

Hangt het warme weer de laatste tijd in Nederland samen met het versterkte broeikaseffect?

Geert Jan van Oldenborgh* Gerbrand Komen*‡

31 augustus 2001

De gemiddelde temperatuur was de laatste tien jaren zowel in Nederland als gemiddeld over de hele wereld hoger dan zo'n dertig jaar geleden. De stijging van de wereldgemiddelde temperatuur is door het IPCC in het Third Assessment Report (IPCC, 2001) met vrij grote zekerheid mede toegeschreven aan de toenemende concentratie broeikasgassen. Door middel van een statistische analyse is onderzocht in hoeverre de waargenomen opwarming in Nederland aan de mondiale opwarming kan worden gerelateerd. Daarbij is gevonden dat er een simpele lineaire correlatie bestaat, zowel voor de jaargemiddeldes als voor de afzonderlijke seizoenen. Ook in landen om ons heen is deze correlatie aanwezig. Binnen de aannames van dit model blijkt dat de helft van de warmte van de jaren negentig gerelateerd is aan de mondiale opwarming, en de andere helft als een toevallige uitschieter moet worden gezien. Aannemend dat dit verband ook de komende tien jaar geldig blijft, kunnen we de IPCC voorspelling van de wereldgemiddelde temperatuur vertalen in een voorspelling voor de temperatuur in Nederland gemiddeld over de periode 2001–2010: ongeveer het niveau van de jaren negentig met een onzekerheidsmarge van circa 0.4°C ten gevolge van lokale klimaat-schommelingen.

1 Inleiding

Klimaatveranderingen

Natuurlijke klimaatvariabiliteit en klimaatveranderingen zijn van alle tijden. Zo hebben onder meer grote vulkaanuitbarstingen, El Niño's en zonneactiviteit invloed op de wereldgemiddelde temperatuur. Tegenwoordig is de menselijke invloed een factor van toenemend belang. Bij de studie van deze klimaatveranderingen maakt men onderscheid tussen detectie en attributie (Tett et al., 1998). Detectie is de statistische vaststelling dat een bepaalde klimaatfluctuatie niet goed binnen een bepaald verwachtingspatroon past. Men maakt bijvoorbeeld een schatting van de natuurlijke variabiliteit, op grond van verleden waarnemingen en modelstudies, en laat dan zien dat het niet waarschijnlijk is dat de opgetreden veranderingen natuurlijk zijn. Attributie is het toeschrijven van een bepaalde waargenomen klimaatverandering aan een bepaalde oorzaak. Van de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur in de twintigste eeuw is in diverse studies vastgesteld dat deze groter is dan dat men zou verwachten op grond van alleen natuurlijke variabiliteit. Tevens is er een aantal studies uitgevoerd waarin zeer aannemelijk gemaakt is dat de opgetreden temperatuurstijging van de laatste

* KNMI

‡ IMAU

decennia voor een deel aan de mens toe te schrijven is. Daarbij is onder andere een vergelijking gemaakt van waargenomen patronen van verandering met gemodelleerde patronen. Pogingen om de waargenomen veranderingen te verklaren met behulp van natuurlijke oorzaken zoals interne variabiliteit, veranderingen in de frequentie van vulkaanuitbarstingen en variaties in de sterkte van zonneforcering waren niet succesvol. De vergelijkingen waren wel succesvol wanneer rekening werd gehouden met antropogene factoren, zoals de veranderende concentratie van broeikasgassen en atmosferische aerosolen.

Regionale klimaatverandering

Een onderwerp van groot belang is dat van de attributie en detectie van regionale klimaatveranderingen. De studie van deze regionale effecten is echter moeilijk. In de eerste plaats is de natuurlijke variabiliteit van een lokale temperatuurreeks, zoals die van De Bilt, veel groter dan in de wereldgemiddelde temperatuur. Verder is het klimaatsysteem niet-lineair. Er kunnen allerlei onverwachte effecten optreden. Zo zou het in De Bilt koeler kunnen worden terwijl de wereldgemiddelde temperatuur toeneemt door een door het versterkte broeikas-effect geïnitieerde plotselinge verzwakking van de Golfstroom en de Noord-Atlantische Drift die warm zeewater naar Europa brengen. Om na te gaan of dit soort effecten een rol speelt zou men in principe gebruik kunnen maken van gekoppelde modellen van het atmosfeer-oceaanstelsel. Deze zijn echter nog niet erg goed in het berekenen van details. Zelfs met de enorme computercapaciteit van tegenwoordig is het onmogelijk om de modellen in voldoende hoge ruimtelijke resolutie te draaien. Daarom is ons onderzoek gebaseerd op waarnemingen: aan de hand van observaties hebben we nagegaan in hoeverre er in het verleden een simpel verband is geweest tussen de wereldgemiddelde temperatuur en de lokale temperatuur in Nederland.

In Meteorologica hebben van Mourik (1999) en Schuurmans en van den Dool (2001) al eerder een verband proberen te leggen. Beiden splitsen de temperatuur op in een circulatieafhankelijk deel en een circulatieonafhankelijk deel, met behulp van Großwetterlagen resp. geconstrueerde analogen. Wij hopen hier in een toekomstige studie op terug te komen. Eerst onderzoeken we de opwarming echter zonder een mechanisme te specificeren. Het is namelijk ook goed mogelijk dat het versterkte broeikas-effect zich zou uiten in een verandering in de frequentie waarmee bepaalde klimaatpatronen voorkomen in plaats van een uniforme opwarming (Corti et al., 1999).

Opzet van de analyse

In het eerste deel van dit artikel zullen we onderzoeken in hoeverre de jaar- en seizoen-gemiddelde temperatuurvariaties lokaal in Nederland in de pas lopen met of los staan van de wereldgemiddelde temperatuur. We zullen zien dat de temperatuur in de Bilt correleert met de wereldgemiddelde temperatuur, zeker als je over tien jaar middelt. Bovendien blijkt dit verband vrijwel hetzelfde is in alle vier seizoenen, en ook buiten Nederland in een groot gedeelte van Europa opgaat. De temperatuur in Nederland is goed te beschrijven als een constante plus een term evenredig met de wereldgemiddelde temperatuur plus bijna witte ruis. Aangezien de toename van de wereldgemiddelde temperatuur deels is toe te schrijven aan menselijk handelen, is dan ook de attributie van de (gemakkelijk te detecteren) opwarming van Nederland te maken.

In het tweede deel geven we twee toepassingen van ons simpele model. Eerst schatten we hoeveel van de anomale warmte in de jaren '90 te verklaren is met de opwarming van de aarde, en hoeveel daarvan los staat. Daarna geven we een klimaatverwachting voor de volgende tien jaar, onder de aanname dat onze statistische relatie ook in een verande-

rend klimaat geldig blijft. Dat betekent dat we onder andere aannemen dat de NAO ongecorreleerd blijft met de wereldgemiddelde temperatuur en niet-lineaire effecten zoals het stilvallen van de Golfstroom uitblijven.

2 Verband tussen de lokale temperatuur met de wereldgemiddelde temperatuur

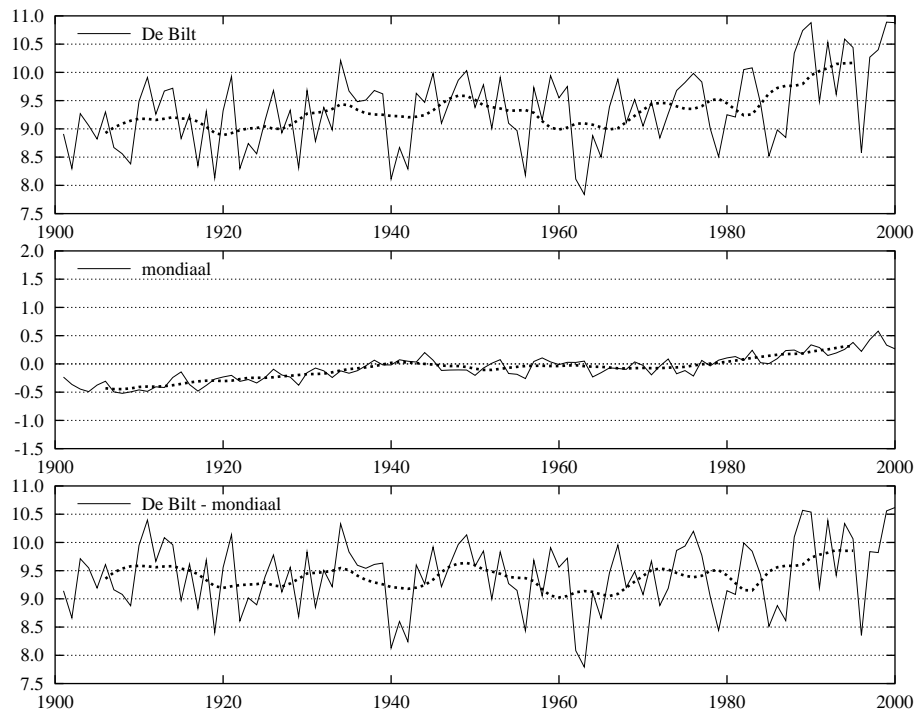
Data

Voor de wereldgemiddelde temperatuur gebruiken we de vrij beschikbare reeks van Jones (1994). Deze reeks, die ook gebruikt is in de KNMI klimaatrapportage 1999 (Können, 1999), geeft de anomalieën ten opzichte van 1961–1990. De temperatuur in Nederland benaderen we door de temperatuur in De Bilt, waarvan de maandgemiddelde meetreeks vanaf 1901 ook beschikbaar is (op www.knmi.nl/onderzk/applied/kd/en/data/tg_260_month.txt). Deze reeks is niet homogeen. We nemen aan dat de inhomogeniteiten veroorzaakt door veranderde meetprocedures, meetopstelling en meetomgeving over de afgelopen eeuw te verwaarlozen zijn voor de analyse in dit artikel. In de KNMI Klimaatrapportage (Können, 1999) worden als de belangrijkste effecten verplaatsingen van de meethut in 1950 en 1960 en verstedelijking genoemd. Het effect van de eerste verplaatsing is het grootste, rond de 0.4°C in de zomer. We hebben de analyse overgedaan met deze correctie, de conclusies veranderen dan nauwelijks. Het effect van de verstedelijking van de omgeving van De Bilt wordt op 0.2...0.3°C geschat, hier komen we later op terug.

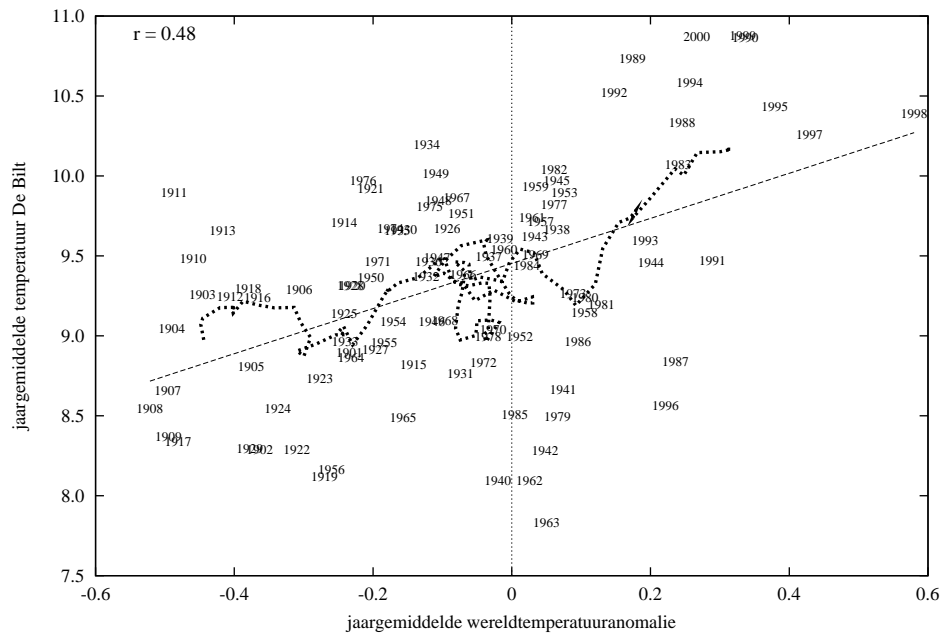
We vergelijken alle klimaatveranderingen van de afgelopen 100 jaar, en niet alleen de opwarming van de afgelopen 30 jaar, om een betere signaal/ruis verhouding te krijgen. We beschouwen de hele eeuw als statistisch homogeen terwijl dat zeker niet zo is. De langzame (tienjarige, decadale) variaties, voor zover begrepen, zijn namelijk geassocieerd met verschillende fysische mechanismen (vulkanen, zon, broeikasgassen, interne variabiliteit). We nemen echter aan dat de fout die daardoor geïntroduceerd wordt verwaarloosbaar is, dus dat het klimaatstelsel bijvoorbeeld ongeveer tegengesteld reageert op afkoeling door vulkaanstof en opwarming door broeikasgassen (van Ulden en van Dorland, 2000).

Jaargemiddelde temperatuur in Nederland

De jaargemiddelden en een lopend tienjaarsgemiddelde van deze twee reeksen zijn onder elkaar gezet in Figuur 1. De tienjarige gemiddelden (stippeltjeslijnen) zijn op het oog duidelijk gecorreleerd: een stijging van 1900 tot 1940–1950, dan een (lichte) daling tot 1970, en weer een sterkere stijging tot 1995. De correlatiecoëfficiënt is 0.48, dus variaties in de wereldgemiddelde verklaren een kwart van de variantie. Dit is niet alleen vanwege de stijging: zonder trend is de correlatie nog steeds positief (0.26). De significantie van deze getallen is minder makkelijk te berekenen. Ten eerste is de temperatuur in De Bilt zelf een deel van het wereldgemiddelde. Heel zwaar weegt dit echter niet: het gebied van 50° × 20° waarvan de ruis in het jaargemiddelde meefluctueert met die in de Bilt is slechts 2.5% van het aardoppervlak. Een 1°C hogere temperatuur in De Bilt door lokale factoren geeft dus slechts een verhoging van de orde van 0.025°C in de wereldgemiddelde temperatuur. Veel vervelender is dat het aantal vrijheidsgraden sterk afhangt van de seriële correlaties: we weten niet hoeveel werkelijk onafhankelijke veranderingen er hebben plaatsgevonden.



Figuur 1: De jaargemiddelde wereldtemperatuur (anomalieën t.o.v. 1961–1990) over de laatste eeuw, de temperatuur in De Bilt, en het verschil daartussen. De gestippelde lijn geeft een tienjarig lopend gemiddelde.



Figuur 2: De jaargemiddelde temperatuur in De Bilt tegen de jaargemiddelde wereldtemperatuur. De gestippelde lijn geeft een tienjarig lopend gemiddelde, de rechte lijn is de aanpassing $T_{\text{DeBilt}} = 1.41T_{\text{mondiaal}} + 9.45$.

n [jaar]	$\sigma\langle T_{\text{DeBilt}} \rangle_n$ [°C]	$\sigma\langle T_{\text{DeBilt}} - T_{\text{mondiaal}} \rangle_n$ [°C]	$\sigma\langle \dots \rangle_1 / \sqrt{n}$ [°C]	$\sigma\langle T_{\text{DeBilt}} - 1.41 T_{\text{mondiaal}} \rangle_n$ [°C]	$\sigma\langle \dots \rangle_1 / \sqrt{n}$ [°C]
1	0.68	0.61	0.61	0.60	0.60
5	0.41	0.29	0.27	0.27	0.27
10	0.37	0.21	0.19	0.17	0.19
20	0.35	0.17	0.14	0.14	0.13

Tabel 1: Standaarddeviatie van de temperatuur in De Bilt en van het verschil daarvan met de wereldgemiddelde temperatuur, gemiddeld over niet-overlappende 1 tot 20 jaar intervallen. De vierde kolom geeft een schatting van de standaarddeviatie als we aanemen dat de ruis wit is. De twee laatste kolommen geven de ruis als de optimale relatie, vgl (3), gebruikt wordt.

Twee stochastische modellen

Een andere manier om het probleem te benaderen is om de temperatuur te schrijven als een stochastisch proces. We vergelijken twee modellen:

$$T_{\text{DeBilt}} = \text{constante} + \text{ruis} \quad (1)$$

$$T_{\text{DeBilt}} = T_{\text{mondiaal}} + \text{constante} + \text{ruis} . \quad (2)$$

In onze modellen nemen we aan dat de ruis wordt beschreven door een normale verdeling met gemiddelde nul en een gegeven standaarddeviatie en autocorrelatie. We hebben waarnemingen gebruikt om de standaarddeviaties te bepalen. De resultaten staan in Tabel 1 voor één tot twintig-jaars gemiddelden van de temperatuur. We zien dat we aanmerkelijk minder interne variatie hoeven aan te nemen op langere tijdschalen als we de ruis definiëren ten opzichte van de wereldgemiddelde temperatuur in plaats van een constante (3^e kolom). De ruis is dan vrijwel wit: de standaarddeviatie neemt bijna af met de wortel van het aantal jaren (4^e kolom). Model (2) is dus beter, omdat we geen langzame ruis hoeven aan te nemen die toevallig honderd jaar lang in de pas liep met de mondiale opwarming.

Natuurlijk is een alternatief model

$$T_{\text{DeBilt}} = Bt + \text{ruis}$$

met deze gegevens niet uit te sluiten: de ruistermen zijn dan bijna even klein als in model (2). Zo'n lineaire trend zou een 100-jaar stukje van onbegrepen langzame fluctuaties kunnen zijn die deze eeuw toevallig gelijk op lopen met de wereldgemiddelde temperatuur. In dit artikel hebben we dit niet verder onderzocht omdat er op dit moment geen plausible verklaring is voor zo'n trend, terwijl het bestaan van een connectie tussen de De Bilt temperatuur en de wereldgemiddelde temperatuur veel meer voor de hand ligt.

Signaal/ruis verhouding

Met Tabel 1 is ook een signaal/ruis verhouding te berekenen. Het signaal is het verschil tussen het begin en einde van de eeuw: 1.3°C in De Bilt. De standaardafwijking van dit verschil is $\sqrt{2}$ keer de standaarddeviatie van de n -jarige gemiddelden. Jaargemiddeld is de signaal/ruis verhouding dus ongeveer één (regel 1, Tabel 1): de gemiddelde temperatuur van een enkel jaar valt niet aan de opwarming van De Bilt toe te schrijven. Over tien jaar gemiddeld is de opwarming echter 2.5 keer groter dan de onzekerheid daarin. Hiermee is de detectie van de op het oog duidelijke opwarming gekwantificeerd.

Een iets beter model

Als we het verband tussen de temperatuur in De Bilt en de wereldgemiddelde temperatuur door een rechte lijn met willekeurige helling beschrijven, vinden we een helling van 1.41 ± 0.52 . Dat wil zeggen: voor elke graad opwarming in de wereld is het in De Bilt met 95% betrouwbaarheid tussen de 0.9 en 1.9 graad warmer geworden (we geven altijd twee standaarddeviatie foutengrenzen). Dit komt waarschijnlijk doordat het land gemiddeld sneller opwarmt dan de oceaan. Merk op dat model (2), helling is 1, nog net binnen de 95% foutengrenzen ligt, zodat dit model met dit criterium niet verworpen kan worden. Echter, de optimale relatie wordt gegeven door

$$T_{\text{DeBilt}} = AT_{\text{mondiaal}} + \text{constante} + \text{ruis} \quad (3)$$

met $A = 1.41 \pm 0.52$ voor de jaargemiddelde temperatuur.

De verschillende seizoenen in Nederland

We kunnen dezelfde analyse ook uitvoeren voor elk van de meteorologische seizoenen, die ieder volledig andere patronen van variabiliteit vertonen. Als we de seizoensgemiddelde temperatuur in De Bilt tegen de seizoensgemiddelde wereldgemiddelde temperatuur uitzetten blijkt de opwarming van de afgelopen eeuw in alle seizoenen hetzelfde patroon te hebben gevolgd. In alle seizoenen is de helling rond de anderhalve graad per graad. In de lente (1.43 ± 0.65), zomer (1.57 ± 0.73) en herfst (1.69 ± 0.79) is de helling meer dan vier standaarddeviaties van nul verwijderd. Alleen in de winter (helling 1.2 ± 1.3) is het verband niet duidelijk.

NAO

Een belangrijk deel van de ruis in de winter kunnen we parametriseren met de sterkte van de Noord-Atlantische Oscillatie (NAO), die in het winterhalfjaar (november–maart) de temperatuur in Nederland beïnvloedt (Können, 1999). De IJsland-Azoren NAO index (Jones et al., 1997) is over de afgelopen eeuw niet met de wereldgemiddelde temperatuur gecorreleerd: aan het begin van de eeuw, toen het wereldgemiddeld door een natuurlijke variatie vrij koud was, stond de NAO juist heel hoog. We kunnen nu voor december, januari en februari lineaire relaties tussen de NAO index en de maandgemiddelde temperatuur in De Bilt vinden. Met de helling van deze lijnen en de maandwaarde van de NAO index berekenen we voor elke maand een ‘NAO-loze temperatuur’ voor NAO index nul. Het verband tussen deze temperatuur en de wereldgemiddelde temperatuur is veel duidelijker, daar de helling (1.26 ± 0.60) nu vier in plaats van twee standaarddeviaties van nul afzit.

Signaal/ruis verhouding in de seizoenen

We hebben ook voor de seizoensgemiddelden de signaal/ruis verhouding voor de temperatuur gemiddeld over een aantal (5, 10, 20) opeenvolgende jaren bestudeerd. De resultaten staan in Tabel 2. De toename in het signaal, de wereldgemiddelde temperatuur, is voor alle seizoenen vrijwel hetzelfde. Voor de ruis zien we in de lente, zomer en herfst vrijwel hetzelfde verband als bij de jaargemiddelden: de standaarddeviaties van de jaar-op-jaar fluctuaties rond de wereldgemiddelde temperatuur zijn van dezelfde orde van grootte als de opwarming. Over tien jaar gemiddeld zijn de fluctuaties een factor twee tot drie kleiner dan de wereldgemiddelde opwarming. Voor de winter ligt het anders: zelfs over tien jaar gemiddeld zijn de fluctuaties 0.54°C , dus je kan tien jaren met zachte winters niet aan een stijging van de wereldgemiddelde temperatuur relateren; pas bij 20-jaar gemiddelden beginnen afwijkingen significant te worden; dan is de ruis 0.33°C .

n [jaar]	$\sigma(T_{\text{DeBilt}})_n$ [°C]				$\sigma(T_{\text{DeBilt}} - T_{\text{mondiaal}})_n$ [°C]			
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
1	1.63	0.89	0.91	0.95	1.59	0.82	0.85	0.89
5	0.72	0.49	0.51	0.55	0.68	0.38	0.40	0.43
10	0.61	0.48	0.44	0.43	0.54	0.36	0.28	0.27
20	0.42	0.41	0.37	0.43	0.33	0.29	0.18	0.23

Tabel 2: Standaarddeviatie van de temperatuur in De Bilt ten opzichte van de wereldgemiddelde temperatuur in de winter, lente, zomer en herfst, gemiddeld over 1 tot 20 jaar intervallen.

De jaargemiddelde temperatuur op andere plaatsen

Ook voor de rest van de wereld hebben we gekeken hoe de lokale temperatuur met de wereldgemiddelde temperatuur samenhangt. Voor elk roosterpunt in de dataset van Jones & Parker (2m temperatuur boven land, SST boven zee) is de regressiecoëfficiënt in vergelijking (3) voor het jaargemiddelde berekend en in Figuur 3 uitgezet. Het gemiddelde van dit plaatje moet per definitie één zijn: het gemiddelde van alle roosterpunten is nu eenmaal de wereldgemiddelde temperatuur.

Opvallend is dat de temperatuur in de meeste roosterpunten ongeveer even sterk gestegen is als de wereldgemiddelde temperatuur: 75% van het plaatje heeft een helling tussen de 0.5 en 2. De uitzonderingen zijn voor een goed deel begrepen. Canada en Rusland warmen sneller op door de ijs-albedo feedback. El Niño's zijn duidelijk terug te vinden in de wereldgemiddelde temperatuur, dus is ook het El Niño gebied warmer dan gemiddeld bij een hogere temperatuur. (Op langere tijdschalen is dit effect vrijwel afwezig. Rond 1900 was de tien-jaar gemiddelde NINO3 index ook hoog, terwijl de wereldgemiddelde temperatuur juist laag was.)

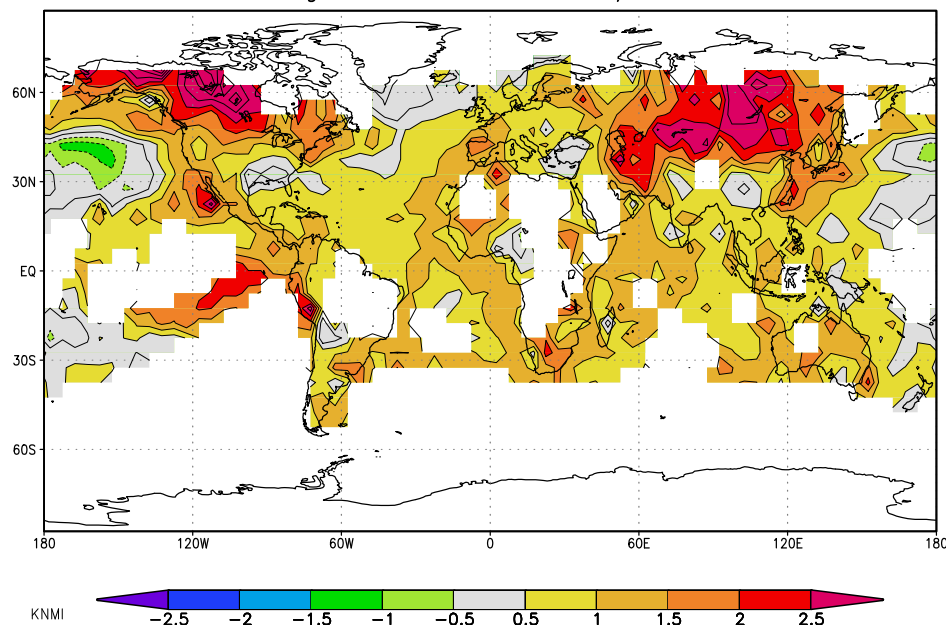
Op de noordelijke Stille Oceaan is een decadale oscillatie (de PDO) actief, waardoor het gebied rond 40°N, 160°W van 1950 tot 1997 afkoelde (en de kust van Noord-Amerika tegelijkertijd opwarmde). Aangezien data van voor 1950 hier schaars zijn geeft dit een plaatselijk negatief verband met de wereldgemiddelde temperatuur die over dezelfde periode toenam. De afwezigheid van een opwarming in de Noordwest-Atlantische Oceaan zou misschien verklaard kunnen worden door de uitzonderlijk diepe menglaag in dit gebied, die de effectieve warmtecapaciteit van de oceaan heel hoog maakt.

3 Analyse en voorspelling

De jaren negentig

Nu we een verband tussen de wereldgemiddelde temperatuur en de temperatuur in De Bilt gevonden hebben kunnen we dit gebruiken om de warmte van de jaren negentig op te splitsen in een component gerelateerd aan de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur en een component ruis, dat wil zeggen de waarde van deze (vooral nog) onvoorspelbare lokale fluctuaties in de jaren negentig. In de onderste grafiek van Figuur 1 is te zien dat deze fluctuaties positief waren. Als referentieperiode gebruiken we de officiële 1961–1990 normalen: de anomalieën ΔT zijn ten opzichte hiervan. De relevante getallen staan in Tabel 3, zowel jaargemiddeld als per seizoen. Ter vergelijking hebben we ook de gemiddelden over de hele eeuw gegeven. De verschillen tussen de eeuwgemiddelden en de WMO normalen voor de periode 1961–1990 zijn klein. De warmte van de jaren negentig, gemiddeld 0.81°C boven normaal, is daarom des te opmerkelijker.

slope Jan–Dec averaged global temperature index
with Jan–Dec averaged Jones & Parker SST/T2m anom 1900–1999



Figuur 3: De evenredigheidsconstante tussen de lokale jaargemiddelde temperatuur en de wereldgemiddelde temperatuur over de laatste eeuw (Data: Jones & Parker). De witte gebieden hebben minder dan 34 jaar data.

Om de bijdrage van de mondiale temperatuurstijging aan de opwarming van De Bilt te bepalen hebben we vgl (3) gebruikt. Voor anomalieën valt de constante term weg. We hebben $\Delta T_{(1991-200)}^{\text{mondiaal}}$ ten opzichte van 1961–1990 uit de reeks van Jones bepaald. De gevonden waarde is $+0.29^{\circ}\text{C}$, en uitgesplitst per seizoen: DJF $+0.33$, MAM $+0.31$, JJA $+0.29$ en SON $+0.23$. Voor De Bilt zijn de resultaten weergegeven in Tabel 3. Voor de jaargemiddelde temperatuur is de term gerelateerd aan de mondiale opwarming slechts $+0.41 \pm 0.15^{\circ}\text{C}$. In dit gedeelte is volgens het IPCC de menselijke invloed zichtbaar. De andere helft is ruis: een lokale opwarming die binnen ons model niet aan de mondiale opwarming gerelateerd kan worden. De ruisterm is 2.4 ± 0.9 keer zo groot als de 10-jaar standaarddeviatie uit Tabel 1. Dit is een behoorlijke afwijking: de kans op zo'n grote of grotere toevallige fluctuatie is slechts 3%. Mogelijk is dit een gevolg van het feit dat we de ongecorrigeerde temperatuurreeks van De Bilt gebruiken. Met een verstedelijkingscorrectie van $0.1 \dots 0.2^{\circ}\text{C}$ zou dit $10 \dots 30\%$ worden.

Verdeeld over de seizoenen krijgen we het volgende beeld. Van de 1.3°C opwarming in de lente is slechts ongeveer een derde gerelateerd aan de mondiale opwarming. In de zomer is het ruim de helft, terwijl we in de herfst juist te maken hebben gehad met een lokale relatieve afkoeling. In de winter komen we ook op een 50/50 verdeling uit, echter met een relatief grote onzekerheid. Gebruik makend van de analyse van het effect van de NAO op de wintertemperatuur in 2.2 kunnen we de onzekerheid verkleinen. De NAO index was flink hoger in de jaren '90 (0.56) dan in 1961–1990 (0.18). Deze toename verklaart 0.30°C van de toename van de wintertemperatuur. Het effect van de mondiale opwarming

[°C]	jaar	DJF	MAM	JJA	SON
$T_{1901-2000}$	9.34	2.59	8.61	16.24	9.92
$T_{1961-1990}$	9.36	2.64	8.42	16.22	10.16
$T_{1991-2000}$	10.17	3.57	9.72	17.03	10.35
$\Delta T_{1991-2000}$	+0.81	+0.93	+1.30	+0.81	+0.19
aandeel mondiale opwarming	0.41 ± 0.15	0.40 ± 0.43	0.44 ± 0.20	0.46 ± 0.21	0.39 ± 0.18
aandeel ruis	0.40 ± 0.15	0.53 ± 0.43	0.86 ± 0.20	0.35 ± 0.21	-0.20 ± 0.18
$T_{2001-2010}$	9.9...10.1 ± 0.4	3.2...3.4 ± 0.6	8.9...9.1 ± 0.4	16.8...17.0 ± 0.4	10.7...10.9 ± 0.3

Tabel 3: De temperatuur in De Bilt gemiddeld over de hele eeuw, de WMO normalen 1961–1990, de jaren negentig en het verschil tussen de laatste twee. Dit verschil, de anomalie, hebben we met behulp van vgl (3) uitgesplitst in een deel dat toe te schrijven is aan de mondiale opwarming en een deel dat te beschouwen is als ruis. De onderste rij geeft onze verwachting voor De Bilt voor 2001–2010 op basis van vgl (3) en de door het IPCC verwachte opwarming van de aarde van 0.1...0.25°C ten opzichte van 1991-2000. De stippeltjes geven de onzekerheid in de IPCC scenario's weer, het getal achter de \pm het 95% onzekerheidsinterval door de ruis.

op de voor de NAO gecorrigeerde wintertemperatuur is $0.42 \pm 0.20^\circ\text{C}$, zodat er dus nog maar een klein beetje niet-NAO gerelateerde ruis nodig is om de waargenomen 0.93°C vol te maken.

De komende tien jaar

Onder de aanname dat de relatie tussen de wereldgemiddelde temperatuur en de temperatuur in De Bilt de volgende tien jaar zo blijft als hij de afgelopen eeuw gemiddeld geweest is, kunnen we een verwachting van de wereldgemiddelde temperatuur vertalen in een verwachting voor de temperatuur in Nederland in de komende tien jaar. Omdat we de ruis niet kunnen voorspellen is onze beste schatting hiervoor een gemiddelde nul, maar met bekende onzekerheid: twee keer de standaarddeviatie, dus $\pm 0.4^\circ\text{C}$ voor de jaargemiddelde temperatuur (zie tabel 1). Onze schatting voor de toename van de wereldgemiddelde temperatuur ontlenen we aan het IPCC (IPCC, 2001, Fig 5d in de Summary for Policymakers). Het IPCC onderscheidt verschillende emissiescenario's. Voor het hoge scenario is de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur tot 2010 0.5°C ten opzicht van 1990. Voor het lage scenario is dit 0.2°C . Dit vertaalt in een gemiddelde dat 0.4°C tot 0.55°C warmer is dan de periode 1961–1990.

Onze verwachting voor de volgende tien jaar ten opzichte van de jaren negentig is dan een combinatie van

- een afkoeling van 0.4°C omdat de jaren negentig door een lokale klimaatfluctuatie zoveel warmer waren en de beste verwachting voor de volgende tien jaar is dat deze component terugvalt naar het niveau van de jaren daarvoor.
- een verdere opwarming van 1.4 keer de toename van de wereldgemiddelde temperatuur van 0.15°C tot 0.35°C en
- een onzekerheid in de lokale temperatuur ten opzichte van de mondiale temperatuur, bijvoorbeeld het effect van de NAO in de winter, van 0.4°C .

Concreet is dit een verwachting voor de tienjarig gemiddelde temperatuur in De Bilt van

$$T_{2001-2010} = 9.9 \dots 10.1 \pm 0.4^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

De 9.9°C correspondeert met de laagste IPCC schatting, de 10.1°C met de hoogste, de 95% onzekerheidsterm $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ is een schatting van de onzekerheid door (nog) niet voorspelbare klimaatprocessen. Waarschijnlijk wordt het dus een fractie koeler dan de jaren negentig ($T_{1991-2000} = 10.17^{\circ}\text{C}$), maar duidelijk warmer dan de jaren tachtig (en daarvoor). Dit werd op basis van kwalitatieve beschouwingen ook al in de KNMI klimaatrapportage 1999 (Können, 1999) verwacht. In de huidige studie hebben we deze verwachting gekwantificeerd.

We hebben de voorspelling ook per seizoen gemaakt. De resultaten staan in Tabel 3. Ze geven een vergelijkbaar beeld voor de winter, lente en zomer, hoewel met grotere onzekerheden. Het najaar was in de jaren negentig niet uitzonderlijk warm en daar verwachten wij dan ook een inhaalslag.

Aannames

Deze verwachtingen zijn gemaakt onder een aantal aannames.

- We hebben aangenomen dat de De Bilt temperatuurreeks homogeen is, terwijl er bekende inhomogeniteiten zijn. De verplaatsing van de meethut in 1950 lijkt geen groot effect op de analyse te hebben, maar de verstedelijking rond De Bilt heeft dat waarschijnlijk wel. We schatten dat een verwachting voor De Bilt op basis van een gecorrigeerde reeks enkele tienden graden hoger zal uitkomen, even warm als de jaren negentig. Die temperatuur is dan echter minder representatief voor heel Nederland.
- We nemen aan dat het verband tussen de wereldgemiddelde temperatuur en de temperatuur in De Bilt niet verandert, hoewel de oorzaken van de opwarming wel anders zijn.
- We nemen aan dat niet-lineariteiten en langzame fluctuaties in het klimaatsysteem die het lineaire verband (3) verstoren net zo klein blijven als ze binnen dit model de afgelopen honderd jaar geweest lijken te zijn.
- In de IPCC verwachting voor de wereldgemiddelde temperatuur is geen rekening gehouden met veranderingen in de frequentie van grote vulkaanuitbarstingen of met de mogelijke inslag van een grote meteoriet. Dit houdt uiteraard ook een beperking in voor onze regionale verwachtingen.

4 Conclusies

De temperatuur in Nederland is de afgelopen eeuw duidelijk gestegen. We hebben het temperatuurverloop in De Bilt in de twintigste eeuw vergeleken met de wereldgemiddelde temperatuur. Er is een duidelijk verband. De hypothese dat de temperatuur in Nederland iets harder stijgt dan de wereldgemiddelde temperatuur beschrijft de data beter dan geen verband met de wereldgemiddelde temperatuur (of een lineaire trend). De fluctuaties zijn zo groot dat over een enkel jaar alleen iets over de kans op warmer weer te zeggen valt. Pas over tien jaar of langer gemiddeld is de stijging van de jaargemiddelde temperatuur aan de opwarming van de aarde te relateren. Uitgesplitst naar de vier seizoenen is dit verband hetzelfde in de lente, zomer en herfst. In de winter is de variatie van jaar op jaar zo groot dat over twintig jaar gemiddeld moet worden voor het verband duidelijk is. De Bilt is geen

uitzondering: in een groot deel van de wereld was de opwarming in de twintigste eeuw niet veel verschillend van de toename in de wereldgemiddelde temperatuur.

We nemen aan dat de toename van de wereldgemiddelde temperatuur door natuurlijke variaties op dezelfde manier doorwerkt op de temperatuur in Nederland als de toename door het versterkte broeikaseffect. Aangezien de mondiale opwarming door het IPCC met vrij grote zekerheid deels aan menselijk handelen is toegeschreven, is het niet meer dan aannemelijk dat deze menselijke invloed ook naar ons toe heeft doorgewerkt.

De jaren negentig waren ook ten opzichte van de wereldgemiddelde temperatuur zeer warm in Nederland. Vergeleken met de WMO normalen van 1961–1990 is ongeveer de helft van de temperatuur-anomalie van 0.81°C aan de opwarming van de hele aarde gerelateerd, terwijl de andere helft een lokale fluctuatie lijkt te zijn. Buiten het kader van ons model is een gedeelte daarvan mogelijk ook gerelateerd aan de verstedelijking rond De Bilt.

De verwachting van ons simpele model voor de komende tien jaar is dat de fluctuatie weer naar nul gaat en de opwarming doorzet volgens de IPCC verwachting. Dat betekent concreet een tienjarig gemiddelde temperatuur van $9.9 \dots 10.1 \pm 0.4^{\circ}\text{C}$ in De Bilt, waarbij de stippeltjes de onzekerheid in de IPCC verwachting weergeven en de \pm de onzekerheid in lokale fluctuaties rond de wereldgemiddelde temperatuur, zoals de NAO. De centrale waarde is een lichte afkoeling ten opzichte van de jaren negentig, maar nog steeds warmer dan de jaren tachtig. Dit is een kwantificering van de verwachting in de KNMI Klimaatrapportage 1999 (Können, 1999).

Deze verwachting is gebaseerd op een eenvoudig statistisch model en een aantal aannames: dat het verband tussen de wereldgemiddelde temperatuur en de temperatuur in De Bilt hetzelfde is voor interne variabiliteit, natuurlijke externe oorzaken als vulkaanuitbarstingen, en antropogene invloeden, dat de wereldgemiddelde temperatuur niet door grote vulkaanuitbarstingen of meteorietinslagen gaat dalen, en dat de meetreeks van De Bilt voldoende homogeen is. Wij schatten dat de voor deze verwachting belangrijkste correctie, de verstedelijking, de verwachting voor De Bilt enkele tiende graad zal verhogen. Er wordt binnen het HisKlim project op het KNMI gewerkt aan een gecorrigeerde temperatuurreeks.

Voor het verifiëren van de overige aannames en langere-termijn verwachtingen zullen gekoppelde klimaatmodellen onontbeerlijk zijn. Er wordt veel onderzoek verricht naar het verbeteren hiervan door fysisch onderzoek en analyse van waarnemingen, en we verwachten dat over een aantal jaar regionale klimaatverwachtingen gebaseerd op die modellen mogelijk zullen zijn.

Met dank aan Gerrit Burgers voor veel goede ideeën voor dit artikel en Theo Brandsma, Adri Buishand, Aryan van Engelen, Günther Können en anderen voor veel commentaar op het manuscript.

Referenties

- S. Corti, Molteni F., en T.N. Palmer. Signature of recent climate change in frequencies of natural atmospheric circulation regimes. *Nature*, 398:799–802, 1999.
- IPCC. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, 2001. The summaries are available from www.ipcc.ch.

- P. D. Jones. Hemispheric surface air temperature variations: a reanalysis and an update to 1993. *J. Climate*, 7:1794–1802, 1994. Data are available from www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperat.htm.
- P. D. Jones, T. Jónsson, en D. Wheeler. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.*, 17:1433–1450, 1997. Data are available from www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao.htm.
- G. P. Können, Red. *De toestand van het klimaat in Nederland 1999*. KNMI, 1999. www.knmi.nl/voorl/nader/klim/klimaatrapportage.html.
- C. Schuurmans en H. van den Dool. Klimaatverandering en persistentie. *Meteorologica*, maart 2001.
- S. Tett, J. Mitchell, K. Hasselmann, en G. J. Komen. Attribution: beyond discernible? In *Proceedings of the Euroclivar workshop on Climate Change Detection and Attribution*, Eucliv 10, p. 29–41, KNMI, 1998.
- B. van Mourik. Komt het warme weer aangewaaid? *Meteorologica*, p. 7, september 1999.
- A. van Ulden en R. van Dorland. Natural variability of global mean temperatures: contributions from solar irradiance changes, volcanic eruptions and El Niño. In *The Solar Cycle and Terrestrial Climate*, Tenerife, Spain, september 2000. ESA. De grafieken staan ook in het *NOP factsheet klimaat 1*, www.knmi.nl/voorl/nader/klim/klimaatrapportage.html.