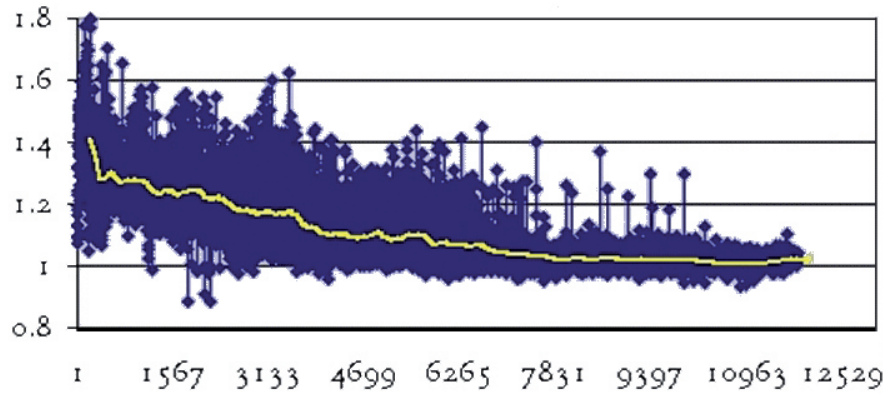


Mieke Reijmerink, Henk van Oel, Engel Andriessen, Leo Kroon, Heleen ter Pelk-wijk, en vele, vele anderen.

Zoals de wind waait..... het ga u allen goed.

Literatuur

Benschop H., 1996: Windsnelheidsmetingen op zeestations en kuststations: herleiding waarden windsnelheid naar 10-meter niveau. KNMI-TR-188.
 KNMI, 2006: Handboek waarnemingen.
 Stepek A. en Wijnant, I., 2010: Windkaart 1981-2010, Rapport in opbouw.
 Verkaik J.W., 2000 : Evaluation of two gustiness models for exposure correction calculations. J. Appl. Meteor. 39, 1613-1626.
 Verkaik J.W., 2006: On wind and roughness over land. Proefschrift Univ. Wageningen.
 Wever N., Groen G., 2009: Improving potential wind for extreme wind statistics. KNMI-WR-2009-02
 Wieringa J., 1976: An objective exposure correction method for average wind speeds measured at a sheltered location. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 102, 241-253.
 Wieringa J., Rijkooort P.J., 1983: Windklimaat van Neder-



Figuur 6. Verhouding tussen OWEZ-windsnelheden van 70 en 21 meter hoogte, gerangschikt van statistische naar onstabiele situaties. Simultane tien-minuten-data bij windsnelheden boven 4 m/s.

land. Staatsuitgeverij, Den Haag, 263 pp.
 Wieringa J., 1986: Roughness-dependent geographical interpolation of surface wind speed averages. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 112, 867-889.
 WMO, 1996: References World Meteorological Organization Guide to meteorological instruments and methods of observation. WMO-No.8, 6th edition.
 [1] www.klimaatatlas.nl
 [2] www.knmi.nl/samenw/hydra
 [3] www.senternovem.nl/mmfiles/Windkaart%20van%20Nederland_tcm24-201743.pdf
 [4] www.noordzeewind.nl

De koudegolven van de toekomst

HYLKE DE VRIES (KNMI)

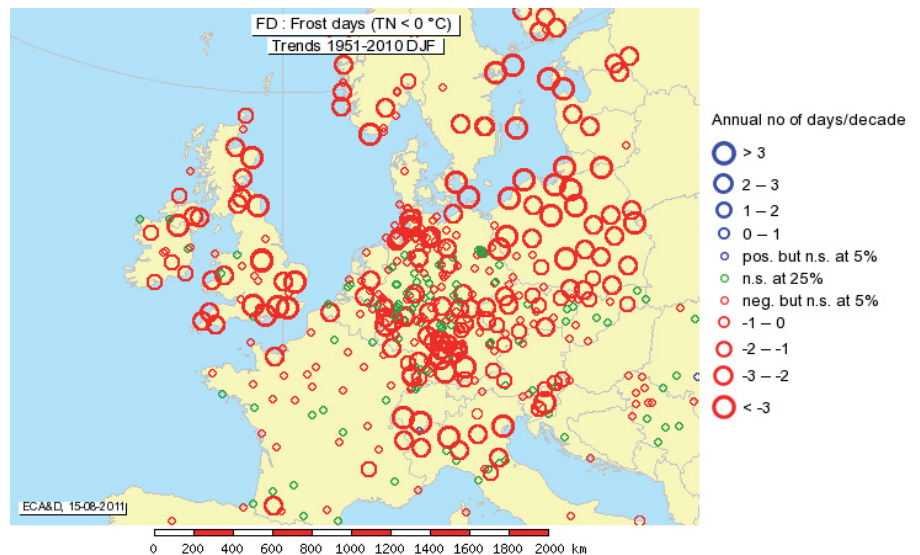
Klimaatstudies laten veelal zien dat in een globaal opwarmend klimaat de winters in Nederland ook aanzienlijk warmer zullen worden. Niet alleen gemiddeld zullen de winters warmer worden, strenge winters zullen ook minder vaak voorkomen. Over de precieze hoeveelheid opwarming verschillen de modellen onderling nog behoorlijk. In dit artikel bestuderen we klimaatmodellsimulaties op veranderingen van 'relatieve' kou.

Kou is een relatief begrip. Wat voor de één reeds als herfst aanvoelt, ervaart een ander nog als zomer. In Rusland klaagt men niet als het in de winter -15°C wordt; hier in Nederland komt de maatschappij praktisch tot stilstand. De menselijke ervaring en beleving van kou hangt af van het klimaat waarin men leeft. Daarom zullen we ook in de toekomst koude periodes blijven beleven. Helaas voor de schaatsers onder ons: voor ijsvorming heeft men alleen wat aan 'absolute' kou. Bij +1°C, hoe waterkoud het ook aanvoelt, krijgen we geen ijs.

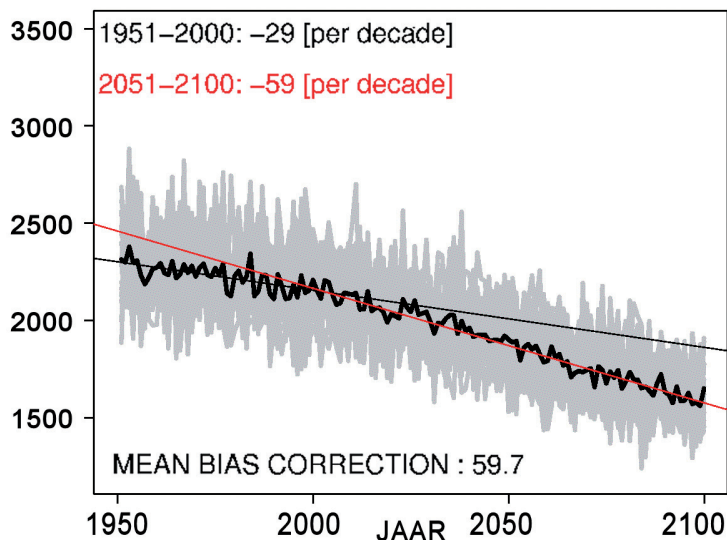
We hebben in de winter het aantal ijsdagen en koude dagen bijgehouden. Deze meten respectievelijk het aantal dagen dat de temperatuur de gehele dag of gemiddeld onder het vriespunt ligt. Het zogenaamde Hellmann getal is ook belangrijk. Dit is het getal dat je krijgt door de som van de gemiddelde etmaaltemperaturen onder nul bij elkaar op te tellen en het minteken weg te halen. Het Hellmann getal, dat in milde winters kleiner is dan 50, maar in zeer strenge winters kan oplopen tot 300, geeft een maat voor de totale hoeveelheid kou, of 'strengheid' van een winter [1]. Er zijn inmiddels vele waarnemingsstudies

verschenen die laten zien dat er in deze getallen reeds enige tijd een dalende trend zit, en dat niet alleen voor Nederland. Als voorbeeld dient figuur 1 die is ontleend aan [2]. Ook modellsimulaties, waarin mogelijke toekomstscenario's worden gerealiseerd met behulp van geavanceerde klimaatmodellen, laten vrijwel unaniem verdere afnamen zien van deze getallen. Een voorbeeld: in een vrij recente simu-

latie met het klimaatmodel van het Max Planck Instituut in Hamburg, het zogenaamde Essence ensemble (Sterl et al., 2008; zie tevens kader), wordt een toekomstig klimaat gesimuleerd dat niet al te sterk opwarmt. Toch schetst dit model reeds een somber beeld voor de toekomst van de ijspretliefebber: de koudste winters in de periode 2060-2100 zullen in Nederland niet kouder zijn dan de warmste winters uit de periode 1960-2000. Dit



Figuur 1. Lineaire trend in het aantal vorstdagen per decade (negatief betekent afname), berekend over de periode 1951-2010. Bron: eca.knmi.nl.



Figuur 2. Graaddagen (wintersom van 18-T, hier genomen over de maanden oktober tot en met maart) in Essence, berekend voor Nederland. Lineaire trends door de eerste en laatste 50 jaar van de door Essence beschreven periode zijn door middel van respectievelijk een zwarte en een rode lijn weergegeven. Een correctie heeft plaatsgevonden om het model klimaat beter bij de waarnemingen te laten passen. De grijze lijnen geven de individuele leden van het Essence ensemble weer, de zwarte lijn het ensemble-gemiddelde.

is geïllustreerd in figuur 2, waarin de zogenaamde graaddagen zijn berekend. Analooq aan het getal van Hellmann, worden graaddagen gedefinieerd als de som van 18-T over alle winterdagen (T = etmaalgemiddelde temperatuur). De 18 graden limiet komt vanuit de energiesector: dit is bij benadering de temperatuur waarop de kachels aan gaan.

Echter, de modelonzekerheid is nog groot. Sommige modellen geven een kleinere opwarming, andere een grotere. Dit maakt het moeilijk om precieze uitspraken te doen over de veranderingen die gaan plaatsvinden.

Relatieve kou

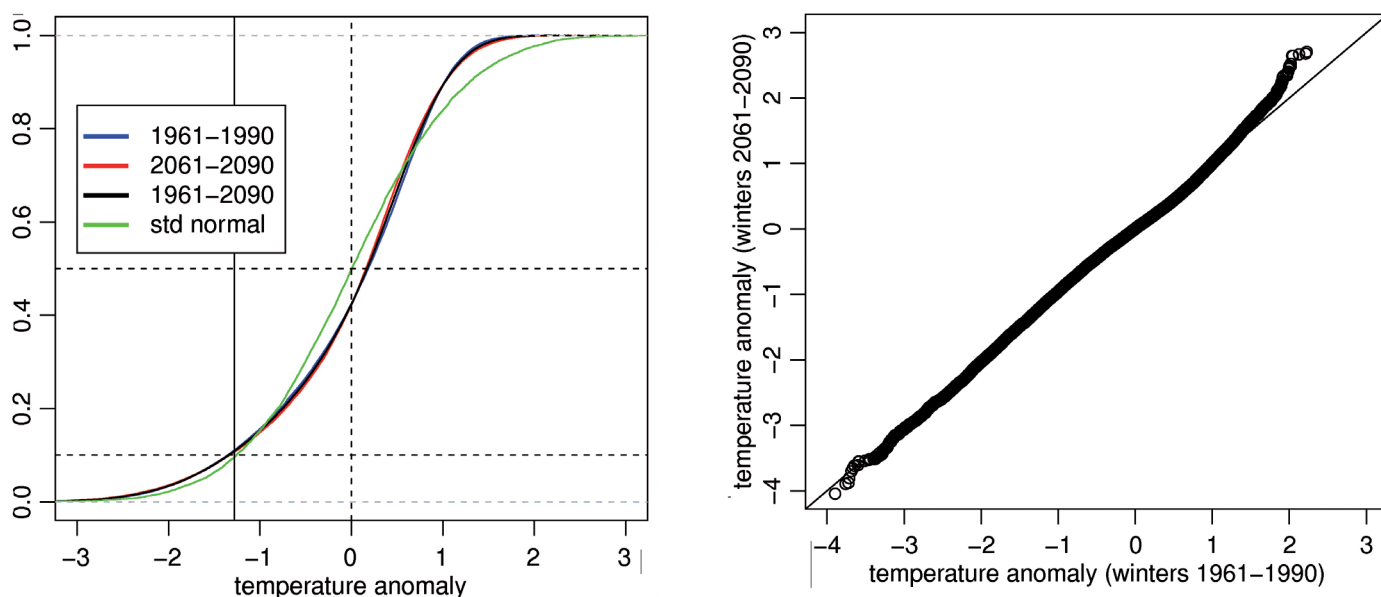
Maar dan terug naar het begin. Kou is een relatief begrip. De perceptie van kou hangt samen met het klimaat waarin wij leven. Hoe beschrijven klimaatmodellen ‘relatieve’ koudegolven? Met ‘relatief’ wordt hier bedoeld, relatief ten opzichte van het referentie temperatuurklimaat uit het betreffende klimaatmodel. Zo’n referentieklimaat kunnen we beschrijven met behulp van de waarschijnlijkheidsverdeling voor de temperatuur. De belangrijkste parameters van deze verdeling zijn de bekende begrippen gemiddelde μ en standaard afwijking σ . Een zogenaamde ‘normale’ verdeling ligt vast door deze twee parameters. Echter, de waargenomen (en gemodelleerde) waarschijnlijk-

heidsverdeling voor temperatuur is niet precies ‘normaal’. In de winter blijkt dat deze verdeling een relatief lange linkerstaart heeft: extreem lage temperaturen komen relatief vaker voor dan extreem warme dagen. De oorzaak hiervoor kan gevonden worden in atmosferische circulatie anomalieën (zoals blokkades) die een asymmetrische temperatuurreactie hebben.

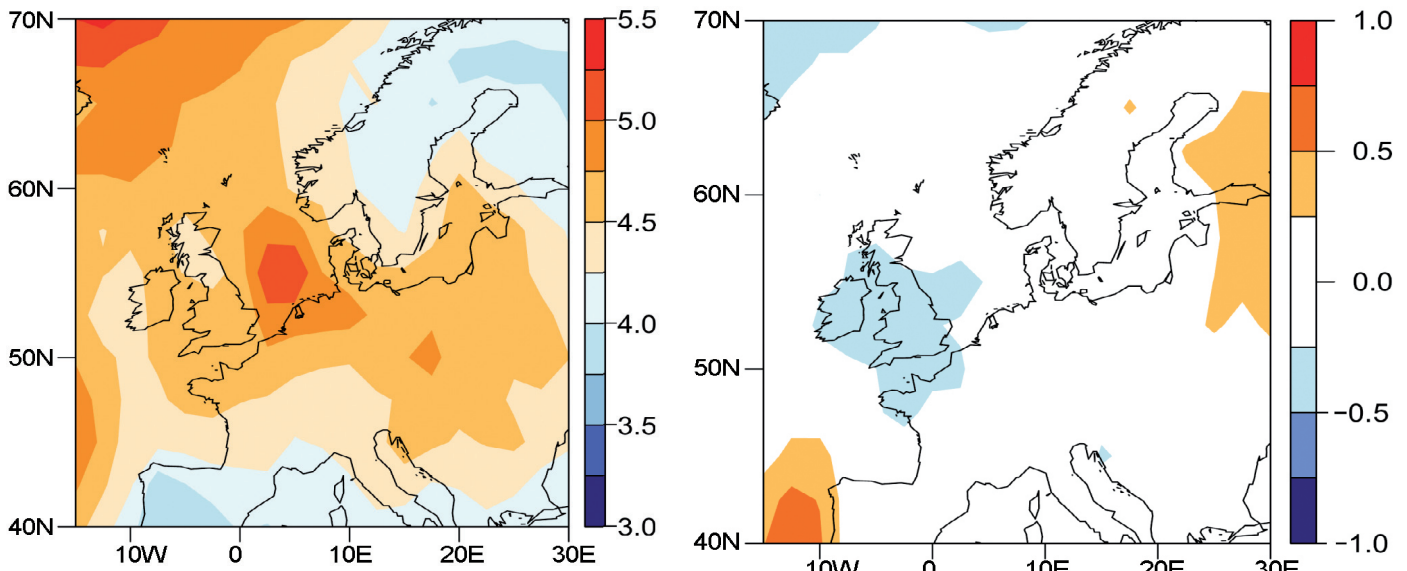
Het kan beargumenteerd worden dat μ en σ goeddeels onze perceptie van kou bepalen. We hebben allemaal een soort gevoel voor de gemiddelde temperatuur en de meest voorkomende variaties daaromheen. Het is daarom zinnig om een anomalie temperatuur (T') te definiëren

$$T'(x, t) := \frac{T(x, t) - \mu(x, t)}{\sigma(x, t)} \quad (1)$$

waarbij x de geografische positie en t de tijd is. Omdat we ons in een veranderend klimaat bevinden zullen μ en σ mee veranderen. We schrijven dus $\mu(t)$ en $\sigma(t)$, waarbij gekozen is om $\mu(t)$ en $\sigma(t)$ te bepalen als 21-jaars lopende wintergemiddelde waarden. Het zijn ook deze twee grootheden die in de klimaatmodellen de grootste veranderingen naar de toekomst laten zien. Het gemiddelde neemt toe, de standaard afwijking neemt af. De laatste afname is consistent met een substantiële afname van de gemiddelde oost-west temperatuurgradiënt (de zee warmt minder snel op dan het land), alsmede een lichte toename van de gemiddelde westcirculatie in de winter (de Vries et al., 2011) (zie tevens kader).



Figuur 3. (links) Empirische cumulatieve distributie functie voor Essence temperatuur anomalieën. Tevens wordt de normale cumulatieve distributie gegeven, die door (0,0.5) gaat. De verticale lijn markeert de positie $x = 1.2815$, het 10% niveau van de standaard normale verdeling. (rechts) Zogenaamde “quantile-quantile plot” waarbij de temperatuur anomalieën van de ene periode van Essence tegen die van de andere periode zijn uitgezet.



Figuur 4. Gemiddelde lengte van de koude periodes in Essence voor (links) winters 1961-1990 en (rechts) het verschil tussen de periode 2061-2090 en 1961-1990. Negatieve waarden betekenen een afname van de gemiddelde lengte. Als maat voor de bepaling van koude dagen diende vergelijking (2).

Nu terug naar de temperatuuranomalieën en de koudegolven. We definiëren het begrip 'koude dag' ('koudegolf' voor een opeenvolging van koude dagen) als een dag waarop de gemiddelde temperatuur niet hoger komt dan die behorend tot de koudste 10%, indien de temperatuurverdeling een normale verdeling zou zijn met gemiddelde $\mu(t)$ en standaard afwijking $\sigma(t)$. Deze aanpak geeft de mogelijkheid om extremen in heden en toekomst te vergelijken zonder de invloed van de (veranderende) extremen zelf. Er wordt hierbij aangenomen dat de extremen weinig invloed hebben op gemiddelde en standaardafwijking. In

een vergelijking betekent dit dat

$$T_{koud} := T' \leq -1.2815 \dots \quad (2)$$

De factor 1.2815... in vergelijking (2) is nodig om precies op de 10% koudste uit te komen in geval van een normale verdeling.

Resultaten

De vraag die we hier bestuderen is of de verdeling van de temperatuur anomalieën en koude dagen, gedefinieerd volgens vergelijking 2, in de toekomst zullen veranderen. Voor het antwoord gebruiken we opnieuw de data van het Essence ensemble (zie kader).

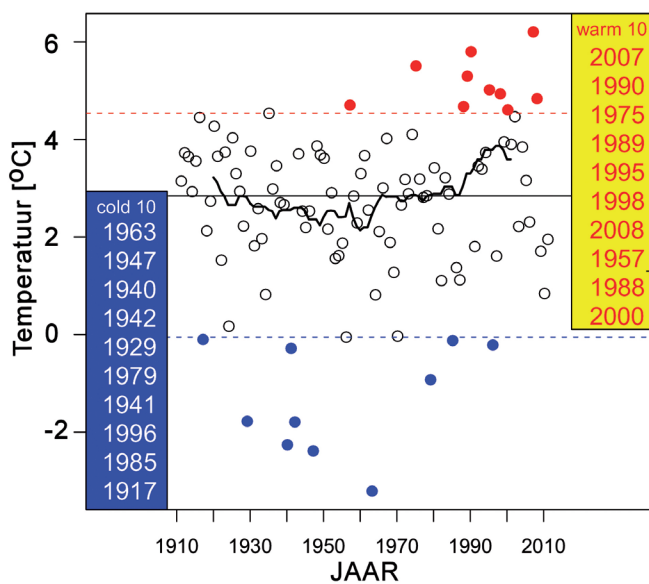
anders zijn dan die van een normale verdeling. Zo is er de relatief overbevolkte koude kant ($x \leq -1$). Wat nog sterker opvalt is het systematisch ontbreken van extreem warme dagen waarbij $x > 0.75$, door de sterke invloed van zee.

Door de geordende temperatuur anomalieën van de ene periode tegen die van de andere uit te zetten, verkrijgen we een zogenaamde "quantile-quantile plot" (qqplot). Voor identieke verdelingen vallen de punten bij benadering op de lijn $y=x$. Figuur 3 (rechts) laat zien dat voor Essence de temperaturen over een groot gebied vrijwel hetzelfde verdeeld zijn.

Als laatste berekenen we de gemiddelde duur van de koudegolven (een of meerdere koude dagen achter elkaar), waarbij we vergelijking (2) als definitie voor koude dagen hanteerden. De gemiddelde duur wordt bepaald door het totaal aantal koude dagen te delen door het totaal aantal koudegolven. Figuur 4 toont het resultaat voor de 1960-1999 periode van Essence als mede de geprojecteerde veranderingen in de toekomst. De gemiddelde lengte van een koudegolf varieert tussen 3 en 5 dagen. De geprojecteerde toekomstige veranderingen zijn erg klein. Voor grote delen van West en centraal Europa zijn de veranderingen kleiner dan 1/4 dag en mogelijk niet statistisch significant.

Conclusies

Wat vertellen de voorgaande resultaten ons? Ten eerste dat, althans volgens het Essence model hierboven beschreven, de statistiek van de koudegolven vrijwel niet wijzigt buiten een verandering van de klimaat parameters (gemiddelde en



Figuur 5. Gemiddelde winterwaarde voor CNT (Centraal Nederland Temperatuur, het gemiddelde van een aantal meetstations waaronder De Bilt, Winterswijk en Eindhoven. Voor meer details, zie elders in dit nummer). De horizontale lijnen geven het 10%, 50% (mediaan) en 90% niveau aan, berekend over de totale periode. Ook is de 20-jaars lopende mediaan weergegeven. De tabellen geven de top-10 koudste en warmste winters tussen 1911 en 2011. Data: bhlclim.knmi.nl.

Allereerst vergelijken we de empirische cumulatieve distributie functie (ecdf) voor verschillende perioden uit Essence (figuur 3 links). De ecdf geeft voor iedere x op de x -as de (empirisch bepaalde) kans dat de temperatuur lager is dan x (we delen simpelweg het aantal dagen waarop de temperatuur lager of gelijk aan x is door het totaal aantal dagen). Wat direct opvalt is dat het weinig verschil maakt welke periode we nemen, de lijnen vallen vrijwel over elkaar heen. Ook duidelijk is dat de ecdfs

standaard afwijking). De dynamica die aanleiding geeft tot temperaturen in de linker staart van de temperatuurverdeling lijkt vrijwel ongevoelig voor veranderingen van het klimaat. Na herschaling blijken de geteste statistische relaties geldig voor zowel huidig als toekomstig klimaat. Verdere analyse laat zien dat ook de terugkeertijden voor koudegolven van bepaalde lengte niet of nauwelijks veranderen, noch de distributie van eventlengtes. Ook andere klimaatmodellen lijken een dergelijke invariantie te in grote lijnen te reproduceren (in de Vries et al. (2011) bestuderen we onder andere ook een subset van de modellen die hebben bijgedragen aan het 4e IPCC rapport). Als dergelijke relaties ook geldig blijken voor de waarnemingen, betekent dit wellicht dat we meer over toekomstige kou kunnen leren door herschaling van huidige relaties. Als we de modellen vertrouwen, kunnen we ook een preciezere statistiek van koudegolven krijgen, door niet langer twee ver uit elkaar gelegen periodes op verschillen te bekijken, maar in plaats daarvan de gehele (anomalie) reeks te bestuderen.

De voorgaande conclusies nemen natuurlijk niet weg dat sneeuw- en ijspret in de toekomst minder zullen gaan worden, in ieder geval volgens de klimaatmodellen. Zoals al eerder gezegd hebben sneeuw en ijs niets te maken met relatieve kou, maar zijn zij gebonden aan vorst en temperaturen onder nul, een absolute maat voor kou. De waarnemingen lijken de trend die zichtbaar is in de modellen te ondersteunen (figuur 5). Als voorbeeld dient de recente winter van 2009-2010. Deze werd gekenmerkt door een zeer lange periode waarin de atmosferische circulatie zich in een geblokkeerde toestand bevond. Een groot deel van Nederland kende een langdurig sneeuwdek en 'vrijwel iedereen' ervoer de winter als een van de strengste van de eeuw. Desondanks komt de winter toch niet voor in de top tien van koudste winters van de afgelopen 100 jaar (figuur 5, winter 2009-2010 staat op plaats 16). Het was de strengste sinds 1996, het jaar van de laatst verreden Friese Elfstedentocht, een winter dus met een herhalingstijd van ongeveer 15 jaar. Niet exceptioneel dus in absolute zin. Wel in relatieve zin, want voor veel kinderen betekende dit de eerste ervaring met langdurige sneeuw sinds hun jeugd. Een klassiek voorbeeld dus waarbij de perceptie (=relatieve gevoel voor kou) niet goed overeen kwam met de 'absolute' werkelijkheid.

Het Essence ensemble

In het Essence project (Sterl et al., 2008) is met behulp van het klimaatmodel van het Max Planck Instituut in Hamburg (ECHAM MPI-OM) een reeks van 17 simulaties van het klimaat over de periode van 1950-2100 uitgevoerd. Voor de periode na 2000 (de toekomstprojecties) is hierbij gebruik gemaakt van een bepaald emissiescenario voor broeikasgassen (A1b). Dit emissie-scenario leidt tot een geleidelijke globale opwarming van enkele graden. Alle 17 leden van dit ensemble zijn gemaakt met hetzelfde model in dezelfde modelconfiguratie, alleen de begincondities zijn gevarieerd. Het chaotisch karakter van de atmosferische circulatie leidt ertoe dat de verschillende leden als onafhankelijke realisaties beschouwd kunnen worden.

Nawoord: de KNMI scenario's

Het KNMI heeft de afgelopen jaren diverse scenario's ontworpen voor de toekomst van het klimaat in Nederland (van den Hurk et al., 2006; Klein Tank en Lenderink, 2009). De volgende scenario's zullen verschijnen in 2013. Scenario's zijn consistente en plausibele projecties naar de toekomst. De twee parameters die de meeste invloed uitoefenen op het klimaat in Nederland zijn temperatuur en circulatie. Op basis van die twee parameters en het vlak dat ze opspannen in de mogelijkhedenruimte, zijn er 4 plausibele scenario's geformuleerd waarbij het klimaat enigszins (+1°C) of sterker (+2°C) opwarmt tot 2050, en waarbij wel of geen verandering in de circulatie optreedt. De resultaten voor het Essence model vallen onder de categorie substantieel warmer

Standaardafwijking van de temperatuur

De instantane temperatuur wordt bepaald door lokale processen (straling e.d.) en transportprocessen. In de temperatuurbalans vergelijking (typische vorm met alle processen) is een belangrijke rol weggelegd voor temperatuuradvectie. Temperatuuradvectie is de temperatuurverandering die het gevolg is van lucht die ons bereikt (via de wind) maar die een andere temperatuur heeft. Als het in het oosten kouder is dan bij ons, dan zal het geleidelijk kouder worden als de wind uit het oosten waait. De modellen laten zien dat de horizontale temperatuurverschillen in de toekomst geleidelijk zullen afnemen (het land warmt sneller op dan de zee). Deze afname leidt direct tot een afname van de standaard afwijking van temperatuur. Voor een aantrekkende gemiddelde westcirculatie geldt een dergelijke redenering: met het toenemen van de westenwind zal de wind ook vaker van zee komen. De temperatuurverschillen boven zee zijn stukken kleiner dan die boven land, en dus zal ook bij toenemende westenwind de temperatuur standaard afwijking afnemen.

De meeste klimaatmodellen laten voor de toekomst een (lichte) toename zien van de gemiddelde sterkte van de westcirculatie. De afgelopen winters hebben echter overtuigend laten zien dat de (natuurlijke) variabiliteit van het klimaat systeem thans (nog) zo groot is dat lange perioden met oostenwind zeker nog tot de mogelijkheden behoren. Toch heeft de recente opwarming van Europa in zekere zin al zijn 'tol' geëist: de 2009-2010 winter was dan qua circulatie karakteristiek en persistentie wel te vergelijken met die van 1962-1963, maar kwam daar qua 'absolute' kou toch bij lange na niet bij in de buurt (Cattiaux et al., 2010).

(+1.5°C) met tevens een verandering van circulatie. De onzekerheid tussen de modellen wat betreft de toekomstige veranderingen van 'absolute' kou is nog erg groot. Deze onzekerheid komt voor een deel voort uit onzekerheden in toekomstige waarden voor de twee centrale momenten van de temperatuur distributiefunctie. Wat dat betreft lijkt er meer eensgezindheid binnen de modellen te zijn over de veranderingen van relatieve kou (de Vries et al., 2011).

Het onderzoek waarover hier gerapporteerd is, is mede mogelijk gemaakt door GasTerra en NAM.

Literatuur

- J. Cattiaux, R. Vautard, C. Cassou, P.Yiou, V. Masson-Delmotte, and F. Codron. Winter 2010 in Europe: A cold extreme in a warming climate. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L20704, 2010. 10.1029/2010GL044613.
- H. de Vries, R. J. Haarsma, and W. Hazeleger. Western European cold spells in current and future climate. *Geophys. Res. Lett.*, in review, 2011.
- B. van den Hurk, A. M. G. Klein Tank, G. Lenderink, and et al. KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. Technical report, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), 2006.
- A. M. G. Klein Tank and G. Lenderink. Klimaatverandering in Nederland; Aanvullingen op de KNMI '06 scenario's. Technical report, KNMI, De Bilt, 2009.
- A. Sterl, C. Severijns, and H. Dijkstra et al. When can we expect extremely high surface temperatures? *Geophys. Res. Lett.*, 35: L14703, 2008. 10.1029/2008GL034071.
- A. van Ulden, G. J. van Oldenborgh, and G. van der Schrier. The construction of a central Netherlands temperature. Technical Report WVR 2009-03, KNMI, 2009.

[1] Meer informatie over het koudegetal van Hellmann kunt u vinden op <http://www.knmi.nl/cms/content/27255/koudegetal>.

[2] [eca.knmi.nl](http://www.knmi.nl)