke inleidend boek over meteorologie van John Wallace en Peter Hobbs. Beide auteurs zijn al meer dan 30 jaar hoogleraar aan de Universiteit van Washington in Seattle. In 1977 brachten ze de eerste editie van hun boek uit. John Wallace heeft noodgedwongen de laatste hand gelegd aan de huidige editie omdat Peter Hobbs vorig jaar op de leeftijd van 69 jaar is overleden.

De nieuwste editie van het boek is zeer “up to date”. De meeste illustraties die de kritische blik van de auteurs hebben doorstaan en opnieuw opgenomen zijn, zijn nu in kleur uitgevoerd. Maar er zijn ook veel nieuwe illustraties bijgekomen. Een vergelijking van de inhoud van de twee edities geeft een goede indruk van de ontwikkeling van het vak over de afgelopen dertig jaar. Daaruit blijkt dat de meteorologie vooral heeft gekeken naar de scheikunde, naar de geologie en in mindere mate ook naar de biologie. Dertig jaar geleden was meteorologie vooral nog een toepassing van de natuurkunde. Stromingsleer, thermodynamica en stralingstheorie waren de basis van het vak. Over de grenzen van de natuurkunde werd nauwelijks gekeken, ook al wisten de meeste onderzoekers dat de chemische samenstelling van de atmosfeer en de vraag hoe deze tot stand komt ook aandacht verdient in een inleidend boek over meteorologie. Dat wil overigens niet zeggen dat Wallace en Hobbs deze thema’s in hun eerste editie helemaal over het hoofd hebben gezien. Echter in de tweede editie zien we dat de chemie van de atmosfeer een eigen

hoofdstuk heeft gekregen. In dit hoofdstuk wordt vrij uitgebreid ingegaan op de bronnen, putten en verspreidingsmechanismen van aerosolen en sporen gassen, zoals ozon en kooldioxide. De temperatuurverdeling in de atmosfeer wordt sterk bepaald door de verdeling van sporengassen, zoals ozon. De temperatuurverdeling is tegelijkertijd bepalend voor de windverdeling waarmee de sporengassen worden verspreid. Deze ingewikkelde interactie tussen dynamica, chemie en straling is op dit moment een centraal onderzoeksthema onder meteorologen. Maatschappelijk relevante problemen zoals het door de mens veroorzaakte broeikaseffect en het ozongat hebben het onderzoek in deze richting sterk gestimuleerd.



De auteurs: Wallace (links) en Hobbs (rechts)

Naast een hoofdstuk over atmosferische chemie zijn in de nieuwe editie ook hoofdstukken toegevoegd over het "systeem aarde" en de "klimaatdynamica". Het eerstgenoemde hoofdstuk gaat over de geschiedenis van het klimaat (ijstijden e.d.), het ontstaan van de atmosfeer en de oceaanen, de rol van de ijskappen in het klimaat en het ontstaan en verdwijnen van ijstijden in relatie tot de intensiteit van de zonnestraling die de aarde, vooral in de zomer, bereikt. Ook de rol van geologische processen (vulcanisme, continentverschuiving) en biologische processen (photosynthese) en de vraag waarom onze buurplaneten, Venus en Mars, niet bewoonbaar zijn krijgt aandacht in dit hoofdstuk. In het hoofdstuk over "klimaatdynamica" worden een aantal van deze thema's verder uitgewerkt. De vraag naar de stabiliteit van het klimaat bij verstoringen zoals een forse toevoer van kooldioxide, krijgt aandacht. Wetenschappers vrezen dat de respons van de atmosfeer op dit soort verstoringen abrupte en grote klimaatveranderingen kunnen veroorzaken. De "Younger Dryas" gebeurtenis, 12000 jaar geleden, is hier een voorbeeld van. Over de "Younger Dryas" is vanaf de jaren negentig van de vorige eeuw meer bekend geworden[1]. Het lijkt aannemelijk dat de grote afvoer van smeltwater door de St. Lawrence rivier in Noord Amerika bij het smelten van de Laurentide ijskap de dichtheid van het water in de Noord Atlantische oceaan zodanig heeft beinvloed dat de grootschalige circulatie, waar de golfstroom deel van uitmaakt, is opgehouden, waardoor de aarde binnen enkele tientallen jaren weer terugkeerde naar een ijstijd, die zo'n 1300 jaar heeft geduurd. Thema's die in de tweede editie een minder prominente rol spelen zijn de energiebalans en de algemene circulatie van de atmosfeer.

De prachtig uitgevoerde nieuwste editie "Wallace en Hobbs" zal vele studenten die in de komende jaren voor het eerst serieus kennismaken met meteorologie zeer plezieren en inspireren om verder te gaan in dit boeiende vakgebied.

[1] (zie bijvoorbeeld http://williamcalvin.com/1990s/1998AtlanticClimate.htm)

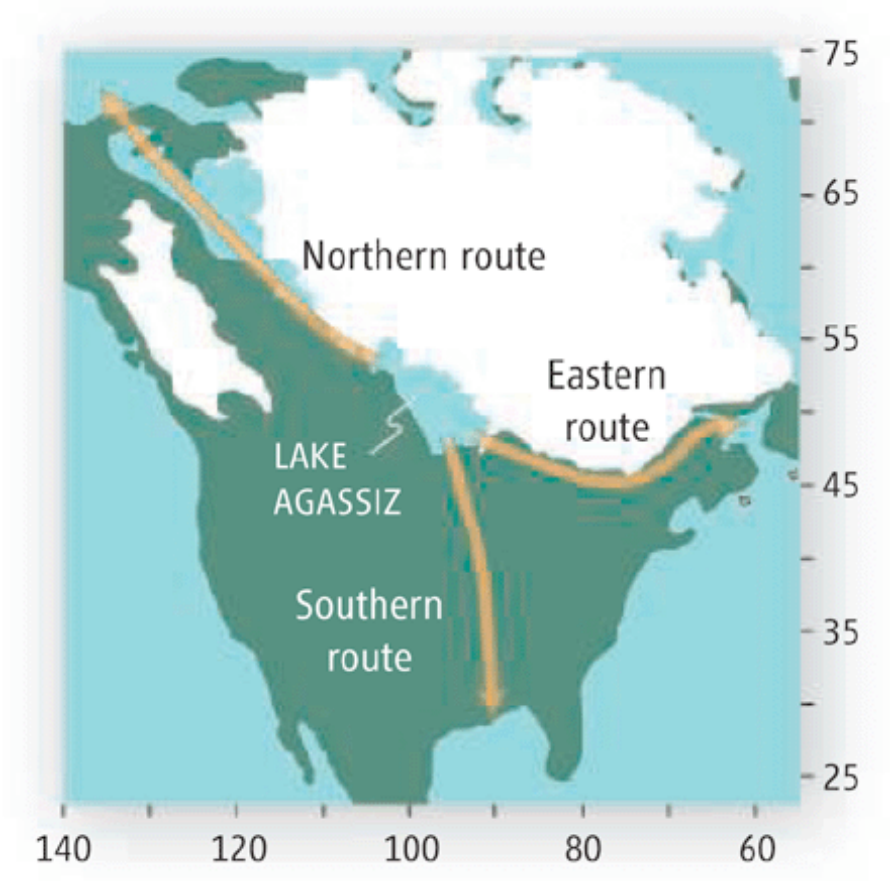
Literatuur

J.M. Wallace and P.V. Hobbs, 1977: **Atmospheric Sciences; An Introductory Survey**. Academic Press, Inc., 467 pp.
J.M. Wallace and P.V. Hobbs, 2006: **Atmospheric Sciences; An Introductory Survey. Second edition**. Elsevier, 483 pp.

De oceaancirculatie en abrupte klimaatverandering

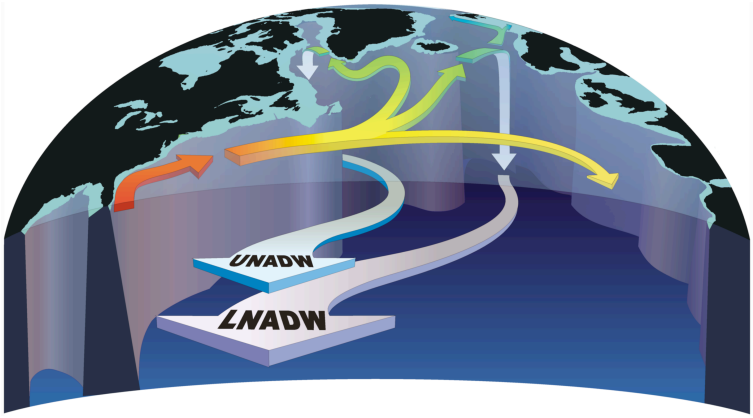
Door Aarnout van Delden (IMAU) (december 2006)
Meteorologica, 4-2006, 35-36.

Het verband tussen oceaanstromingen en abrupte klimaatveranderingen op aarde werd voor het eerst gelegd in 1961 door de beroemde oceanograaf Henry Stommel. In 1985 en in 1987 heeft de geoloog Wallace Broecker dit idee uitgewerkt om de klimaatschommeling die bekend staat als de Jongere Dryas te verklaren. Aan het begin van deze gebeurtenis, zo'n 12900 jaar geleden, daalde de jaargemiddelde temperatuur bij het aardoppervlak op Groenland binnen een tijdsbestek van 20 jaar met bijna 10 graden. Na ongeveer 1400 jaar kwam er, even plotseling, een eind aan de ijzige condities. Broeker denkt dat de Jongere Dryas is geïnitieerd door een snelle en catastrofale uitbarsting van smeltwater uit het Agassizmeer in Zuid Canada (figuur 1). Dit werd in gang gezet toen de Laurentide ijskap zich had teruggetrokken uit de St. Laurencevallei. Het Agassizmeer, dat veel groter was dan het huidige Lake Superior, het grootste meer van de Great Lakes, was na de laatste grote ijstijd ontstaan uit smeltwater van de Laurentide ijskap.



Figuur 1. De kaart van Noord Amerika 12900 jaar geleden, met de Laurentide ijskap en het Agassizmeer (bron: Wallace S. Broecker, 1997).

Ongeveer 10.000 kubieke kilometers zoet water kwam daarmee binnen korte tijd in de Noord Atlantische oceaan terecht. Omdat de dichtheid van zoet water lager is dan de dichtheid van zout water bij dezelfde temperatuur, kwam de vorming van diep water in dit gebied nagenoeg tot stilstand, en daarmee ook de golfstroom. Diep water wordt in de Noord Atlantische gevormde omdat het water dichtbij het oceaanoppervlak in dit gebied relatief zout en koud is, en daarmee relatief zwaar. Het dalende water in dit gebied is onderdeel van een grootschalige oceaancirculatie, die bekend staat als de MOC ("Meridional Overturning Circulation", figuur 2). De golfstroom, die onderdeel is van deze circulatie, transporteert veel energie van het zuiden naar het noorden, waardoor het winterklimaat in Europa relatief zacht is. Het stoppen van de MOC heeft dan ook tot gevolg dat de temperatuur in het noorden sterk daalt. Henry Stommel (1961) was de eerste die kwantitatief liet zien dat de oceaancirculatie, door een grote injectie van zoet water in de polaire oceaan, vrij abrupt tot stilstand kan komen of zelfs kan omkeren, in welk geval juist koud water naar het zuiden wordt getransporteerd. De koeling die optreedt na het stoppen van de oceaancirculatie heeft een uitbreiding van het zeeijsoppervlak in the Noord Atlantische Oceaan tot gevolg. Een ijsoppervlak reflecteert meer zonnestraling dan een wateroppervlak. Er is dus sprake van een positieve terugkoppeling waardoor de afkoeling wordt versterkt.



Figuur 2. De MOC in the Noord Atlantische Oceaan. UNADW staat voor Noord-Atlantisch Diep Water uit de Labradorzee. LNADW staat voor Noord-Atlantisch Diep Water uit de GINzee (het zeegebied tussen Groenland, Ijsland en Noorwegen) (bron: National Oceanography Centre, Southamton).

Op dit gegeven is de film "The Day after Tomorrow" uit 2004 gebaseerd. In deze film komt, door het versterkte broeikaseffect, zoveel zoet water van de smeltende Groenlandse ijskap in de Noord Atlantische oceaan terecht, dat de golfstroom binnen een week tot stilstand komt!

Zo snel gaat het in werkelijkheid echter niet. Toch maakt Wallace Broeker zich zorgen. Een daling van de wereldgemiddelde temperatuur bij het aardopppervlak van 10°C in 20 jaar op een planeet met meer dan 10 miljard mensen brengt de voedselvoorziening en de wereldvrede onherroepelijk in gevaar.

Op 1 december 2005 verscheen in Nature een artikel waarin een analyse van stroommetingen in Noord Atlantische Oceaan werden gepresenteerd waaruit zou blijken dat de intensiteit van de MOC tussen 1957 en 2004 met 30 % zou zijn afgenomen. Het belang van dit artikel werdt onderstreept met een hoofdredactioneel artikel en een beschouwend stuk in het hetzelde nummer van Nature. Detlef Quadfasel schrijft in het beschouwende stuk dat twijfels over de betrouwbaarheid van de conclusies gerechtvaardigd zijn, omdat de bevindingen zijn gebaseerd op een doorsnede van de

circulatie op 25°N in slechts 5 jaren, namelijk 1957, 1981, 1992, 1998 en 2004. Uiteindelijk geeft Quadfesel de auteurs het voordeel van de twijfel.

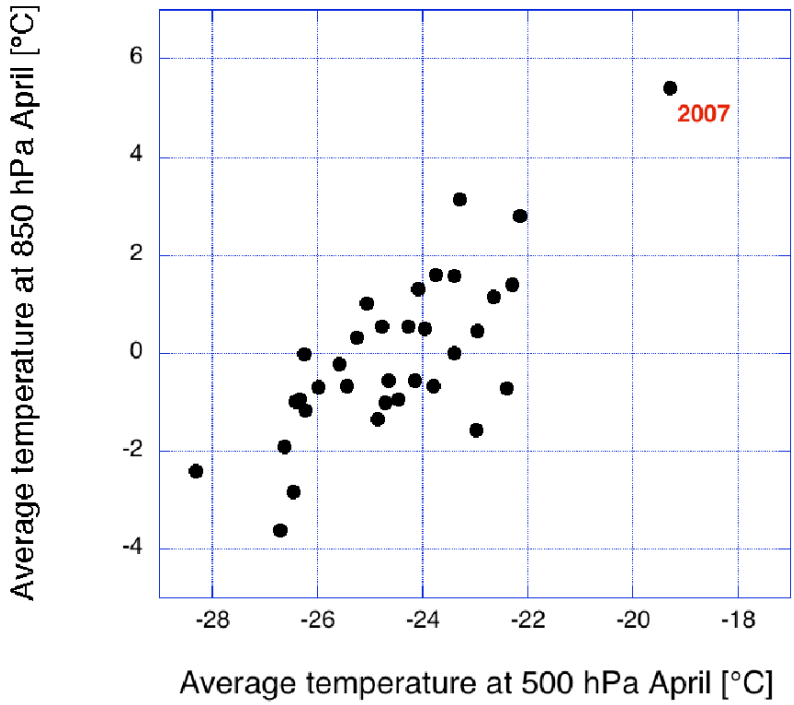
Toch blijven er sterke twijfels. De fysisch oceanograaf, Carl Wunsch, denkt zelfs dat er andere verklaringen voor abrupte klimaatveranderingen op globale schaal zijn dan op grond van het verband met de intensiteit van de MOC. Een afname van de intensiteit van de MOC met 30% zou bovendien gepaard moeten gaan met een afname van zeewatertemperatuur aan het oppervlak van de Noord Atlantische Oceaan van 1-2°C. Dit is echter niet waargenomen. De National Environment Research Council (NERC) in Engeland financiert nu een grote meetproject dat tot doel heeft de intensiteit van de oceaancirculatie (de MOC) in gaten te houden. We zullen er in de nabije toekomst meer over horen (zie: http://www.soc.soton.ac.uk/rapid/sis/moc_monitor.php).

Literatuur

Broecker, W.S., 1997**:** Thermohaline Circulation, the Achilles Heel of Our Climate System: Will Man-Made CO_2 Upset the Current Balance? **Science**. 278, 1582-1588).
Bryden, H. L. , Longworth, H. R. & Cunningham, S. A. Slowing of the Atlantic meridional overturning circulation at 25° N. **Nature 438**, 655–657 (2005).
Detlef Quadfasel, 2005: The Atlantic heat conveyor slows. **Nature 438**, 565-566.
Wunsch, C., 2006: Abrupt Climate Change: An Alternative View. **Quatenary Research**, 65, 191-203.

Hitte en Droogte in een Broeikasklimaat

Door Aarnout van Delden (IMAU) (juni 2007)
Meteorologica, 2-2007, 36-37.



Figuur 1. "Scatterplot" van de maand-gemiddelde temperatuur in april op, respectievelijk, 850 hPa en op 500 hPa boven De Bilt voor de jaren 1973-2007. April 2007 ligt ver buiten de "wolk" van punten die de "normale" statistische verdeling representeert. Zowel op 500 hPa als op 850 hPa was de afwijking in april 2007, t.o.v. het gemiddelde voor de periode 1973-2006, ruim drie maal de standaardafwijking voor de periode 1973-2006.

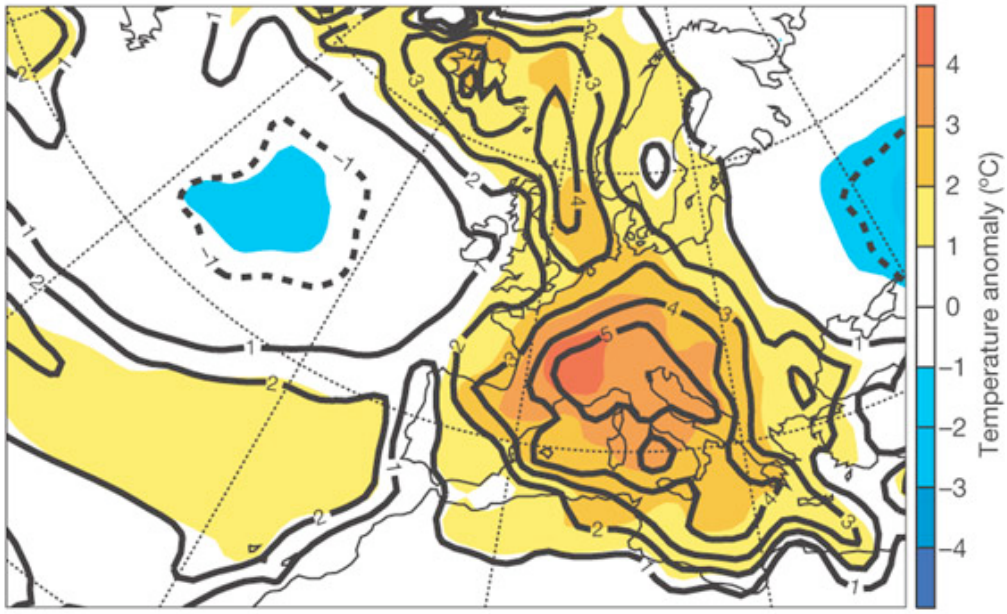
Wat kan er op basis van de recente wetenschappelijke literatuur gezegd worden over de oorzaken van de uitzonderlijk droge en warme aprilmaand in noordwest Europa? De extreme warmte kan een statistische fluctuatie van het Nederlandse klimaat zijn. Records zijn van alle tijden. Echter, het oude temperatuurrecord voor april uit 1794 in De Bilt is niet met enkele tienden °C overschreden, maar met bijna 2°C! Dat is vooral opmerkelijk als bedacht wordt dat de relatief recente maanden juli en september 2006 en januari 2007 ook record warm waren. Misschien is de zachte winter juist deels de oorzaak van de warmte in April, en is het warme najaar deels de oorzaak van de zachte winter en is de hete zomer deels de oorzaak van het warme najaar. Een soort kettingreactie, dus. De relatief hoge temperatuur van het Noordzeewater in april (ongeveer 4 graden hoger dan de normale waarde) is te wijten aan de zachte winter en zal zeker hebben bijgedragen aan de hoge maandgemiddelde temperatuur in april. De wind in april kwam zelfs relatief vaak van zee. Maar ook hoger in de atmosfeer, bijvoorbeeld op 850 hPa en op 500 hPa, was de temperatuur abnormaal hoog (figuur 1).

Opvallend in april 2007 waren de hoge maximumtemperaturen: in De Bilt gemiddeld 19,7°C, bijna 7°C boven de normaal (3,3 maal de standaard afwijking voor de

periode 1901-2006)! Drie effecten verklaren dit verschil: het gebrek aan bewolking en neerslag (landelijk gemiddeld, 280 uur zonneschijn en 0,4 mm neerslag), de uitzonderlijk hoge temperatuur in de hogere luchtlagen (figuur 1) en de uitzonderlijk hoge luchtdruk (vooral in de hogere luchtlagen), waardoor het 850 hPa niveau en het 500 hPa niveau gemiddeld, respectivelijk, 90 m en 174 m hoger lagen dan het gemiddelde over de jaren 1973-2006. In april is de intensiteit van de zonnestraling voldoende om bij een onbewolkte hemel en een droog aardoppervlak overdag lokaal een bijna 2 km dikke droogadiabatisch gelaagde grenslaag te bewerkstelligen. De maandgemiddelde hoogte van het 850 hPa niveau in De Bilt in april 2007 was 1530 m. Met een maandgemiddelde 850 hPa temperatuur in De Bilt van 5,4°C, en dagelijks zonnig weer, verwachten we een maandgemiddelde maximum temperatuur van 20,7°C. Het verschil met de werkelijk opgetreden gemiddelde maximum temperatuur op 1,5 m hoogte in De Bilt in april 2007 (19,7°C) is niet groot.

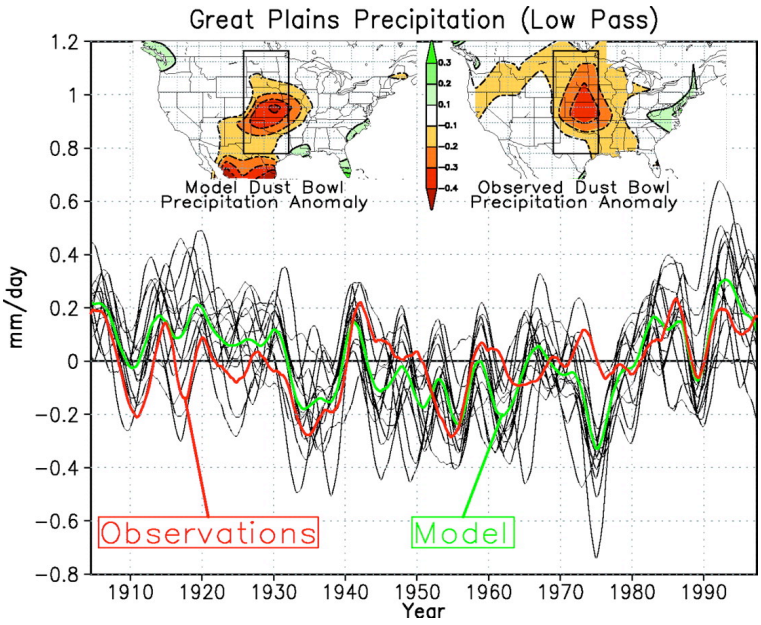
Hoge temperaturen in de hogere luchtlagen worden meestal veroorzaakt door de compressie van lucht in samenhang met dalende beweging, geassocieerd met hoge druk. Waarom was deze situatie zo persistent? Was er sprake van een positieve terugkoppeling waarbij de droogte en de hoge temperaturen de grootschalige luchtbeweging in stand hielden en andersom?

Er is in de wetenschappelijke tijdschriften, naar aanleiding van de hete en droge zomer van 2003, veel geschreven over het vaker optreden van droogte- en hittegolven in een versterkt broeikasklimaat. De aandacht voor dit onderwerp is vooral in Zwitserland groot, waar de zomer van 2003 alle statistische “verwachtingen” overtrof (figuur 2).



Figuur 2. Temperatuuranomalie (op 2 m) gemiddeld in juni, juli en augustus 2003 t.o.v. het 1961–90 gemiddelde. De anomalie wordt weergegeven d.m.v. kleuren (in °C) en d.m.v. contourlijnen (eenheid: standaardafwijking statistiek 1961–90) (ref. 1[2]).

[2] zie ook http://www.meteoswiss.ch/web/en/climate/worldwide_climate/spatial_climate_anomalies.html.



Figuur 3. Vijf jarig lopende gemiddelde van de neerslaganomalie in mm/dag gemiddeld over de Great Plains (30°N to 50°N, 95°W to 105°W; het gebied wordt d.m.v. een kader weergegeven in de kaart). De uitkomst van de 14 aparte leden van het ensemble worden weergeven d.m.v. zwarte dunne lijnen The groene dikke curve stelt het ensemble-gemiddelde voor. De rode curve is afgeleid uit de waarnemingen. Boven de grafiek wordt de geografische verdeling getoond van de neerslaganomalie tijdens de "Dust Bowl" periode (1932-1938), volgens het ensemblegemiddelde van de simulatie (links) en waargenomen (rechts) (in mm/dag) (ref. 4).

Helaas bieden de meeste recent verschenen artikelen over dit onderwerp (zie referenties 1 tot 5) weinig aanknopingspunten voor een beter inzicht in de oorzaken van de extreme warmte en droogte van april 2007. Deze artikelen beschrijven vooral de uitkomsten van numerieke experimenten met een complex klimaatmodel. Dit levert mooie plaatjes op, maar weinig inzicht.

Figuur 3 toont, bijvoorbeeld, het resultaat van een ensemble van 14 modelsimulaties van het klimaat van de twintigste eeuw, waarbij vooral is gekeken naar hoe goed het model in staat is de droogte van de jaren 30 in Noord Amerika (de zogenaamde "dust bowl") te reproduceren. De verschillende simulaties verschillen alleen in de atmosferische begintoestand. De zeewater temperaturen werden voorgeschreven. Hoewel het ensemblegemiddelde van de neerslaganomalie boven de Great Plains in de jaren 30 redelijk goed overeenkomt met de waarnemingen, wordt er in de jaren 70 een even grote neerslaganomalie gesimuleerd die niet is opgetreden. De auteurs concluderen dat de inwoners van de Great Plains "geluk" hebben gehad, want de kans op langdurige droogte was "12 uit 14" (met andere woorden, 12 van de 14 leden van het ensemble produceren droogte in de jaren 70). Als we wat willen begrijpen van de rol van de interactie tussen het straling, verdamping en de grootschalige circulatie bij het tot stand komen van het extreme aprilweer zijn deze artikelen weinig behulpzaam.

Een artikel uit 1975 van Jules Charney over de dynamica van droogte en woestijnen biedt mogelijk meer inzicht in het probleem (ref. 6). Volgens Charney zit het gezochte positieve terugkoppelingsmechanisme als volgt in elkaar. Als het droog is wordt zonneenergie die het aardoppervlak bereikt nauwelijks gebruikt om water te verdampen en daarom bijna geheel omgezet in voelbare warmte. Hierdoor stijgt de temperatuur van

het aardoppervlak en de lucht daarboven en daalt de relatieve luchtvochtigheid, waardoor de kans op wolkenvorming klein is, ondanks de statische onstabiliteit. Overdag is het aardoppervlak en de onderste laag van de atmosfeer in deze omstandigheden een sterke bron van infrarode straling, die vanwege de droge atmosfeer relatief makkelijk naar de ruimte verdwijnt. Dit kan leiden tot een negatieve stralingsbalans aan de top van de atmosfeer. Als het aardoppervlak weinig warmte opslaat, zoals boven het continent, is het de atmosfeer die warmte verliest. Dit gebeurt bijvoorbeeld boven de Sahara in hartje zomer! Thermisch evenwicht kan in dit geval worden bereikt en gehandhaafd als de lucht daalt en door compressie adiabatisch opwarmt. Dalende lucht gaat gepaard met divergentie van massa in de onderste luchtlagen en de vorming van een anticycloon (een hogedrukgebied). Dalende lucht onderdrukt bovendien de bewolking, waardoor de droogte in stand blijft.

Is dit de essentie van het het mechanisme dat in april 2007 het extreem warme, zonnige en droge weer zolang in stand hield? Het kan niet het hele verhaal zijn want dat zou betekenen dat het centrum van het hogedrukgebied altijd boven het continent moet hebben gelegen, terwijl het in werkelijkheid ook dikwijls boven de Noordzee en de Oostzee heeft gelegen. Andere processen moeten een belangrijke rol hebben gespeeld. Waarschijnlijk heeft de condensatiewarmte die op grote schaal vrijkwam bij “slecht weer” in het Middelandsezeegebied de stijgbewegingen aldaar versterkt en de compenserende daalbewegingen ten noorden en zuiden vergroot. Een soort “Hadley Circulatie” dus, maar dan op gematigde breedte. Er zijn dus nog genoeg vragen voor verder onderzoek.

Dankbetuiging

Dank aan Wim van den Berg (Meteo Consult) en Bart van den Hurk (KNMI/IMAU) voor behulpzaam commentaar.

Literatuur

1. C. Schär, P.L. Vidale, D. Luthi, C. Frei, C. Häberli, M.A. Liniger, C. Appenzeller, 2004: The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. **Nature, 427**, 332-336.
2. The GLACE Team, 2004: Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. **Science, 305**, 1138-1140.
3. G.A. Meehl, Claudia Tebaldi, 2004: More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in 21st century. **Science, 305**, 994-997.
4. S.D. Schubert, M.J. Suarez, P.J. Pegion, R.A. Koster, J.T. Bacmeister, 2004: On the causes of the Dust Bowl. **Science, 305**, 1855-1859.
5. S.I. Seneviratne, D. Luthi, M. Litschi, C. Schär, 2006: Land-atmosphere coupling and climate change. **Nature, 443**, 205-209.
6. J.G. Charney, 1975: Dynamics of deserts and drought in the Sahel. **Quart.J.R.Met.Soc., 101**, 193-202.

Het Internet als bibliotheek

Door Aarnout van Delden (IMAU) (september2007)
Meteorologica, 3-2007, 33.

Vroeger ging je naar de bibliotheek of naar een boekenwinkel om op de hoogte te blijven van de nieuwste wetenschappelijke literatuur. Tegenwoordig kan dit ook thuis via Internet. Voor het bekijken van wetenschappelijke tijdschriften, maakt Internet een bezoek aan de bibliotheek langzamerhand overbodig. Bijna alle belangrijke abonnementen zijn electronisch beschikbaar. Ook electronische versies van oude artikelen zijn met behulp van Google, door het intypen van de titel van het artikel of de naam van de auteur, op Internet vaak met gemak te vinden. Sommige instituten, zoals het *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (de bakermat van de klimaatmodellen) stellen bijna alle publicaties van de werknemers als pdf-bestand beshikbaar (1). Wat dit betreft heeft de AMS (*American Meteorological Society*) het ook goed voor elkaar. Op de site van de AMS (2) kan men bijna alle artikelen die tot zes jaar geleden zijn verschenen in één van de AMS-Journals, zoals *Journal of the Atmospheric Sciences* en *Monthly Weather Review*, gratis downloaden. Een abonnement is niet nodig. De artikelen van de laatste vijf jaar kunnen alleen met een abonnement worden gedownload. Helaas hebben de meesten andere uitgevers van vaktijdschriften het niet zo goed voor elkaar. Gelukkig is er de site van de non-profit organisatie, "JSTOR" ("Journal Storage") (3) waarop een grote verzameling electronische copiëen van wetenschappelijke tijdschriftartikelen op allerlei gebied te vinden is. Alle nummers van het bekende blad *Science*, verschenen tussen 1880 en 2001, kunnen hier gratis worden bekeken.

Elektronische versies van boeken zijn meestal nog niet beschikbaar. Toch begint zich wat dit betreft een kentering af te tekenen. Steeds meer organisaties en auteurs stellen goede "leerboeken" beschikbaar op internet. Mooie voorbeelden hiervan zijn de electronische boeken van Robert Stuart getiteld "Introduction to Physical Oceanography" (4) en van Spencer Weart, getiteld "The Discovery of Global Warming" (5). Verder is de site van de *Department of Ocean and Atmospheric Sciences* van de *Old Diminion University* (6) de moeite van het bekijken waard. De onderwerpen "Stratospheric Ozone" en "Global Land Vegetation" worden hier uitgebreid en voorzien van mooie illustraties behandeld. Op de site van de *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) zijn sinds Mei j.l. alle hoofdstukken van het wetenschappelijke deel van het vierde klimaatraport als pdf-bestand beschikbaar (7). Dit raport is mooi vormgegeven en zorgvuldig geschreven. Zeer aan te bevelen is hoofdstuk 6, dat handelt over paleoklimaat (klimaatgeschiedenis). Als laatste wil ik aanbevelen een *klimaatatlas* die is gebaseerd op de *ERA-40 re-analysis* (8). Dit is een analyse van alle beschikbare waarnemingen met de meest geavanceerde data-asimmilatietechnieken met als doel het verkrijgen van een consistent drie-dimensionaal beeld van de gemiddelde toestand van de atmosfeer tussen 1958 en 2001. De atlas is gemaakt door het ECMWF (*European Centre for Medium Range Weather Forecasts*), in samenwerking met experts, zoals Brian Hoskins, van de Universiteit van Reading. De pdf-file beslaat bijna 70 MB! Wie van atlassen houdt en een passie heeft voor de meteorologie, zal veel tijd kunnen doorbrengen met het bekijken van de fascinerende en leerzame plaatjes die overigens ook apart kunnen worden gedownload.

Websites

(1) http://www.gfdl.noaa.gov/reference/bibliography/authors/
(2) http://ams.allenpress.com/perlserv/?request=get-archive
(3) http://www.jstor.org/
(4) http://oceanworld.tamu.edu/resources/ocng_textbook/PDF_files/book_pdf_files.html
(5) http://www.aip.org/history/climate/pdf.htm
(6) http://www.ccpo.odu.edu/SEES/
(7) http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html
(8) http://www.ecmwf.int/research/era/ERA-40_Atlas/index.html

Zeespiegelstijging: wat staat Nederland te wachten?

Aarnout van Delden (IMAU) (december 2007)
Meteorologica, 4-2007, 29.



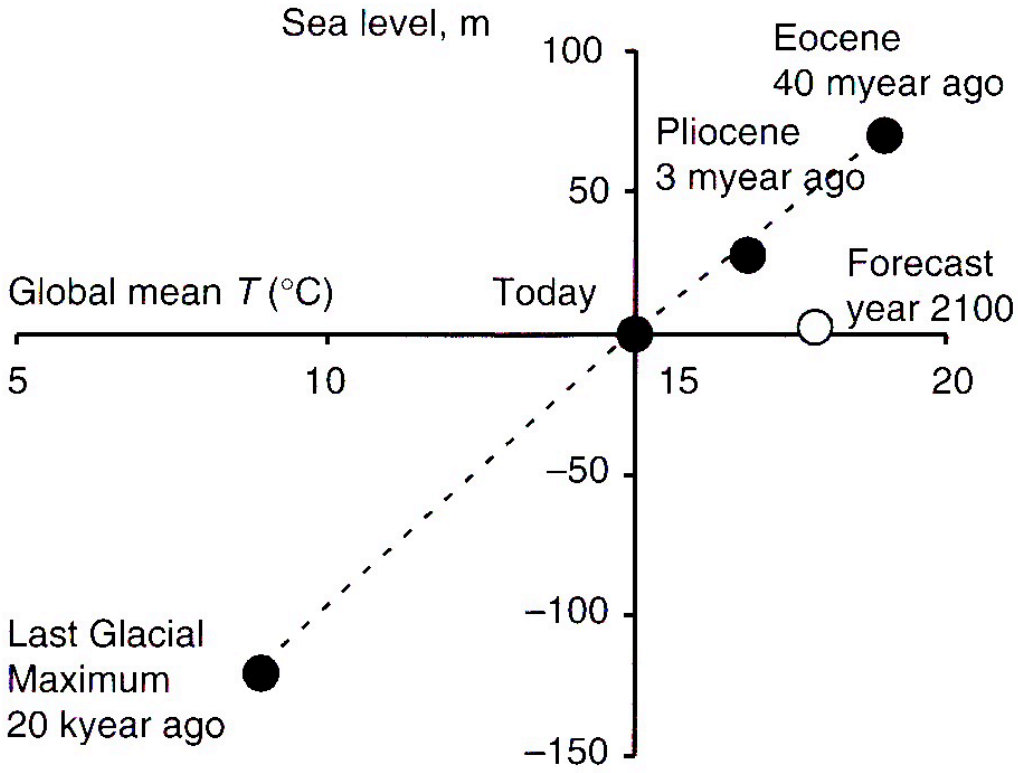
Figuur 1. Satellietfoto van Vatnajökull ijskap op IJsland. Deze ijskap heeft een oppervlak van ongeveer 8000 vierkante kilometer en is maximaal 1 km dik. Bron: NASA.

Volgens het dit jaar verschenen IPCC-rapport [1] zal de zeespiegel in de komende eeuw wereldgemiddeld met ongeveer 30 cm stijgen. Dit getal is echter zeer onzeker omdat de processen die hieraan bijdragen nog slecht begrepen worden. De belangrijkste processen die de zeespiegel beïnvloeden zijn thermische expansie van de oceaan, het afkalven van Groenland en Antarctica en het smelten van gletjers en kleine ijskappen. Vatnajökull op IJsland (figuur 1) is een voorbeeld van een kleine ijskap. Vooral op de vraag hoe Groenland en Antarctica gaan reageren op hogere temperaturen is nog geen antwoord. Een zeespiegelstijging van 30 cm heeft voor Nederland geen dramatische gevolgen. Bij de Noordzeestorm van 9 november j.l. steeg de zeespiegel bij Hoek van Holland tot ruim 3 meter boven NAP, de hoogste stand sinds 1 februaru 1953. Bij Delfzijl lag de zeespiegel zelfs ruim 4 meter boven NAP. Je zou zeggen, “het loopt niet zo’n vaart”.

Maar het is zeer waarschijnlijk dat dit getal (30 cm) een flinke onderschatting is van wat ons in werkelijkheid staat te wachten. Dat schrijft Stefan Rahmstorf, onderzoeker aan het Potsdam Institute for Climate Research. Rahmstorf gelooft niet dat wij op dit moment in staat zijn de zeespiegelstijging op grond van fysische wetten te berekenen, vooral omdat er nog weinig bekend is over hoe Antarctica en Groenland ijs verliezen [2]. Rahmstorf laat, op grond van waarnemingen van het zeeniveau en van de temperatuur in

de twintigste eeuw, zien dat de snelheid waarmee de zeespiegel stijgt evenredig is met de temperatuurstijging ten opzichte van de temperatuur tijdens het pre-industriële tijdperk. Hij berekent een evenredigheidsconstante van 3,4 mm per jaar per graad Celcius. Toegepast op de door het IPCC gemelde scenarios voor de komende eeuw komt dit neer op een zeespiegel die in 2100 met 0,5 meter tot 1,4 meter is gestegen ten opzichte van het zeeniveau in 1990.

Eigenlijk is dit nog maar het begin van een langdurige periode waarin de oceaan zich aanpast aan de nieuwe omstandigheden. De oceaan en de cryosfeer reageren namelijk zeer traag op temperatuurstijgingen in de atmosfeer. Twintig duizend jaar geleden, op het hoogtepunt van de laatste ijstijd, lag het zeeniveau 120 m lager dan nu, terwijl de wereldgemiddelde temperatuur toen t.o.v. nu 4 tot 7 graden lager was. Drie miljoen jaar geleden was de wereldgemiddelde temperatuur 2 tot 3 graden hoger dan nu, terwijl het zeeniveau toen 25 to 35 meter hoger lag dan nu. Het Eoceen, 40 miljoen geleden, was het laatste tijdperk waarin onze planeet vrij was van grote ijskappen. Toen lag de zeespiegel 70 m boven die van nu. Zoals is te zien in figuur 2, suggereren deze geologische gegevens dat er een lineair verband bestaat tussen de wereldgemiddelde temperatuur en het zeeniveau. Er staat ons dus nog een alarmerende zeespiegelstijging te wachten van enkele tientallen meters. Het zal, door de traagheid van het oceaan-ijs systeem, een hele tijd duren voordat deze zeespiegelstijging is gerealiseerd (op zijn minst eeuwen, zo niet duizenden jaren), maar of Nederland hier uiteindelijk tegen bestand is, is twijfelachtig! We mogen dan alleen maar hopen dat de volgende natuurlijke ijstijd voor die tijd is ingetreden.



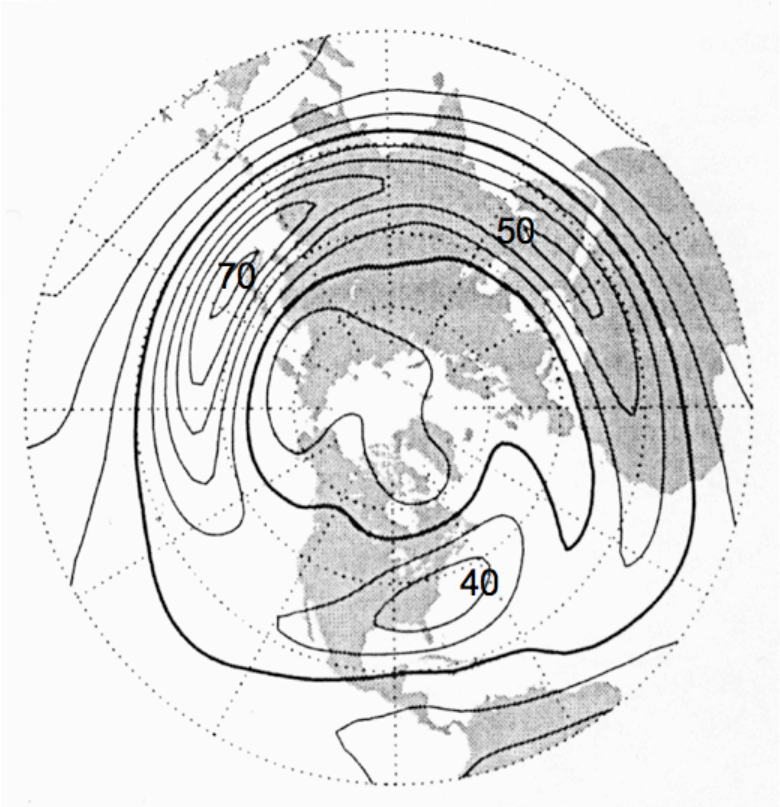
Figuur 2. De relatie tussen zeespiegel en temperatuur op zeeniveau op geologische tijdschaal. IPCC verwacht een zeespiegelstijging van maximal een halve meter in de komende eeuw, terwijl op grond van "geologische" kennis dit uiteindelijk wel 50 meter zal zijn. Bron: Archer (2007) [3].

Literatuur

[1] Meehl, G.A. et al., 2007: Global Climate Projections. In Climate Change 2007, chapter 10 of the fourth assessment report of the **Intergovernmental Panel on Climate Change** (IPCC).
[2] Stefan Rahmtorf, 2007: A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. **Nature**, 315, 368-370.
[3] Archer, D., 2007: **Global Warming: Understanding the Forecast.** Blackwell Publishers, Oxford, UK, 194 pp.

De verbreding van de tropen

Door Aarnout van Delden (IMAU) (maart 2008)
Meteorologica, 1-2008, 29-30.



Figuur 1. De zonale component van de windsnelheid op 12 kilometer hoogte in het wintersizoen op het noordelijk halfrond (december, januari en februari), gemiddeld over de jaren 1958-1997, volgens de "NCEP/NCAR-reanalysis". Contourinterval is 10 m/s; de dikke lijn correspondeert met een zonale (west-oost) windsnelheid van 20 m/s. De gordel van hoge windsnelheden op ongeveer 35°N is de subtropische straalstroom.

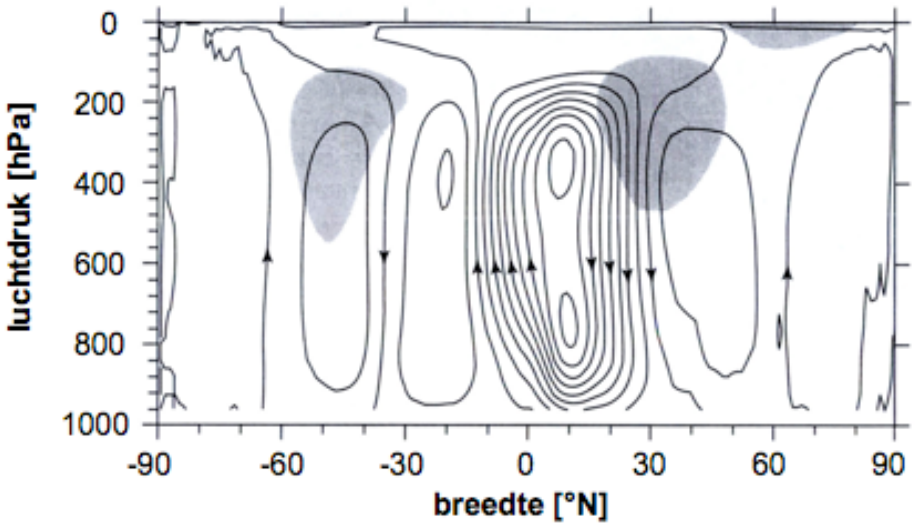
Niet alleen Nederland heeft een uitzonderlijk zachte winter achter de rug, in heel Noord Europa inclusief Scandinavië en Rusland is echt winterweer nagenoeg uitgebleven. Een verklaring voor de uitzonderlijke hoge wintertemperaturen in deze regio's is terug te voeren op de in het algemeen vrij noordelijke ligging van het subtropische hogedrukgebied boven centraal en/of zuidwest Europa, waardoor het in het Alpengebied vrij zonnig was, terwijl de lagedrukgebieden vanuit de Atlantische oceaan met een grote boog ten noorden van het hogedrukgebied over Noord Europa trokken. De zachte oceaanlucht drong daardoor zelfs tot in Lapland en Noord Rusland door. Tegelijkertijd werdt er langs de oostflank van het hogedrukgebied soms relatief zeer koude lucht naar de Balkan, Griekenland, Turkije en het Midden-Oosten gevoerd, waardoor er in Jeruzalem in januari en in Athene in februari een flink pak sneeuw viel.

De opvallend noordelijke ligging van het subtropisch hogedrukgebied boven West Europa, en daarmee ook van de noordelijke koers van de Atlantische depressies,

doet zich al een groot aantal winters voor. Vanaf het einde van de jaren 80 van de vorige eeuw is er sprake van een grotere frequentie in de winter van het optreden van zuid-westen winden in Nederland. De vraag is of dit de tekenen zijn van klimaatverandering als gevolg van de door de mens veroorzaakte verandering in de samenstelling van de atmosfeer. In het eerste nummer van het nieuwe tijdschrift, *Nature Geosciences*, een soort dependence van het bekende tijdschrift, *Nature*, wordt een overzicht gegeven van de stand van zaken rond een thema dat met deze vraag samenhangt, namelijk de meridionale verbreding van de tropische gordel.

De tropische gordel wordt op verschillende manieren gedefinieerd. Wellicht de beste definitie is aan de hand van de afstand tussen de subtropische straalstromen aan beide kanten van de evenaar. Het blijkt uit waarnemingen dat deze afstand vanaf 1979 tot 2005 is toegenomen. De gemiddelde positie en sterkte van de subtropische straalstroom op het noordelijke halfrond in de winter wordt getoond in figuur 1. De subtropische straalstroom ligt aan de poolwaarste kant van de dalende tak van de zogenaamde "Hadleycirculatie" (figuur 2), en hangt samen met de subtropische hogedrukgebieden. Uit diverse studies blijkt nu dat dit gebied vanaf 1979 tot 2005 *zonaal gemiddeld* ongeveer 200 kilometer poolwaarts is opgeschoven. Overigens, voor Europa is de vraag van belang of de poolwaartse verschuiving van de subtropische straalstroom boven Noord Afrika misschien wel groter is dan elders. Hier wordt in het artikel van Seidel et al. niets over gezegd. Ook wordt niets gezegd over eventuële verschillen in de poolwaartste uitbreiding van de relatief sterke winter-Hadleycirculatiecel t.o.v. de relatief zwakke zomer-Hadleycirculatiecel.

De klimaatmodelsimulaties die zijn gedaan voor het recent verschenen IPCC-rapport geven een minder sterke uitbreiding van de Hadleycirculatie dan in werkelijkheid is opgetreden. Volgens diezelfde klimaatmodelsimulaties zal de Hadleycirculatie zich enigzins poolwaarts uitbreiden en tegelijkertijd verzwakken. Het is echter lastig om met behulp van zulke complexe modellen de oorzaken te



Figuur 2. De zonaal-gemiddelde meridionale stroomfunctie gemiddeld in december, januari en februari (contourinterval: 2×10^9Kg/s). In de grijs getinte gebieden is de zonaal-gemiddelde zonale windsnelheid gemiddeld in december, januari en februari groter dan 20 m/s. De "Hadleycirculatiecel" van het winter halfrond (tussen 10°Z en 30°N) is bij verre het sterkst. Gebaseerd op 20 jaren ECMWF-analyses. Bron: Encyclopedea of Atmospheric Science, p. 922, Academic Press.

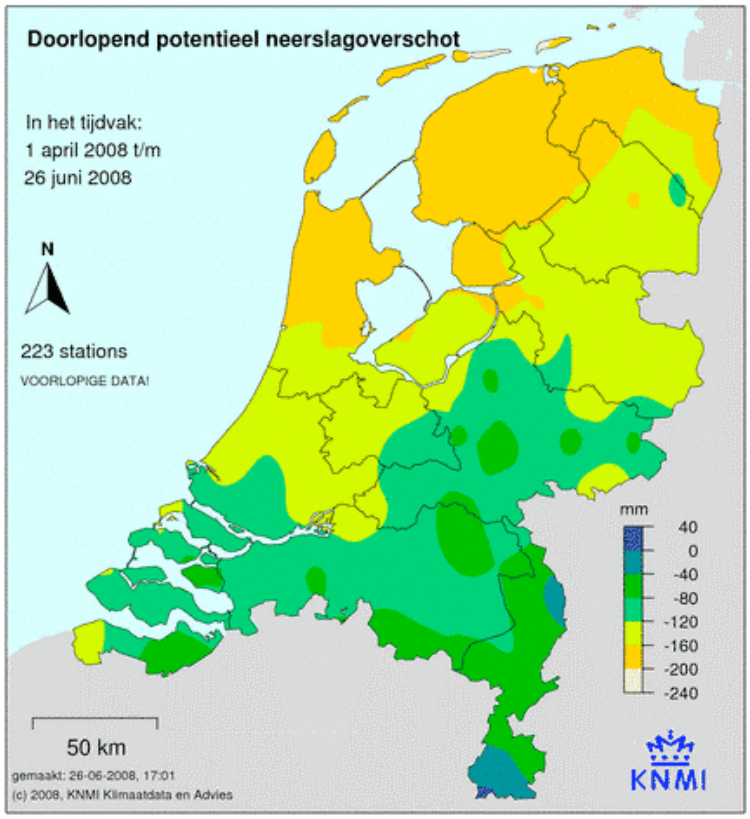
vinden voor deze veranderingen. In het artikel van Seidel et al. worden wel enkele suggesties voor de oorzaken gedaan, zoals ozonafbraak in de stratosfeer, hogere zeewatertemperaturen, veranderingen in de verticale gradient van de temperatuur in de atmosfeer door het versterkte broeikaseffect, en een toename van de hoogte van de tropopause, maar deze suggesties worden niet uitgewerkt, vooral omdat er nog maar weinig concreet onderzoek naar gedaan is. De auteurs van het artikel in het eerste nummer van *Nature Geosciences* pleiten dan ook voor verder onderzoek. Dit onderzoek zal zich ook met de vraag moeten bezighouden naar veranderingen in de afwijkingen van zonale symmetrie. Deze afwijkingen komen bijvoorbeeld tot uiting in sterke variaties in de ligging en de intensiteit van de straalstroom *als funktie van de geografische lengte*, zoals duidelijk zichtbaar in figuur 1.

Literatuur

Seidel, D.J., Qiang Fu, W.J.Randel, T,J. Reichler, 2008: Widening of the tropical belt in a changing climate. **Nature Geoscience**, **1**, 21-24.

Hoe de Sahara droog werd

Door Aarnout van Delden (IMAU) (juni 2008)
Meteorologica, 2-2008, 28-29.



Doorlopend potentieel neerslagtekort in Nederland in het voorjaar van 2008. Het noorden is extreem droog, het zuiden juist niet. Bron: KNMI.

De droogte in delen van Europa is dit voorjaar vaak in het nieuws geweest. Spanje had het in april moeilijk met de drinkwatervoorziening, vanwege een zeer droge winter en herfst. In Mei bracht overvloedige regen op het Iberisch schiereiland gelukkig soelaas, maar toen was het noorden van Europa de “klos”. Nederland beleefde een haast zomerse mei-maand. In Noord-Nederland, Zuid-Zweden, Denenmarken, Noord-Duitsland en Polen was de droogte dit voorjaar opvallend. In de noordelijke kuststreek van Nederland was het doorlopend neerslag tekort op 6 juni j.l. opgelopen tot ongeveer 150 mm.

Mijn interesse in neerslag en droogte was hierdoor gewekt, waardoor een artikel (verschenen in Science op 13 mei 2008) over de ecologische geschiedenis van Noord Africa en de grootste woestijn ter wereld, de Sahara, opviel. De 15 auteurs van dit artikel hebben onder leiding van Stefan Kröpelin, geoloog bij het Instituut voor prehistorische archaeologie van de Universiteit van Keulen, de Noord-Afrikaanse klimaatgeschiedenis van de laatste 6000 jaar uitgeplozen. De meeste informatie is afgeleid uit analyses van sedimentkernen afkomstig uit het meer van Yoa in Noord-Tsjaad. Dit meer is eigenlijk één van de laatste overblijfselen aan het aardoppervlak van de zogenaamde “Noord Afrikaanse natte periode”, maar wordt nu omringd door een krukdroge woestijn waarin een grassprietje een zeldzaamheid is. Het meer van Yoa verliest meer dan 6000 mm water per jaar door verdamping. Dit water wordt aangevuld door “fossiel” grondwater,

een overblijfsel uit de natte periode, tussen het eind van de laatste ijstijd, 15000 jaar geleden, en ongeveer 5000 jaar geleden. In die periode reikte de Noord Afrikaanse moesson (regentijd) veel verder naar het noorden en was bovendien heviger dan die nu het geval is. Algemeen wordt geaccepteerd dat de oorzaak hiervan te maken heeft met het feit dat het perihelium (het tijdstip in het jaar waarop de aarde het dichtst bij de zon gelegen is) in die periode optrad in de zomer van het noordelijk halfrond, terwijl tegelijkertijd de inclinatie van de aardas ten opzichte van de ecliptica maximaal was (9000 jaar geleden was die hoek 24,23°; nu is die hoek 23,45°). Op dit moment treedt het perihelium op in de zomer van het zuidelijk halfrond. Deze samenloop van astronomische omstandigheden had tot gevolg dat het noordelijk halfrond in de zomer ten opzichte van de huidige situatie tientallen W m^{-2} meer straling van de zon ontving. Hierdoor ontstonden in de zomer relatief intense thermische lagedrukgebieden boven de grote landmassa's waardoor bijvoorbeeld meer vochtige lucht dieper het Noord Afrikaanse continent op kwam. Talrijke moerassen, meren, graslanden en bossen bedekten de Sahara in die periode, daar waar nu slechts kale aarde te vinden is. De moesson werd verder versterkt doordat een positief terugkoppelingsmechanisme in werking trad. Tegenwoordig kaatst het bijna witte zand van de Sahara veel zonnestraling terug naar de ruimte. Hierdoor is de stralingsbalans in de zomer aan de top van de atmosfeer boven de Sahara negatief! In de natte periode, echter, zorgde de vegetatie voor een lager albedo, waardoor een groter deel van de inkomende zonnestraling werd geabsorbeerd.



Het Yoa meer in Tsjaad.

Tot nu toe dacht men, op grond van sedimentonderzoek en klimaatmodel simulaties (deMenocal et al., 2000), dat de droogte in de Sahara, 5000 jaar geleden, vrij "plotseling" (in minder dan 1000 jaar) heeft toegeslagen, mede door de "omkering" van het positieve terugkoppelingseffect tussen vegetatie en albedo. Dit gebeurde volgens modelsimulaties toen de instraling van de zon in de zomer beneden een zekere drempelwaarde kwam. Uit het onderzoek van Kröpelin et al. blijkt echter dat de overgang van een natte Sahara naar een droge Sahara heel geleidelijk is geweest, in lijn met de geleidelijke afname van de instraling van de zon in de zomer op het noordelijk halfrond. De invloed van de vegetatie op het albedo zal hierbij ook zeker een rol hebben gespeeld, maar de theorie dat het overschrijden van een "verborgen drempel" ertoe heeft geleid dat Noord Afrika binnen een periode van enkele honderden jaren van groen naar bruin is veranderd, wordt door Kröppelin et al. krachtig en overtuigend tegengesproken.

Toch is de discussie over de mogelijk snelle klimaatverandering in Noord Afrika nog niet voorbij. Een groep van negen onderzoekers, waarvan drie Nederlands, voegt in een artikel in Nature Geosciences (online gepubliceerd op 30 mei 2008) een ander

element toe, namelijk de thermohaline oceaancirculatie in de Atlantische oceaan. Paleoklimatologisch onderzoek heeft uitgewezen dat het klimaat in Noord-Afrika tijdens de koude Jonge Dryas periode tussen 12800 en 11500 jaar geleden tijdelijk droog was. De algemeen aanvaarde theorie is dat de Jonge Dryas zelf veroorzaakt is door een tijdelijke afzwakking van de golfstroom. Computer model-simulaties wijzen nu uit dat de tijdelijke afzwakking van de Noord-Afrikaans moesson tijdens de Jonge Dryas ook direct verband kan houden met deze veranderde oceaancirculatie, waarbij ook de circulatie in de equatoriale Atlantische Oceaan tijdelijke heel anders is geweest.

Literatuur

Chang, P., R. Zhang, W. Hazeleger, C. Wen, X. Wan, L. Ji, R. Haarsma, W-P. Breugem, H. Seidel, 2008: *Oceanic Link between abrupt changes in the North Atlantic Ocean and the African monsoon*. **Nature Geosciences**, Online publication: 30 May 2008.

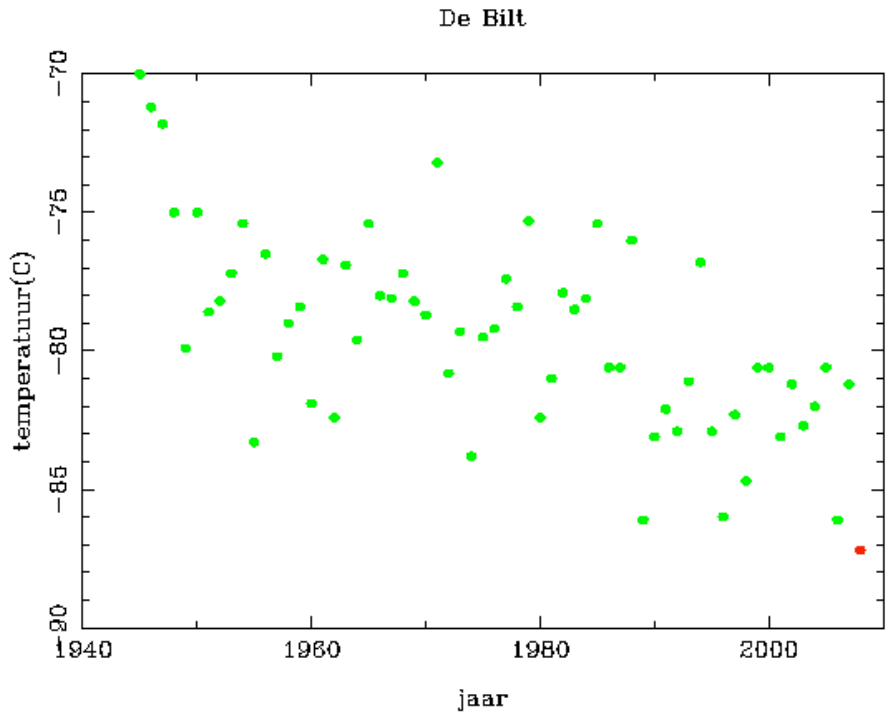
Holmes, J.A., 2008: *How the Sahara became dry*. **Science, 320**, 752-753.

Kröpelin, S., D. Verschuren, A.-M. Lezine, H. Eggermont, C. Cocquyt, P. Fancus, J.-P.Cazet, M.Fagot, B.Rumes,J.M.Russell, F. Darius, D.J. Conley, M.Shuster, H, von Suchodoletz, D.R. Enstrom, 2008: *Climate-Driven Ecosystem Succession in the Sahara: The past 6000 years.* **Science, 320**, 765-768.

deMenocal, P., J. Ortiz, T. Guilderson, J. Adkins, M. Sarnthein, L. Baker, M. Yarusinsky, 2000: *Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing*. **Quaternary Science Reviews, 19**, 347-361.

Lage temperaturen in de stratosfeer en warme Nederlandse winters

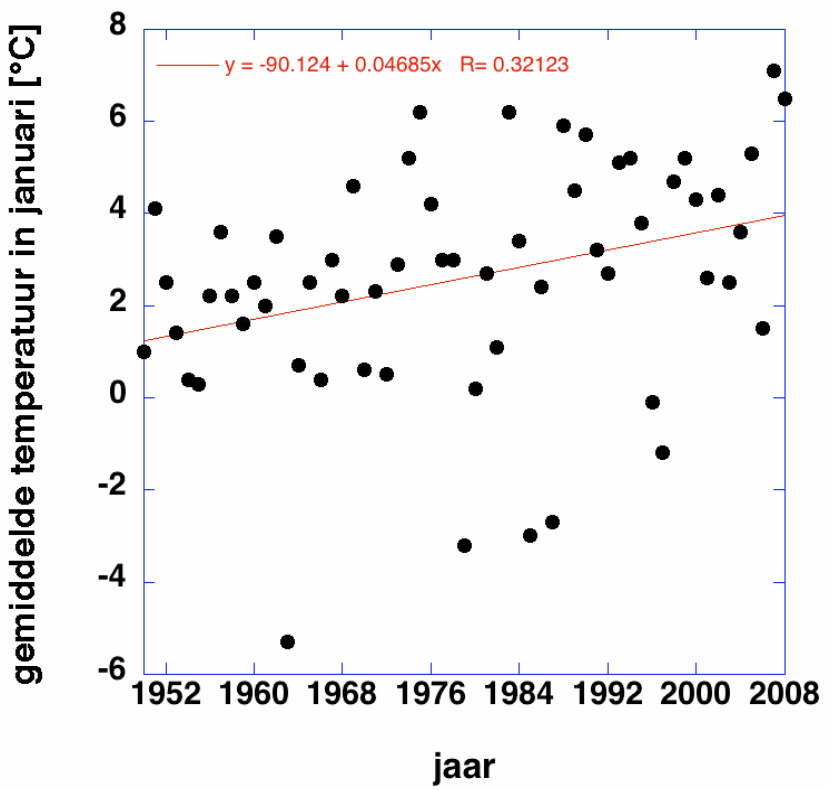
Door Aarnout van Delden (IMAU) (september 2008)
Meteorologica, 3-2008, 25-26.



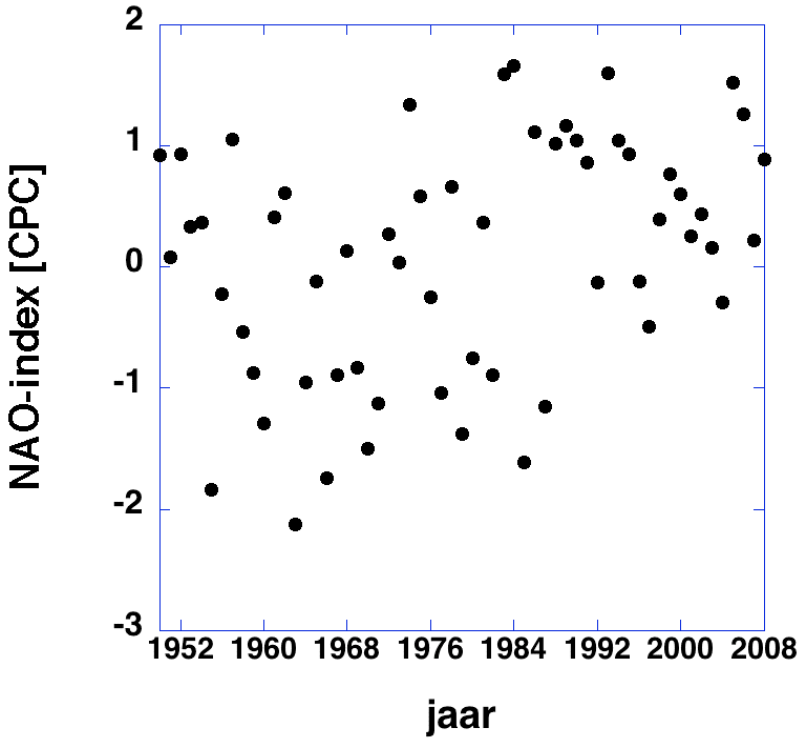
Figuur 1. Kouderecords boven De Bilt. Bron: [1].

De stratosfeer, de statisch stabiele zeer ijle luchtlaag boven een hoogte van 10 km, is over de laatste decennia afgekoeld, waarschijnlijk door afnemende ozonconcentraties en toenemende kooldioxideconcentraties. Boven De Bilt worden bijna elke winter opnieuw record lage temperaturen gemeten [1] (figuur 1). Het record ligt nu op -87,2°C, waargenomen op een hoogte van 21,5 km op 19 februari j.l. Tegelijkertijd worden de winters in Nederland steeds zachter. Vanaf 1950 is de gemiddelde januaritemperatuur op 1,5 m hoogte in De Bilt met gemiddeld 0,46°C per decade gestegen (figuur 2). Deze stijging is sterker dan op grond van het broeikaseffect valt te verwachten. Er zijn inmiddels aanwijzingen dat de oorzaak van de vele zachte winters van de laatste 20 jaar in Nederland en omgeving *deels* moet worden gezocht in de stratosfeer. Vooral Mark Baldwin en medewerkers [2-5] maken duidelijk dat de stratosfeer in de winter een meetbare invloed uitoefent op het weer nabij het aardoppervlak op gematigde breedte. Schuurmans en van Dorland hebben hierover in 2003 in Meteorologica al gerapporteerd [6].

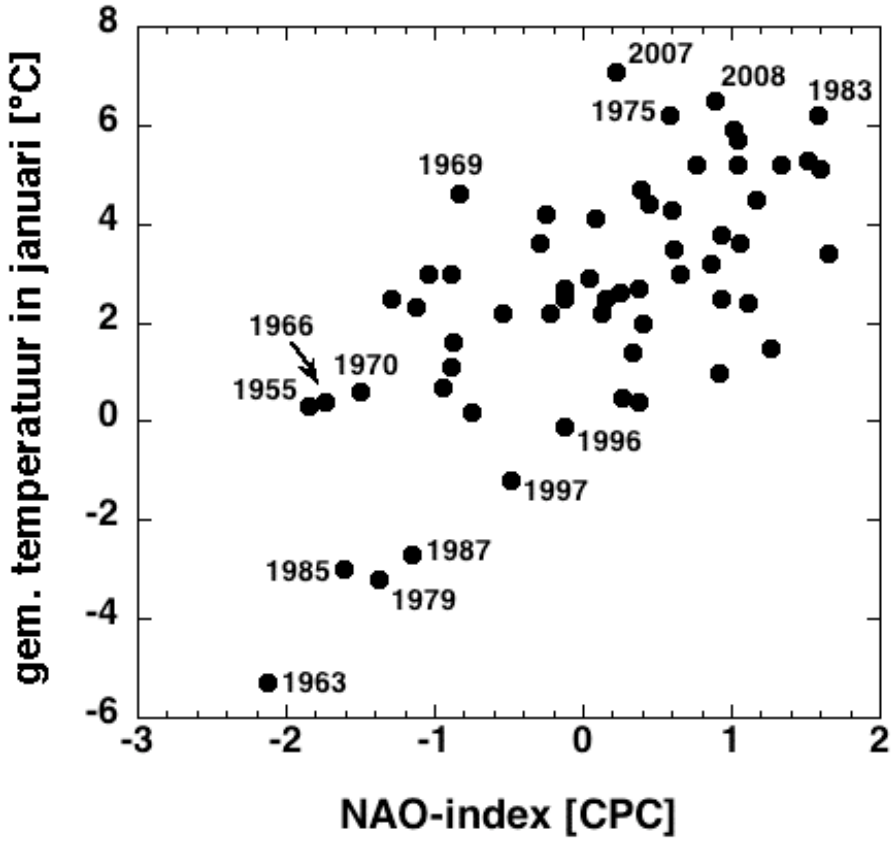
Baldwin en zijn medewerkers hebben uit waarnemingen een duidelijk statistisch verband aangetoond tussen de sterkte van de stratosferische vortex boven de pool en de NAO-index. De NAO-index is een maat voor de sterkte van de westenwinden nabij het aardoppervlak boven de Atlantische Oceaan tussen IJsland en de Azoren. De polaire stratosferische cyclonale vortex ontstaat door afkoeling van de atmosfeer in de



Figuur 2. Scatterplot van de gemiddelde temperatuur in januari op 1,5 m hoogte in De Bilt als functie van het jaar. De rechte lijn is bepaald met de kleinste kwadraten methode. Bron: http://www.knmi.nl/klimatologie/.



Figuur 3. Scatterplot van de gemiddelde waarde van de NAO-index in januari volgens de Climate Prediction Center (CPC) als functie van het jaar. Bron NAO-index: http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/nao_index.html.



Figuur 4. Scatterplot waarmee het verband tussen de NAO-index en de gemiddelde januari temperatuur in De Bilt wordt aangetoond. Het verband tussen NAO en temperatuur voor de extreem koude maanden (1963, 1979, 1985, 1987, 1996 en 1997) lijkt systematisch anders dan het verband voor de andere maanden. Dit heeft zeer waarschijnlijk te maken met het verloop van de winter (bijvoorbeeld de aanwezigheid van een sneeuwdek) in de voorgaande maanden in de omgeving van Nederland.

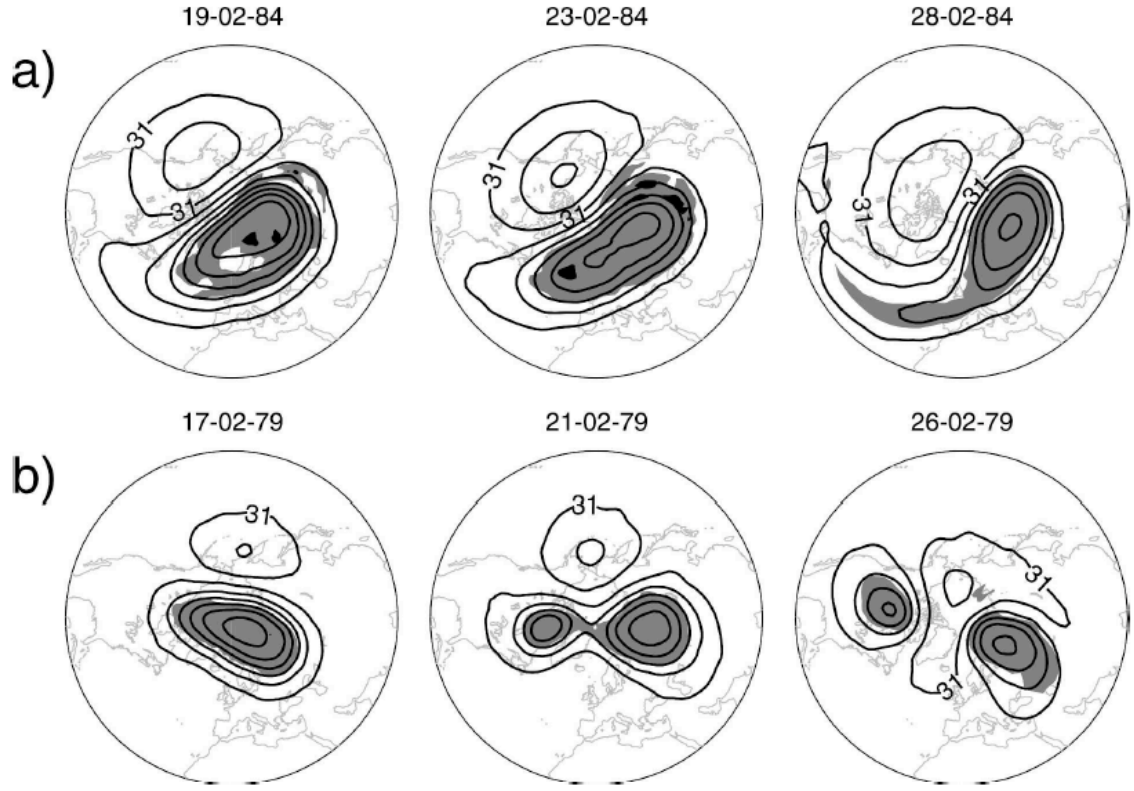
polaire nacht. Het blijkt dat een sterke en koude (zwakke en relatief minder koude) stratosferische polaire vortex gepaard gaat met een positieve (negatieve) NAO index. Bij een hoge NAO-index zijn de depressies in dit gebied sterker.

We kunnen dus stellen dat lagere temperaturen boven de pool in de stratosfeer gepaard gaan met een hogere NAO-index en daarmee diepere depressies op de Atlantische oceaan, waardoor een gemiddeld sterkere aanvoer van zachte maritieme lucht in west Europa in stand wordt gehouden en daarmee minder koude winters. Figuren 2 en 3 laten zien dat zowel de temperatuur nabij het aardoppervlak als de waarde van de NAO-index zijn gestegen, hoewel we erbij moeten zeggen dat de interjaarlijkse variabiliteit van de NAO-idex heel groot is. Figuur 4 laat zien dat de NAO-index en de temperatuur aan het aardoppervlak in De Bilt in de maand januari heel duidelijk positief gecorreleerd zijn. Thompson et al. [3] laten zien dat lage wintertemperaturen aan het aardoppervlak in west Europa relatief vaak gepaard gaan met een zwakke stratosferische polaire vortex.

De NAO-index stijgt sinds begin deze eeuw niet meer, ondanks de Biltse kouderecords en ondanks de verdere stijging van de kooldioxideconcentraties, terwijl de ozonlaag zich nog niet hersteld. Dit blijkt samen te hangen met een toename, vanaf 1999, van de frekwentie van zogenaamde “sudden stratospheric warmings” (SSW’s). Een SSW is

wellicht het meest spektaculaire meteorologische fenomeen in de winter-stratosfeer. SSW's ontstaan als gevolg van het "breken" van grootschalige golven die vanaf het aardoppervlak de stratosfeer indringen. Dit process lijkt op het breken van een zeegolf nabij het strand. Tijdens een SSW stijgt de temperatuur in een groot gedeelte van de Arctische stratosfeer binnen één of twee dagen met enkele tientallen graden. De stratosfeer na een SSW herstelt niet snel. Het duurt vaak minstens één maand voordat de "normale" lage temperaturen die voor de SSW heersten weer worden waargenomen (dit is vooral het geval bij SSW's waarbij vortex splitsing optreedt, waarover later meer). Stralingsafkoeling moet dit bewerkstelligen en dit process werkt traag in de stratosfeer.

SSW's zijn vrij zeldzaam. Uit een recente studie van Charlton en Polvani [7], waarbij uit de ERA-40 heranalyse [8] een SSW-klimatologie (voor de jaren tussen 1957 en 2002) is geconstrueerd, blijkt dat de frekwentie van het voorkomen van een sterke SSW zeer variabel is. De maximale sterkte die de polaire vortex bereikt in de winter hangt mede af van het al of niet optreden van een SSW in de eerste helft van de winter. Gemiddeld komen sterke SSW's in november, december of januari slechts eens in de twee jaar voor, maar vanaf de winter van 1988-1989 tot aan de winter van 1997-1998 was er geen enkele sterke SSW in deze maanden! De afwezigheid van SSW's in de jaren 90 kan de gemiddeld lage polaire stratosferische temperaturen in



Figuur 5. Een SSW van het type "vortexverplaatsing" (a) (februari 1984) en een SSW van het type "vortexsplitsing" (b) (februari 1979). De contouren corresponderen met de geopotentiaal op 10 hPa (label in km; contourinterval: 0.4 km). Gebieden waar de potentiële vorticiteit boven een bepaalde kritische waarde uitkomt worden donker weergegeven. De meeste SSW's komen voor in februari. Bron: Charlton en Polvani, 2007 [7].

deze periode dus ook verklaren. Dit was tevens de periode waarin de NAO-index in de winter hoger was dan gemiddeld en ook de periode waarin de winters in Nederland relatief zeer zacht waren (afgezien van die van 1996 en 1997). Het lijkt erop dat het al of niet voorkomen van sterke SSW's in het begin of in het midden van de winter een grote invloed heeft op de NAO-index in de rest van de winter (omdat zoals gezegd de gevolgen van de SSW vaak minstens een maand aanhouden), en daardoor ook op de wintertemperatuur in Nederland.

De zaak ligt eigenlijk nog ingewikkelder. Charlton en Polvani [6] laten namelijk zien dat er twee soorten SSW's zijn (figuur 5): de SSW die samenhangt met een verplaatsing van de vortex van de pool naar lagere breedte en de SSW die samenhangt met een splitsing van de vortex in twee aparte stukken. De laatste type SSW beïnvloedt de stratosferische temperatuur in het arctische gebied op grotere schaal en langduriger dan de eerste soort, waarbij de vortex nauwelijks in kracht afneemt en zich binnen pakweg een week weer op de oorspronkelijke positie boven de pool bevindt. De record lage stratosferische temperaturen die in 2008 boven De Bilt op, respectievelijk, 22 januari en 19 februari zijn waargenomen waren te wijten aan een verplaatsing van de koude polaire vortex richting west Europa waarbij aan de rand van de vortex (dichtbij de Noord Pool) tegelijkertijd een sterke temperatuurstijging optrad. Overigens zouden de SSW's van januari en februari j.l. niet aan de criteria voor een "sterke SSW" van Charlton en Polvani voldoen.

SSW's waarbij vortex splitsing optreedt zijn relatief zeldzaam. Van de 18 intense SSW's die op het noordelijk halfrond tussen 1957 en 2002 in de maanden november, december en januari zijn voorgekomen, gingen 8 gepaard met een splitsing van de vortex. Boven het zuidelijk halfrond is er nog maar één SSW van dit type waargenomen, namelijk in September 2002. Dit geval trok grote belangstelling. Het maartnummer van het jaar 2005 van Journal of the Atmospheric Sciences is hieraan gewijd. Ook op de "SPARC-meeting" in Bologna [9] in de eerste week van september j.l. waren SSW's onderwerp van grote belangstelling.

Literatuur

[1] http://www.knmi.nl/VinkCMS/news_detail.jsp?id=40635 .
[2] Baldwin, M.P., and T.J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. **Science, 294**, 581-584.
[3] Thompson, D.W.J., M.P. Baldwin, and J.M. Wallace, 2002: Stratospheric connection to northern hemisphere wintertime weather: implications for prediction**, J. Climate, 15**, 1421-1428.
[4] Baldwin, M.P., D.B. Stephenson, D.W.J. Thompson, T.J. Dunkerton, A.J. Charlton, A. O'Neill, 2003: Stratospheric memory and extended-range weather forecasts, **Science, 301**, 636-640.
[5] Baldwin, M.P., M. Dameris, and T.G. Shepherd, 2007: How Will The Stratosphere Affect Climate Change? **Science, 316**, 1576-1577.
[6] Schuurmans, C, en R. van Dorland, 2003: Voorboden uit de stratosfeer. **Meteorologica**, 1-2003, 25-29.
[7] Charlton, A.J., and L.M. Polvani, 2007: A new look at stratospheric warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks. **J.Climate, 20**, 449-469.
[8] http://www.ecmwf.int/research/era/do/get/era-40
[9] http://www.atmosp.physics.utoronto.ca/SPARC/

Toename helderheid lucht nabij aardoppervlak in Europa

Aarnout van Delden (IMAU) (maart 2009)
Meteorologica, 1-2009



Fire Island National Seashore aan de zuidkant van Long Island (New York) staat bekend om zijn heldere luchten
(bron: http://www.nps.gov/fiis/naturescience/images)

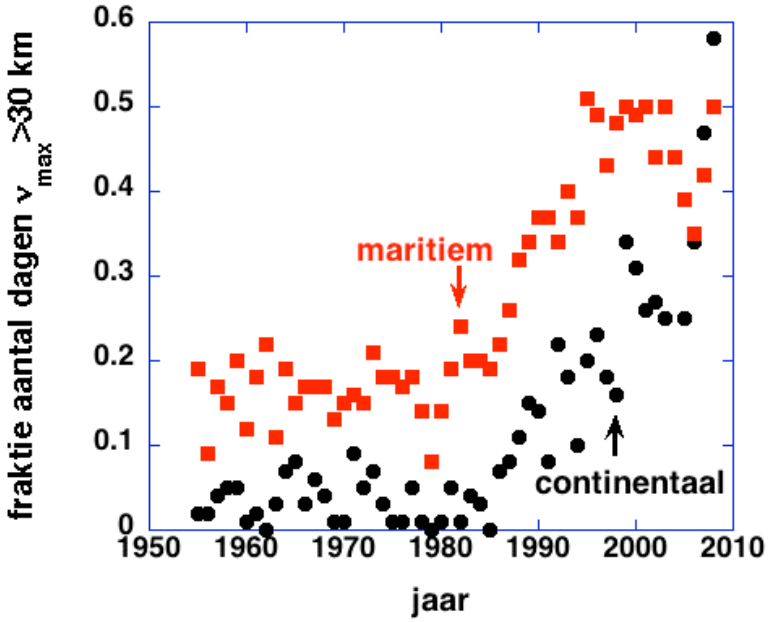
In het vorige nummer van Meteorologica werd door Jacobs et al. (2008) een interessant heet hangijzer in het huidige klimaat onderzoek aangeroerd, namelijk het thema dat bekend staat onder de titel "global brightening". Tot voor een paar jaar geleden was, gek genoeg, de term "global dimming" meer in zwang. Waarom deze omslag?

Halverwege de jaren 80 van de vorige eeuw ontdekte de stralingsdeskundige, Atsumu Ohmura, dat de intensiteit van de op de aarde vallende zonnestraling (dikwijls aangeduid met de term "globale straling") met 10% was afgenomen in de voorgaande 30 jaar. De toegenomen belasting van de atmosfeer met aerosolen, door verbranding van bijvoorbeeld zwavelhoudende fossiele brandstoffen zoals bruinkool en steenkool was hiervan waarschijnlijk de oorzaak. Maar sinds het eind van de jaren 80 is er juist sprake van een toename van de globale straling en spreekt men dus niet meer van "global dimming" maar van (global) "brightening" (Wild et al., 2005). De term "global" staat in tweede instantie tussen haakjes omdat het laatst genoemde verschijnsel niet zo "globaal" is. In grote delen van de tropen is er nog steeds sprake van "dimming". In Europa is er

wel degelijk sprake van een spektaculaire toename van de helderheid van de lucht. Twee Franse onderzoekers en één Nederlandse onderzoeker tonen dit aan in een artikel dat in februari 2009 is verschenen in *Nature Geoscience*.

Dit artikel (Vautard et al., 2009) gaat over de afname in Europa van het aantal dagen met mist (zicht minder dan 1 km) en het aantal heiige en nevelige dagen (zicht minder dan 5 km). Het aantal dagen per jaar waarop het zicht op enig tijdstip minder is dan 5 km is in heel Europa, en vooral in centraal Europa, vanaf 1980 flink gedaald, namelijk gemiddeld van bijna 60 dagen per jaar in 1978 tot net onder de 40 per jaar in 2006 . Dit verloop blijkt sterk te correleren met de uitstoot van zwavel dioxide (SO_2). De auteurs schatten, op basis van 4 maal dagelijkse zichtmetingen op 342 weerstations verspreid over heel Europa, dat de afgenomen mistigheid van de lucht 10-50% van de waargenomen opwarming nabij het aardoppervlak overdag kan verklaren.

Informatie over de nauwkeurigheid van de gebruikte zichtmetingen is in het artikel nauwelijks te vinden. Daarvoor moet op internet de "supplementary information" worden geraadpleegd. Hieruit blijkt dat er voor de meeste stations weinig bekend is over de meetmethode waarmee het zicht is bepaald. Daardoor is er over de homogeneniteit van de meetreeksen niet veel te zeggen. Het zicht is de afstand waarop een zwart voorwerp van voldoende grootte tegen een heldere horizon nog net te zien en herkennen is, indien dit voorwerp wordt verlicht tot daglichtsterkte. Zichtwaarden groter dan 3 km worden over het algemeen nog met het blote oog gedaan door te kijken naar hoge objekten, zoals torens, bomen, flatgebouwen of elektriciteitsmasten, waarvan de afstand bekend is. Zichtwaarden kleiner dan 3 km worden, vooral op vliegvelden, gemeten met transmissometers, die vanaf 1965 zijn geintroduceerd, maar elders ook nog tot de dag van vandaag gewoon met het oog geschat.



Fraktie van het aantal dagen per jaar met een maximaal zicht groter dan 30 km in De Bilt bij, respektievelijk, aanvoer van continentale lucht (overheersende windrichting tussen oost en zuid via zuidoost) (zwarte rondjes) en aanvoer van maritieme lucht (overheersende windrichting tussen zuid en oost via west) (rode vierkantjes).
Bron gegevens: http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/download.html).



Strooilichtmeter bij een heldere lucht op het meetveld van het KNMI in De Bilt. Bron: http://www.keesfloor.nl/wolken/zicht.htm.

Het KNMI heeft begin 2009 alle oude daggegevens van het weer in Nederland voor iedereen op internet beschikbaar gesteld. In de uitleg bij de bestanden wordt slechts het volgende gezegd over het meten van zicht: "...zicht wordt op bemande stations uurlijks visueel waargenomen door herkenning van markante punten in de omgeving van een meetstation, waarvan de afstand tot de waarnemer bekend is. Op automatische stations worden hiervoor zichtmeters gebruikt". Meer details over het meten van zicht worden gegeven in hoofdstuk 9 van het handboek waarnemingen van het KNMI (http://www.knmi.nl/samenw/hawa/). Volgens één van de specialisten op dit gebied bij het KNMI, Jitske van der Meulen, wijken bij slecht zicht (zicht hooguit enkele honderden meters) de zichtwaarnemingen met behulp instrumenten het meest af van de zichtwaarnemingen met het oog.

Vautard et al. hebben zich niet afgevraagd of het aantal dagen met zeer goed zicht is toegenomen in de laatste decaden. Daarom de volgende kleine toevoeging. In het bestand met de etmaalgegevens van De Bilt wordt het maximale zicht, ν_{max}, per dag weergegeven. Voor De Bilt is deze grootheid bekend vanaf 1 januari 1955 tot vandaag. Een eerste indruk van het verband tussen goed zicht en de herkomst van de lucht kan worden verkregen door de dagen met goed zicht te verdelen in een groep van dagen met een overheersende windrichting tussen 90°(oost) en 180°(zuid) (continentale lucht) en een groep van dagen met een overheersende windrichting *niet* tussen 90° en 180° (maritieme lucht).

De grafiek laat zien dat dagen met zeer heldere momenten in maritieme lucht frequenter zijn dan in continentale lucht, iets dat niet geheel voor de hand ligt omdat het, in het algemeen, droger en zonniger is bij luchtaanvoer vanuit het continent. De jaren 1962, 1979 en 1985 waren in De Bilt zelfs geheel verstoken van dagen waarop ν_{max}>30 km bij aanvoer vanuit het oosten tot zuiden via zuidoost! Gemiddeld is het aantal dagen per jaar met een overheersende wind uit richtingen tussen oost en zuid via zuidoost ongeveer 65. In dit getal zit sinds 1955 geen noemenswaardige verloop.



Heiigheid bestaat vooral nog in "derde-wereld" landen zoals Egypte. Hier een beeld van heiigheid in Cairo. Bron: http://www.keesfloor.nl/wolken/zicht.htm.

We zien ook dat de frequentie van het aantal dagen met ν_{max}>30km vanaf ongeveer 1987 sterk is gestegen, zowel voor de maritieme lucht als voor de continentale lucht. Opmerkelijk is dat we wellicht ook kunnen concluderen de helderheid van maritieme lucht in de huidige eeuw nauwelijk meer toeneemt, terwijl de helderheid van continentale lucht nog steeds toeneemt. Vorig jaar was de frequentie van het aantal dagen met zeer goed zicht bij luchtaanvoer vanaf het continent zelfs iets groter dan bij luchtaanvoer vanaf zee, namelijk 58% (!) tegen 50%. Dit wijst erop dat het maximale positieve effect van maatregelen op het Europese continent om de uitstoot te beperken van aerosolen, die de transmissie van zonlicht beïnvloeden, wellicht nog niet is bereikt.

Literatuur

Robert Vautard, Pascal Yiou and Geert Jan van Oldenborgh, 2009: Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. **Nature Geoscience, 2**, 115-119.
Jacobs, A., Heusinkveld, B. en Holtslag, B., 2008: 80 jaar waarnemingen van zonnestraling te Wageningen. **Meteorologica, 4**-2008, 4-7.
Wild, M. et al., 2005: From dimming to brightening: decadal changes in Solar radiation reaching Earth's surface. **Science, 308**, 847-850.

Fouten in de representatie van straling in klimaatmodellen

Aarnout van Delden (IMAU) (juni 2009)
Meteorologica, 2-2009



Figuur 1. Het Arctische landschap 55 miljoen jaar geleden?

Klimaatmodellen zijn vrij goed in staat om de waargenomen temperatuurverdeling in de atmosfeer te reproduceren. Dit lijkt een grote verdienste, maar is het eigenlijk niet. Vooral de stralingsschema's in deze modellen zijn in hoge mate geijkt aan de hand van de waargenomen temperatuurverdeling. Klimaatmodellen zijn in staat het waargenomen temperatuurverloop nabij het aardoppervlak over de laatste eeuw vrij nauwkeurig te reproduceren. De relatief lage wereldgemiddelde temperatuur in de jaren 50 en 60 van de vorige eeuw kan daarmee verklaard worden als een effect van toegenomen reflectie van zonnestraling door een vuilere atmosfeer. Sinds de jaren 70 is de atmosfeer op veel plaatsen geleidelijk schoner geworden, waardoor meer zonnestraling het aardoppervlak bereikt. De temperatuurstijging nabij het aardoppervlak, die daar mede het gevolg van is, wordt goed berekend door de klimaatmodellen.

Het vertrouwen in klimaatmodellen is groot. Daarom is in de afgelopen 10 jaar de behoefte ontstaan om deze modellen te gebruiken voor studies naar het klimaat uit het verre verleden (Heinemann, 2009). Er is een grote interesse in het extreme broeikasklimaat van het zogenaamde PETM ("Paleoceen-Eoceen temperatuursmaximum") (55 tot 56 miljoen jaar geleden). De samenstelling van de atmosfeer was toen heel anders dan nu. Kooldioxide concentraties in die tijd worden door

Pearson en Palmer (2000) geschat op ongeveer 3000 ppm (parts per million) (de huidige concentratie is bijna 400 ppm) (zie ook Zachos et al., 2008). Boven de noordpool en omgeving heerste in die tijd een bijna subtropisch klimaat. Geologen hebben geconcludeerd dat de jaargemiddelde temperatuur rond de Noord Pool boven de 20°C moet hebben gelegen. Binnen de poolcirkel op het noordelijk halfrond groeide loofbos (figuur 1). Tegelijkertijd was het bij de evenaar maar ietsjes warmer dan nu. Het temperatuurverschil tussen de noordpool en de tropen was daarom veel kleiner dan nu het geval is. Wetenschappers tasten nog steeds in het duister bij het zoeken naar de verklaring hiervoor (Abbota en Tziperman, 2008). De klimaatmodellen kunnen het geringe temperatuurcontrast niet reproduceren, ook al wordt de CO_2 concentratie in het model vertienvoudigd t.o.v. de huidige waarde.

Met dit soort experimenten worden de modellen echter flink op de proef gesteld. Het is de vraag of klimaatmodellen de extreme toestand van het PETM aan kunnen. Een recente studie van Goldblatt, Lenton en Watson (2009) laat zien dat dit waarschijnlijk niet het geval is omdat de stralingscodes in deze modellen grote fouten bevatten als ze worden toegepast op situaties waarbij de samenstelling van de atmosfeer heel anders is dan de samenstelling waarop ze geijkt zijn. Absorptie en emissie van straling door zogenaamde "broeikasgassen" in de atmosfeer, zoals waterdamp, kooldioxide en wolken, is sterk afhankelijk van de golflengte van de straling. Broeikasgassen emiteren en absorberen straling in soms zeer kleine golflengte-intervallen (figuur 2). Voor een nauwkeurige berekening van de absorptie en emissie van straling in de atmosfeer is het nodig om het spectrum op te splitsen in minstens 1000 intervallen. Dit leidt tot een zeer rekenintensieve code. De snelste computers zijn niet snel genoeg om deze code toe te passen in een klimaatmodel. Daarom heeft men voor toepassing in klimaatmodellen sterk versimpelde stralingscodes ontwikkeld, waarbij het langgolvige spectrum slechts in hooguit 10 zogenaamde absorptiebanden wordt onderverdeeld. Voor elke band wordt een interval-gemiddelde van een experimenteel bepaalde golflengte afhankelijke absorptie coefficient gebruikt. Deze absorptiecoefficienten zijn echter niet alleen een functie van de golflengte van de straling maar ook een functie van de temperatuur en de druk. De vraag is of de gebruikte waarden van de absorptie coefficienten wel van toepassing zijn op de omstandigheden van het PETM. Voor wie meer wil weten over dit onderwerp, is het aanstaande boek van Raymond Pierrehumbert zeer aan te raden. Een eerste bijna complete versie van dit boek is via de website van de auteur te downloaden (zie de referentielijst).



Figuur 2. Het zichtbare deel van het zonnespectrum. Rood licht heeft een grotere golflengte dan blauw licht. De zwarte lijnen zijn zogenaamde absorptielijnen.

Goldblatt et al., (2009) hebben de 9-bandige langgolvige stralingsmodule van het Hadley Centre (UK Met. Office) klimaat model vergeleken met het meest nauwkeurige stralingsmodel, waarin alle mogelijke spectrale "absorptielijnen" van zoveel mogelijk broeikasgassen worden opgelost. De CO_2-concentratie is opgeschroefd tot ver boven de huidige concentraties. Tot een concentratie van 1000 ppm doet het klimaat model het schijnbaar goed. Echter, dit is slechts schijn, want een nadere bestudering van het stralingsbudget laat zien dat de fouten in, repektievelijk, de opwaartse en neerwaartse stralingsfluxen relatief groot zijn en elkaar bovendien gedeeltelijk compenseren, waardoor het eindresultaat op het eerste gezicht nog niet zo slecht lijkt. Vooral nabij het

aardoppervlak wordt de stralingsenergie in het Hadley Centre klimaatmodel bij hogere CO_2-concentraties slecht gerepresenteerd, waardoor de verandering in de intensiteit van convectie bij een toename van de CO_2-concentratie het verkeerde teken heeft. CO_2-concentraties van 1000 ppm in het jaar 2100 zijn niet ondenkbaar. Er is dus nog heel veel werk aan de winkel voordat klimaatmodellen betrouwbare verwachtingen kunnen leveren voor het klimaat van de komende eeuw.

Lenton en Watson hebben een speciale positie in de klimaatwetenschap. Beiden worden geassocieerd met "Daisyworld", een didactisch model van een wereld waarin de biosphere (het leven) het klimaat voor een belangrijk deel reguleert. Andrew Watson en James Lovelock hebben dit model in 1982 ontworpen om de zogenaamde "Gaia-hypothese" kracht bij te zetten. Timothy Lenton, die vele publicaties over Daisyworld op zijn naam heeft, heeft onlangs een overzichtsartikel over "Daisyworld" gepubliceerd in Reviews of Geophysics (Wood et al., 2008).

Literatuur

Abbota, D. S. and E. Tziperman, 2008: A high-latitude convective cloud feedback and equable climates. **Q.J.R.Meteorol.Soc**., **134**, 165–185.

Goldblatt, C., T.M. Lenton and A.J. Watson, 2009: An evaluation of the long-wave radiative transfer code used in the Met Office Unified Model. **Q.J.R.Meteorol.Soc., 135**, 619-633.

Heinemann, M., J. H. Jungclaus, and J. Marotzke, 2009: Warm Paleocene/Eocene climate as simulated in ECHAM5/MPI-OM. **Clim. Past Discuss**., **5**, 1297–1336.

Pearson, P.N., and M.R. Palmer, 2000: Atmospheric carbon dioxide concentrations over the past 60 million years. **Nature, 406**, 695-699.

Pierrehumbert, R.T., 2009: **Principles of Planetary Climate**. Nog niet gepubliceerd. Te downloaden vanaf de website van de auteur: http://geosci.uchicago.edu/~rtp1/.

Wood, A.J., G.J. Ackland, J.G. Dyke, H.T.P.Williams en T.M. Lenton, 2008: Daisyworld: a review. **Rev.Geophys**., **46**, RG1001, 1-23.

Zachos, J.C., G.R. Dickens and R.E. Zeebe, 2008: An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. **Nature, 451**, 279-283.

Wolken zijn een belangrijke en onzekere factor in klimaatverandering

Aarnout van Delden (IMAU) (september 2009)
Meteorologica, 3-2009

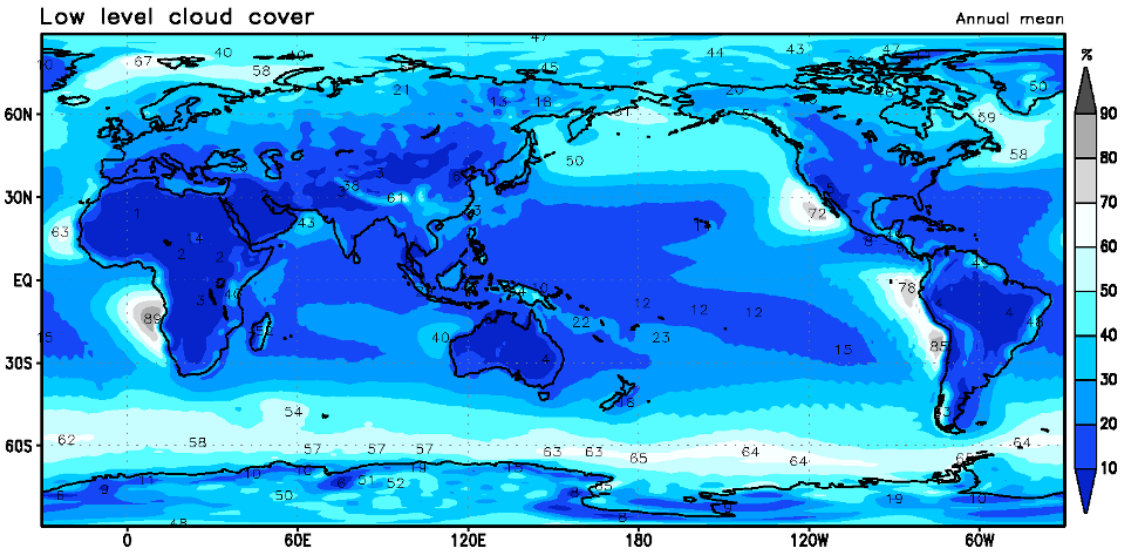


Figuur 1. Stratocumulus wolken bij de kust. Door de gaten in het wolkendek dringt zonnestraling door tot het aardoppervlak (meestal het zeeoppervlak). Is dit voldoende om een positieve klimaat"feedback" in gang te zetten?
Bron foto: http://arnolds.dhs.org/image_archive/clouds_and_weather.

Omdat het modelleren van wolken erg lastig is en omdat wolken een zeer complexe interactie hebben met straling, zijn wolken de meest onzekere factor bij het maken van klimaatvooruitzichten. De onderzoekers, Amy Clement en Robert Brugman van de Universiteit van Miami en Joel Norris van de Universiteit van Californië in San Diego hebben deze onzekerheid onderzocht. Hun conclusies zijn op 24 juli 2009 in een Science-artikel gepubliceerd (1).

Het is al lang bekend dat lage wolken in theorie een koelend effect hebben op het klimaat. Volgens Clement en haar collega's is dit nu voor het eerst bewezen. Alle wolken reflecteren zonnestraling, maar speciaal lage wolken, met hun relatief warme toppen, zijn bovendien effectieve stralers in het infrarood, waardoor deze wolken relatief veel warmte verliezen aan de ruimte en vanaf de top sterk afkoelen. Dit afkoelen houdt de wolkenlaag bovendien juist in stand.

De auteurs hebben een lange reeks van waarnemingen van wolken en straling in de Stille Oceaan tussen Mexico en Hawaii bestudeerd. Uit deze studie blijkt dat lage wolken, zoals stratocumuluswolken (figuur 1), die in dit gebied veel voorkomen, zijn geassocieerd met een zogenaamde "positieve terugkoppeling" in het klimaatsysteem.



Figuur 2. Jaargemiddelde verdeling van de bedekkingsgraad (%) van lage (grenslaag)wolken tussen 1979 en 2004 volgens de Japanse "reanalysis".
Bron: http://jra.kishou.go.jp/JRA-25/index_en.html

In de subtropen bevinden zich, vooral aan de oostkant van de oceaanen (figuur 2), waar de temperatuur van het zeeoppervlak door opwellend water relatief laag is, omvangrijke gebieden met stratocumulus bewolking met een jaargemiddelde bedekkingsgraad die groter is dan 70%. De temperatuur van het zeewater kan in deze gebieden, door veranderingen in de oceaanstromingen, relatief grote schommelingen ondergaan. Een stijgende zeewater temperatuur leidt meteen tot een warmere atmosferische grenslaag, waardoor de stratocumulus bewolking gedeeltelijk of geheel oplost. Hierdoor bereikt meer zonnestraling het zeeoppervlak, waardoor de temperatuur van het zeewater verder stijgt. Dit leidt dan weer tot het verder verdwijnen van de wolken. Dit proces representeert een positieve terugkoppeling in het klimaatsysteeem. Maar de vraag is, of de extra zonnestraling die door de gaten in de bewolking het zeeoppervlak bereikt het zeewater voldoende opwarmt om de positieve terugkoppeling mogelijk te maken. Uit satellietwaarnemingen blijkt nu dat deze extra zonnestraling inderdaad verantwoordelijk is voor het grootste deel van de opwarming van de oceaan. De positieve terugkoppeling is "echt", concluderen de auteurs.

Clement et al. hebben daarna gekeken of de klimaatmodellen, die zijn gebruikt bij het opstellen van het vierde IPCC-rapport uit 2007 (2), alle elementen van deze positieve terugkoppeling boven de Stille Oceaan reproduceren. Zij komen tot de vrij schokkende conclusie dat dit slechts bij 2 van de 18 modellen het geval is. Het Engelse klimaatmodel "HadGEM1" van de UK Met-Office (3) blijkt het beste te presteren, maar tegelijkertijd blijkt dit model ook het meest gevoelig te zijn voor een toename in de kooldioxideconcentraties. Een verdubbeling van de kooldioxideconcentratie in het model leidt tot een toename met 4,4°C van de wereldgemiddelde temperatuur. Bij de andere modellen is dit gemiddeld 3,1°C. Het enige andere model dat een redelijk goede relatie tussen wolken en meteorologie produceert, is het model van het Instituut voor Numerieke Wiskunde van de Russische Akademie voor Wetenschappen. De Amerikaanse klimaatdeskundige,

David Randall, zegt het volgende hierover. "IPCC assumes that all models are created equal. I think we have to get away from that" (4).

Literatuur

(1) Clement, A.C., 2009: Observational and model evidence for positive low-level cloud feedback. **Science, 325**, 460-464.

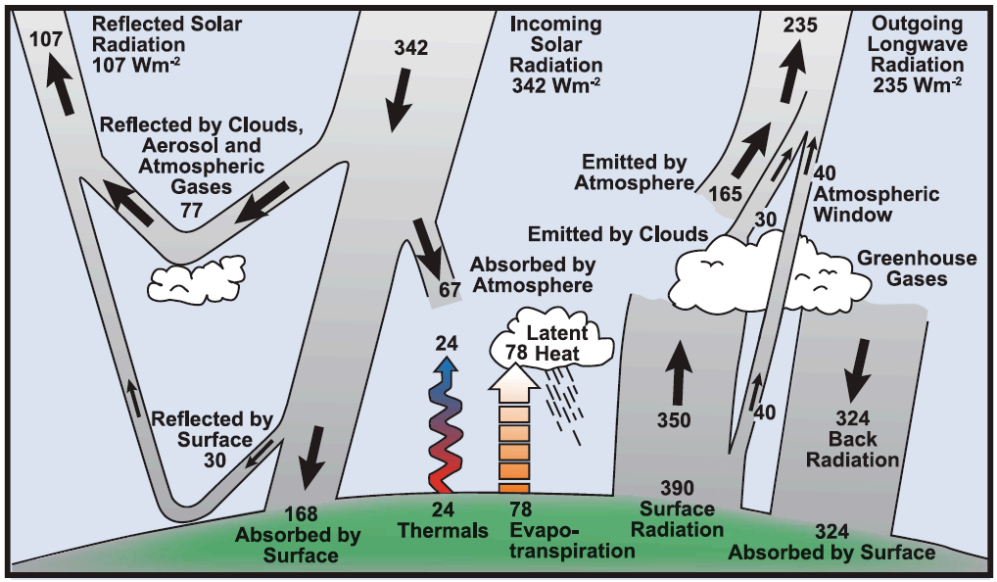
(2) http://www.ipcc-data.org/ar4/gcm_data.html

(3) http://www.metoffice.gov.uk/climatechange/science/hadleycentre/

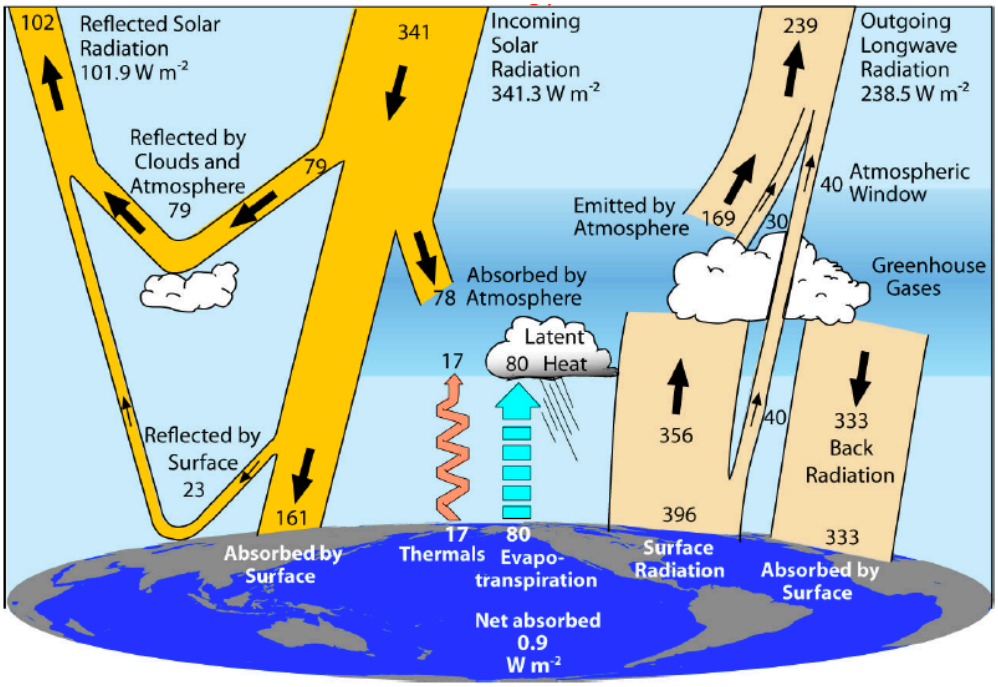
(4) Kerr, R.A., 2009: Clouds appear to be big, bad player in global warming. **Science, 325**, 376.

Hoe goed bekend is de sterkte van het broeikaseffect?

Aarnout van Delden (IMAU) (december 2009)
Meteorologica, 4-2009



Figuur 1. Het globaal gemiddeld energiebudget voor de periode 1985-1989, volgens Kiehl en Trenberth (1997). Eenheid: Watt per vierkante meter.



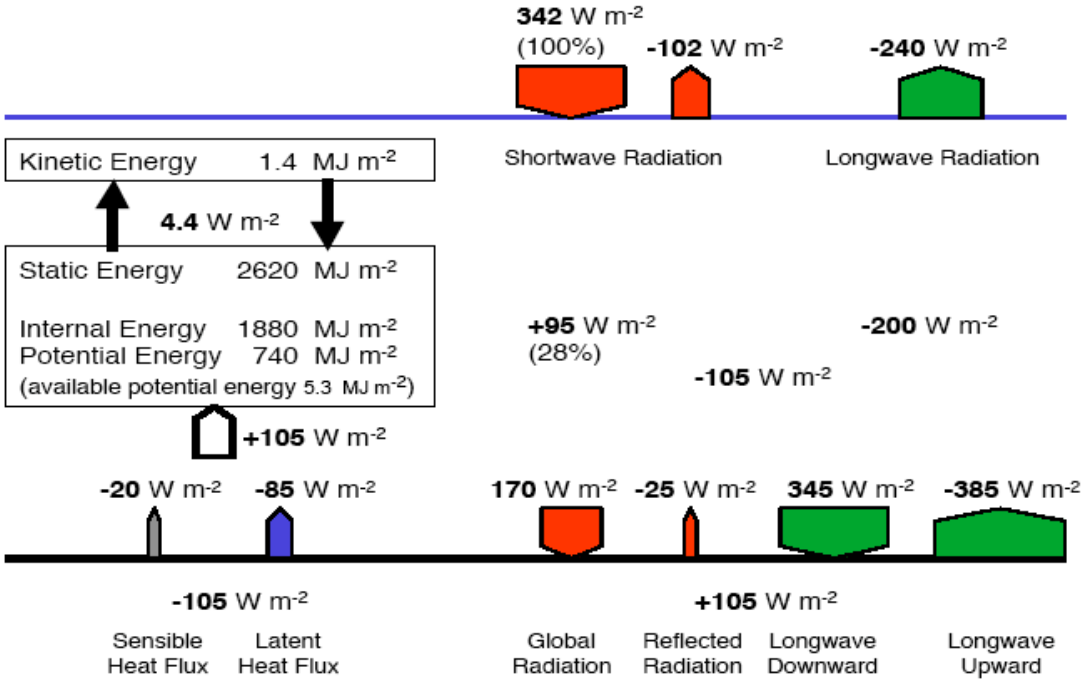
Figuur 2. Het globaal gemiddeld energiebudget voor de periode 2000-2004, volgens Trenberth, Fasullo en Kiehl (2009). Eenheid: Watt per vierkante meter.

De energiebalans van de aarde is al meer dan een eeuw intensief onderwerp van studie. Relatief nauwkeurige schattingen van globaal gemiddelde energiefluxen kwamen echter pas na 1960 ter beschikking, toen satellieten met stralingssensoren in de ruimte werden gebracht. De eerste redelijk succesvolle satellietmissie, met als doel het meten van globaal gemiddelde stralingsfluxen aan de top van de atmosfeer, vond plaats tussen 1985 en 1989. Deze missie staat bekend als het *Earth Radiation Budget Experiment* (*ERBE*). Kiehl en Trenberth (1997) hebben de de waarnemingen van *ERBE* gebruikt voor een ijking van het globaal gemiddelde energiebudget, waarbij een nauwkeurig stralingsmodel is gebruikt om de niet gemeten fluxen door de atmosfeer te berekenen. Het resultaat van deze studie wordt samengevat in figuur 1. Dit plaatje is inmiddels één van de meest gereproduceerde plaatjes in de klimaatwetenschap. Zowel in het derde (uit 2001) als in het vierde (uit 2007) IPCC rapport bezet het een prominente plaats.

Inmiddels zijn er meer satellietmissies geweest, waaronder die van *CERES* (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*), en ook zogenaamde *renanalysis* projecten, zoals die van het *ECMWF* (*ERA-40*), waaruit stralingsfluxen kunnen worden afgeleid. Trenberth, Fasullo en Kiehl (2009) hebben met deze nieuwe informatie het globaal gemiddeld energiebudget nog ééns onder de loep genomen. Het resultaat van deze studie wordt samengevat in figuur 2.

Bij het vergelijken van de getallen in de figuren moeten we in gedachte houden dat een verdubbeling van de CO_2-concentratie van de atmosfeer van 280 ppmv (voor het industrieel tijdperk) naar 560 ppmv (ergens in de 21ste eeuw) in theorie zal resulteren in een *toename* van ongeveer 4 W m^{-2} in de stralingsflux van de atmosfeer naar het aardoppervlak. Deze stralingsflux, die representatief is voor de sterkte van het broeikaseffect, wordt in figuur 2 geschat op 333 W m^{-2}, 9 W m^{-2} hoger dan de schatting in figuur 1, terwijl de CO_2-concentratie tussen 1985 en 2004 met slechts 5% is gestegen. Het kan zijn dat hier de positieve terugkoppeling van waterdamp een rol speelt, want het waterdampgehalte van de atmosfeer is in die periode met ongeveer 2,5% gestegen. Ook waterdamp is een belangrijk broeikasgas, en draagt daarom bij aan een toename van de langgolvige terugstraling van de atmosfeer naar de aarde.

Deze terugstraling (*back radiation* in de figuren) wordt pas de laatste 15 tot 20 jaar betrouwbaar gemeten op 36 plekken verspreid over de wereld. De stralingsdeskundige, Atsumo Ohmura (*ETH*, Zurich), heeft deze metingen in 2006 gecombineerd met de *reanalysis* van het *ECMWF* en komt op een globaal gemiddelde waarde van 345 W m^{-2} (figuur 3). Je gaat je dus afvragen hoe Kiehl en Trenberth in 1997 aan een waarde komen die 21 W m^{-2} lager ligt. Overigens, heeft Ohmura (2006) de schattingen van de atmosferische terugstraling van verschillende auteurs in een tabel op een rijtje gezet. De Engelse meteoroloog, Dines, kwam in 1917 uit op een zeer lage waarde van 194 W m^{-2}. Sellers (1965) noteert op blz. 47 van zijn bekende boek (het boek dat begin jaren 80 in Utrecht werd gebruikt bij het doctoraalvak klimaatfysika) een iets minder lage waarde van 273 W m^{-2}. Verschillende klimaatmodellen kwamen begin deze eeuw uit op waarden die liggen tussen 311 en 345 W m^{-2}. De reanalysis van *NCEP-NCAR* komt op een waarde van 334 W m^{-2}, terwijl *ERA-40* een waarde van 340 W m^{-2} berekend. Er is dus sprake van een grote onzekerheid in deze belangrijke grootheid. De schatting van Kiehl en Trenberth uit 1997 (324 W m^{-2}) is zeker té laag, maar valt wel binnen de onzekerheidsmarge.



Figuur 3. Het globaal gemiddeld energiebudget volgens Ohmura (2006).

Kiehl en Trenberth beschikten midden jaren 90 niet, zoals Ohmura (2006), over een lange reeks van betrouwbare metingen van de atmosferische terugstraling aan het aardoppervlak op meerdere plekken op aarde. De niet gemeten stralingsfluxen zijn daarentegen uitgerekend met een nauwkeurig stralingsmodel, waarbij een temperatuur-, waterdamp-, wolken- en CO_2-verdeling, is verondersteld die representatief is voor de globaal gemiddelde atmosfeer. Dat de auteurs daarbij de zogenaamde *US-1976 Standard Atmosphere* als representatief voor de globaal gemiddelde atmosfeer hebben aangenomen is hoogst verbazingwekkend. Deze aanname houdt geen stand als het gaat om waterdamp. De *US-1976 Standard Atmosphere* is namelijk veel droger dan de globaal gemiddelde atmosfeer. Globaal gemiddeld zit er ongeveer 25 kg m^{-2} waterdamp in de atmosfeer, terwijl de *US-1976 Standard Atmosphere* slechts14 kg m^{-2} bevat! De verbazing wordt nog groter als ik op bladzijde 200 van het artikel uit 1997 lees dat Kiehl en Trenberth de specifieke vochtigheid met nog eens 12% hebben gereduceerd om overeenstemming te krijgen tussen het model en de satellietmetingen van de uitgaande langgolvige straling aan de top van de atmosfeer (235 W m^{-2} in figuur 1). Het is dus niet verrassend dat hierdoor de terugstraling van de atmosfeer naar het aardoppervlak, en daarmee de sterkte van het broeikaseffect, wordt onderschat!

De onzekerheid in de waarde van andere energiefluxen tussen atmosfeer en aarde is eveneens minstens 4 W m^{-2}. Neem bijvoorbeeld de globaal gemiddelde waarde van de latente warmteflux (78 W m^{-2} in figuur 1, 80 W m^{-2} in figuur 2). Deze waarde wordt afgeleid uit de gemeten globaal gemiddelde neerslag, in de veronderstelling dat het aan het oppervlak verdampte water uiteindelijk weer terugkomt als neerslag. De schattingen van de globaal gemiddelde neerslag, die overigens voor verschillende tijdvakken gelden, lopen uiteen van 2.61 mm per dag (1979-2001) (Adler et al., 2003) tot 3.1 mm per dag (NCEP2 reanalysis 1989-2008). Kiehl en Trenberth (1997)

houden het op 2.69 mm per dag terwijl Ohmura (2006) een waarde van 2.74 mm per dag gebruikt. Dit laatste relatief kleine verschil representeert 7 W m^{-2}!

Kijken we vervolgens naar de zonnestralingsflux dan zien we dat ook hier de onzekerheid groot is. In figuur 2 is de reflectie van zonnestraling door het systeem aarde plus atmosfeer 5 W m^{-2} lager dan in figuur 1. Dit heeft te maken met zowel een toename van de door de atmosfeer geabsorbeerde zonnestraling van 11 W m^{-2}, als een afname van het gemiddeld albedo van het aardoppervlak van 0.18 naar 0.14. Het planetaire albedo is iets minder sterk afgenomen (van 0.31 naar 0.30)!

Tenslotte, het voelbare warmtetransport van de aarde naar de atmosfeer wordt als sluitstuk bepaald uit de netto straling aan het aardoppervlak en de latente warmteflux. Ook hier zijn de onderlinge verschillen groot: Kiehl en Trenberth (1997) krijgen een waarde van 24 W m^{-2}; Trenberth et al. (2009) komen uit op een waarde van 17 W m^{-2}; Ohmura (2006) komt uit op een waarde van 20 W m^{-2}.

Als het globaal gemiddeld energiebudget aan het aardoppervlak zo slecht bekend is, zoals blijkt uit deze vergelijking van verschillende recente studies, dan mag met recht worden getwijfeld aan de gedetailleerde klimaatverwachtingen voor de komende eeuw.

Literatuur

Adler, R.F. et al., 2003: The Version-2 precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). **Journal of Hydrometeorology**, 4, 1147-1167.

Dines, W.H., 1917: The heat balance of the atmosphere. **Quarterly J. R.Meteorol.Soc.**, 43, 151-158.

Kiehl J.T., and K.E. Trenberth, K.E., 1997: Earth's annual global energy budget. **Bull.Am.Meteorol.Soc., 78,** 197-208.

Ohmura, A., 2006 : **New radiation and energy balance of the world and its variability.** IRS 2004: Current Problems in Atmospheric Radiation. 327-330.

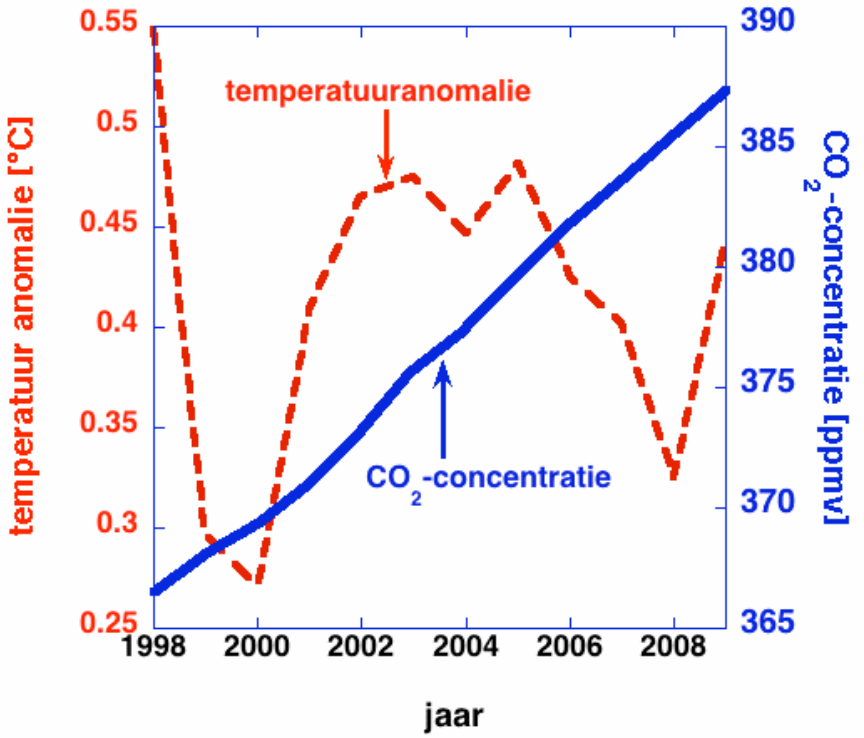
Sellers, W.D., 1965: **Physical Climatology**. University of Chicago Press.

Trenberth, K.E., J.T. Fasullo and J. Kiehl, 2009: Earth's global energy budget. **Bull.Amer.Meteorol.Soc., 90**, 311-324.

Waar blijft de energie van het versterkte broeikaseffect?

Aarnout van Delden (IMAU) (september 2010)
Meteorologica, 3-2010

Als het gaat om het detecteren van klimaatverandering is men teveel gepreoccupeerd met de atmosfeer. Men vergeet vaak dat de oceaan en de ijskappen een belangrijk onderdeel zijn van het klimaatsysteem. Dit wordt nog eens duidelijk, nu er wordt gezocht naar een verklaring voor het feit dat de globaal gemiddelde temperatuur van de atmosfeer nabij het aardoppervlak al geruime tijd (11 jaar) niet meer stijgt, ondanks de voortdurende stijging van de CO_2-concentratie in de atmosfeer (figuur 1) (Kerr, 2009). Sommige "klimaatsceptici", die geloven dat het allemaal niet zo'n vaart zal lopen met "de door de mens veroorzaakte opwarming van de aarde", spinnen hier garen bij. Wetenschappers zoeken naar een verklaring. Die moet waarschijnlijk worden gezocht in de enorme warmtecapaciteit van de oceanen en de ijskappen. De waarnemingen zijn helaas nog onvoldoende nauwkeurig om deze verklaring te boekstaven.

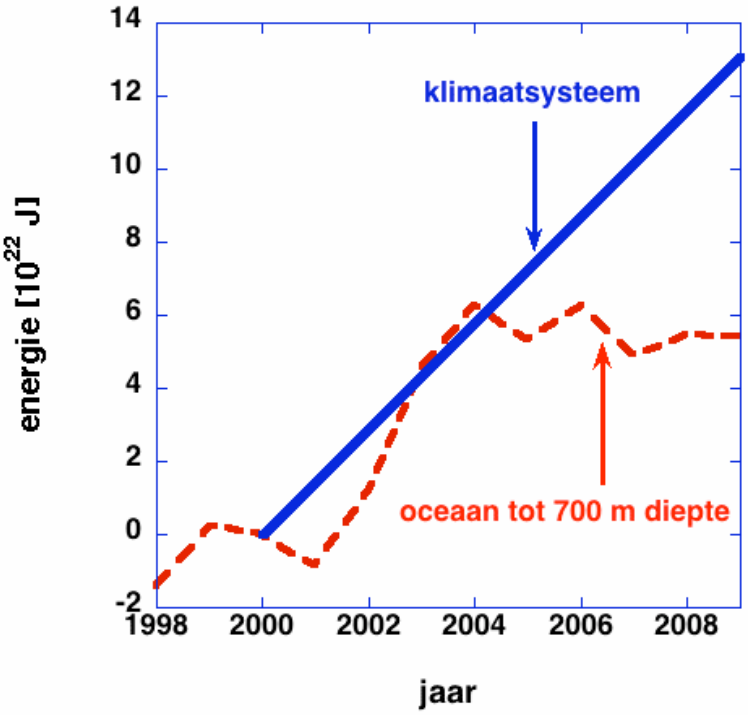


Figuur 1. Globaal-gemiddelde, jaar-gemiddelde temperatuur nabij het aardoppervlak (anomalie t.o.v. de periode 1961-1990) (stippellijn) (http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/) en jaar-gemiddelde CO_2-concentratie op Moana Loa (Hawaii) (http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/).

Waarnemingen van de neerwaartse langgolvige stralingsflux bij het aardoppervlak tonen aan dat deze flux sinds 1973 toeneemt met 2.2 W m^{-2} per decade (Wang en Liang, 2009). Deze toename is zeer waarschijnlijk een gevolg van zowel de geleidelijke toename van de atmosferische CO_2-concentratie als de vermoedelijk

toegenomen luchtvochtigheid (Trenberth et al., 2005). Tegelijkertijd laten modelberekeningen in combinatie met satellietmetingen van het stralingsbudget aan de top van de atmosfeer zien dat het aardse klimaatsysteem netto stralingsenergie opneemt. Voor de periode 2000-2004 wordt dit overschot geschat op ongeveer 0,9 W m^{-2} (Hansen et al., 2005; Trenberth et al., 2009). Omgerekend betekent dit dat het klimaatsysteem er, door het versterkte broeikaseffect, per jaar $1{,}45\times10^{22}$ J aan energie bij krijgt.

De grote vraag is nu: waar blijft deze energie? Blijkbaar niet in de atmosfeer. Zeer waarschijnlijk is de overtollige energie dus in de oceanen verdwenen. Levitus et al. (2009) hebben uit oceaantemperatuur waarnemingen afgeleid dat de bovenste 700 m van de oceaan tussen 1969 en 2008 globaal gemiddeld ongeveer $0{,}4\times10^{22}$ J per jaar aan energie heeft opgenomen. Dit is echter niet een geleidelijke trend. De energieopname door de oceaan gaat kennelijk met horten en stoten (figuur 2). Juist tussen 2000 en 2004 is de energieinhoud van de bovenste 700 m van de oceanen met ongeveer $1{,}45\times10^{22}$ J per jaar toegenomen, hetgeen betekent dat de oceanen ongeveer alle energie die tussen 2000 en 2004 aan het klimaatsysteem is toegevoegd hebben opgenomen.



Figuur 2. Jaargemiddelde energieinhoud van alle oceanen tot 700 m onder het zeeoppervlak (stippellijn) (http://www.nodc.noaa.gov/OC5/3M_HEAT_CONTENT/basin_data.html) en de energieinhoud van het totale klimaatsysteem (atmosfeer+oceaan+cryosphere+aarde) (getrokken lijn), beiden als anomalie t.o.v. het jaar 2000.

De analyse van Levitus et al. (2009) laat echter ook zien dat de energieopnamesnelheid van de oceanen tussen 2004 en 2008 is gestagneerd, althans in de bovenste 700 m (rode stippellijn in fig. 2). Er is geen reden om aan te nemen dat het stralingsbudget aan de top van de atmosfeer in deze periode in balans was. Trenberth en Fasullo weten op 16 april 2010 niet waar de “anthropogene

broeikasenergie", die zich sinds 2004 in het klimaatsysteem heeft opgehoopt, is gebleven. Zij achten het zeer onwaarschijnlijk dat deze energie in zijn geheel is gebruikt om zeeijs en het ijs van gletsjers, ijskappen en permafrost te smelten. Opname van warmte door land speelt al helemaal geen noemenswaardige rol vanwege de slechte warmtegeleiding door de aarde, waardoor warmte slechts tot een diepte van ten hoogste enkele meters doordringt.

Uit een nieuwe analyse (Lyman et al., 2010) van de rommelige dataset van oceaantemperatuur metingen, die met behulp van het sinds 2000 geïnstalleerde "Argo profiling float system" (http://www.argo.ucsd.edu/) (een soort radiosondenetwerk, maar dan in de oceaan) is verzameld, blijkt nu dat de "broeikasenergie" dieper in de oceaan is doorgedrongen dan aanvankelijk werd gedacht: minstens tot een diepte van 2 km. Klaarblijkelijk zijn metingen van de temperatuur in de diepe oceaan hard nodig om het energiebudget sluitend te krijgen.

De twee korte beschouwingen van het energiebudget van Trenberth (met medewerking van John Fasullo) in de edities van *Science* van 16 april j.l. en van *Nature* van 20 mei j.l., naar aanleiding van de studies van Levitus et al. (2009), von Schukmann et al. (2009) en Lyman et al. (2010), moeten daarom worden gezien als een pleidooi voor een verbetering en een uitbreiding van het meetnetwerk in de oceanen en ook een voortzetting van de inspanningen om het energiebudget aan de top van de atmosfeer vanaf satellieten te meten en te analyseren, want ook omtrent dit budget bestaat nog veel onzekerheid (Loeb, et al., 2009). Alleen dan kan men, wellicht met behulp van klimaatmodellen, gaan begrijpen waarom de globaal gemiddelde temperatuur nabij het aardoppervlak gedurende meer dan 10 jaar niet meer stijgt, ondanks de continu stijgende concentratie van het broeikasgas, CO_2.

Literatuur

Hansen, J., L. Nazarenko, R. Ruedy, M Sato, J Willis, A. Del Genio, D. Koch, A. Lacis, K. Lo, S. Menon, T. Novakov, J. Perlwitz, G. Russell, G.A. Schmidt, N. Tausnev, 2005: Earth's Energy Imbalance: Confirmation and Implications. **Science, 308**, 1431-1435.

Kerr, R., 2009: What happened to global warming? **Science**, **326**, 28-29.

Levitus, S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, H. E. Garcia, and A. V. Mishonov, 2009: Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems. **Geophys.Res.Lett., 36**, L07608, doi:10.1029/2008GL037155.

Loeb, N.G., B.A. Wielicki, D.R. Doelling, G.L. Smith, D.F. Keyes, S. Kato, N. Manalo-Smith, T Wong, 2009: Toward Optimal Closure of the Earth's Top-of-Atmosphere Radiation Budget. **J.Clim., 22**, 748-766.

Lyman, J.M., S.A. Good, V.V. Gouretski, M. Ishii, G.C. Johnson, M.D. Palmer, D.M. Smith and J.K. Willis, 2010: Robust warming of the global upper ocean. **Nature**, **465**, 334-337.

von Schuckmann, K., F. Gaillard, and P.-Y. Le Traon, 2009: Global hydrographic variability patterns during 2003–2008, **J. Geophys. Res.,** *114*, C09007, doi:10.1029/2008JC005237.

Trenberth, K. E., J. Fasullo, and L. Smith, 2005: Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. **Clim. Dyn., 24**, 741-758.

Trenberth, K.E., J.T. Fasullo and J. Kiehl, 2009: Earth's global energy budget. **Bull.Amer.Meteorol.Soc., 90**, 311-324.

Trenberth, K.E. and J.T. Fasullo, 2010: Tracking Earth's energy balance. **Science, 328**, 316-317.

Trenberth, K.E., 2010: The ocean is warming, is'nt it? **Nature, 465**, 304.

Wang, K., and S. Liang, 2009: Global atmospheric downward radiation over land surface under all-sky conditions from 1973 to 2008**. J.Geoph.Res., 114**, D19101, doi:10.1029/2009JD011800.