

De toestand van het klimaat in Nederland 2003



Inhoudsopgave

Voorwoord 4

Samenvatting 5

1 Nederland is verder opgewarmd 6

2 Nederlandse temperatuur volgt de wind en de opwarming van de wereld 16

3 Waarom zachte winters en warme lentes? 22

4 Het klimaat in de 21^e eeuw 26

Voorwoord

Het wereldklimaat verandert, mede als gevolg van menselijke activiteiten. Klimaatverandering staat dan ook al geruime tijd in de maatschappelijke belangstelling. Dit is het vierde rapport in een reeks waarin het KNMI de ontwikkeling van het Nederlandse klimaat bespreekt. Het is opgesteld ten behoeve van overheden, organisaties en het algemene publiek.

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) van de Verenigde Naties rapporteert vanaf 1990 ongeveer elke vijf jaar over de evolutie van het wereldwijde klimaat. Het rapport dat voor u ligt is deels gebaseerd op het derde IPCC rapport uit 2001. Het geeft daarnaast specifieke informatie over de Nederlandse situatie en gaat in op nieuwe wetenschappelijk ontwikkelingen.

De indeling sluit aan bij de drie hoofdvragen die centraal staan in het klimaatonderzoek van het KNMI:

- *Wat merken we nu al van klimaatverandering in Nederland?*
Deze vraag wordt beantwoord in hoofdstuk 1. Het blijkt dat Nederland warmer en natter is geworden, in overeenstemming met de wereldwijde ontwikkeling. Dat is geen vanzelfsprekend resultaat, omdat het klimaat op een specifieke locatie zeer veel grilliger is dan het wereldgemiddelde.
- *Hoe moeten de opgetreden veranderingen worden begrepen?*
De achterliggende vragen worden gesteld en deels beantwoord in de hoofdstukken 2 en 3. De klimaatvariaties in Nederland blijken voor een deel goed in de pas te lopen met de wereldwijde veranderingen. Daarnaast hebben verschuivingen in de overheersende windrichting een belangrijke invloed gehad. Dit zou een natuurlijk proces kunnen zijn, maar er zijn nu ook studies die dergelijke verschuivingen in verband brengen met de afbraak van de ozonlaag en het broeikaseffect.
- *Hoe ziet het toekomstige Nederlandse klimaat er uit?*
Er is een groeiend wetenschappelijk vertrouwen in de voorspelbaarheid van de menselijke invloed op het klimaat van de 21^e eeuw. Hoofdstuk 4 schetst een beeld van het toekomstige mondiale, Europese en Nederlandse klimaat. De kernboodschap is dat Nederland naar verwachting warmer en natter zal worden.

Dit rapport beschouwt het Nederlandse klimaat vanuit een meteorologisch perspectief. De Nederlandse beleidsmaatregelen ter vermindering van het broeikaseffect worden besproken in de Milieubalans 2003 van het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM). De gevolgen van klimaatverandering voor de natuur komen aan de orde in de Natuurbalans 2003 van het RIVM. De publiekscampagne 'Nederland leeft met water' van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat gaat uitvoerig in op de aanpassing van het nationale waterbeheer aan een gewijzigd klimaat (www.nederlandleeftmetwater.nl).

Dit rapport wil u informeren over de toestand van het klimaat van Nederland. Daarnaast hopen wij dat er iets overkomt van de fascinatie voor het klimaatsysteem die de klimaatonderzoekers van het KNMI verbindt.

Prof. Dr. Joost de Jong, Hoofddirecteur KNMI

Prof. Dr. Gerbrand Komen, Hoofd Klimaatonderzoek en Seismologie

Samenvatting

Nederland is verder opgewarmd

De jaren 1990, 1999 en 2000 voeren de lijst aan van warme jaren sinds 1901. Direct daarna volgt het jaar 2002. De opwarming van het Nederlandse klimaat, die het KNMI constateerde in 'De toestand van het klimaat in Nederland 1999', zet daarmee onverminderd door. De verhoogde temperaturen hebben gevolgen voor de natuur en de samenleving. Deels in samenhang met het warmer wordende weer neemt ook de hoeveelheid neerslag toe: van 1999 tot en met 2002 was het natter dan normaal. Het aantal stormen per jaar is de laatste decennia afgenomen.

Nederlandse temperatuur volgt de wind en de opwarming van de wereld

De temperatuurwaarnemingen laten zien dat het Nederlandse klimaat voor een belangrijk deel in de pas loopt met de wereldwijde klimaatverandering. Daarnaast blijkt dat in de afgelopen jaren de opwarming in de winters en de lentes is versterkt door veranderingen in de overheersende windrichting.

Waarom zachte winters en warme lentes?

Er bestaat een wetenschappelijk vermoeden dat de veranderingen in het windklimaat samenhangen met de waargenomen afkoeling van de hoge atmosfeer boven de noordpool. Die afkoeling is veroorzaakt door de afbraak van de ozonlaag en het versterkte broeikaseffect. Op die manier is het denkbaar dat het Nederlandse klimaat ook langs indirecte weg is opgewarmd door menselijke activiteiten.

Het klimaat in de 21^e eeuw

Wetenschappelijk gezien wordt nauwelijks meer getwijfeld aan een verdere wereldwijde opwarming in de loop van de 21^e eeuw, als gevolg van de menselijke invloed op het klimaat. Klimaatwetenschappers schetsen het volgende toekomstbeeld:

De invloed van de mens op het wereldklimaat zal toenemen waardoor in de loop van de 21^e eeuw de wereldtemperatuur verder stijgt met 1 tot 6 graden. Meer en heviger neerslag is dan het gevolg. De zeespiegel zal wereldwijd stijgen met 10 tot 90 cm.

In Nederland heeft dat verstrekkende gevolgen voor met name de waterhuishouding. Vandaar dat het waterbeleid voor de 21^e eeuw nu al wordt afgestemd op het toekomstige klimaat.



De jaren 1990, 1999 en 2000 voeren de lijst aan van warme jaren sinds 1901. Direct daarna volgt het jaar 2002. De opwarming van het Nederlandse klimaat, die het KNMI constateerde in 'De toestand van het klimaat in Nederland 1999', zet daarmee onverminderd door.

Nederland is verder opgewarmd

De verhoogde temperaturen hebben gevolgen voor de natuur en de samenleving. Deels in samenhang met het warmere weer neemt ook de hoeveelheid neerslag toe: van 1999 tot en met 2002 was het natter dan normaal. Het aantal stormen per jaar is de laatste decennia afgenomen.



DE GEMIDDELDE JAARTEMPERATUUR is de laatste jaren hoger dan in het verleden. In 'De toestand van het klimaat in Nederland 1999' werd door het KNMI al een opwarming geconstateerd. De jaren na 1998 versterken dat beeld: ze zijn alle beland in de hoogste regionen van de reeks van warme jaren sinds 1901.

Temperatuur (°C)	
2000, 1999, 1990	10,9
2002	10,8
1989	10,7
1994	10,6
1992	10,5
2001, 1998, 1995	10,4

Tabel 1.1. Tien hoogste jaartemperaturen vanaf 1901 in De Bilt. De jaartemperatuur in De Bilt is representatief voor Nederland.

Hetzelfde beeld komt naar voren uit een overzicht van de hoogste wereldgemiddelde jaartemperaturen. Ook hier staan de recente jaren in de top-10 van de hoogste wereldgemiddelde temperaturen vanaf 1901.

Temperatuurafwijking (°C) t.o.v. gemiddelde 1961–1990	
1998	0,6
2002	0,5
2001, 1997, 1995	0,4
2000, 1999, 1994, 1991, 1990	0,3

Tabel 1.2. Tien hoogste wereldgemiddelde jaartemperaturen vanaf 1901. Bron: Climatic Research Unit, Universiteit van East Anglia

In hoofdstuk 2 wordt bekeken hoe het verloop van de temperatuur in Nederland samenhangt met de ontwikkeling van de wereldgemiddelde temperatuur.

Opwarming per seizoen

ALS DE TEMPERATUREN in Nederland worden uitgesplitst naar de vier seizoenen, dan blijkt dat niet ieder seizoen in gelijke mate heeft bijgedragen aan de hoge jaartemperaturen van de laatste decennia. In *figuur 1.1* wordt de temperatuurontwikkeling in de loop van de 20^e eeuw te De Bilt geïllustreerd aan de hand van een kleurcodering. Voor ieder jaar en seizoen zijn de afwijkingen weergegeven ten opzichte van het

langjarig gemiddelde in het tijdvak 1961–1990. Afhankelijk van de grootte van de afwijking zijn daarbij de seizoenen ingedeeld in vijf klassen (veel kouder dan normaal, kouder dan normaal, normaal, warmer dan normaal, veel warmer dan normaal). De klassengrenzen zijn zo gekozen dat tussen 1961 en 1990 alle categorieën in gelijke mate voorkomen. Hier en elders in dit rapport worden de zogenaamde meteorologische seizoenen gehanteerd: december-januari-februari vormen de winter, maart-april-mei de lente, juni-juli-augustus de zomer en september-oktober-november de herfst.

De figuur laat zien dat alle seizoenen in de afgelopen vier jaar (veel) warmer waren dan normaal, met uitzondering van de zomer van 2000 die normaal verliep. Met name de lentes springen er uit met 15 keer achter elkaar 'veel warmer dan normaal', slechts onderbroken door de lente van 1996 die kouder dan normaal verliep. De figuur toont ook dat er geen volledige regelmaat bestaat.

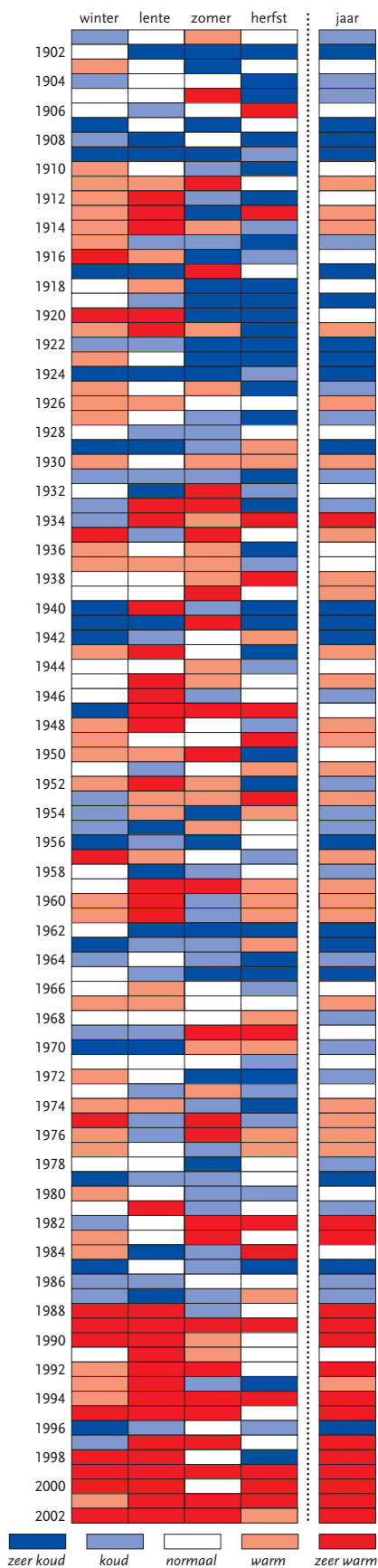
De conclusie is dat de jaargemiddelde temperatuur in De Bilt de laatste decennia ondubbelzinnig een opwarming laat zien. De stijging van de jaartemperaturen is vooral toe te schrijven aan de winters en de lentes. In hoofdstuk 2 en 3 wordt hier verder op ingegaan. De herfst vertoont de laatste paar jaar recordtemperaturen, maar er is geen sprake van een duidelijke trend.

Wat betekent de opwarming?

DE HOGERE TEMPERATUREN in Nederland hebben gevolgen voor de natuur en de samenleving. Om daar meer inzicht in te krijgen bekijken we hier de veranderingen vanuit dat perspectief.

De betekenis van de opwarming voor de natuur kan tot uitdrukking worden gebracht door te kijken naar de lengte van het groeiseizoen.

Meteorologen verstaan onder de lengte van het groeiseizoen: het aantal dagen per jaar tussen de eerste periode na 1 januari van 6 dagen van meer dan 5°C en de eerste periode na 1 juli van 6 dagen van minder dan 5°C. In de prak-



Figuur 1.1. Afwijking van de seizoens- en jaargemiddelde temperaturen in De Bilt.

tijk sluit deze definitie goed aan bij waarnemingen in de natuur. In 2002 begon het groeiseizoen volgens deze definitie op 21 januari en eindigde op 8 december; in totaal 321 dagen. *Figuur 1.2* geeft de lengte van het meteorologische groeiseizoen in De Bilt vanaf het jaar 1901. Het verloop vertoont een duidelijke trend, die wijst op een verlenging van het groeiseizoen in de loop van de 20^e eeuw met ongeveer 25 dagen.

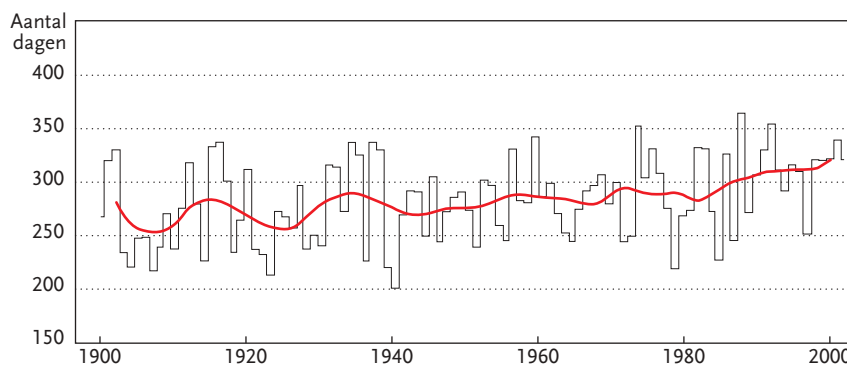
De betekenis van de temperatuurstijging voor de samenleving blijkt onder meer uit de verandering in de behoefte aan huisverwarming. De invloed van het weer op die behoefte kan tot uitdrukking worden gebracht aan de hand van het begrip graaddagen.

Om het aantal graaddagen per jaar vast te stellen wordt voor alle dagen waarop de gemiddelde temperatuur lager was dan 17°C bekeken hoeveel graden de temperatuur lager was. Die

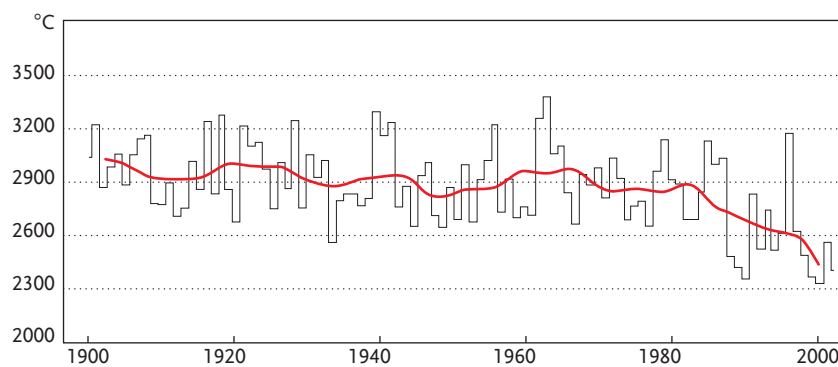
afwijkingen bij elkaar opgeteld geeft het aantal graaddagen (voorbeeld: een dagtemperatuur van 14°C draagt 3 bij, een dagtemperatuur van -3°C draagt 20 bij, enzovoorts). Het achterliggende idee is dat de verwarming pas wordt aangezet bij een buitentemperatuur beneden de 17°C en dat er meer moet worden gestookt naarmate het kouder is. De figuur geeft het verloop van het aantal graaddagen per jaar in de loop van de 20^e eeuw.

Ook hier zien we een duidelijke trend die suggereert dat de behoefte aan verwarming aan het afnemen is. Dat betekent niet automatisch dat het energieverbruik zal dalen omdat allerlei factoren, zoals bijvoorbeeld een toename van het aantal airconditioners, hier een rol spelen.

De ontwikkelingen in de lengte van het groeiseizoen en het aantal graaddagen hangen samen met trends in de gemiddelde temperatuur. Maatschap-



Figuur 1.2. De lengte van het meteorologische groeiseizoen in de loop van de 20^e eeuw. De rode lijn is het gemiddelde van 10 jaar.



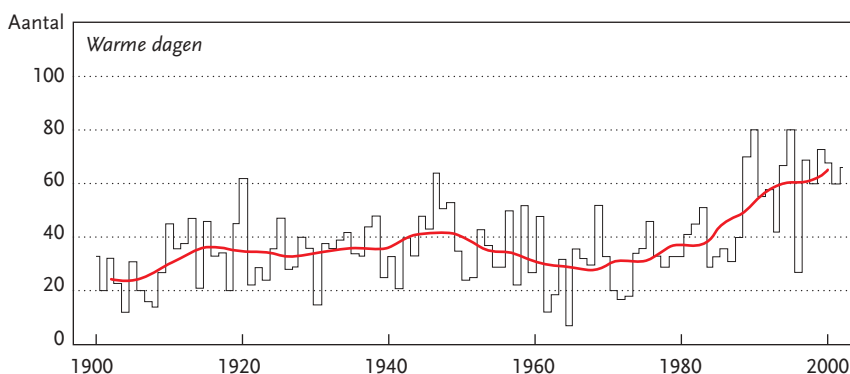
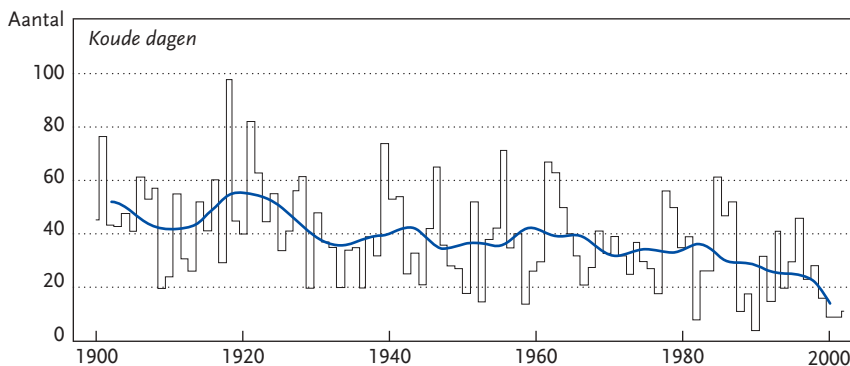
Figuur 1.3. Het aantal graaddagen in de loop van de 20^e eeuw. De rode lijn is het gemiddelde van 10 jaar.

pelijk gezien zijn ontwikkelingen in extreme temperaturen van minstens even groot belang: een hittegolf of een periode van extreme kou heeft onmiddellijk grote gevolgen voor iedereen. Extreme gebeurtenissen zijn uit de aard der zaak zeldzaam. De periode van de opwarming van Nederland is te kort om verschuivingen in extreme weersomstandigheden onomstotelijk te kunnen vaststellen. Om toch een indruk te krijgen kan worden gekeken naar de frequentie waarmee bijzonder maar niet extreem warme en koude dagen voorkomen.

In ons klimaat komen de koudste dagen van het jaar bijna altijd voor in de winter en de warmste in de zomer. Dat maakt die dagen nog niet extreem. Pas als ze veel kouder of warmer zijn dan normaal voor het seizoen horen ze bij de extremen. Om het aantal extreme dagen vast te stellen moet dus worden gekeken naar de dagen die bijzonder koud of warm zijn voor de tijd van het jaar.

Figuur 1.4 geeft het resultaat van de telling gebaseerd op de temperatuur in De Bilt. Als grens voor koud en warm is voor elke kalenderdag gekozen voor de temperatuur die maar op 10% van de dagen tussen 1961 en 1990 werd gepasseerd. De bovenste figuur toont het aantal dagen per jaar waarop het erg koud was voor de tijd van het jaar, de onderste figuur het aantal dagen per jaar waarop het erg warm was voor de tijd van het jaar.

In tegenstelling tot wat misschien zou kunnen worden verwacht, verlopen de veranderingen in het aantal koude en warme extremen per jaar niet precies tegengesteld. De grafiek van de koude dagen laat een geleidelijke afname zien, maar uit de onderste grafiek blijkt dat er sprake is van een sterke toename van het aantal warme dagen, die zich vanaf ±1975 heeft voltrokken. De sterke opwarming van de afgelopen decennia gaat dus vooral gepaard met een sterke toename van het aantal warme dagen en in mindere mate met een afname van het aantal koude dagen.



Figuur 1.4. Het aantal relatief koude en warme dagen in de loop van de 20^e eeuw. De rode lijn is het gemiddelde van 10 jaar.

Natuur ontwaakt eerder



De stijging van de temperatuur in Nederland heeft directe gevolgen voor het moment waarop allerlei processen zich in de natuur voordoen. Het begin van bloei, bladontplooiing en bladval maar ook het moment waarop vlinders gaan vliegen en vogels gaan broeden wordt sterk bepaald door het weer. De hoge temperaturen in de winter en het voorjaar in de afgelopen jaren resulteerden in een zeer vroege start van het groeiseizoen.

Uit waarnemingen in het kader van De Natuurkalender wordt duidelijk dat de bloei van een groot aantal planten in 2002 wel drie tot meer dan vier weken vroeger is begonnen dan in de jaren 40, 50 en 60 van de vorige eeuw. Hierbij gaat het om planten als het maarts viooltje, brem, speenkruid en fluitenkruid. De vervroeging is in overeenstemming met de toename van de lengte van het meteorologische groeiseizoen. Ook veel vlindersoorten (bijvoorbeeld: bont zandoogje, klein koolwitje en landkaartje) kwamen veel eerder tevoorschijn dan men normaal gesproken zou verwachten.

□ Arnold van Vliet
Wageningen Universiteit

(www.natuurkalender.nl)



Neerslag

Vanaf 1901 is er sprake van een toename van de gemiddelde neerslag over het land in het winterhalfjaar (oktober tot maart). In het zomerhalfjaar is de neerslaghoeveelheid niet veranderd. Nederland loopt daarmee in de pas met de noordelijke helft van Europa. De afgelopen vier winters waren natter dan normaal. Daarnaast kenden 2001 en 2002 natte zomers. Meer nog dan bij temperatuur zijn bij neerslag vooral de extremen van belang. De wateroverlast in Midden-Europa in de zomer van 2002 heeft dat opnieuw duidelijk gemaakt.

Ook in ons land gaf intensieve regenval in de afgelopen jaren wateroverlast. Soms ging de neerslag gepaard met windstoten of hagel die de schade verergerden. Het is vanwege het grillige karakter niet eenvoudig verschuivingen in dergelijke extremen vast te stellen. Zware zomerse buien zijn zeer plaatselijk en geven vooral problemen op de weg of in het stedelijk gebied. Ze verschillen totaal van karakter met de neerslag die in de winter vooral in landelijk gebied tot wateroverlast leidt. In de winter speelt met name de omvang van het getroffen gebied een rol.

Figuur 1.5 laat voor de jaren na 1950 het aantal keren zien dat op een zomerdag (juni, juli en augustus) ergens in Nederland een neerslaghoeveelheid van meer dan 50 mm is gemeten. Daarbij is uitgegaan van het landelijke KNMI-netwerk van 325 neerslagstations. De jaren 2001 en 2002 springen in het oog, met de hoogste score van 12 tegen 5 gemiddeld. Een duidelijke trend is evenwel niet waarneembaar. De figuur zegt niets over de ruimtelijke uitgestrektheid van de neerslaggebeurtenis.

Extreme neerslag in het Westland

IN DE AFGELOPEN vier jaar werd het Westland drie keer getroffen door wateroverlast ten gevolge van overvloedige regenval. Deze overlast vond telkens in het najaar plaats. De zee is dan nog relatief warm waardoor de kans op zware buien in het kustgebied groot is. Op 4 oktober 1999 en op 8 tot 10 november 2000 was sprake van een zeer koude bovenlucht waardoor boven

Verlaging aardgasafzet?

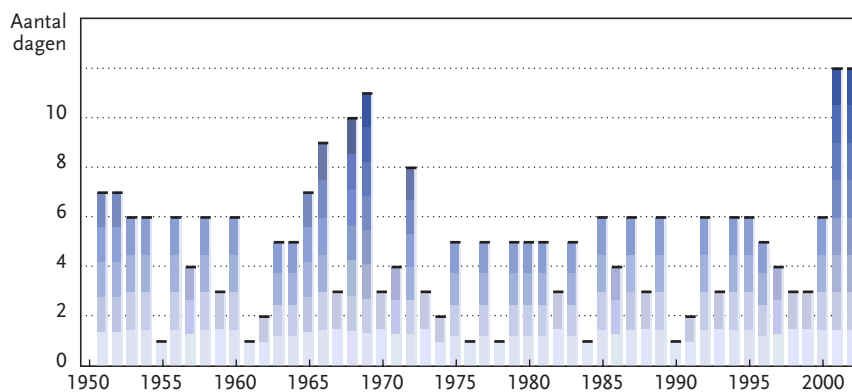
Gasunie Trade & Supply is betrokken bij een groot deel van de in- en verkoop van aardgas in Nederland. Bij de planning van de gasinkoop en -afzet maakt de Gasunie gebruik van temperatuurreeksen van het KNMI. Voor de winterperiodes gebeurt dit op basis van historische reeksen voor de gemiddelde etmaaltemperatuur en windsnelheid te De Bilt. Hiermee worden schattingen gemaakt van de gasafzet in gemiddelde en koude winters. Deze schattingen bepalen welke maatregelen nodig zijn om ook op de langere termijn in de dagelijkse vraag naar aardgas te kunnen voorzien. Dit heeft onder meer geleid tot de bouw van ondergrondse gasbergingen bij Norg en Grijpskerk.

Recent is ook onderzoek gedaan naar de effecten van klimaatverandering op de jaarlijks af te zetten gashoeveelheden. Uit een Gasunie-studie gebaseerd op cijfers van het KNMI blijkt dat de huidige opwarming in Neder-

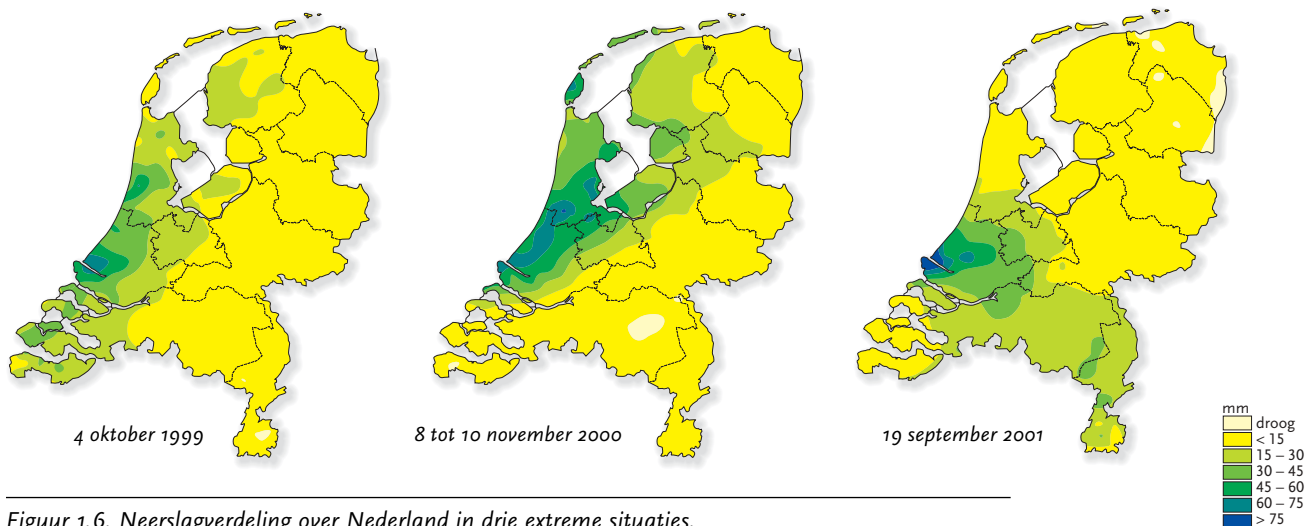


land over 5 jaar waarschijnlijk geleid heeft tot een daling van de aardgasafzet met 1%. Ontwikkelingen van sociaal-economische en technische aard maken het lastig dat effect ook daadwerkelijk vast te stellen.

□ Jarig Steringa,
Gasunie



Figuur 1.5. Aantal dagen met extreme neerslag in Nederland.



Figuur 1.6. Neerslagverdeling over Nederland in drie extreme situaties.

het warme zeewater voor de kust zware buien ontstonden die vervolgens het land binnentrokken. Op 19 september 2001 werd de neerslag veroorzaakt door een depressie die vanuit het noorden het land binnentrok om vervolgens tot stilstand te komen. De kaarten in *figuur 1.6* geven de verdeling van de neerslag over Nederland weer op de drie genoemde data.

September 2001 was in grote delen van Nederland uitzonderlijk nat. In De Bilt werd 211 mm opgevangen tegen 72 mm normaal. Daarmee kwam deze maand op de tweede plaats in de rij van natste septembermaanden sinds 1901 (september 1957 staat op de eerste plaats met 213 mm). Op een flink aantal plaatsen, met name in een brede strook tussen Zeeland en Groningen, viel meer dan 200 mm neerslag. Het natst was het in Zuid-Holland. In Hoek van Holland werd 289 mm afgetapt, ongeveer 35% van de gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid.

De drie voorbeelden uit het Westland illustreren de gevolgen van extreme regenval op de lokale en regionale waterhuishouding. Hoewel de gevolgen vergelijkbaar zijn (grote wateroverlast) zijn de meteorologische omstandigheden en de grootte van het getroffen gebied telkens zo verschillend dat de voorvallen zich niet laten rangschikken van minst tot meest uitzonderlijk.

Grootschalige wateroverlast is dermate zeldzaam, dat de korte meetreeks

sen van de neerslag waarover we beschikken geen mogelijkheid bieden om duidelijke trends te herkennen. Om, ondanks het grillige karakter van extreme neerslag, toch inzicht te krijgen in mogelijke verschuivingen kan worden gekeken naar gebeurtenissen die wel bijzonder maar niet extreem zijn. Dan blijkt dat sprake is van een toename van de bijdrage van de natste dagen aan de totale neerslaghoeveelheid, in de loop van de 20^e eeuw.

De waargenomen toename in de gemiddelde neerslag en de verschuiving naar meer dagen met veel regen maken het zeer aannemelijk dat de extreme neerslag ook is toegenomen.

De stormen uit 2000 en 2002

DE AFGELOPEN vier jaar is Nederland vier maal getroffen door een zware storm (dat wil zeggen op tenminste 1 landstation een uurgemiddelde windsnelheden van 88 km per uur, windkracht 10, of meer). Meteorologisch gezien was de storm van 28 mei 2000 het meest uitzonderlijk, omdat hij buiten het stormseizoen viel dat van oktober tot en met maart loopt.

In de aanloop naar deze storm bevond zich boven Nederland een sterke straalstroom. In deze straalstroom trok een uitdiepende depressie langs de kust naar het noordoosten. Er was die meidag sprake van een zware zuidwest- tot westerstorm, uniek zo laat in het voorjaar. In Vlissingen en IJmuiden liepen de uurgemiddelde snelhe-

Wet Tegemoetkoming Schade

Zeer zware regenval op 13 en 14 september 1998 zette grote delen van Nederland onder water. Delen van Zuid-Holland, Zeeland, Noord-Brabant en Limburg kwamen blank te staan. Storm en regen op 27 en 28 oktober zorgden anderhalve maand later voor grote wateroverlast in het noorden en oosten van het land.

Schade als gevolg van extreme neerslag was toen niet verzekeraar. Voor deze twee situaties is door het Kabinet de Wet Tegemoetkoming Schade (wts) bij rampen en zware ongevallen van toepassing verklaard. Deze wet wordt uitgevoerd door het Ministerie van Binnenlandse Zaken. Ook trad de regeling Oogstschade in werking, die wordt uitgevoerd door het Ministerie van Landbouw, Natuurbeheer en Visserij.

De wts wordt van toepassing verklaard als er sprake is van een ramp van uitzonderlijk karakter, die een gecoördineerde inzet van alle hulpverleningsdiensten noodzakelijk maakt en die leidt tot maatschappelijke ontwrichting en grote materiële schade.

Als gevolg van de twee gebeurtenissen van 1998 werden er door bedrijven, decentrale overheden en particulieren 17.000 schademeldingen ingediend. In het kader van de wts werd door het

Rijk circa 290 miljoen euro uitgekeerd als schadecompensatie.

De afgelopen vier jaren hebben zich opnieuw situaties voorgedaan waarbij schade is geleden als gevolg van extreme neerslag. Voorbeelden daarvan zijn de drie gebeurtenissen in het Westland. Er is toen veel overlast ontstaan en er werd vele tientallen miljoenen euro's aan materiële schade geleden. Aangezien het ging om zeer plaatselijke gebeurtenissen is de wts hierop niet van toepassing verklaard.



Rond de jaarwisseling 2002/2003 steeg door zware regenval de Maas in Limburg tot een verontrustend hoog peil. Met name delen van de gemeente Venlo worden getroffen door ernstige wateroverlast als gevolg van de doorbraak van een kade. De schade is geschat op circa 3 mln euro. De wts is hierop wel van toepassing verklaard.

Sinds 2001 is alle schade aan opstalen inboedel als gevolg van hevige plaatselijke regenval verzekeraar voor zowel particulieren als bedrijven. Daarnaast is een principeakkoord bereikt tussen het Kabinet en de Land en Tuinbouworganisatie (LTO) over de opzet van een oogstschadeverzekering.

Onder hevige plaatselijke regenval wordt verstaan extreme neerslag van ten minste 40 mm in 24 uur, 53 mm in 48 uur of 67 mm in 72 uur, op en/of nabij de locatie waar de schade is ontstaan. In beide verzekeringsvoorwaarden wordt het risico van dijkdoorbraak, overstroming vanuit zee en van rivieroverstromingen als gevolg van neerslag in het buitenland nadrukkelijk uitgesloten. Voor deze onverzekerbare risico's blijft gelden dat de wts van toepassing kan worden verklaard.

- Nils Ligthart
Ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties.

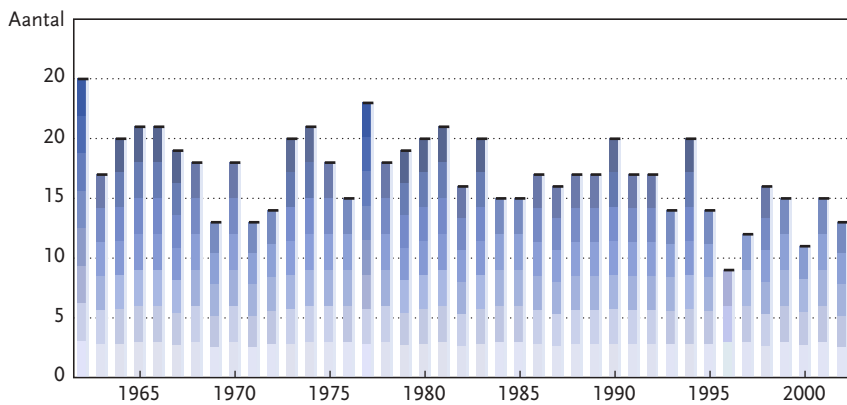
den op tot 90 km per uur. In het hele land brachten zeer zware windstoten, met snelheden tot circa 90–110 km per uur, veel schade toe aan gebouwen en bomen. De bomen waren extra kwetsbaar omdat ze volledig in blad stonden en dus meer wind vingen. De storm eiste in Nederland drie mensenlevens.

In de nacht van 29 op 30 oktober 2000 ontstond langs de kust een zware zuidwesterstorm onder invloed van een zeer diepe depressie ten noorden van Schotland. In IJmuiden liep de uurgemiddelde windsnelheid op tot 94 km per uur. Tot diep in het binnenland traden windstoten op met snelheden tot

85 km per uur, in de kustprovincies oplopend tot 125 km per uur.

Op 26 februari 2002 trok een actieve storing van het zuidwesten van Ierland over het midden van de Noordzee naar Denemarken. Op de Waddenzee stond een zware storm met uurgemiddelde windsnelheden tot 90 km per uur. In het hele land kwamen zeer zware windstoten voor.

Op 27 oktober 2002 trok een zware storm over de kustprovincies. Het hele land ondervond zeer zware windstoten, van 100 tot 125 km per uur. De storm eiste vier mensenlevens, richtte grote schade aan en ontwrichtte het openbare leven. Gemiddeld over het



Figuur 1.7. Het aantal stormen per jaar in Nederland.

land was dit de zwaarste storm sinds 25 januari 1990.

De zwaarste stormen treden op in het winterhalfjaar. De bovengenoemde stormen van oktober 2000, februari 2002 en oktober 2002 waren voor de tijd van het jaar niet uniek. De storm van 28 mei 2000 is meteorologische gezien wel een uitschieter. Het is tot nu toe de zwaarste storm van alle stormen buiten het winterhalfjaar.

Men kan zich afvragen of de kans op stormen in Nederland in samenhang met de opwarming aan het veranderen is. In eerdere publicaties van het KNMI werd die vraag ontkennend beantwoord. Daarbij werd steeds uitgegaan van indirecte gegevens (drukmetingen). Recentelijk zijn de directe metingen van de windsnelheden geschikt gemaakt voor onderlinge vergelijking over langere perioden.

Figuur 1.7 geeft vanaf 1962 het aantal stormen per jaar, uitgaande van metingen op 13 plaatsen verspreid over het land. Het aantal stormen wordt verkregen door eerst de gebeurtenissen te selecteren waarbij op minimaal 7 van de 13 plaatsen een piek in de windsnelheid is gemeten. Deze gebeurtenissen worden vervolgens gerangschikt door te kijken naar de uitzonderlijkheid van die pieken. De figuur laat zien hoe de 700 meest uitzonderlijke gebeurtenissen zijn verdeeld over de afgelopen 41 jaar. Door stormen op deze manier te selecteren wordt voorkomen dat uitsluitend de hoge windsnelheden wor-

den geteld die pal aan de kust optreden. Tevens wordt voorkomen dat zeer plaatselijke gebeurtenissen worden meegenomen. De gebruikte telling is daarmee beter in overeenstemming met de gevolgen van de storm. De windsnelheid die hoort bij de getelde stormen ligt, afhankelijk van de plaats in het land boven de 11 tot 16 m/s, hetgeen overeenkomt met een windkracht vanaf 6 à 7. Als in plaats van 700 naar bijvoorbeeld de 500 of 300 meest uitzonderlijke gebeurtenissen wordt gekeken, verandert dit beeld niet. De grafiek laat zien dat het aantal stormen in Nederland de afgelopen 41 jaar geleidelijk is afgenomen.

Verder verkennen

De volgende gegevens zijn te vinden op www.knmi.nl/voorl/kd

Langjarige gemiddelden en extremen over het tijdvak 1971–2000;

Dagelijkse overzichten van diverse weers-elementen;

Maand-, seizoens- en jaar-overzichten;

Databestanden van tijdreeksen.

Nederlandse temperatuur de wind en de

*De wereld warmt op. Nederland is ook warmer geworden. Is er een verband?
De waarnemingen laten zien dat het Nederlandse klimaat inderdaad voor
een belangrijk deel in de pas loopt met het wereldwijde klimaat. Daarnaast
blijkt dat in de afgelopen jaren de opwarming in de winters en de lentes is
versterkt door veranderingen in de overheersende windrichting.*



volgt opwarming van de wereld

Geert Jan van Oldenborgh en
Aad van Ulden

DE WINDRICHTING BEPAALT VOOR een groot gedeelte de dagelijkse temperatuur in Nederland. Zo is in de winter een oostenwind, die lucht aanvoert over land, koud en een westenwind, die lucht aanvoert over zee, zacht. Uit welke hoek de wind waait is voor een groot gedeelte toevallig: het weer is chaotisch.

Ook de maandgemiddelde temperatuur varieert sterk met de overheersende windrichting, soms wel met vijf graden in de winter en twee graden in de zomer. Naarmate over nog langere perioden wordt gemiddeld, neemt de grillige invloed van de wind af. De langjarige veranderingen die overblijven bestaan uit een restant van toevalli-



ge weerfactoren, lokale langjarige klimaatfluctuaties, bijvoorbeeld als gevolg van abnormale zeewatertemperaturen, en wereldwijde klimaatveranderingen.

In hoeverre volgt de Nederlandse temperatuur het wereldgemiddelde?

DE WERELDGEMIDDELDE TEMPERATUUR varieert van jaar tot jaar onder invloed van een aantal natuurlijke factoren en, sinds het midden van de twintigste eeuw, mede onder invloed van de mens. De belangrijkste factoren zijn in willekeurige volgorde:

- Vulkanuitbarstingen. Het vrijkomende vulkaanstof koelt het aardoppervlak tijdelijk af.
- Variaties in de sterkte van de zonnestraling. Processen op de zon geven kleine wisselingen in de hoeveelheid energie die de aarde bereikt waardoor de atmosfeer kan opwarmen of juist kan afkoelen.
- El Niño's. De hoge zeewatertemperaturen die gepaard gaan met El Niño warmen de atmosfeer op.
- Het chaotisch karakter van het klimaatstelsel. Ook bij gelijkblijvende omstandigheden heeft het klimaat de neiging te fluctueren, zoals een wapperende vlag.
- De hoeveelheid broeikasgassen en onnatuurlijke stofdeeltjes (aerosolen) in de atmosfeer. Broeikasgassen warmen de lagere atmosfeer op, onnatuurlijke stofdeeltjes koelen de atmosfeer af. Gezamenlijk verhogen ze de wereldgemiddelde temperatuur.

Vanaf het midden van de 20^e eeuw is, over langere perioden genomen, het door de mens versterkte broeikas-effect van al deze invloeden waarschijnlijk de grootste.

Het verband tussen de wereldgemiddelde jaartemperatuur en de jaartemperatuur in Nederland kan worden onderzocht door te kijken in hoeverre de veranderingen in beide reeksen die in de loop van de 20^e eeuw zijn opgetreden parallel verlopen. In Nederland zijn de variaties van jaar tot jaar vrij groot: gemiddeld 0,6 °C. Dat is evenveel als de totale toename van de

wereldgemiddelde temperatuur in de 20^e eeuw. De langzame veranderingen komen daarom beter tot uiting als wordt gekeken naar het verloop van het gemiddelde over tien jaar. De wereldgemiddelde temperatuur laat dan een stijging zien van 1900 tot 1940. Vervolgens is er een constant verloop tot 1970 en uiteindelijk een stijging tot aan het heden (*zie figuur 2.1*). De temperaturen in Nederland sluiten daar goed bij aan. Eerst vertoont de reeks een opwarming van 1900 tot 1950, vervolgens een vlak verloop tot begin jaren 60 en uiteindelijk een opwarming tot aan het heden (*zie figuur 2.1*). Zo op het oog is een verband tussen beide dus niet onwaarschijnlijk.

Statistische berekeningen versterken dit vermoeden. Beschouwen we de Nederlandse tienjaargemiddelde temperaturen in de loop van de 20^e eeuw als volstrekt toevallige afwijkingen rond het Nederlandse eeuwgemiddelde dan blijken de schommelingen gemiddeld 0,4°C te bedragen. Gaan we er daarentegen van uit dat de temperatuur in Nederland varieert rond het verloop van de wereldgemiddelde temperatuur dan blijken de schommelingen en daarmee de toevalsfactor te halveren tot 0,2°C. Blijkbaar verklaart het verloop van de wereldgemiddelde temperatuur ongeveer de helft van het verloop van de tienjaargemiddelde temperatuur in Nederland. Dit resultaat is niet specifiek voor Nederland: voor de rest van Europa worden vergelijkbare resultaten gevonden. Verder blijkt dat gedurende de tweede helft van de 20^e eeuw Nederland meer dan gemiddeld is opgewarmd in de late winter en het vroege voorjaar. In de volgende paragraaf wordt die extra opwarming in verband gebracht met veranderingen in het windklimaat.

In hoeverre bepaalt de windrichting de opwarming van Nederland?

ZOALS HIERBOVEN OPGEMERKT, leert de ervaring dat de temperatuur in Nederland in het algemeen sterk afhangt van de overheersende windrichting. Een goed begrip van de opwarming van Nederland vraagt dus om een goed inzicht in de rol van de wind.

Het statistisch verband tussen de Nederlandse temperatuur en het wereldgemiddelde

De Climatic Research Unit van de Universiteit van East Anglia houdt de wereldgemiddelde temperatuur bij aan de hand van metingen op vele honderden stations over de hele aarde. De gegevens zijn gecorrigeerd voor onder meer veranderingen in meetapparatuur, meetomstandigheden en de toenemende invloed van verstedelijking. Ze worden wereldwijd gebruikt in klimaatstudies. Dit rapport gaat uit van de reeks die in 2002 beschikbaar is gekomen.

De temperatuur in De Bilt wordt bijgehouden door het KNMI. In dit hoofdstuk maken we gebruik van een meetreeks die is gecorrigeerd voor verplaatsing en veranderingen in de meetlocatie, verlaging van de meethoogte en effecten van verstedelijking. Details over deze nieuwe reeks zullen in 2003/2004 door het KNMI worden gepubliceerd.

De geleidelijke variaties tonen op het oog eenzelfde verloop. Die samenhang komt statistisch tot uiting in de correlatie en de regressie. De correlatie is een getal dat aangeeft in welke mate twee ontwikkelingen gelijkelijk verlopen. Een correlatie van 1 betekent een volmaakte rechtlijnige samenhang terwijl 0 duidt op de afwezigheid van enig verband. De regressie is de sterkte waarmee de twee verschijnselen samenhangen. Zo betekent een regressie van 1,5 dat een temperatuurstijging in het wereldgemiddelde anderhalf keer zo sterk tot uiting komt in de temperatuur in De Bilt.

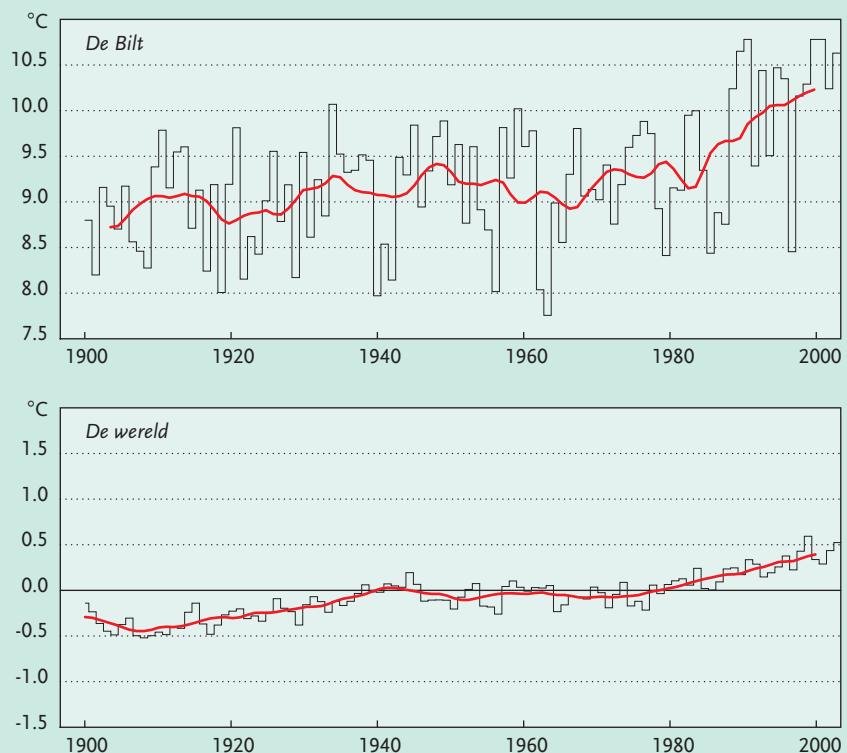
Over de hele eeuw genomen blijkt uit de correlatie van $0,5 \pm 0,2$ dat er een statistische samenhang is tussen de ontwikkeling van de wereldgemiddelde temperatuur en de temperatuur in De Bilt. De lage correlatie ($0,3 \pm 0,3$) in de eerste helft van de eeuw en de hoge ($0,6 \pm 0,2$) in de tweede laten zien dat de samenhang vooral in de tweede helft van de eeuw tot uiting gekomen is. Verder tonen de lage regressie ($0,8 \pm 0,9$) in de eerste helft en de

hoge regressie ($2,2 \pm 0,9$) in de tweede helft van de eeuw dat in de tweede helft de temperatuur in De Bilt relatief sterk gestegen is ten opzichte van het wereldgemiddelde.

Nadere analyse (hier niet weergegeven) laat zien dat die extra opwarming plaatsvond in de maanden februari, maart en april. Die periode correspondeert met de late winter en het vroege voorjaar. In hoofdstuk 1 is geconcludeerd dat Nederland in de laatste decennia vooral is opgewarmd tijdens de winter en het voorjaar. Hier blijkt dus dat dat niet geldt voor het wereldgemiddelde.

	1901–2002	1901–1950	1951–2002
Correlatie	$0,5 \pm 0,2$	$0,3 \pm 0,3$	$0,6 \pm 0,2$
Regressie	$1,5 \pm 0,5$	$0,8 \pm 0,9$	$2,2 \pm 0,9$

Tabel 2.1. Correlaties en regressies tussen de temperatuur in De Bilt en de wereldtemperatuur. De werkelijke waarde ligt met 95% kans in de aangegeven intervallen.

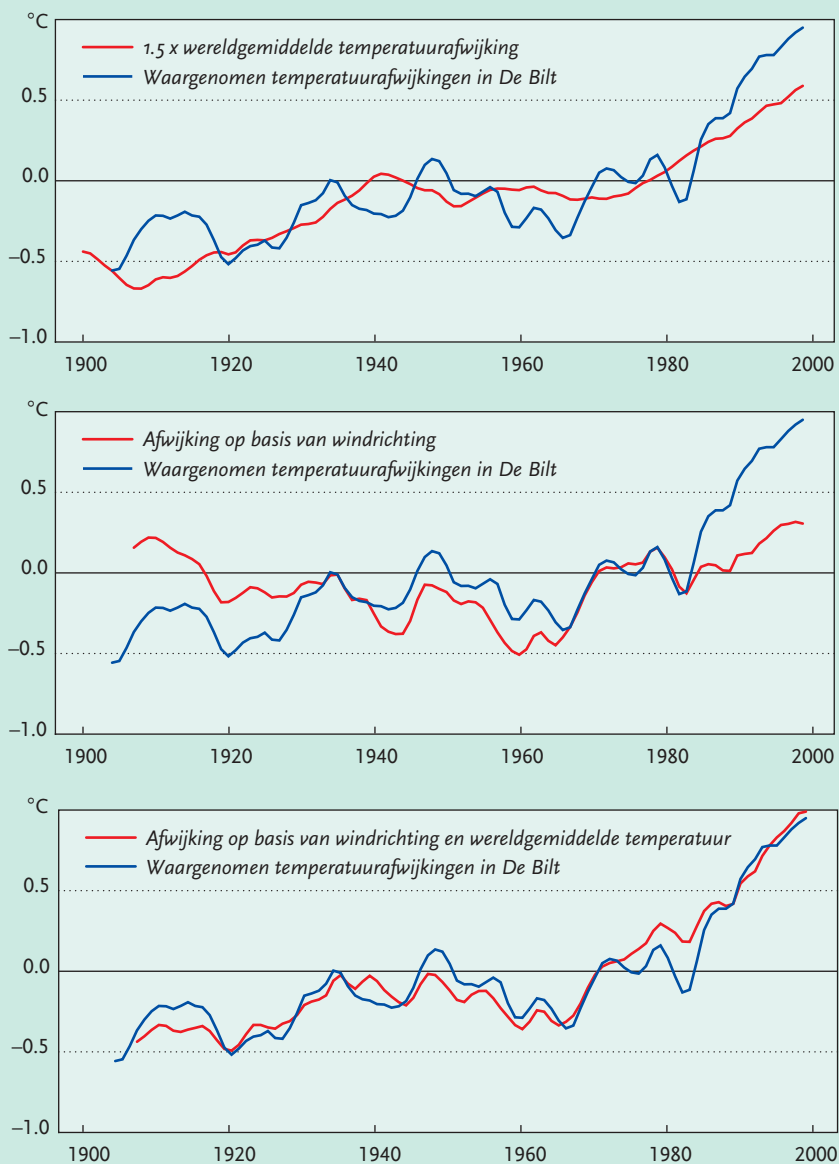


Figuur 2.1. Het verloop van de jaargemiddelde temperatuur in De Bilt en de wereld. De wereldtemperatuur is uitgedrukt in de afwijking ten opzichte van het gemiddelde over 1961–1990. De rode lijn is het gemiddelde van 10 jaar.

Ontwikkeling van de Nederlandse jaargemiddelde temperatuur

De ontwikkeling van de jaargemiddelde temperatuur in De Bilt in de loop van de 20^e eeuw wordt in dit hoofdstuk gerelateerd aan de wereldgemiddelde temperatuur en de lokale invloed van de windrichting. Aan de hand van *figuur 2.2* kunnen de beide invloeden eerst los en vervolgens gecombineerd worden vergeleken met de werkelijk opgetreden temperaturen.

De temperatuur in De Bilt loopt in algemene zin gelijk aan het wereldgemiddelde, al blijven allerlei details onverklaard. De invloed van de windrichting laat een tegengesteld beeld zien. De overeenstemming is hier juist meer gelegen in de details en niet in de grote lijn. Tezamen blijken de beide factoren de temperatuurontwikkeling in De Bilt uitstekend te kunnen verklaren.



Figuur 2.2 a) De samenhang met de wereldgemiddelde temperatuur, b) de overheersende windrichting en c) beide effecten tezamen, op de tienjaargemiddelde temperatuur in De Bilt. Ter vergelijking is in iedere grafiek ook de waargenomen temperatuur opgenomen.

Er zijn twee manieren waarop de wind het verloop van de gemiddelde temperatuur in Nederland kan beïnvloeden.

Ten eerste zou het temperatuureffect van bepaalde windrichtingen in de loop der tijd kunnen veranderen. Zo zou bijvoorbeeld de warme oostenwind in de zomer iets warmer geworden kunnen zijn. Deze mogelijkheid is onderzocht door per seizoen en per windrichting te bepalen of de bijbehorende temperatuur in De Bilt in de loop van de 20^e eeuw is veranderd. Het blijkt dat bij vrijwel alle windrichtingen een gelijke opwarming heeft plaatsgevonden in ongeveer dezelfde mate als de totale opwarming van Nederland. Dit effect hangt samen met de uniforme wereldwijde opwarming die ter sprake kwam in de vorige paragraaf.

De andere mogelijkheid is het vaker of juist minder vaak voorkomen van bepaalde warme of koude windrichtingen. Dit is onderzocht met een statistisch model dat de temperatuurvariaties in De Bilt uitsluitend relateert aan de maandelijks gemiddelde windrichting. Het blijkt dat variaties in de overheersende windrichting 60% van de jaar-op-jaar variaties van de jaargemiddelde temperatuur bepalen. Met behulp van het model is de invloed van langzame verschuivingen in de overheersende windrichting op het langjarige temperatuurverloop in De Bilt vastgesteld (zie *figuur 2.2b*). Het blijkt dat de wind tussen 1910 en 1960 een afkoeling van 0,7°C heeft veroorzaakt en een evenzo grote opwarming vanaf 1960 tot aan het heden. De koude weertypen overheersten meer tussen 1940 en 1970, terwijl aan het begin en het eind van de eeuw juist de warme weertypen domineranter waren.

De vraag rijst nu waar deze langjarige variaties verband mee houden. Het grootste deel blijkt samen te hangen met de grilligheid van het klimaatstelsel. De maanden februari, maart en april vormen hierop een uitzondering. Gedurende deze maanden laat de tweede helft van de 20^e eeuw een sterke toename van zuidwestelijke luchtstromingen zien, die moeilijk aan het toeval is toe te schrijven. Hierop wordt nader ingegaan in het volgende hoofdstuk.

Over de eeuw als geheel vertoont de invloed van de wind geen trend die van invloed is op de temperatuur. Veranderingen in de gemiddelde windrichting kunnen de waargenomen temperatuurstijging in de loop van de 20^e eeuw in De Bilt dan ook niet verklaren.

Conclusie

SAMENGEVAT KOMEN WE tot de volgende beschrijving van de ontwikkeling van de Nederlandse temperatuur in de loop van de 20^e eeuw. Voor perioden langer dan tien jaar loopt de temperatuur in ons land grotendeels parallel met de wereldgemiddelde temperatuur. De toename van de Nederlandse temperatuur in de loop van de 20^e eeuw hangt dus vooral samen met de wereldwijde opwarming. Op zijn beurt wordt het wereldgemiddelde vooral beïnvloed door vulkaanuitbarstingen, de zonneactiviteit, chaotische fluctuaties en vanaf het midden van de 20^e eeuw het door de mens versterkte broeikaseffect. Het broeikaseffect is tegenwoordig waarschijnlijk de overheersende factor.

Van jaar tot jaar worden de temperaturen in Nederland hoofdzakelijk bepaald door veranderingen in de overheersende windrichting. Op langere termijn vervagen die invloeden, al zijn ze niet verwaarloosbaar. In het bijzonder zijn de late winters/vroege lentes in de tweede helft van de 20^e eeuw aanmerkelijk warmer geworden door veranderingen in de overheersende windrichting. In het volgende hoofdstuk wordt bekeken waar die veranderingen in het windklimaat vandaan zouden kunnen komen.

Verder verkennen

De wetenschappelijke artikelen die ten grondslag liggen aan dit hoofdstuk:

G.J. van Oldenborgh en G.J. Komen, Hangt het warme weer de laatste tijd in Nederland samen met het versterkte broeikaseffect? *Meteorologica*, september 2001.

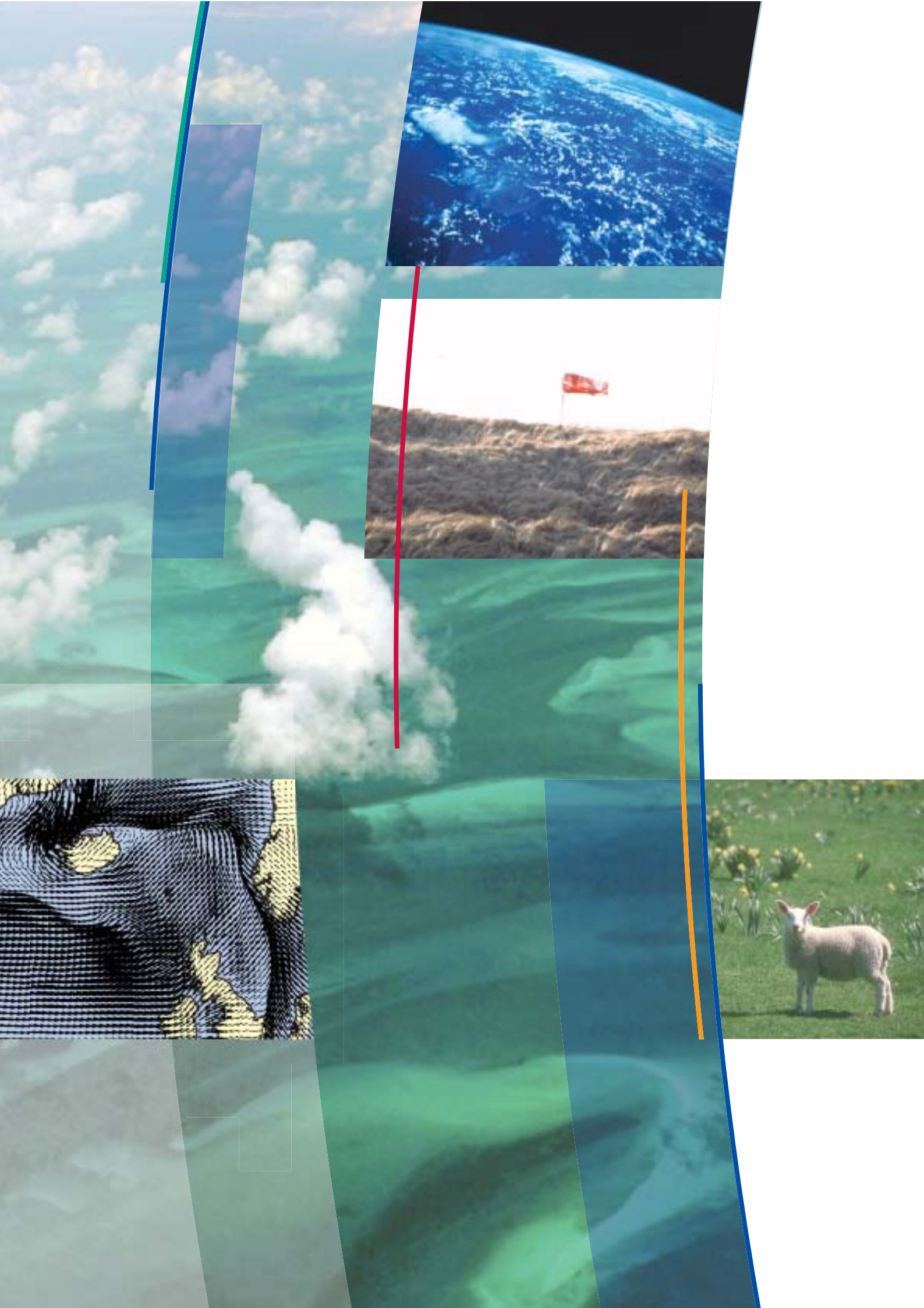
www.knmi.nl/onderzk/oceano/publ/oldenbor/debiltwarmer.html

G.J. van Oldenborgh, Temperatuur en windrichting in Nederland in de 20^e eeuw, *Meteorologica*, juni 2003.

www.knmi.nl/onderzk/oceano/publ/oldenbor/circulatie.html

G.J. van Oldenborgh en A. van Ulden, On the relationship between global warming, local warming in the Netherlands and changes in circulation in the 20th century, KNMI preprint 2003–05.

www.knmi.nl/onderzk/oceano/publ/oldenbor/circulation.html



In de voorgaande hoofdstukken is opgemerkt dat zachte winters en warme lentes in Nederland worden gekenmerkt door een overheersend zuidwestelijke wind. Ook is gebleken dat in de laatste tientallen jaren een zuidwestelijke wind in de winter en de lente vaker is voorgekomen, waardoor ons klimaat extra is opgewarmd. Dat lijkt geen toeval te zijn.

Waarom zachte winters en warme lentes?

In dit hoofdstuk komen mogelijke wetenschappelijke verklaringen van dit fenomeen aan bod.

Peter Siegmund en Wim Verkley

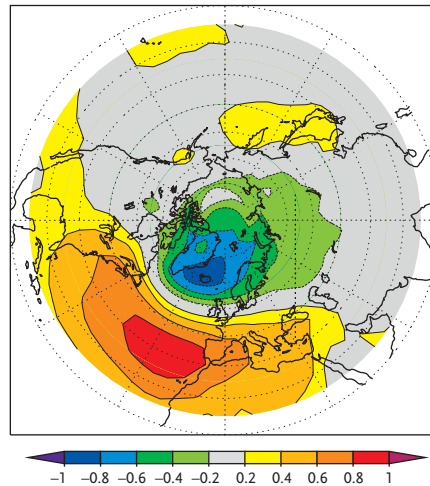
VERANDERINGEN IN DE windrichting in Nederland hangen samen met de ligging van hoge en lage drukgebieden in Europa. Het blijkt dat die drukgebieden deel uitmaken van grootschalige patronen die aan schommelingen onderhevig zijn. Dergelijke patronen staan al sinds de jaren dertig wetenschappelijk in de belangstelling. Bekende voorbeelden zijn de Noord Atlantische Oscillatie (NAO) en de Zuidelijke Oscillatie. De NAO heeft grote invloed op de West-Europese winters. De Zuidelijke Oscillatie hangt sterk samen met El Niño en is vooral van belang voor de tropen. In 'De toestand van het klimaat in Nederland 1999' is uitvoerig ingegaan op de NAO en de Zuidelijke Oscillatie. Recent onderzoek aan de NAO suggereert een verband tussen de afbraak van de ozonlaag, het door de mens versterkte

broeikaseffect en wijzigingen in het West-Europese windklimaat. Dat verband geeft mogelijk een verklaring voor de zachte winters en de warme lentes van de afgelopen decennia.

De Noord Atlantische Oscillatie

IN ESSENTIE VERWIJST de NAO naar variaties in het verschil in luchtdruk tussen de Azoren (een eilandengroep ten westen van Portugal) en IJsland. Is dat luchtdrukverschil groot, dan leert de wet van Buys Ballot dat West Europa te maken krijgt met een sterke westelijke stroming. Uit waarnemingen blijkt dat het bijbehorende drukpatroon (zie figuur 3.1) zich in het winterhalfjaar uitstrekt over de hele Noord Atlantische Oceaan, overeenkomstig de naam. De mate waarin het NAO-luchtdrukpatroon in de werkelijke drukverdeling tot uitdrukking komt,





Figuur 3.1. Het NAO-luchtdrukpatroon. Het minimum (blauw) ligt in de buurt van IJsland. Het maximum (oranje) valt samen met de Azoren.

varieert in de loop van de tijd en wordt uitgedrukt in een getal: de NAO-index. Een hoge NAO-index betekent voor Nederland een sterke zuidwesten wind nabij het aardoppervlak. In de winter en het vroege voorjaar leidt deze wind tot aanvoer van zachte oceaanolucht en daarmee tot hogere temperaturen.

De NAO-index varieert sterk van week tot week. Over langere periodes gemiddeld vertoont de NAO-index een geleidelijke daling van begin 1900 tot aan 1970, gevolgd door een relatief sterke stijging tot aan 1990 (zie figuur 3.2). Deze stijging is met name zichtbaar in de maanden februari, maart en april. Inmiddels lijkt de index weer wat af te nemen, al is de waarde nog steeds hoog. De invloed van de windrichting op de tienjaargemiddelde temperatuur in Nederland in de loop van de 20^e eeuw (zie figuur 2.2b) verloopt parallel aan de ontwikkeling van de NAO-index.

De veranderlijkheid van de NAO-index is al jarenlang een van de belangrijke onderwerpen in het klimaatonderzoek. De aandacht ging tot voor kort vooral uit naar natuurlijke invloeden, zoals de rol van Noord-Atlantische zeevatertemperaturen en El Niño.

De NAO als onderdeel van de Noordelijk Halfrond Oscillatie

RECENT ONDERZOEK HEEFT EEN NIEUW driedimensionaal drukpatroon geïden-

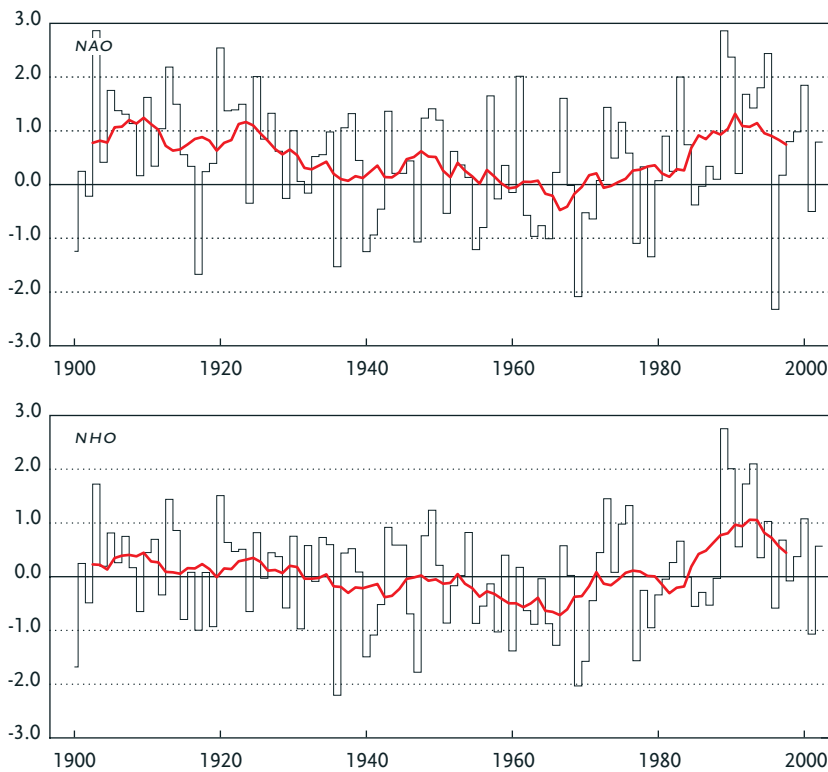
tificeerd dat zich uitstrekt tot ongeveer 50 km hoogte en het hele noordelijke halfrond beslaat: de Noordelijk Halfrond Oscillatie (NHO). *Figuur 3.3* toont het NHO-patroon op 20 km hoogte. De NHO laat een samenhang zien tussen de temperatuur en de druk van de atmosfeer op grote hoogte (de stratosfeer) en de wind nabij aardoppervlak. Zo blijkt in de winter een relatief lage temperatuur in de stratosfeer boven de Noordpool gepaard te gaan met een sterke westenwind in zowel de stratosfeer als daaronder, met hogere temperaturen in Nederland tot gevolg.

De mate waarin het NHO-patroon de werkelijke situatie beschrijft wordt uitgedrukt in de NHO-index. De ontwikkeling van de NHO-index verloopt parallel met die van de NAO-index (zie figuur 3.2). Het patroon van de NHO nabij het aardoppervlak komt ook overeen met het patroon van de NAO. In wezen is de NAO dus een onderdeel van de Noordelijk Halfrond Oscillatie. Het onderzoek naar de veranderlijkheid van de NAO-index is daarmee in een ander licht komen te staan omdat invloeden van de hogere luchtlagen in beeld gekomen zijn.

De invloed van de hogere luchtlagen op de NHO

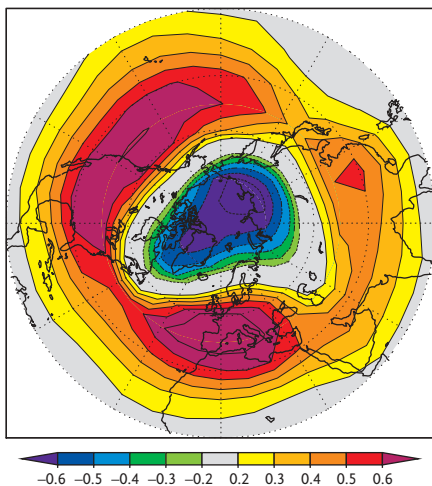
DE AFGELOPEN TIENTALLEN jaren zijn de hogere luchtlagen (de stratosfeer) wereldwijd aanmerkelijk kouder geworden. In de lagere stratosfeer (15–20 km hoogte) is de afkoeling sinds de jaren tachtig het sterkst boven de polen, aan het eind van de winter en het begin van de lente. In dezelfde periode is ook de westenwind op onze breedtegraad boven de Atlantische Oceaan zowel in de stratosfeer als nabij het aardoppervlak sterker geworden en is de NHO-index toegenomen, in overeenstemming met de hierboven beschreven driedimensionale structuur van het NHO patroon.

Uit wetenschappelijk onderzoek blijkt dat de stratosfeer om twee redenen zo sterk aan het afkoelen is. Voor de lagere stratosfeer is de oorzaak vooral gelegen in de afbraak van ozon. De hogere stratosfeer koelt af door zowel de ozon-



Figuur 3.2 Het tienjarig gemiddelde verloop van de NAO-index (boven) en de NHO-index (onder) in de loop van de 20^e eeuw, gedurende de winter. De rode lijn is het gemiddelde van 10 jaar.

afbraak als de toename van het broeikaseffect. Dat laatste moge wat vreemd overkomen: het broeikaseffect warmt de aarde immers op? Het punt is hier dat het broeikaseffect de lagere atmosfeer opwarmt, als het ware ten koste van de hogere atmosfeer, die er juist



Figuur 3.3 Het NHO-luchtdrukpatroon op ongeveer 20 km hoogte

door afkoelt. De afbraak van ozon en de toename van het broeikaseffect zijn beide het gevolg van menselijke activiteiten.

Het is dus mogelijk dat menselijke activiteiten samenhangen met de hoge waarde van de NHO-index en daarmee met de extra warme winters en lentes die Nederland de afgelopen tientallen jaren heeft meegemaakt. Het feitelijke wetenschappelijke bewijs hiervoor is evenwel nog niet geleverd. Een aantal modelstudies vertoont onder invloed van de ozonafbraak en het versterkte broeikaseffect inderdaad een stijging van de NHO-index in de winter. Er zijn nog wel grote onderlinge verschillen in de sterkte van de stijging. Ook kan nog niet geheel worden uitgesloten dat de toename van de NHO-index vanaf 1970 een natuurlijke fluctuatie is. In dit verband dient te worden opgemerkt dat de NHO-index ook relatief hoog was rond 1920, toen van een menselijke invloed op het klimaat nog nauwelijks sprake was.

Naast de hogere luchtlagen hebben ook de oceanen een belangrijke invloed op de NHO, die hier onbesproken blijft (zie Verder verkennen).

Zachte winters en warme lentes in de 21^e eeuw?

HET BROEIKASEFFECT ZAL in de loop van de 21^e eeuw verder toenemen, waardoor de stratosfeer naar verwachting verder zal afkoelen. Ook de afbraak van ozon zal waarschijnlijk nog enkele decennia aanhouden. De meeste onderzoeken geven aan dat de NHO-index in de winter tot halverwege de 21^e eeuw gemiddeld aan de hoge kant zal zijn. Een dergelijke ontwikkeling heeft relatief hoge winter- en lentetemperaturen in West-Europa tot gevolg.

Verder verkennen

Een overzichtsartikel over de NHO:

Hartmann, et al., 2000: Can Ozone Depletion and Greenhouse Warming Interact to Produce Rapid Climate Change? Proc. Nat. Acad. Sci., 97, 1412–1417.
www.pnas.org/cgi/content/full/97/4/1412

De invloed van de oceanen op de NHO:

Hoerling, et al., 2001: Tropical Origins for Recent North Atlantic Climate Change. Science: Vol.292, pp 90–92.

Rodwell, et al., 1999: Oceanic forcing of the winter North Atlantic Oscillation and European Climate. Nature, 398, 320–323.

Het klimaat in de

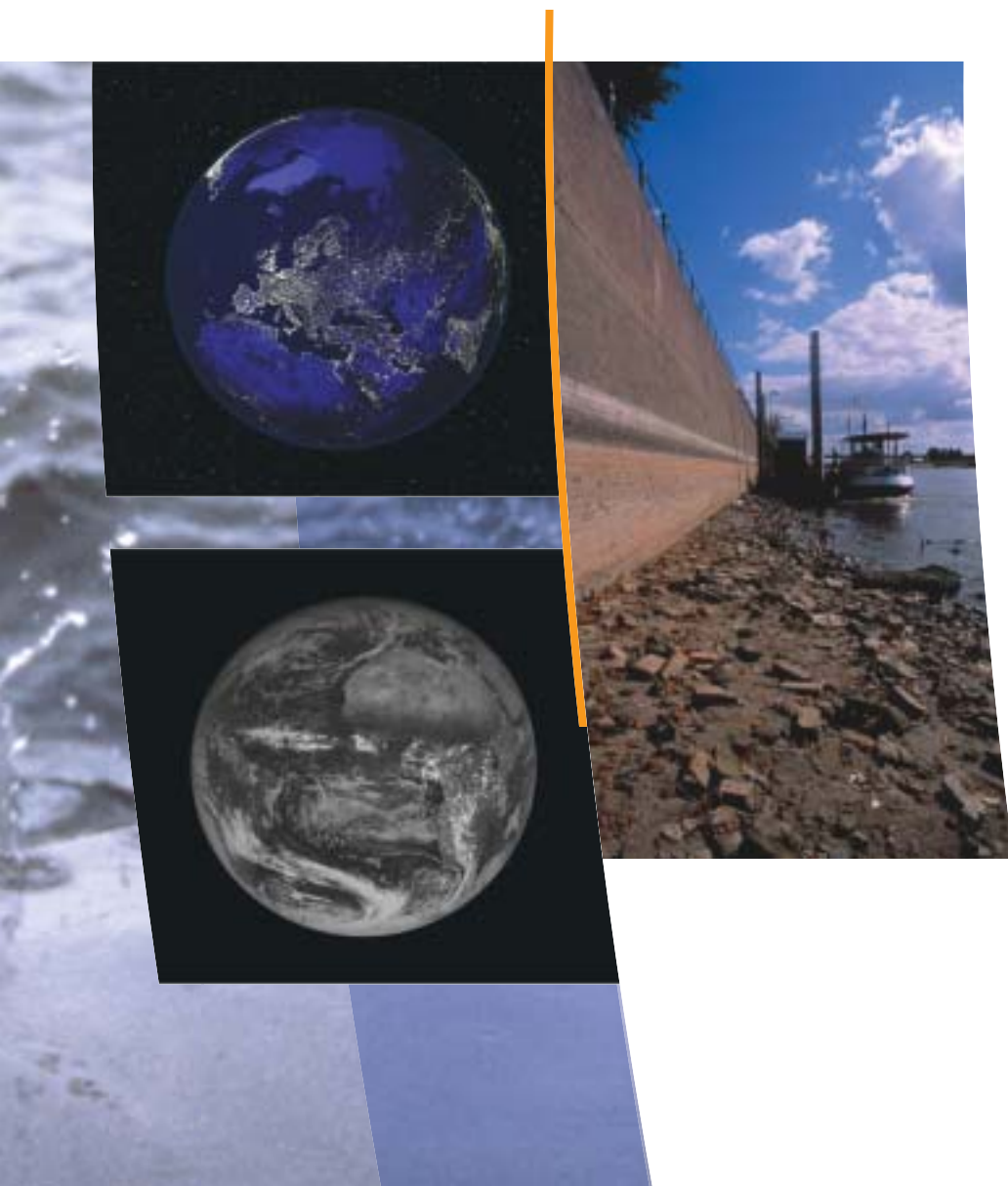


21^e eeuw

Het wereldklimaat verandert en het Nederlandse klimaat verandert mee.

Wat staat ons de komende eeuw te wachten? Klimaatwetenschappers schetsen het volgende toekomstbeeld. De invloed van de mens op het klimaat zal toenemen waardoor de wereldtemperatuur verder stijgt met 1 tot 6 graden. Meer en heviger neerslag is dan het gevolg. De zeespiegel zal wereldwijd stijgen met 10 tot 90 cm.

In Nederland heeft dat verstrekkende gevolgen voor met name de waterhuishouding. Vandaar dat het waterbeleid voor de 21^e eeuw nu al wordt afgestemd op het toekomstige klimaat.



IN DE VOORGAANDE hoofdstukken is het hoe en waarom van de ontwikkeling van het Nederlandse klimaat in de 20^e eeuw aan bod gekomen. De vraag is nu hoe de lijn zich zal voortzetten. Het antwoord ligt besloten in de kennis over de toestand van het huidige wereldwijde en Nederlandse klimaat, en de te verwachten invloeden in de 21^e eeuw.

Het wereldklimaat in de 20^e eeuw

HET WERELDKLIMAAT IS veranderd in de loop van de 20^e eeuw. De wereldgemiddelde temperatuur aan het aardoppervlak is sinds 1860 met ongeveer 0,6°C toegenomen. Zo'n sterke, snelle opwarming is de laatste duizend jaar waarschijnlijk niet eerder voorgekomen. Het is opmerkelijk dat vijf recente jaren (1995, 1997, 1998, 2001 en 2002) in ieder geval de warmste jaren waren sinds 1860 en waarschijnlijk zelfs in de afgelopen duizend jaar.

Door de temperatuurstijging is de bedekking van de aarde met sneeuw en ijs afgenomen. De zeespiegel is met 10 tot 20 cm gestegen, door opwarming van het zeewater en het smelten van landijs. De hoeveelheid neerslag op gematigde en hogere breedten is toegenomen, terwijl in de subtropen een afname is geconstateerd. Uit waarnemingen van de vegetatie blijkt dat wereldwijd de lengte van het groeiseizoen is toegenomen. Al deze feiten wijzen op een opwarming van het wereldwijde klimaat.

Zeer waarschijnlijk is die klimaatverandering in belangrijke mate door de mens veroorzaakt. De uitstoot van broeikasgassen, zoals CO₂, maar ook andere gassen zoals methaan en lachgas, versterken het natuurlijke broeikaseffect waardoor de aarde opwarmt.

Het wereldklimaat in de 21^e eeuw

UITGAANDE VAN AANNAMEN over de toekomstige uitstoot van broeikasgassen en binnen de beperkingen van de wetenschappelijke kennis over het klimaatstelsel heeft het IPCC in zijn derde klimaatrapport (zie kadertekst Het derde IPCC Klimaatrapport) het volgende beeld geschetst van de ontwikkelingen van het mondiale klimaat in de 21^e eeuw:

De wereldgemiddelde temperatuur zal in de periode 1990–2100 verder stijgen met 1,4 tot 5,8°C. De bovengrens is van dezelfde orde als de natuurlijke temperatuuroename sinds de laatste ijstijd, die zich over een veel langere periode van ongeveer 20.000 jaar heeft voorgedaan. De temperatuuroename boven de continenten van het noordelijk halfrond zal tot 40% sterker zijn dan boven zee. De waterkringloop intensificeert waardoor er wereldgemiddeld gezien meer en heviger neerslag wordt verwacht. Die toename zal vermoedelijk vooral plaatsvinden op de gematigde breedten, terwijl in de subtropen juist een afname wordt voorzien. Deze veranderingen gaan gepaard met toenemende jaarlijkse verschillen. Zee-ijs, gletsjers en landijs zullen zich verder terugtrekken, terwijl de ijsmassa van Antarctica door de vergroting van de lokale hoeveelheid neerslag juist zal toenemen. Het niveau van de zeespiegel zal naar verwachting met 9 tot 88 cm stijgen. De opwarming zal na de 21^e eeuw, ook bij gelijkblijvende concentraties broeikasgassen, nog vele eeuwen doorwerken. Uiteindelijk wordt op een termijn van duizend jaar een zeespiegelstijging van enkele meters verwacht.

Het Europese klimaat in de 21^e eeuw

DE GEMIDDELDE TEMPERATUUR in Europa zal vermoedelijk iets sterker toene-

Het derde IPCC klimaatrapport

Wereldwijd werken duizenden klimaatwetenschappers aan een beter begrip van het klimaatstelsel. De invloed van de mens op het klimaat is daarbij één van de centrale vraagstukken. Het grote maatschappelijke belang en de veelheid aan informatie maken dat de Verenigde Naties regelmatig overzichten laat opstellen van de wetenschappelijke inzichten op het gebied van klimaatverandering, om de balans van het klimaatvraagstuk te kunnen opmaken.

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) van de Verenigde Naties heeft in 2001 opnieuw een overzicht gepubliceerd. In dat rapport wordt de ontwikkeling van het wereldklimaat beschreven. Daarnaast zijn, uitgaande van verschillende sociaal-economische scenario's, uitspraken gedaan over de ontwikkeling van het wereldklimaat in de 21^e eeuw.

- Het rapport is gepubliceerd op internet (www.ipcc.ch)

Onzekerheden in klimaatverwachtingen

De klimaatwetenschap heeft de afgelopen jaren flinke vorderingen gemaakt. Zo is nu aangetoond dat de menselijke uitstoot van broeikasgassen het klimaat aanzienlijk beïnvloedt. De onzekerheden met betrekking tot het toekomstige klimaat zijn evenwel groot gebleven. Enerzijds is het onmogelijk om een nauwkeurig beeld te geven van de toekomstige sociaal-economische ontwikkeling van de wereld. Die ontwikkeling bepaalt uiteindelijk de toename van de hoeveelheid broeikasgassen en daarmee de verstoring van het klimaat. Anderzijds maakt de complexiteit van het klimaatsysteem dat de computermodellen waarmee klimaatverwachtingen worden opgesteld slechts een beperkte geldigheid hebben.

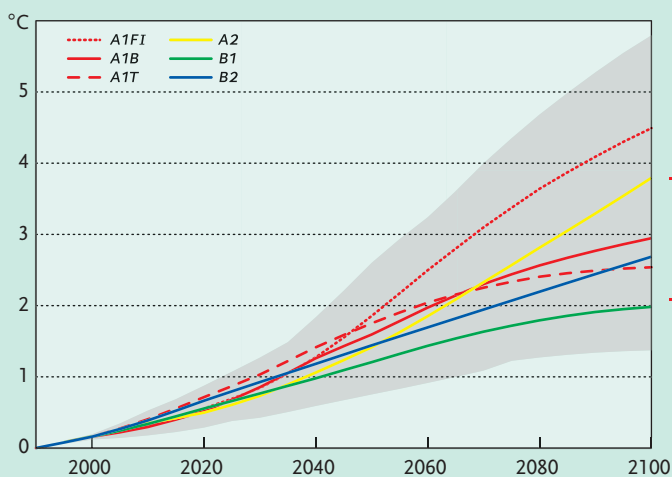
De sociaal-economische onzekerheden worden in kaart gebracht door te werken met scenario's waarin ideeën over sociale, economische en technologische ontwikkelingen worden gecombineerd tot plausibele toekomstbeelden. Gezamenlijk schetsen de scenario's de contouren van de toekomst.

Ieder scenario wordt doorgerekend met een reeks van klimaatmodellen.

De spreiding in het resultaat per scenario geeft zo een indruk van de onzekerheid van de modellen. Uiteindelijk levert deze werkwijze een waaier aan voorspellingen op. Op voorhand is niet aan te geven welke voorspelling de beste is. Daarom wordt de term voorspelling liever vermeden en spreekt men van projecties.

Naast de klimaatmodellen die het complete wereldklimaat simuleren wordt steeds meer geïnvesteerd in fijnmazige klimaatmodellen voor bepaalde regio's. Dergelijke modellen zijn nodig om uitspraken te kunnen doen over de gevolgen van de wereldwijde opwarming voor bijvoorbeeld West-Europa.

Regionale klimaatverwachtingen zijn relatief lastig omdat kleine verschuivingen in ruimtelijke klimaatpatronen al snel een groot verschil maken op de regionale schaal. Bovendien zijn de jaar tot jaar fluctuaties in specifieke regio's over het algemeen veel groter dan de veranderingen in het wereldgemiddelde. De komende jaren staat de verdere verbetering van regionale klimaatprojecties dan ook hoog op de onderzoeksagenda.



Figuur 4.1. Wereldgemiddelde temperatuurprojecties voor de 21^e eeuw volgens het IPCC. De gekleurde lijnen in de figuur tonen het temperatuurverloop voor zes scenario's, gemiddeld voor zeven klimaatmodellen. De gekleurde balken rechts geven voor elk scenario de spreiding van de zeven klimaatmodellen weer. Het grijze gebied toont de spreiding van alle temperatuurprojecties.

men dan het wereldgemiddelde. De kans op hittegolven neemt toe, de kans op vorstdagen neemt af. In de Scandinavische landen zal de wintertemperatuur waarschijnlijk veel sterker stijgen dan het wereldgemiddelde. In Zuid-Europa lijken juist de zomertemperaturen omhoog te gaan. De zeespiegelstijging voor West-Europa zal niet wezenlijk afwijken van het wereldgemiddelde, al moet men voor Nederland ook nog rekening houden met een bodemdaling van 10 cm per eeuw, vanwege inklinking van de veengronden.

Het grillige karakter van neerslag maakt uitspraken over toekomstige ontwikkelingen onzeker. Er is een redelijke wetenschappelijke overeenstemming dat de winterneerslag in Noord-Europa met 5 tot 20% zal toenemen, met name in Scandinavië, maar ook op lagere breedtegraden. In de zomer is de neerslagverandering onzeker. In Zuid-Europa kan de neerslag met meer dan 20% afnemen.

Er wordt een toename van zware neerslag en de kans op uitschieters verwacht. Dat geldt zowel op een termijn van dagen als op een termijn van jaren.

De hogere temperaturen brengen meer verdamping met zich mee. In de zomer zal de verdamping meer toenemen dan de neerslag, terwijl in de winter de toename van neerslag de overhand heeft. De kans op zomerdroogte neemt toe, met name in Zuid-Europa.

Er bestaat een kleine kans op abrupte veranderingen in het klimaatstelsel

met vermoedelijk grote gevolgen. Dat soort veranderingen is niet of nauwelijks opgenomen in de huidige klimaatprojecties. Zo kan een verzwakking van de Warme Golfstroom een aanzienlijke verlaging van de gemiddelde temperatuur in West-Europa bewerkstelligen. Een ander voorbeeld is het afsmelten van de West Antarctische ijskap. Sommige onderzoeken geven aan dat die ijskap bij een temperatuurstijging van enkele graden in zee zal schuiven met een zeespiegelstijging van een meter per eeuw tot gevolg. Volgens de huidige inzichten is de kans dat dat daadwerkelijk gebeurt in de 21^e eeuw zeer klein.

KNMI klimaatscenario's voor 2100: Nederland wordt natter

DE HUIDIGE KLIMAATMODELLEN geven aan dat de te verwachten temperatuurstijging in Nederland nagenoeg in de pas loopt met de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur, in overeenstemming met de conclusies van hoofdstuk 2 van dit rapport. Uitgaande van de wereldgemiddelde temperatuurprojecties van het IPCC heeft het KNMI een drietal klimaatscenario's ontwikkeld voor het Nederlandse klimaat in het jaar 2100.

Deze klimaatscenario's zijn het uitgangspunt voor verkennende studies van de gevolgen van klimaatverandering voor Nederland en omgeving. Zo wordt het nationale waterbeleid voor de 21^e eeuw mede gebaseerd op deze inzichten.

	Lage schatting	Centrale schatting	Hoge schatting
Temperatuur	+ 1 °C	+ 2 °C	+ 4 tot 6 °C
Gemiddelde zomerneerslag	+ 1 %	+ 2 %	+ 4 %
Zomerverdamping	+ 4 %	+ 8 %	+ 16 %
Gemiddelde winterneerslag	+ 6 %	+ 12 %	+ 25 %
Jaarlijks maximum van de 10-daagse winterneerslagsom in Nederland	+ 10 %	+ 20 %	+ 40 %
Herhalingstijd van 10-daagse som die nu eens per 100 jaar voorkomt (≥ 140 mm)	47 jaar	25 jaar	9 jaar
Zeespiegelstijging	+ 20 cm	+ 60 cm	+ 110 cm

Tabel 4.1. KNMI Klimaatscenario's voor Nederland in 2100 op basis van het derde IPCC rapport. De temperatuurrange onder de hoge schatting (+4 tot 6°C) geeft aan dat de bijbehorende effecten op de neerslag min of meer onveranderlijk zijn in dat temperatuurgebied. Het jaarlijks maximum van de tiendaagse neerslagsom geeft een indruk van de hevigheid van extreme neerslag. De herhalingstijd van de tiendaagse winterneerslagsom geeft een indruk van de kans op extreme neerslag. De zeespiegelstijging is hier gecorrigeerd voor naijleffecten en de Nederlandse bodemdaling.

Minder elfstedentochten?

In de afgelopen eeuw zijn 15 elfstedentochten verreden. Er waren 38 winterse perioden waarin het ijs dik genoeg was. Niet iedere mogelijkheid is benut omdat de organisatoren lang van tevoren moeten weten of het ijs dik genoeg wordt. De kwaliteit van de weersverwachtingen en het vertrouwen erin spelen hier een rol.

De verwachte temperatuurtoename in Nederland zal de kans op koude perioden verkleinen. Uitgaande van de gegevens over de 20^e eeuw kan een schatting worden gemaakt van het aantal te verwachten elfstedentochten in de 21^e eeuw. Bij gelijkblijvende verhouding tussen benutte en onbenutte kansen levert dat het volgende beeld op.



Er zijn dus minder elfstedentochten te verwachten, tenzij de kwaliteit van de weersverwachtingen en het vertrouwen erin verder worden verbeterd.

	Elfstedentochten	Geschiedte koudeperioden
20 ^e eeuw	15	38
21 ^e eeuw, IPCC laag	10	26
21 ^e eeuw, IPCC hoog	4	10

Tabel 4.2. Schatting van het aantal elfstedentochten en geschikte koudeperioden in de 21^e eeuw, op basis van de uitersten van de IPCC-projecties, onder aanname van gelijkblijvende verhouding tussen benutte en onbenutte kansen.

het binnendringen van zoutwater. In droge zomers kan de vraag naar water de aanvoer overstijgen waardoor de kans op waterschaarste toeneemt.

De zeespiegelstijging vergroot de indringing van zoutwater in de kustgebieden, met gevolgen voor de drinkwatervoorziening en toepassingen in de landbouw. De kusterosie neemt toe. Het spuien van overtollig rivierwater uit bijvoorbeeld het IJsselmeer zal worden bemoeilijkt. De kans op hoge waterstanden aan de kust neemt in beginsel toe. De hoge onzekerheid van de invloed van klimaatverandering op het stormklimaat maakt dat veranderingen in de kans op hoogwater nog niet goed bekend zijn.

Toekomst van het onderzoek

De kennis over het klimaatsysteem is de laatste tientallen jaren aanzienlijk toegenomen. Het is nu mogelijk om een plausibele bandbreedte van toekomstige wereldwijde klimaatveranderingen te bepalen. Wetenschappelijk gezien wordt nauwelijks meer getwijfeld aan een verdere opwarming in de loop van de 21^e eeuw, als gevolg van de menselijke invloed op het klimaat. Dat neemt niet weg dat er nog veel onderzoek nodig is om de bestaande onzekerheden te verkleinen en de toepasbaarheid van de kennis te vergroten.

Verder verkennen

Een samenvatting van het derde klimaatrapport van het IPCC ten behoeve van het waterbeheer:
www.knmi.nl/voorklimaat/folderweerenwater.pdf

Brandsma, T., 2001, Hoeveel elfstedentochten in de 21^e eeuw?, Zenit, 28, 194–197.

Zelf experimenteren met oorzaken van de wereldwijde temperatuurverandering:
www.nat.vu.nl/~hs/Greenz

Voor wat betreft de neerslag zijn deze scenario's opgesteld door waargenomen verbanden tussen neerslag en temperatuur in Nederland door te trekken naar de toekomstige temperaturen. Daarbij is aangenomen dat die verbanden ook geldig zijn in het veranderde klimaat. Bovendien is aangenomen dat de atmosferische circulatie en het aantal dagen waarop neerslag valt niet wezenlijk veranderen. Het KNMI heeft onlangs een groot onderzoeksproject opgestart om met behulp van een geavanceerd regionaal klimaatmodel de Nederlandse klimaatscenario's op deze punten te verbeteren.

Gevolgen voor Nederland

DE VERWACHTE TOENAME van de neerslag zal gepaard gaan met een toename van de kans op perioden met extreme neerslag en de kans op natte jaren.

Waterbeheerders houden daar nu al rekening mee. Tegenover de kleine toename van de gemiddelde zomerneerslag staat een sterkere toename van de verdamping in de zomer, met grotere kans op verdroging tot gevolg. Toch neemt de kans op lokale wateroverlast ook in de zomer toe, als gevolg van de toename van de kans op hevige lokale buien.

De verwachte invloeden op de neerslag en de verdamping in Europa vergroten de gemiddelde afvoer van de Rijn in de winter. Bij gelijke dijkhoogte verhoogt dat de kans op overstromingen. In de zomers wordt een verlaging van de gemiddelde afvoer voorzien. Dat leidt tot lagere waterstanden, die de scheepvaart kunnen hinderen. Lagere afvoeren hebben een negatieve invloed op de waterkwaliteit en vergemakkelijken

Colofon

Algehele redactie

Koos Verbeek

Vormgeving

Studio KNMI, Birgit van Diemen

Productie en coördinatie

Johan Bremer

Lithografie en druk

Drukkerij Van de Ridder, Nijkerk

Fotografie

Ab Baas, De Vlinderstichting

KNMI

NASA

NFP Rechtenvrij

NOAA/AOML/Hurricane Research Division

NOS

Raoul Somers

Peter-Paul Hattinga Verschure

B. Wammes

Weather Pictures International

Papier

Binnenwerk: Reviva Mega mat, 150 g/m²

Omslag: Reviva Mega mat, 250 g/m²

Reviva Mega bestaat uit 50% recycled en 50% totaal chloorvrij papier.

Het omslag is voorzien van een mat laminaat. Voor de productie hiervan is geen gebruik gemaakt van zware metalen, chloorverbindingen of pvc. Zowel het omslag als het binnenwerk is geschikt voor recycling van oud papier. Bij huisvuilstort vindt geen grondwater- of bodemverontreiniging plaats.

Electronische versie

www.knmi.nl/voorl/nader/klim/klimaatrapportage2003.html

Oplage

6000

© KNMI, De Bilt, april 2003