

Extreme maximumtemperaturen in de toekomst

ANDREAS STERL¹, GEERT JAN VAN OLDENBORGH¹, WILCO HAZELEGER¹, HENK DIJKSTRA²
(¹ KNMI; ² IMAU)

Extreme waarden van meteorologische parameters zoals neerslag en temperatuur hebben veel grotere gevolgen voor de maatschappij dan gemiddelden. Het is dus belangrijk om veranderingen in extremen in een veranderend klimaat te onderzoeken. Extremen zijn per definitie zeldzaam, en er zijn lange tijdreeksen nodig om statistisch betrouwbare uitspraken te kunnen doen. In het ESSENCE project is de ontwikkeling van het klimaat tussen 1950 en 2100 maar liefst 17 keer doorgerekend. Dat levert genoeg data voor een betrouwbare schatting van de 100-jaar terugkeer temperatuur (T_{100}). Dit is de temperatuur die gemiddeld eens per 100 jaar optreedt. Het model heeft een warme bias, dus het overschat (extreme) temperaturen. Zelfs na een biascorrectie vinden we voor het einde van deze eeuw T_{100} -waarden van meer dan 50°C in grote delen van de bewoonde wereld. Voor Nederland vinden we waarden van rond de 44°C. Dat is consistent met de in de KNMI'06 scenario's gemaakte aannames.

Inleiding

De toenemende concentratie van broeikasgassen, met name CO_2 , in de atmosfeer leidt tot stijgende temperaturen. Het recente Fourth Assessment Report (AR4) van het IPCC (2007) gaat uit van een stijging van de wereldgemiddelde oppervlaktetemperatuur van tussen de 1,1°C en 6,4°C aan het einde van deze eeuw ten opzichte van het gemiddelde over 1980-1999. Daarbij liggen de 'meest waarschijnlijke' waarden tussen de 3 en 4 graden. Veel belangrijker dan de wereldgemiddelde temperatuur zijn echter lokale maxima, omdat die een directe invloed op tal van sectoren (bijvoorbeeld volksgezondheid, landbouw, energiebehoefte) kunnen hebben.

Het bepalen van extremen en hun mogelijke veranderingen is echter lastig. Ze zijn zeldzaam (anders waren ze niet extreem), en daarom moet meestal vanuit een korte tijdreeks geëxtrapoleerd worden. Dit artikel gaat over de temperatuur die gemiddeld eens per 100 jaar optreedt (T_{100}). Vaak moet die uit een waarnemingsreeks van maar 30 jaar geschat worden, wat natuurlijk tot grote foutenmarges leidt. Nog moeilijker wordt het, als het

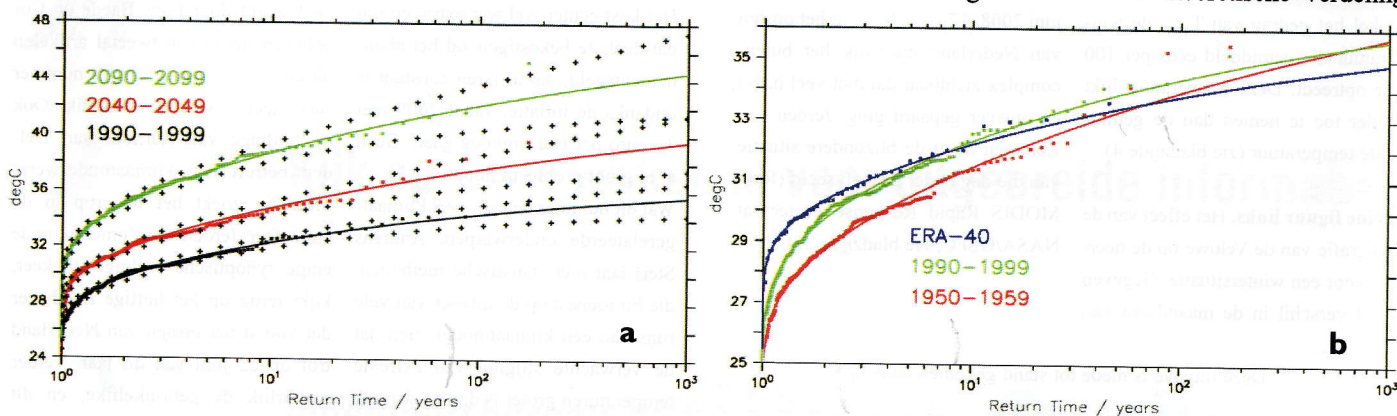
onderliggende klimaat verandert als gevolg van het broeikas effect. Eerdere resultaten (Kharin et al. 2007) beperken zich daarom tot relatief gematigde extremen, zoals T_{20} , de temperatuur met een terugkeertijd van 20 jaar. Het IPCC rapport beperkt zich daarom tot de vaststelling dat de extreme temperaturen sneller stijgen dan de gemiddelde temperaturen. Deze beperkingen gelden niet voor de resultaten van het ESSENCE project (Dijkstra et al., 2007; Sterl et al., 2008). In ESSENCE is de ontwikkeling van het klimaat tussen 1950 en 2100 maar liefst 17 keer doorgerekend. Daarbij is gebruik gemaakt van het ECHAM5/MPI-OM klimaatmodel, dat door het Max-Planck-Instituut voor Meteorologie in Hamburg is ontwikkeld. Bij een vergelijking tussen verschillende (voor het AR4 gebruikte) modellen kwam dit model als een van de beste uit de bus (Van Ulden en van Oldenborgh, 2006). Voor de 'historische' periode 1950-2000 werden de waargenomen concentraties van broeikasgassen en aerosolen voorgeschreven. Vanaf 2001 volgen deze concentraties het SRES (Special Report on Emissions Scenarios) A1b scenario. Dit scenario leidt tot een

CO_2 -concentratie van ongeveer 700 ppm (*parts per million*) in 2100. Nu is deze concentratie ongeveer 385 ppm.

Elk van deze 17 simulaties (runs) begint met een kleine verstoring van de begintoestand. Doordat de atmosfeer chaotisch is, zijn de runs na een paar weken hun begintoestand 'vergeten' en vertoont elke run zijn eigen variaties, onafhankelijk van de andere runs. Door over alle leden van het ensemble te middelen kan het broeikassignaal van de interne variabiliteit worden gescheiden (Dijkstra et al., 2007). Aan de andere kant leveren 17 realisaties van het klimaat ook een grote hoeveelheid data op, waardoor de bovengenoemde beperkingen bij het schatten van extremen komen te vervallen.

Bepaling van mogelijke extremen

Om de temperatuurextremen en hun ontwikkeling in de tijd te kunnen bepalen, zijn de gesimuleerde 150 jaren in blokken van 10 jaar (1950-1959, 1960-1969, etc.) opgedeeld. In elk blok zijn de 170 (10 x 17) jaarlijkse maxima van de 2m-temperatuur vervolgens aan een GEV (*Generalized Extreme Value*) distributie gefit. Dat is de theoretische verdeling



Figuur 1. GEV fit voor de jaarlijkse maximum 2m temperatuur voor Nederland (5,6°E, 51,3°N) als functie van de terugkeertijd (zie vergelijking (2)) voor verschillende tijdvakken, met de waarden uit ERA-40 voor de periode 1958-2001. De gekleurde lijnen zijn de fits aan de actuele waarden, die door de gelijk gekleurde puntjes weergegeven worden. De zwarte plustekens in panel a geven de 95% betrouwbaarheidsintervallen voor de desbetreffende fit aan.

van blok-maxima (Coles, 2001):

$$G(x) = \exp\left\{-\left[1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-1/\xi}\right\} \quad (1)$$

Hier zijn μ , σ en ξ respectievelijk de locatie-, spreidings- en vormparameter. $G(x)$ is gedefinieerd voor x zodanig dat

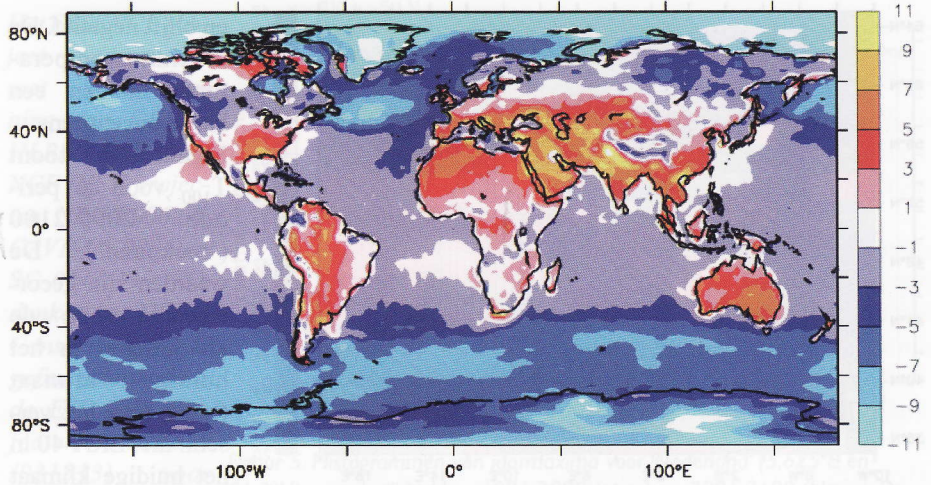
$$1 + \xi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) > 0$$

zodat de verdeling voor negatieve waarden van ξ een harde bovengrens van $T_{\max} = \mu - \sigma/\xi$ heeft. De terugkeertijd $T(x)$ voor de waarde x wordt door het $1-1/T(x)$ -percentiel

$$T(x) = \frac{1}{1 - G(x)} \quad (2)$$

gegeven.

In figuur 5 is een voorbeeld van een dergelijke fit zien. Door het grote aantal waarden per tijdvak (170) zijn de foutenmarges voor de resulterende schattingen van de verdelingparameters klein. Voor het roosterpunt 'Nederland' (zie ook figuur 4) wordt dit aangetoond in figuur



Figuur 2. T_{100} uit ESSENCE (hele ensemble) minus T_{100} uit ERA-40 voor de gehele ERA-40 periode (1958-2001).

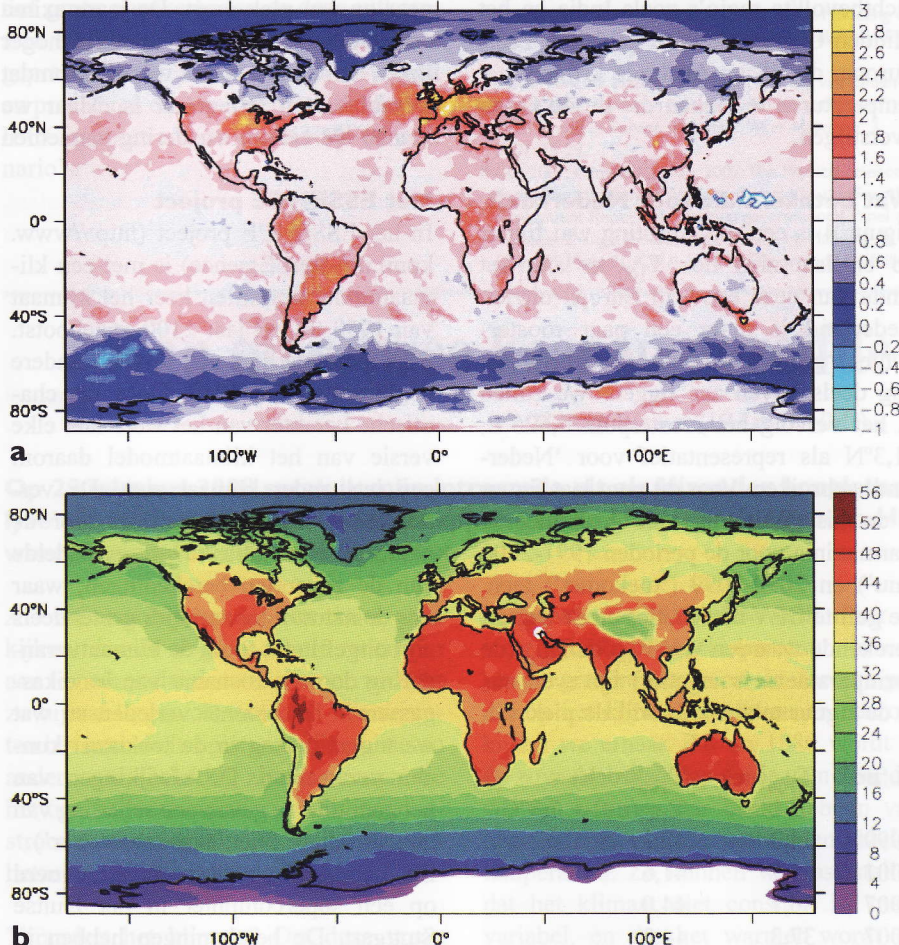
1a. In deze figuur is de temperatuur samen met het 95% betrouwbaarheidsinterval als functie van de terugkeertijd uitgezet. Het betrouwbaarheidsinterval is met een 'bootstrap' methode met 1000 herhalingen bepaald. De figuur laat zien dat de GEV-fit de data goed representeert. De spreiding van de modelwaarden (gekleurde puntjes) rond de gefitte curven is klein, en het betrouwbaarheidsinterval voor T_{100} is kleiner dan $\pm 2^\circ\text{C}$. Soortgelijke conclusies gelden ook voor

andere locaties. Kharin et al. (2007) laten zien dat de spreiding tussen verschillende modellen al voor de 20-jaar terugkeertijd meerdere graden bedraagt. De sampling fout in ESSENCE is dus veel kleiner dan de modelfout.

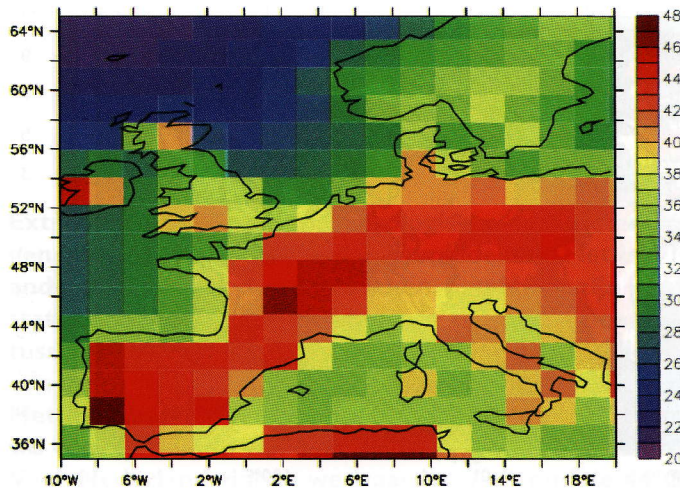
Resultaten

Voor de periode 1958-2001 zijn de uit het model afgeleide T_{100} -waarden vergeleken met waarden afgeleid uit de ERA-40 heranalyse (Uppala et al., 2005) en uit de HadGHCND dataset (Caesar et al., 2006) van waargenomen maximumtemperaturen. De beide datasets komen goed overeen, maar bij gebrek aan voldoende waarnemingen heeft HadGHCND in grote gebieden van de wereld geen data. Figuur 1b laat zien dat voor Nederland de T_{100} -waarden uit ESSENCE nauwelijks verschillen van die uit ERA-40. Helaas geldt dit niet voor andere gebieden op aarde (figuur 2). De gesimuleerde terugkeerwaarden zijn tot meer dan 10°C hoger dan de waarden uit de heranalyse, en de overschatting is het hoogst in droge gebieden (Middellandse Zeegebied, Midden-Oosten, Zuid-Afrika en Australië). Voor Siberië worden de maxima juist onderschat. Ook voor de oceanen onderschat het model de maxima. In ESSENCE is de zeevatertemperatuur iets lager dan in ERA-40. Omdat de variabiliteit over zee laag is, worden de extremen door de gemiddelde temperaturen bepaald en komen in ESSENCE dus lager uit.

Het verschilpatroon in figuur 2 lijkt heel goed op wat Kharin et al. (2007; hun figuur 4) voor de 20-jaar terugkeertijden uit 16 AR4 modellen gevonden hebben. De overschatting van extreme temperaturen is dus een algemene eigenschap van de huidige generatie klimaatmodellen. Voorzichtigheid is daarom geboden: dezelfde modelfouten, die nu voor een



Figuur 3. a) De toename van T_{100} over de periode 2001-2100 als veelvoud van de toename van de gemiddelde temperatuur over dezelfde periode. Rood (blauw) betekent een snellere (langzamere) toename van T_{100} dan de gemiddelde temperatuur. b) T_{100} uit ESSENCE voor de periode 2090-2099, gecorrigeerd voor de afwijking van ERA-40 in het huidige klimaat (Figuur 2).



Figuur 4. T_{100} (gecorrigeerd) over Europa - uitvergroting van Figuur 3b.

overschatting van extremen in bijvoorbeeld het Midden-Oosten zorgen, zouden bij een verdere stijging van de temperaturen ook een rol kunnen gaan spelen in gebieden waar de overschatting nu nog klein is, zoals in Nederland.

Figuur 3a laat de toename van T_{100} als veelvoud van de toename van de gemiddelde temperatuur zien. De grootste toename vindt plaats in gebieden waar de bodem uitdroogt. Net zoals al door Kharin et al. (2007) werd gevonden, nemen de extremen sneller toe dan de gemiddelden. De toename van extremen wordt door veranderingen in zowel de locatieparameter μ als in de spreidingsparameter σ veroorzaakt. De eerste geeft het effect weer van de toename van de gemiddelde temperatuur, de tweede van een toenemende variabiliteit van het klimaat (zie vergelijking (1)). De verandering van μ is overal positief en groter boven land dan boven zee. De grootste veranderingen treden op over Zuid-Europa en het noorden van Zuid-Amerika, gevolgd door Zuid-Afrika en het Midden-Oosten. De verandering van de spreidingsparameter σ heeft een ander patroon. Boven de meeste landgebieden neemt σ toe en de grootste toename vindt plaats in Europa en delen van Noord-Amerika. Deze patronen komen goed overeen met de door Clark et al. (2006, hun figuur 4) gevonden patronen. De vormparameter verandert overigens niet systematisch

en blijft negatief. De maximumtemperaturen houden een harde bovengrens. Figuur 3b toont T_{100} voor de periode 2090-2100 ('toekomst'). De waarden zijn gecorrigeerd voor de afwijkingen in het huidige klimaat ('nu') door het verschil met ERA-40 in het huidige klimaat (figuur 2) van de ruwe modeluitvoer

af te trekken,

$$T_{100}^{corr}(toek) = T_{100}(toek) - (T_{100}(nu) - T_{100}^{ERA40}) \\ = T_{100}^{ERA40} + (T_{100}(toek) - T_{100}(nu)) \quad (3) \\ = T_{100}^{ERA40} + \Delta T_{100}$$

Anders uitgedrukt wordt de door het model berekende toename (ΔT_{100}) opgeteld bij de uit ERA-40 afgeleide waarden. Volgens deze figuur bereiken de temperaturen extremen van 50°C in een groot gedeelte van de tropen (binnen 30° van de evenaar). Dat gebied omvat dichtbevolkte regio's zoals India en het Midden-Oosten. Andere gebieden zoals Europa, de VS en Australië krijgen met temperaturen te maken die de 40°C ver overstijgen.

Wat betekent dit voor Nederland?

Figuur 4 is een uitvergroting van figuur 3b en laat zien hoe T_{100} er aan het einde van deze eeuw in Europa uitziet. Nederland is maar een paar roosterpunten 'groot', waarvan de meeste ook nog deels boven zee liggen. We zullen in het vervolg het roosterpunt 5,625°E, 51,3°N als representatief voor 'Nederland' gebruiken. Voor dit punt laat figuur 5 de histogrammen van gesimuleerde jaarmaxima voor de perioden 1991-2000 ('nu') en 2090-2099 ('toekomst') zien. De gefitte GEV-distributies en de daaruit berekende waarden van T_{100} en T_{max} (de vormparameter is negatief) zijn eveneens in de figuur te zien. Terwijl de piek van

de verdeling (die door de locatieparameter μ bepaald wordt) maar ongeveer 5°C opschuift, neemt T_{100} met bijna 8°C toe. Dat komt omdat de verdeling breder wordt (de spreidingsparameter σ wordt groter): het klimaat wordt in dit opzicht variabler. De toename van bijna 8°C komt goed overeen met de projecties in de KNMI'06 scenario's (KNMI, 2006). Worden de in de scenario's genoemde waarden voor de 'yearly warmest day' in 2050 doorgetrokken naar 2100 en een herhaaltijd van 100 jaar, dan komt eenzelfde toename tevoorschijn (A. Klein Tank, pers. mededeling), echter met veel grotere foutenmarges.

Voor de toekomstige periode komt T_{100} (ongecorrigeerd) uit op 42,2°C, of 7,9°C meer dan nu (figuur 5 en tabel 1). Als we, zoals in de figuren 3b en 4, voor de afwijking ten opzichte van ERA-40 corrigeren, komen we uit op 41,6°C. We moeten ons natuurlijk afvragen hoe goed ERA-40 eigenlijk is. We kijken daarvoor naar stationsobservaties. In eerste instantie is dat oneerlijk, want modeluitvoer, zoals die uit ESSENCE of ERA-40 komt, is representatief voor een groot gebied, terwijl een station maar op een plek meet. De jaarmaxima van stationswaarden zullen altijd hoger liggen dan de roostercel waarden, omdat de variabiliteit (σ) groter is. Maar we kunnen als eerste benadering aannemen

Het ESSENCE project

In het ESSENCE project (<http://www.knmi.nl/~sterl/Essence>) is met een klimaatmodel zeventien keer het klimaat van 1950 tot het jaar 2100 nagebootst. Elke simulatie had een miniem andere begintoestand in 1950. Door het chaotische karakter van het weer laat elke versie van het klimaatmodel daarom een iets ander klimaat zien. De verschillen worden veroorzaakt door de natuurlijke variaties. Het gemiddelde van de zeventien berekeningen, waar dus de natuurlijke variaties grotendeels zijn uitgefilterd, toont de klimaatverandering door de toename van broeikasgassen in het recente verleden en wat we mogelijk nog in de toekomst kunnen verwachten. De afwijkingen van het gemiddelde geven een schatting van de natuurlijke fluctuaties ('het weer'). De berekeningen werden uitgevoerd op een supercomputer in het Duitse Stuttgart. De berekeningen hebben in totaal acht maanden geduurd en ongeveer vijftig TeraByte (= ruim duizend DVD's) aan data opgeleverd.

	locatie	tijdvak 'nu'	$T_{100}(nu)$	$T_{100}(toek) = T_{100}(nu) + 7,9^{\circ}C$
ESSENCE	5,625°E, 51,3°N	1990-1999	34,3	42,3
ERA-40	6,0°E, 51,0°N	1958-2001	33,7	41,6
station De Bilt	5,2°E, 52,1°N	1901-2007	36,1	44,0
station Eindhoven	5,4°E, 51,4°N	1951-2007	37,3	44,2
station Maastricht	5,8°E, 50,9°N	1906-2007	37,7	44,6

Tabel 1. T_{100} voor 'Nederland'. De 'toekomst'-waarden (2090-2099) zijn verkregen door de door het model bepaalde toename (7,9°C) bij de waarden voor het huidige klimaat ('nu') op te tellen.

dat de toename van de stationsdata gelijk is aan de toename van de roosterdata. We maken dan eigenlijk gebruik van vergelijking (3), maar corrigeren niet voor de afwijking van ERA-40, maar voor de afwijking van de desbetreffende stationswaarde. Het resultaat is voor drie stations in de rooster 'Nederland' aangegeven in tabel 1. Op grond van de discussie hierboven mag eenieder zelf beslissen, welk getal in de kolom 'toekomst' hij/zij het meest vertrouwt!

Samenvatting

Het ESSENCE-ensemble maakt het door zijn omvang mogelijk om in de toekomst mogelijke extreme temperaturen met een lage statistische fout te schatten. Deze extremen stijgen veel sneller dan de gemiddelde temperaturen. Voor grote delen van de bewoonde wereld kunnen extreme temperaturen van rond de 50°C verwacht worden. Voor Zuid-Europa lopen deze waarden op tot 48°C, en voor Nederland tot 42-44°C. Omdat dergelijke temperaturen grote gevolgen op het functioneren van de maatschappij kunnen hebben, verdient het onderzoek naar extreme temperaturen meer aandacht. De grote modelbias leidt nog tot relatief grote onzekerheden in deze uitkomsten en moet worden verkleind. De hier gepresenteerde resultaten ondersteunen en preciseren de resultaten van het laatste IPCC-rapport en van de KNMI'06-scenario's.

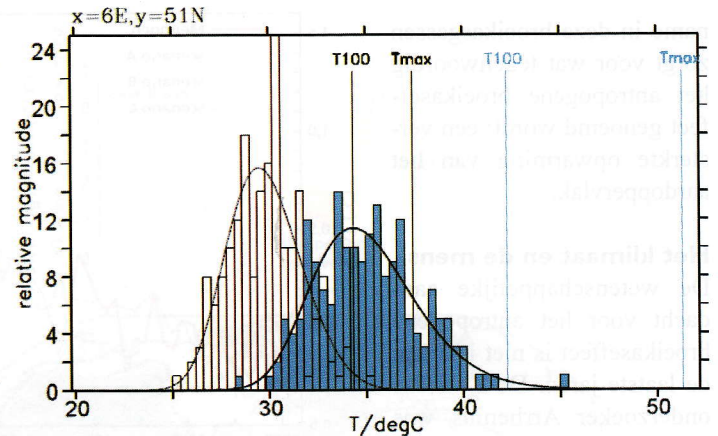
Het ESSENCE project is uitgevoerd met ondersteuning van DEISA, HLRS, SARA en NCF (NCF projecten NRG-2006.06, CAVE-06-023 en SG-06-267). We danken het DEISA Consortium (mede gefinancierd door de EU, FP6 projecten 508830

/031513) voor ondersteuning binnen de DEISA Extreme Computing Initiative (www.deisa.org).

We danken Camiel Severijns (KNMI) en de staf van SARA en HLRS voor technische ondersteuning en het Max-Planck-Instituut ter Meteorologie in Hamburg voor het ter beschikking stellen van hun model.

Literatuur

- Caesar, J., and L. Alexander, 2006: Large-scale changes in observed daily maximum and minimum temperatures: Creation and analysis of a new gridded data set, *J. Geophys. Res.*, 111, D05101, doi:10.1029/2005JD006280.
- Coles, S., 2001: *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*, 208 pp, Springer-Verlag, Berlin, London, Heidelberg.
- Dijkstra, H.A., W. Hazeleger, A. Sterl, and G.J. van Oldenborgh, 2007: Gevolgen versterkte broeikas effect in 2030 overall in Europa merkbaar, *Weer Magazine*, 3, 2007: 26-29.
- IPCC, 2007: *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report on the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller



Figuur 5. Histogrammen van jaarmaxima voor 'Nederland' (5,625°E en 51,3°N) voor de tijdvakken 1991-2000 (open) en 2091-2100 (blauw). De breedte van de bins is 0,4°C. De dunne en dikke lijnen zijn de bijbehorende GEV fits. De verticale lijnen geven de berekende waarden van T_{100} en T_{max} weer. De waarden in deze figuur zijn gebaseerd op de ruwe modeluitvoer en dus niet gecorrigeerd.

- (eds.) Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 996 pp.
- Kharin, V.V., F.V. Zwiers, X. Zhang, and G.C. Hegerl, 2007: Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations, *J. Clim.*, 20, 1419-1444, doi: 10.1175/JCLI4066.1.
- KNMI, 2006: *KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands*. KNMI Scientific report WR 2006-01, <http://www.knmi.nl/klimaatsscenarios/-knmi06/achtergrond/WR23mei2006.pdf>.
- Sterl, A., C. Severijns, H. Dijkstra, W. Hazeleger, G. J. van Oldenborgh, M. van den Broeke, G. Burgers, B. van den Hurk, P. J. van Leeuwen, and P. Van Velthoven, 2008: When can we expect extremely high surface temperatures?, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L14703, doi:10.1029/2008GL034071, in press.
- Uppala, S., and 44 co-authors, 2005: The ERA-40 reanalysis, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131, 2961-3012, doi: 10.1256/qj.04.176.
- Van Olden, A.P., and G.J. van Oldenborgh, 2006: Large-scale atmospheric circulation biases and changes in global climate model simulations and their importance for regional climate scenarios: a case study for West-Central Europe, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 863-881, SRef-ID: 1680-7324/acp/2006-6-863.

Kan men twee keer in dezelfde rivier stappen?

NANNE WEBER (UU EN KNMI)

Op 29 februari 2008 sprak ik mijn intrede uit als bijzonder hoogleraar Klimaatmodellering en Klimaatanalyse aan de Faculteit Geowetenschappen van de Universiteit Utrecht. Hier volgt een verkorte en bewerkte weergave van de uitgesproken tekst.

Als we eens bij zomaar een rivier gaan kijken, dan is er geen enkele reden om aan te nemen dat deze er morgen niet net zo bij zal liggen als vandaag. We vergeten het snel als het gisteren of eergisteren anders was. Gelukkig zijn er mensen die het opschrijven wanneer een rivier overstroomt of droogvalt. Zo weten we wat hetzelfde blijft en wat anders is.

Verandert het klimaat? Om deze vraag te beantwoorden, kijkt men meestal naar de wereldgemiddelde temperatuur. Het is niet zo dat je er in Nederland veel van merkt als het gemiddeld op aarde een

beetje warmer of kouder wordt, maar de wereldgemiddelde temperatuur is een goede graadmeter voor de forceringen die op het klimaat inwerken en daarom kijken we ernaar. Pas na 1880 wordt er op zoveel plaatsen op aarde gemeten, dat we een betrouwbaar beeld hebben van het verloop van de wereldgemiddelde temperatuur. Zo kunnen we vast stellen dat het klimaat niet constant is, maar variabel, en dat het warmer wordt op aarde – vooral sinds 1990.

Het is zeer waarschijnlijk dat de recente warme jaren toegeschreven kunnen wor-

den aan de toegenomen concentratie van kooldioxide (CO₂) en de andere broeikasgassen methaan en lachgas. Deze gassen komen van nature voor in de atmosfeer en samen met waterdamp zorgen ze ervoor dat de atmosfeer langgolvige straling uitzendt. Hierdoor is het aardoppervlak warmer dan het zonder dit zogenaamde broeikas effect zou zijn. De toename in CO₂ wordt veroorzaakt door de grootschalige verbranding van fossiele brandstoffen door de mens, die is begonnen tijdens de Industriële Revolutie. Ook methaan en lachgas nemen toe door menselijke activiteiten. De toe-