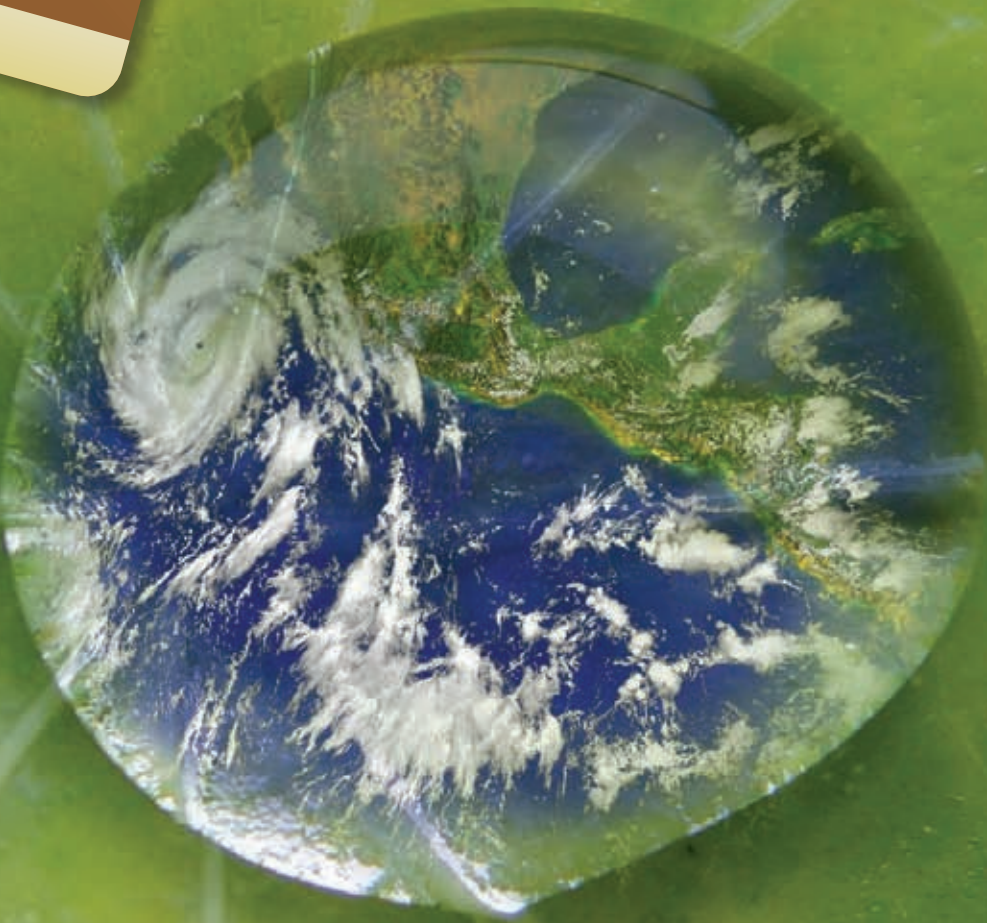




# De toestand van het klimaat

*in Nederland 2008*







Voorwoord 4

Samenvatting 5

Opnieuw vijf warme jaren in Nederland 6

Nederland warmt sneller op dan verwacht 16

Neerslag en droogte 24

Troposferisch ozon en het klimaat 34

Temperatuurreksen 42

Inhoudsopgave

## Voorwoord

De wereld warmt op en het Nederlandse klimaat ook. Elk van de afgelopen vijf jaren is ruim warmer dan het langjarige gemiddelde geweest. Dit is het vijfde rapport in een reeks waarin het KNMI om de vijf jaar de waargenomen ontwikkeling van het Nederlandse klimaat vanuit een meteorologisch perspectief bespreekt. Het is opgesteld ten behoeve van overheden, organisaties en het algemene publiek.

Het KNMI is het nationale kenniscentrum op het gebied van weer, klimaat en seismologie. De rol van nationale weerdienst brengt met zich mee dat het KNMI als operationeel bedrijf dagelijks data inwint en verwachtingen, adviezen en waarschuwingen produceert. Daarnaast wordt op langere tijdschaal weer- en klimaatonderzoek gedaan op grond van wetenschappelijke vragen, vragen van beleidsmakers en vragen uit de samenleving. Juist die combinatie van operationele taken, onderzoekswerk en concrete vragen uit de samenleving geeft het KNMI een uniek perspectief en mogelijkheden. Dit rapport is een mooi voorbeeld van het samenbrengen van waarnemingen en onderzoek.

Dit rapport informeert u over de toestand van het klimaat in Nederland zoals we dat de afgelopen jaren meemaakten. In het eerste hoofdstuk van dit rapport kijken we terug op het weer van de afgelopen jaren en bespreken de opvallende gebeurtenissen, zoals stormen, bijzonder warme perioden of plaatselijke wateroverlast door overvloedige regen. We zetten die opvallende gebeurtenissen in de context van het Nederlandse klimaat over een veel langere periode om na te gaan hoe zeldzaam die opvallende gebeurtenissen zijn en om na te gaan of ze nu misschien vaker of juist minder vaak voorkomen dan vroeger.

De onderzoeksresultaten, die in de hoofdstukken twee en drie worden beschreven, geven inzicht in de mogelijke oorzaken van de opvallende weergebeurtenissen van de afgelopen jaren. De waargenomen opwarming van Nederland wordt vergeleken met waarnemingen in landen om ons heen en met modelberekeningen en zo in een bredere context geplaatst. We gaan wat dieper in op overvloedige zomerse regenval bij de kust en op diverse droge periodes. In hoofdstuk vier komt het luchtkwaliteit-onderzoek aan de orde, door het verband tussen de opwarming en het ozongehalte in de atmosfeer nader te beschouwen. Aan het eind vindt u informatie over temperatuurreksen en meteorologisch taalgebruik.

Klimaatverandering staat nu midden in de belangstelling van samenleving, politiek en wetenschap. Er wordt momenteel veel onderzoek naar gedaan want er zijn veel onzekerheden en vragen. Maar op vragen over het toekomstige klimaat dat in Nederland mogelijk is, gaan we in deze rapportage niet in. Met de "KNMI'06 klimaatscenario's voor Nederland", die we in het voorjaar van 2006 publiceerden, wordt aan de behoefte aan informatie daarover tegemoet gekomen.

De inhoud van dit rapport staat natuurlijk niet op zichzelf. Aan het eind van ieder hoofdstuk staat, onder het kopje "verder lezen", steeds een aantal verwijzingen naar literatuur en naar webadressen waarin meer informatie te vinden is. Het KNMI heeft ook een speciale website ingericht, [www.knmi.nl/toestandklimaat](http://www.knmi.nl/toestandklimaat), met toelichting en verdieping van dit rapport.

Wij hopen dat dit rapport een waardevolle bron van informatie is, die uitnodigt tot kennisname en verdere verdieping in het onderwerp klimaat!

Juli 2008

**Dr ir Frits Brouwer, Hoofddirecteur**

**Dr Hein Haak, Directeur Klimaat en Seismologie**

## Samenvatting

### Opnieuw vijf warme jaren

De opwarming van het Nederlandse klimaat heeft zich de afgelopen vijf jaar onverminderd doorgezet. De jaren 2006 en 2007 zijn de warmste sinds het begin van de Nederlandse metingen in 1706 geweest. Inmiddels zijn de opwarming en de gevolgen ervan voor de natuur goed merkbaar. Neerslag en wind vertonen van 2003 tot 2007 net als in andere periodes een grote variabiliteit. In de afgelopen vijf jaar zijn 2004 en 2007 nat geweest, terwijl 2003 een droog jaar was. 2005 en 2006 waren gemiddeld. Extreme windsituaties zijn er nauwelijks geweest. Een uitschieter is de storm van 18 januari 2007. Die is met zijn windkracht 10 de enige zware storm in vijf jaar geweest.

### Nederland warmt sneller op dan verwacht

De aarde warmt op door het versterkte broeikaseffect en Nederland heeft een uitzonderlijke reeks warme seizoenen achter elkaar meegemaakt. *Past de opwarming van Nederland tot nu toe in het beeld van de mondiale klimaatverandering, rekening houdend met de grillige weer- en klimaatschommelingen die van nature ons klimaat bepalen?*

Nederland is sinds 1950 twee keer zo snel opgewarmd als de wereldgemiddelde temperatuur. Die snellere opwarming wordt hoogstwaarschijnlijk niet veroorzaakt door natuurlijke schommelingen. De temperaturen van herfst 2006, winter 2007 en voorjaar 2007 zijn - zelfs als we rekening houden met de snellere opwarming van Nederland - uitzonderlijk grote afwijkingen boven de trend.

### Kustneerslag en zomerdroogte

In de (late) zomer is de Nederlandse kust gemiddeld natter dan de rest van het land. Ook in de afgelopen zomers is een paar keer sprake geweest van overvloedige regenval en wateroverlast in kustprovincies. *In hoeverre heeft het warme Noordzeewater daar mee te maken? Naast die uitzonderlijke regenval waren er ook een paar heel droge periodes. Hoe ongewoon waren die eigenlijk?*

Het warme Noordzeewater blijkt inderdaad de zomerse neerslag aan de kust te kunnen versterken. Naarmate Nederland verder opwarmt, zal dat effect sterker worden. De droge zomer van 2003 was niet zo uitzonderlijk: zulke droge jaren zijn er zo af en toe in Nederland. Maar droogte zoals in het voorjaar van 2007 is nog nooit gezien. Dit leidde echter niet tot een record droge zomer, want de droge periode was al voorbij toen de zomer begon.

### Ozon in de troposfeer in interactie met het klimaat

De (chemische) samenstelling van de atmosfeer hangt op vele manieren samen met de toestand van het klimaat op mondiale, regionale en lokale schaal. Hier worden een aantal aspecten van deze interactie besproken aan de hand van veranderingen die in recente jaren zijn waargenomen in de ozonconcentraties boven Europa.

Troposferisch ozon is na kooldioxide en methaan het belangrijkste broeikasgas. Maar in de schattingen van de invloed van ozon op het klimaat zitten grote onzekerheden. Een beter begrip van troposferisch ozon is daarom van groot belang.



# Opnieuw vijf warme jaren

## *in Nederland*



Rob Sluijter

*De opwarming van het Nederlandse klimaat heeft zich de afgelopen vijf jaar onverminderd doorgezet. De jaren 2006 en 2007 zijn de warmste sinds het begin van de Nederlandse metingen in 1706 geweest. Sinds 2003 zijn alle seizoenen warmer dan normaal verlopen, met uitzondering van de winter van 2003 en 2006 en de herfst van 2003 en 2007.*

*Deze oplopende temperaturen in Nederland liggen in de lijn der verwachtingen die in de vorige KNMI-klimaatrapportages zijn beschreven. Inmiddels zijn de opwarming en de gevolgen ervan voor de natuur goed merkbaar. Klimaatverandering is de afgelopen vijf jaar dan ook een belangrijk thema geworden. Uiteraard hebben Al Gore's film *An Inconvenient Truth* en de rapportages van het IPCC hier aan bijgedragen.*

*Neerslag en wind vertonen van 2003 tot 2007 net als in andere periodes een grote variabiliteit. In de afgelopen vijf jaar zijn 2004 en 2007 nat geweest terwijl 2003 een droog jaar was, 2005 en 2006 waren gemiddeld. Extreme windsituaties hebben zich nauwelijks voorgedaan. Een uitschieter is de storm van 18 januari 2007. Die is met zijn windkracht 10 de enige zware storm in vijf jaar geweest.*

## TEMPERATUURSTIJGING

Alle jaren van 2003 tot 2008 zijn ruim warmer geweest dan het langjarige gemiddelde van 9,8 °C. Drie ervan staan hoog in de lijst van warmste jaren sinds het begin van de regelmatige metingen in 1706 (tabel 1.1).

| Jaar             | Temperatuur (°C) |
|------------------|------------------|
| 2007, 2006       | 11,2             |
| 2000, 1999, 1990 | 10,9             |
| 2002             | 10,8             |
| 2005, 1989, 1779 | 10,7             |
| 1994             | 10,6             |
| 2001, 1998, 1995 | 10,4             |

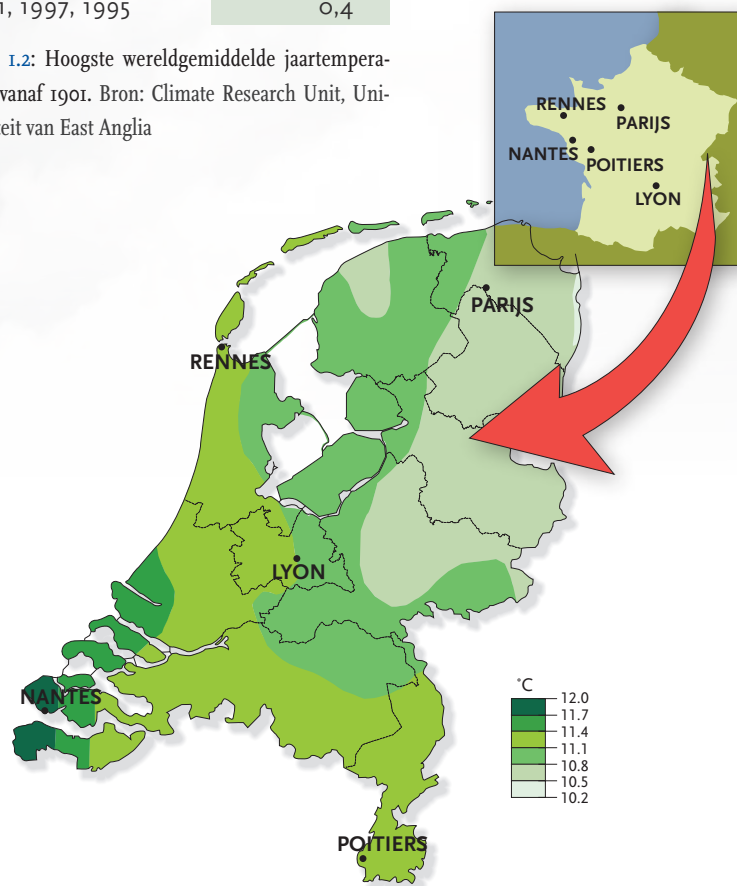
**Tabel 1.1:** Hoogste jaartemperatuur vanaf 1706 in De Bilt. De jaartemperatuur in De Bilt is representatief voor Nederland. Van 1706 tot 1900 zijn de gegevens herleid uit metingen in Zwanenburg en Utrecht.

Als we de recente warmte in perspectief zetten (zie figuur 1.1), dan blijkt dat de gemiddelde temperaturen in Nederland in 2006 en 2007 vergelijkbaar zijn met het klimaat in midden-Frankrijk tegen het eind van de vorige eeuw. Dat gebied ligt ongeveer 600-800 kilometer zuidelijk van ons land.

Wereldwijd behoren de afgelopen vijf jaren bij de warmste in ruim een eeuw (tabel 1.2). Het decennium 1998-2007 was het warmste sinds tenminste 1850.

| Jaar             | Temperatuurafwijking (°C)<br>t.o.v. gemiddelde 1961-1990 |
|------------------|--|
| 1998             | 0,6  |
| 2005, 2003, 2002 | 0,5  |
| 2007, 2006, 2004 | 0,4  |
| 2001, 1997, 1995 | 0,4  |

**Tabel 1.2:** Hoogste wereldgemiddelde jaartemperatuur vanaf 1901. Bron: Climate Research Unit, Universiteit van East Anglia



**Figuur 1.1:** De jaargemiddelde temperatuur zoals die op Nederlandse stations in 2006 en 2007 werd geregistreerd was gelijk aan het langjarig gemiddelde (1961-1990) van de temperatuur van steden in Frankrijk, op een afstand van 600 tot 800 km zuidelijk van ons land.

### 2006/2007: Record zachte winter

Met een gemiddelde temperatuur van 6,5 °C tegen een langjarig gemiddelde van 3,3 °C was deze winter de zachtste sinds het begin van de waarnemingen in 1706. Vooral het uitzonderlijk zachte karakter van januari viel op. Met een gemiddelde temperatuur van 7,1 °C tegen 2,8 °C normaal bleek ook deze maand de zachtste sinds 1706. Ijsdagen kwamen in een groot deel van het land helemaal niet voor, het langjarige gemiddelde bedraagt acht. Het aantal vorstdagen kwam in De Bilt uit op vijftien tegen normaal 38. Vaak ging het slechts om een enkel graadje vorst. Regelmatig steeg de temperatuur tot 10 °C of hoger, in De Bilt op maar liefst 42 van de 90 winterdagen. Dat was niet eerder voorgekomen.

### 2007: Zachtste lente in tenminste drie eeuwen

Met in De Bilt een gemiddelde temperatuur van 11,7 °C tegen 8,9 °C normaal was de lente veruit de zachtste sinds tenminste het begin van de regelmatige waarnemingen in 1706. Vooral de uitzonderlijke warmte in april viel op, deze maand was met 13,1 °C vijf graden warmer dan normaal. De maand telde veertien warme en zeven zomerse dagen, beiden nieuwe records.

### 2003 en 2006: Zomers bij de warmste in 100 jaar

De zomer van 2003 voert samen met die van 1947 de lijst aan van warmste zomers sinds 1901. 2003 had een gemiddelde temperatuur van 18,6 °C, 1947 18,7 °C. De warmte hield lang aan. Dit komt tot uiting in het record aantal

warme dagen dat werd opgetekend: 83. Daarnaast werden 40 zomerse en elf tropische dagen gemeten.

Zelden heeft een zomer zo'n twee totaal verschillende gezichten laten zien als die van 2006. Juni en juli waren zeer zonnig, zeer droog en warm. Augustus echter was koel, zeer somber en record nat. Juli was de warmste kalendermaand in de complete meetreeks vanaf 1706. De warmte kwam in twee hittegolven. De tweede duurde maar liefst zestien dagen, waarmee deze hittegolf bij de langstduurende hittegolven na 1901 hoort (zie figuur 1.5). In totaal werden in De Bilt in juli de recordaantallen van 31 warme, 26 zomerse en 11 tropische dagen genoteerd. Uiteindelijk eindigde de zomer van 2006 op de derde plaats van warmste zomers in ruim een eeuw met een gemiddelde temperatuur van 18,5 °C.

### 2005 en 2006: Twee opeenvolgende herfstseizoenen uitzonderlijk zacht

De gemiddelde temperatuur over de herfst in 2005 was 12,0 °C tegen normaal 10,2 °C, de hoogste waarde sinds 1706. In 2007 werd dit record alweer gebroken, de herfst eindigde toen met een gemiddelde temperatuur van 13,6 °C. In 2005 werd het van 27 tot en met 31 oktober, plaatselijk in het noorden en midden van het land, nog twintig graden of meer. In 2006 werden tot laat in november maxima van boven de 15 °C gemeten. Dit zijn uitzonderlijke waarden voor de tijd van het jaar.

Box 1.1 Opvallende seizoenen



### VERSCHILLEN PER SEIZOEN

Om een goed beeld van de temperatuurontwikkeling in Nederland te krijgen, worden de seizoenen van voorbijgaande jaren met elkaar vergeleken. In figuur 1.2 wordt de temperatuurontwikkeling over de periode 1901-2007 geïllustreerd aan de hand van een kleurcodering. De seizoenen zijn ingedeeld in vijf klassen: veel kouder dan normaal, kouder dan normaal, normaal, warmer dan normaal, veel warmer dan normaal. Voor ieder jaar en elk seizoen zijn op deze manier de afwijkingen weergegeven ten opzichte van het langjarig gemiddelde in het tijdvak 1961-1990.

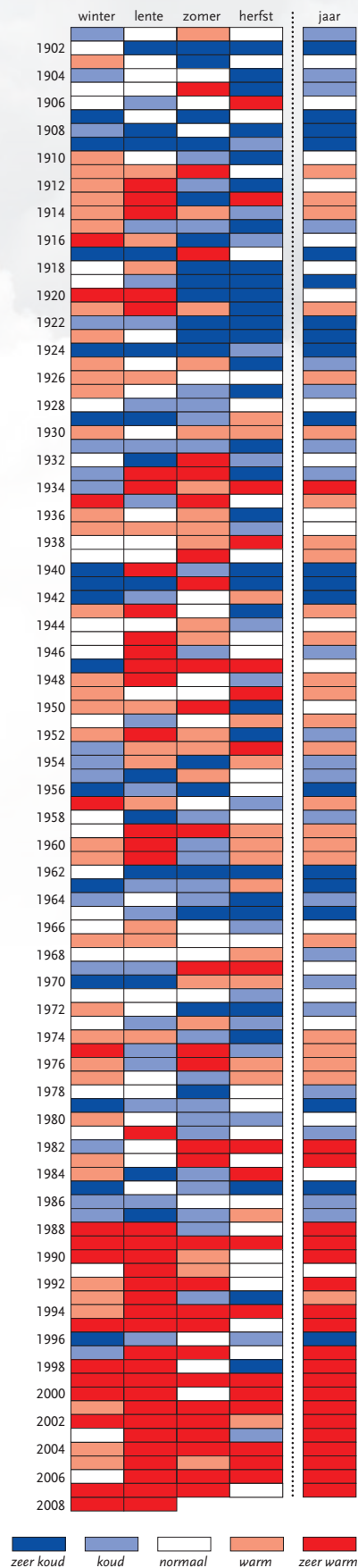
Met uitzondering van de winter van 2003 en 2006 en de herfst van 2003 en 2007 zijn alle seizoenen de afgelopen vijf jaar warmer dan normaal verlopen. De herfstseizoenen van 2005 en 2006, de winter en de lente van 2007 waren de warmste sinds tenminste 1706, het begin van de regelmatige waarnemingen in ons land. De zomer van 2003 was de warmste sinds 1947; die van 2006 eindigde op de derde plaats.

Het ligt voor de hand om te denken dat al deze warmte te maken heeft met het - door de mens veroorzaakte - versterkte broeikas effect.

*Maar is dat ook zo? Passen deze warme episodes in Nederland bij het beeld dat de klimaatonderzoekers hebben van de mondiale opwarming?* In het volgende hoofdstuk van deze rapportage kijken we daar naar en verdiepen we ons in de achtergronden van deze uitzonderlijke reeks van warme seizoenen.

### OPWARMING MERKBAAR

De bijzonder hoge temperaturen door het jaar heen hebben de afgelopen jaren geleid tot voor Nederland atypische verschijnselen zoals stranddagen in april en terrasbezoek in februari. De opwarming is het meest tastbaar tijdens extreme gebeurtenissen, bijvoorbeeld tijdens een hittegolf (zie box 1.2). De periode van 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 - figuur 1.4. De opwarming gaat gepaard met een sterke toename van het aantal warme dagen en een afname van het aantal koude dagen. De rond 1975 ingezette stijging van het aantal warme dagen heeft zich over de afgelopen vijf jaar voortgezet. Vooral het extreem warme jaar 2006 scoort met 103 dagen bijzonder hoog.



Figuur 1.2: Afwijking van de seizoens- en jaargemiddelde temperatuur in De Bilt.

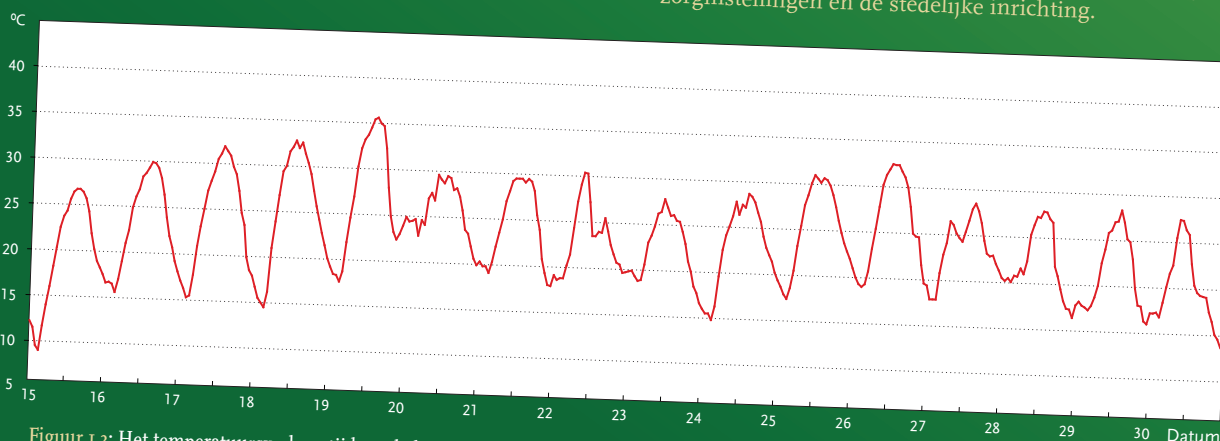
Aanhoudende hitte vormt een gezondheidsrisico voor bepaalde groepen zoals ouderen, chronisch zieken en mensen met overgewicht. Ze kunnen gezondheidsproblemen krijgen door de warmte, en de kwaliteit van hun leven gaat sterk achteruit.

Het nationaal hitteplan is er op gericht dit zoveel mogelijk te voorkomen en te verminderen. Het hitteplan is opgesteld in samenwerking tussen het Ministerie van vws, het RIVM, het Nederlandse Rode Kruis, GGD-Nederland en het KNMI.

Het plan bevat een waaier van maatregelen die gericht zijn op de goede voorbereiding op en adequaat handelen tijdens een periode van aanhoudende hitte.

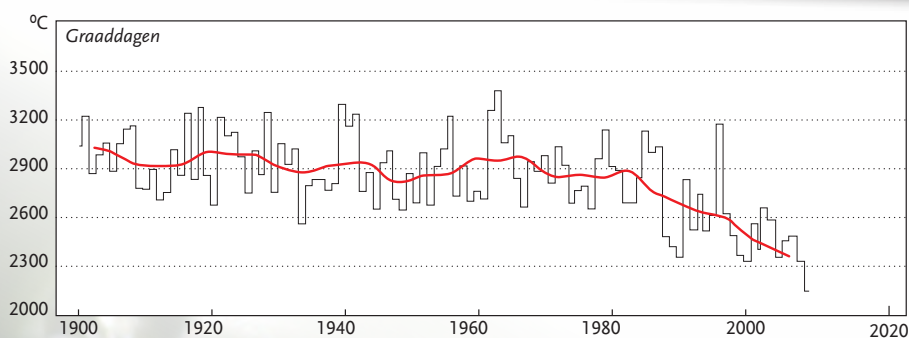
Het KNMI waarschuwt het RIVM als er een tijdvak van vijf of meer dagen met een maximumtemperatuur van 27 °C of hoger wordt verwacht. Op basis van deze informatie kan het RIVM een alarmering in gang zetten. Er gaat een waarschuwing uit naar het publiek indien de kans op aanhoudende hitte meer dan 90% bedraagt. Er volgen daarna gedragsadviezen, gericht op de doelgroepen. Hierbij zijn veel spelers betrokken zoals GGD's, huisartsen en de thuiszorg.

In het hitteplan wordt aangegeven dat in het kader van de klimaatverandering de komende jaren gekeken moet worden naar de mogelijkheden voor lange termijn maatregelen, zoals hittebestendig bouwen, klimaatbeheersing in zorginstellingen en de stedelijke inrichting.

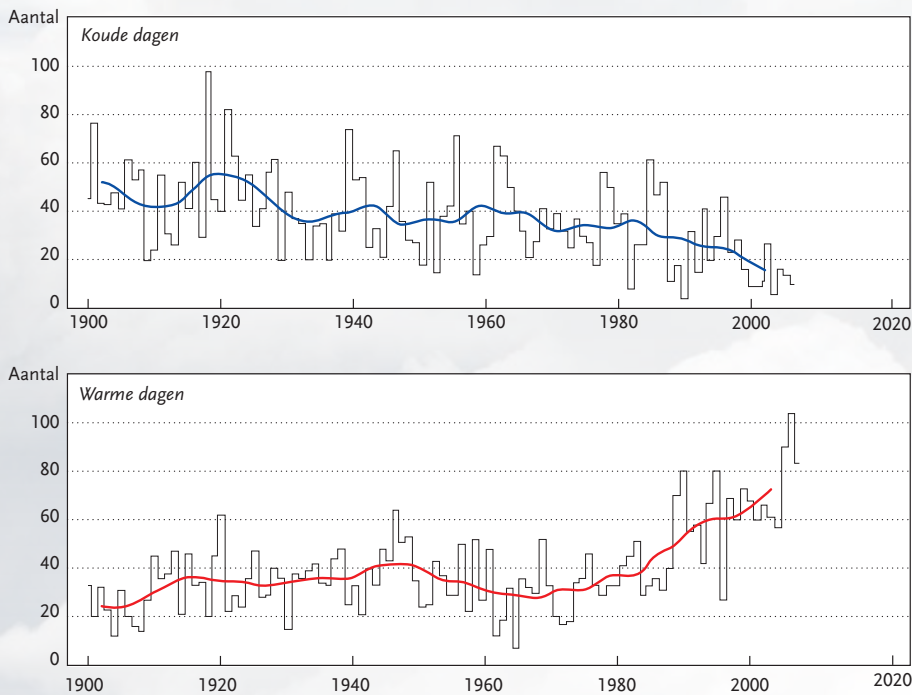


Figuur 1.3: Het temperatuursverloop tijdens de hittegolf van 15 tot en met 30 juli 2006. Tijdens de nachten daalde de temperatuur op verschillende dagen slechts kort tot onder de 20 °C. De Vierdaagse van Nijmegen werd gehouden maar moest op 19 juli worden afgebroken. Het besluit volgde op de dood van twee wandelaars door de hitte. In totaal werden meer dan driehonderd mensen onwel. In vijf gevallen moest er worden gereanimeerd. Het Rode Kruis sprak van een ramp.

### Box 1.2 Nationaal hitteplan



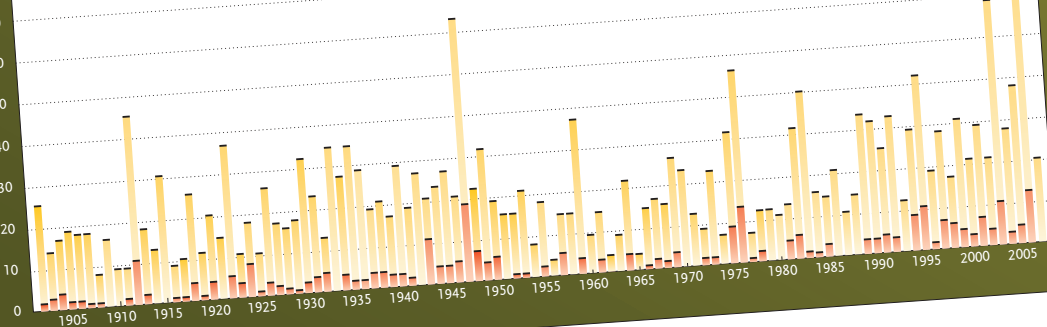
Figuur 1.5: Het aantal graaddagen sinds 1901, De Bilt. De rode lijn is het voortschrijdend gemiddelde van 10 jaar. Om het aantal graaddagen vast te stellen wordt voor alle dagen waarop de gemiddelde temperatuur lager was dan 17 °C bekeken hoeveel graden de temperatuur lager was. Die afwijkingen worden bij elkaar opgeteld. Achterliggende gedachte is dat de verwarming pas wordt aangezet bij een temperatuur beneden de 17 °C en dat er meer moet worden gestookt bij een lagere temperatuur.



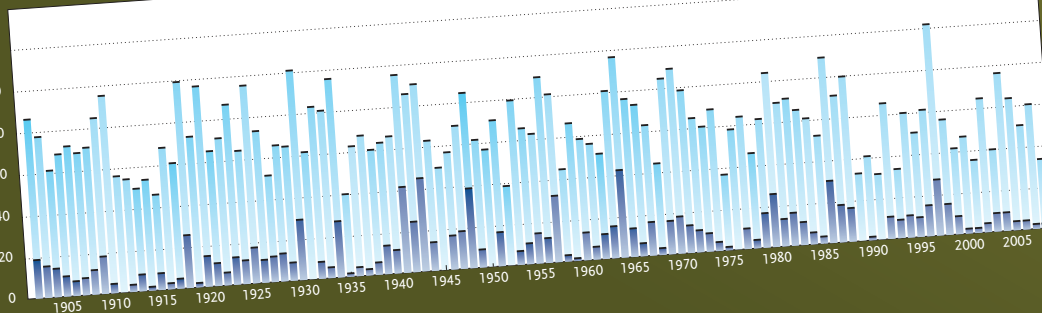
**Figuur 1.4:** Het aantal warme en koude dagen per jaar in De Bilt, vanaf 1901. De rode en blauwe lijn geven het voortschrijdend gemiddelde van 10 jaar. Als grens voor warm en koud is voor elke kalenderdag gekozen voor de temperatuur die maar op 10% van die kalenderdag tussen 1961 en 1990 werd gepasseerd.

De afname in het aantal graaddagen, als maat voor de behoefte aan huisverwarming, heeft zich de afgelopen vijf jaar ook onverminderd doorgezet (figuur 1.5). Het aantal graaddagen in 2007, met de extreem zachte winter, was met 2205 record laag.

Zomerse en tropische dagen

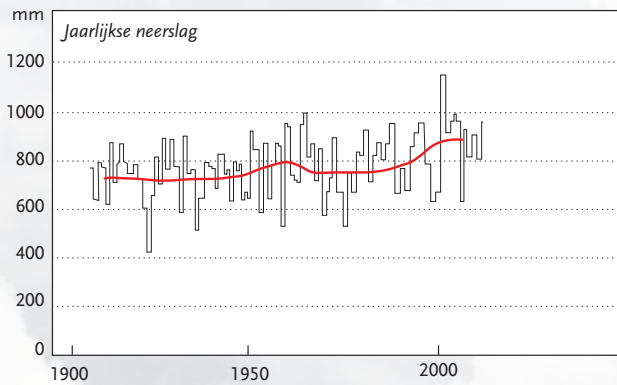


Vorst en ijsdagen

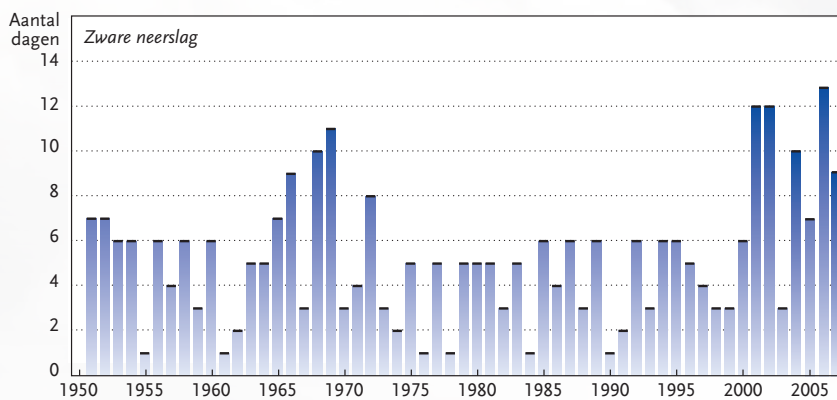


Figuur 1.6 + 1.7: In de publieksvoorlichting wordt tijdens de winter vaak gesproken over 'vorst- en ijsdagen', en tijdens de zomer over 'zomerse en tropische dagen' (zie box meteorologisch taalgebruik). Uit de figuren wordt duidelijk dat zowel het aantal hoogzomerse als winterse dagen een grote variatie kennen van jaar tot jaar die samenhangt met de grilligheid van ons klimaat. De zomerse en winterse dagen laten een geleidelijke stijging, c.q. daling zien die significant is en ook samenhangt met de mondiale opwarming.

### Box 1.3 Tropische en ijsdagen



**Figuur 1.8:** Jaarlijkse neerslag in Nederland (gemiddelde van 13 stations) tussen 1906 en 2007. De rode lijn toont het voortschrijdend gemiddelde van 10 jaar.



**Figuur 1.9:** Aantal dagen met zware neerslag (50 mm of meer) in de zomer in Nederland

## NEERSLAG

De jaarlijkse hoeveelheid neerslag (figuur 1.8) is in Nederland de afgelopen eeuw toegenomen met achttien procent. Maar de neerslagsom kent een grote variabiliteit van jaar tot jaar. In de afgelopen vijf jaar waren 2007 en 2004 nat en 2003 was een droog jaar. In 2005 en 2006 week de neerslagsom gemiddeld over het land niet veel af van het langjarig gemiddelde.

De laatste jaren is er sprake van een groot aantal dagen met zware neerslag in Nederland (figuur 1.9). Dit is in lijn

met de KNMI-klimaatsscenario's waarin een toename van de hevigheid van buien in de zomer wordt voorzien.

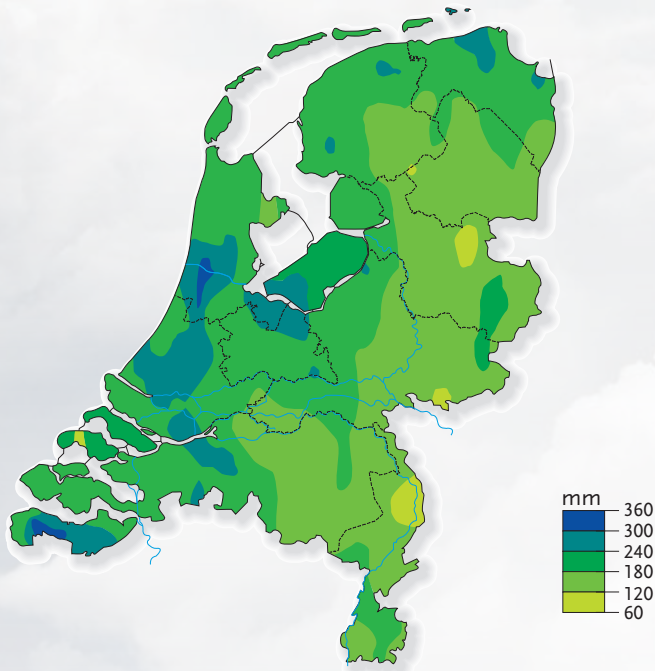
### UITZONDERLIJK NATTE MAANDEN

Augustus 2006 (figuur 1.10) was, met gemiddeld over het land 184 millimeter neerslag tegen normaal 62 millimeter, de natste oogstmaand in honderd jaar. Op diverse stations werd deze maand de driehonderd millimeter overschreden. Het aantal dagen met zware regen waarbij op tenminste één KNMI-station vijftig millimeter werd

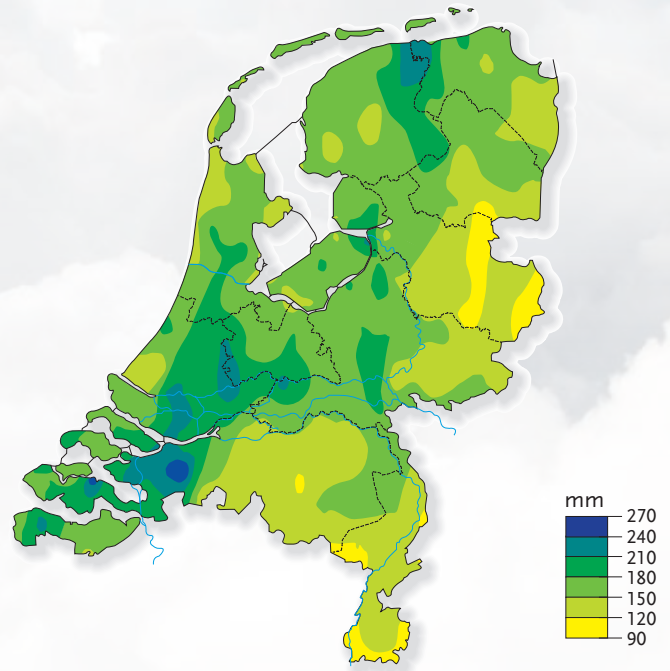
afgetapt (elf dagen) is sinds 1951 niet zo hoog geweest. In Zeeuws-Vlaanderen viel aan het begin van de maand tot ruim honderddertig millimeter in twee etmalen.

Een dergelijke hoeveelheid wordt op een bepaalde plaats in Nederland veel minder vaak dan eens per honderd jaar overschreden.

Juli 2007 (figuur 1.11) was de op één na natste julimaand sinds 1906 met landelijk gemiddeld 155 millimeter tegen 70 millimeter normaal. Op het



Figuur 1.10: Neerslag in augustus 2006



Figuur 1.11: Neerslag in juli 2007

KNMI-neerslagstation in Oudenbosch werd 267 millimeter afgetapt.

Op vijf dagen viel lokaal tenminste vijftig millimeter neerslag met plaatselijke wateroverlast. De natste julimaand was overigens juli 1942 met 158 millimeter. De figuren 1.10 - 1.11 laten goed zien dat de meeste neerslag in die natte zomermaanden in de buurt van de kust viel. Dat komt door de invloed van het warme Noordzeewater. In het derde hoofdstuk van deze rapportage gaan we dieper in op dit kusteffect.

#### LANGDURIGE DROOGTE IN 2003 & 2007

De zomer van 2003 was niet alleen uitzonderlijk warm maar ook zeer droog. In alle drie zomermaanden viel minder neerslag dan normaal. Gemiddeld over het land viel 119 millimeter neerslag

tegen een langjarig gemiddelde van 202 millimeter. Van 1 tot en met 27 augustus viel er in een groot deel van het land geen of slechts enkele millimeters neerslag. Door het vaak zonnige en warme weer was de verdamping groot. De lokale droogte in combinatie met de uitzonderlijk lage afvoer van de grote rivieren leidde tot problemen voor onder meer de agrarische sector, het waterbeheer en energieproducenten (zie box 1.4).

Het warme voorjaar van 2007 kende ook een lang, zeer droog tijdvak. Tussen 22 maart en 6 mei viel op veel plaatsen gedurende 46 dagen geen neerslag. De lange duur van de droogte was uniek in tenminste de laatste honderd jaar. Het gebrek aan neerslag in combinatie met veel verdamping door het vaak zonnige en

(zeer) warme weer leidde tot een voor de tijd van het jaar uitzonderlijk groot neerslagtekort.

In het derde hoofdstuk van deze rapportage gaan we dieper in op dat begrip 'neerslagtekort' en zetten we de droge periodes van de afgelopen jaren in perspectief.

#### WIND

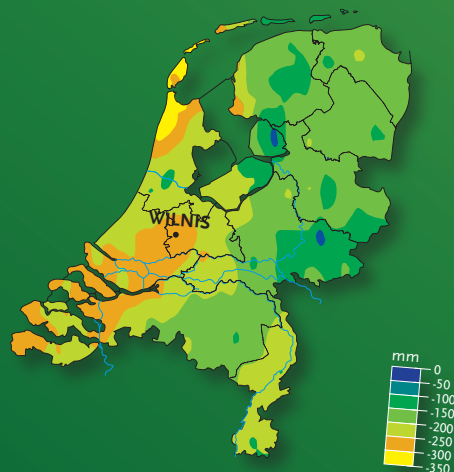
Ondanks de grote jaar-op-jaar variabiliteit van de wind in Nederland is er sprake van een lichte daling van de gemiddelde windsterkte. Hoeveel wind er daadwerkelijk beschikbaar is voor het opwekken van energie met windmolens wordt bijgehouden met de zogeheten 'Windex' (zie box 1.5). Ook in die Windex zien we de grote variabiliteit van de wind en een lichte daling de afgelopen jaren.

Wie kent niet de frase van Herman Finkers: "Het stoplicht staat op rood, het stoplicht staat op groen, in Almelo is altijd wat te doen." Deze frase is misschien wel kenmerkend voor de aandacht die droge en warme zomerperiodes in het algemeen in de pers krijgen en die van 2003 in het bijzonder. Bij velen en zeker bij waterbeherend West-Nederland staat die zomer nog in het geheugen gegrift.

Elektriciteitsproducenten gebruikten voor het eerst de stoplichtmethode om bij hogere temperaturen van het rivierwater de omvang van hun reservecapaciteit en daarmee hun kwetsbaarheid aan te geven. Het bleef gelukkig uiteindelijk bij de code oranje, maar de schrik zat er toch wel in.

Een droog voorjaar met lage rivierafvoeren deed de zouttong bij Rotterdam tot aan Gouda de rivier opkruipen. Voor het peilbeheer op de Rijnlandse boezem was het hoogheemraadschap gedwongen dit 'zoute' water in te laten en uiteindelijk zelfs water via Amstellandsboezem vanuit het IJmeer aan te voeren. Kort nadat de wateraanvoerroute in werking werd gezet, begon het te regenen. En als klap op de vuurpijl verschoof de boezemveendijk bij Wilnis op de vooravond van een debat in de Tweede Kamer, gevolgd door een tweede veendijk bij Rotterdam. Een uitgebreide inspectieactie van de waterschappen moest erger voorkomen. Terugkijkend kun je je afvragen of de commo-

tie in die zomer wel de ernst van de situatie goed weergaf. De droogte van die zomer was met haar frequentie van voorkomen namelijk achteraf niet eens zo exceptioneel (zie het hoofdstuk over droogte). Maar die vraag is eigenlijk niet zo heel erg belangrijk. Veel belangrijker is het besef dat die bijzondere zomer van toen wel eens de gewone zomer van straks kan zijn. Terugkijken is altijd makkelijker dan vooruitkijken, en dat laatste is toch wat de inwoners van Nederland van hun waterbeheerders vragen.



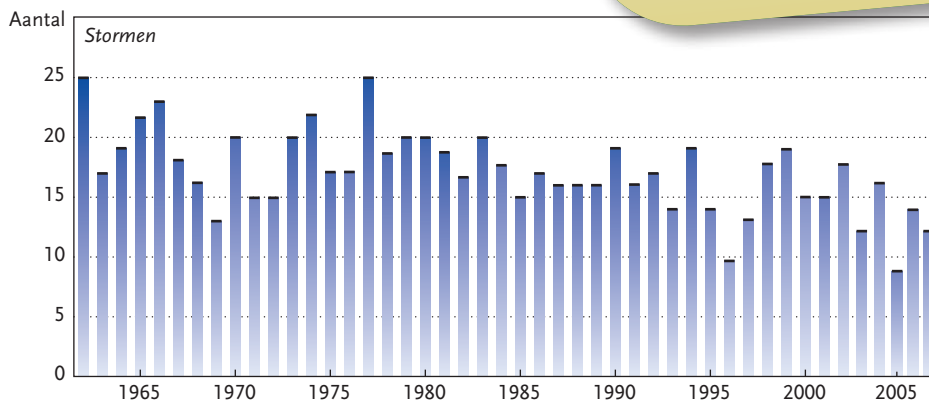
Figuur 1.12: In Wilnis schoof in de zomer van 2003 als gevolg van verdroging een veendijk af, met grote wateroverlast in een woonwijk als gevolg. De kaart toont de ruimtelijke verdeling van het neerslagtekort op 26 augustus. De positie van Wilnis is aangegeven; met een neerslagtekort van ruim 250 mm lag de Veendijk in één van de droogste regio's.

#### Box 1.4 Het stoplicht van de zomer van 2003

Joost Buntsma, Ministerie van Verkeer en Waterstaat

Nederland is te klein en de meetreeksen zijn te kort om veranderingen in het aantal zware stormen bij ons vast te kunnen stellen. Daarvoor komen ze te weinig voor. Maar volgens metingen op KNMI-stations sinds 1962 neemt het aantal periodes met sterke wind (vanaf windkracht 6 in het binnenland en vanaf windkracht 7 aan de kust) in Nederland af (figuur 1.13).

De storm van 18 januari 2007 was de enige zware storm in vijf jaar. Langs vrijwel de hele kust stond geruime tijd een windkracht 10. Tijdens de storm viel bovendien bijzonder veel neerslag; op veel plaatsen 50 tot 60 millimeter in 36 uur. Er waren zeven doden in ons land te betreuren en er werd voor ruim tweehonderd miljoen euro schade aangericht.



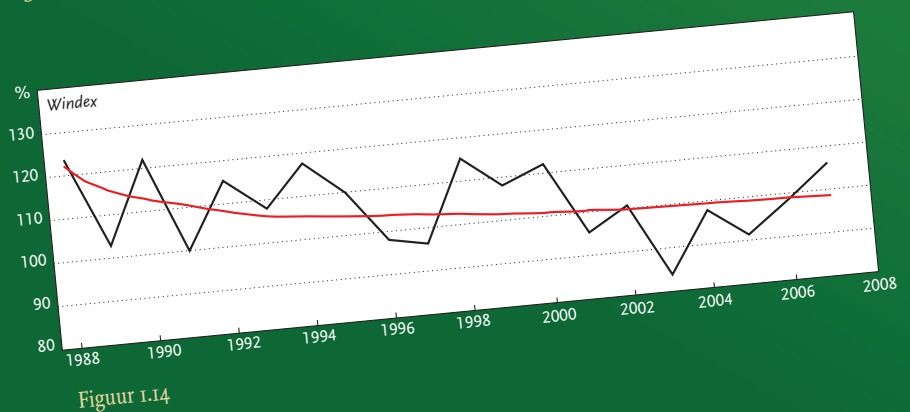
Figuur 1.13: Het aantal stormen per jaar in Nederland

De zwarte lijn in onderstaande figuur toont de jaargemiddelde Windex over de afgelopen twintig jaar. De Windex is een wind index die per maand aangeeft hoe groot de energie-inhoud van de wind was ten opzichte van een langjarig gemiddelde maand. De berekening van de Windex is mogelijk dankzij de maandelijkse aanlevering van molenproducties door vele tientallen moleneigenaren. Vanaf januari '96 wordt de Windex voor Nederland berekend aan de hand van de productie van windturbines die deelnemen aan de statistieken in "De Wind-Maand" (zie Verder lezen).

De Windex is recht evenredig met de elektriciteitsproductie van een windturbine. Met de Windex kan na een relatief

korte periode van 3 - 6 maanden o.a. berekend worden wat de gemiddelde jaarproductie van een nieuwe windturbine zal worden.

De energie-inhoud van de wind is evenredig met de derde macht van de windsnelheid. Dat wil zeggen, dat als de wind b.v. twee keer zo hard gaat waaien er acht keer zoveel energie uit kan worden gewonnen. Hoewel het KNMI concludeert dat er de afgelopen vijf jaren een nauwelijks significante afname in windsnelheid zit, is de dalende trend in de gemiddelde Windex (rode lijn hieronder) van grote betekenis voor windturbine-eigenaren! De trend laat een daling van de kWh-productie van ruim 20% sinds 1988 zien.



Figuur 1.14

Box 1.5 Energie uit de wind: Windex  
Jaap Langenbach, Wind Service Holland

•••• VERDER LEZEN

De volgende informatie is te vinden op:  
[www.knmi.nl/klimatologie](http://www.knmi.nl/klimatologie)

- Dagelijkse overzichten van diverse weers-elementen in grafiek- en kaartvorm;
- Maand-, seizoen- en jaaroverzichten;
- Klimaatatlas 1971-2000; Langjarige gemiddelden en extremen van het Nederlandse klimaat;
- Databestanden van tijdreeksen

• Alles over de windexen is te lezen op:  
<http://home.planet.nl/~windsh/windmaand.html>

# Nederland warmt sneller op

*dan verwacht*



*De aarde warmt op door het versterkte broeikaseffect en Nederland heeft een uitzonderlijke reeks warme seizoenen achter elkaar meegemaakt.*

*Past de opwarming van Nederland tot nu toe in het beeld van de mondiale klimaatverandering, rekening houdend met de grillige weer- en klimaatschommelingen die van nature ons klimaat bepalen?*

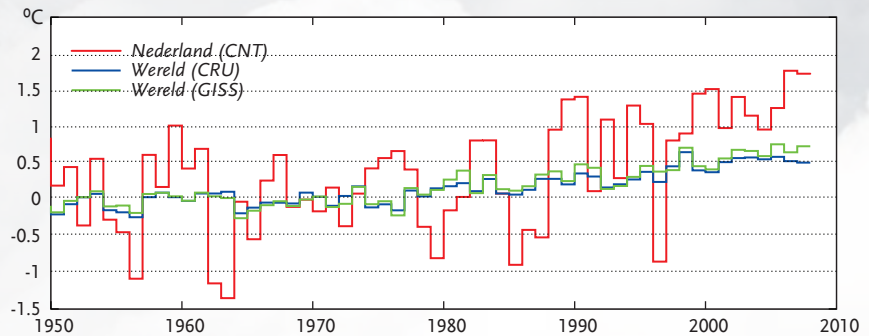
*Nederland is sinds 1950 twee keer zo snel opgewarmd als de wereldgemiddelde temperatuur. Die snellere opwarming wordt hoogstwaarschijnlijk niet veroorzaakt door natuurlijke schommelingen.*

*De temperaturen van herfst 2006, winter 2007 en voorjaar 2007 zijn - zelfs als we rekening houden met de snellere opwarming van Nederland - uitzonderlijk grote afwijkingen boven de trend.*

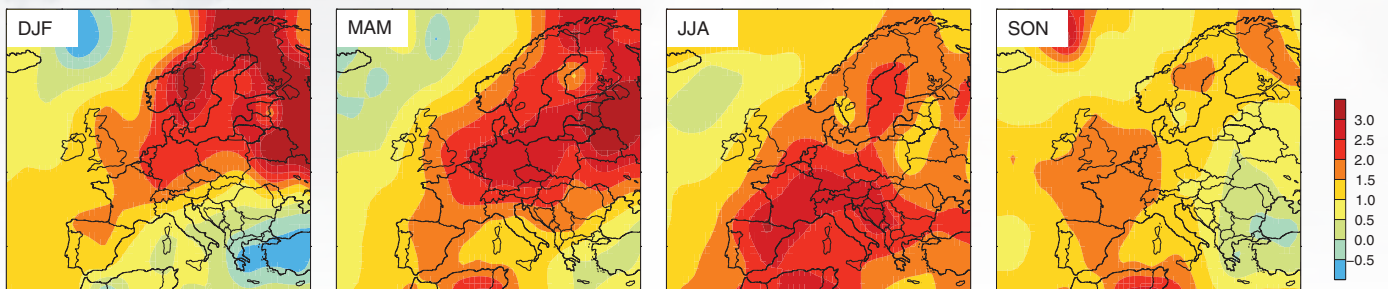


## PATRONEN VAN OPWARMING

De opwarming van het klimaat als gevolg van het versterkte broeikas-effect gaat niet overal even snel. De grote landmassa's warmen duidelijk sneller op dan de oceanen. Het Noordpoolgebied warmt nog sterker op. Dit is vooral een gevolg van het smelten van sneeuw en ijs, waardoor zonnestraling, die eerst teruggekaatst



Figuur 2.1: Jaargemiddelde temperatuur (afwijking van 1951-1980) in Nederland (rode lijn) en wereldgemiddeld (blauwe en groene lijn). Bron: KNMI, CRU/Hadley Centre, NASA/GISS



Figuur 2.2: Waargenomen trends in de temperatuur over 1950-2007 (lokale temperatuurstijging per graad stijging van de wereldgemiddelde temperatuur) in de meteorologische seizoenen: december-februari (a), maart-mei (b), juni-augustus (c) en september-november (d). Data: CRU/Hadley Centre.

werd door het witte oppervlak, nu het land en de oceaan kan opwarmen. Uitdroging van continentale gebieden in de zomer zorgt ook voor snellere opwarming, omdat verdamping van water dan geen afkoelende factor meer is. Die ongelijke opwarming in verschillende gebieden wordt door de klimaatmodellen beschreven en ook in de werkelijkheid duidelijk waargenomen.

Tot nu toe werd verwacht dat de opwarming in Nederland (en omstreken) ongeveer even snel zou gaan als de wereldgemiddelde stijging van de temperatuur. We liggen immers op middelbare breedte en staan onder invloed van zowel land als van zee. De opwarming in Nederland blijkt tot nu toe echter twee keer zo groot te zijn geweest als de mondiale opwarming. Dat is te zien in figuur 2.1, waar de

temperatuurstijging in het midden van Nederland (Centraal Nederland Temperatuur, CNT, zie het hoofdstuk over temperatuurreksen) vergeleken wordt met de wereldgemiddelde temperatuurstijging.

Het gebied met snellere opwarming is niet beperkt tot Nederland, maar strekt zich uit over een groot gedeelte van Europa. De kleuren in figuur 2.2 geven, per seizoen, aan hoeveel sneller of langzamer de plaatselijke opwarming gegaan is dan de mondiale opwarming. In het voorjaar is de stijging sinds 1950 meer dan twee keer zo snel als de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur in een gebied dat zich uitstrekt van Frankrijk tot Rusland. In de zomer ligt dit gebied zuidelijker en loopt van Spanje, Italië en de Balkan tot Nederland. In de herfst en de winter is de opwarming in westelijk Europa minder snel gegaan, maar nog steeds sneller dan de wereldgemiddelde temperatuur.

#### KAN DE SNELLE OPWARMING TOEVAL ZIJN?

In “De Toestand van het Klimaat in Nederland 2003” maakten we nog aannemelijk dat het toen waargenomen verschil met de wereldwijde opwarming zeer wel toeval zou kunnen zijn. Een opeenvolging van een aantal warmere jaren is er altijd wel geweest. *Kunnen we nog volhouden dat de snellere opwarming in Nederland en omgeving het gevolg van zo'n toevallige rij warmere jaren kan zijn?* Eigenlijk vragen we ons dan af of de trendlijn misschien ook minder steil had kunnen zijn. Daarvoor kunnen we om te beginnen kijken naar de

schommelingen rondom de geleidelijk stijgende trend. Die zijn het gevolg van onvoorspelbare weersveranderingen en klimaatvariaties. Tussen die schommelingen door kunnen we de trendlijn inderdaad wel wat steiler of minder steil tekenen. Als we aannemen dat het karakter van de schommelingen niet is veranderd, kan met een statistische techniek geschat worden wat de kans is dat de opwarming in Nederland eigenlijk hetzelfde was als de wereldgemiddelde opwarming, maar dat een toevallige reeks van warmere periodes de opwarming in Nederland sneller doet lijken. Die kans blijkt in deze berekening kleiner dan 1 op 1000. Dat kan dus bijna geen toeval zijn: Nederland warmt sinds 1950 duidelijk sneller op dan het wereldgemiddelde. Jaargemiddeld ongeveer 2,2 keer zo snel.

De temperatuurstijging is niet gelijk verdeeld over het jaar. De lentetemperaturen zijn over 1950-2008 2,8 keer zo snel gestegen als de wereldgemiddelde temperatuur, terwijl de herfsttemperaturen een factor 1,8 laten zien. Zomer en winter zitten daartussenin met 2,1 en 2,4. De onzekerheid van deze getallen is echter vrij groot, omdat de jaar-op-jaar variaties groter worden als je kortere perioden beschouwt. De opwarming is het duidelijkst zichtbaar

in de jaargemiddelde temperatuur, ook nog goed meetbaar in de seizoensgemiddelde temperatuur, maar per maand nog maar net groter dan de toevallige weersinvloeden.

#### WAARDOOR KOMT DIE SNELLE OPWARMING?

Nederland en de omliggende landen warmen hoogstwaarschijnlijk systematisch sneller op dan de wereld gemiddeld. *Wat is er dan nog meer veranderd in ons klimaat dan die geleidelijke stijging van de wereldgemiddelde temperatuur?* We hebben al drie factoren genoemd: een snellere opwarming in het winterhalfjaar in Azië (door minder sneeuw) en in de zomer in het Middellandse-Zeegebied (door uitdroging), en een langzamere opwarming van de Atlantische Oceaan. In West-Europa compenseren deze factoren elkaar grotendeels. Daarnaast hebben we nog twee andere factoren gevonden die een extra temperatuurstijging in Nederland veroorzaken: een systematische trend naar meer westenwind in de late winter en het vroege voorjaar en een toename in de hoeveelheid zonnestraling in het voorjaar en de zomer.

De trend naar meer (zuid)westenwind in de late winter en het vroege voorjaar die in “De Toestand van het Klimaat in Nederland 2003” werd genoemd heeft

onverminderd doorgezet. Als gevolg hiervan is er in de tussenliggende jaren niet één strenge winter geweest en de meeste vorstperiodes traden op in december, niet in januari of februari. De verschuiving in de overheersende windrichting hangt samen met een toename van de luchtdruk in het Middellandse-Zeegebied in de maanden januari tot maart. De invloed op de temperatuur van deze verandering in overheersende windrichting verklaart het overgrote gedeelte van de snellere opwarming in die tijd van het jaar. Gegeven de grilligheid van de Nederlandse winters zijn strenge winters nog lang niet uitgesloten, maar de kans erop lijkt kleiner te zijn geworden.

Sinds de vroege jaren zeventig wordt de hoeveelheid zonnestraling die direct en indirect de grond bereikt goed gemeten in Nederland. Zowel de hoeveelheid wolken als de helderheid van de lucht beïnvloeden deze metingen. In de lente en zomer was er een lichte afname tot ongeveer 1985 en daarna een sterke toename. De luchtvervuiling met stofdeeltjes (aërosolen) in de jaren zeventig en tachtig zorgde ervoor dat minder zonnestraling de grond bereikte. De afgelopen twintig jaar is de lucht weer schoner geworden, waardoor de zonnestraling aan de grond is toegenomen. Mede hierdoor zijn de lente- en zomertemperaturen tot midden jaren 1980 nauwelijks toegenomen, en daarna dubbel zo snel gestegen.



Er is echter een tweede effect zichtbaar in de metingen van de zonnestraling, dat op langere termijn belangrijker is: een gestage toename over de hele meetperiode, zowel in de lente als in de zomer, voornamelijk bij oosten- en zuidenwind. Deze stijging wordt op alle stations waargenomen bovenop de verandering door luchtvervuiling met stofdeeltjes. Het temperatureffect ervan in Nederland verklaart een groot gedeelte van de waargenomen extra opwarming in deze seizoenen. De toename in de gemeten zonnestraling aan de grond is waarschijnlijk een gevolg van een afname van de bewolking, vooral bij zuidelijke wind, als droge en warme lucht uit het snel opwarmende Zuid-Europa wordt aangevoerd.

### DRIE EXTREME SEIZOENEN

De herfst van 2006, de daaropvolgende winter en de lente van 2007 waren de warmste herfst, winter en lente sinds het begin van de metingen in Nederland in 1706. *Hoe bijzonder is zoiets eigenlijk?* Als de gemiddelde temperatuur zo snel stijgt, is elke afwijking naar boven misschien wel een record (zie box 2.1). Maar als we de opwarming over de periode 1906-2005/2006 van de gemeten temperaturen aftrekken, blijken de temperatuurfluctuaties in de drie

genoemde seizoenen nog steeds de grootste (herfst, lente) of op één na grootste (winter) afwijkingen naar boven te zijn in de hele meetreeks 1906-2007. Dit geeft aan dat de temperaturen zelfs voor een opwarmend klimaat uitzonderlijk hoog waren. Hoe uitzonderlijk extremen zijn, wordt beschreven met een herhalingstijd. Een herhalingstijd van tien jaar betekent dat er elk jaar een kans van één op tien is dat zo iets gebeurt. In honderd jaar waarnemingen komt zo'n gebeurtenis dus ongeveer tien keer voor. Als de gebeurtenis nog nooit eerder is voorgekomen, zoals de afwijkingen in 2006/2007, wordt de kans daarop geschat door de kansverdeling van zeldzame gebeurtenissen die zich wel hebben voorgedaan door te trekken naar nog zeldzamere waarden buiten de verdeling. Dat wordt extremenstatistiek genoemd.

De berekende herhalingstijd voor de herfst van 2006 in Nederland blijkt op die manier tussen de 300 en 1500 jaar te liggen, afhankelijk van de details van de berekening. Voor de winter van 2007 is dat 25 tot 150 jaar en voor de lente van 2007 50 tot 150 jaar. Als we rekening houden met de ervaring dat een zachte winter vaak door een warmer voorjaar gevolgd wordt, is de temperatuurafwijking van de lente van 2007 minder uitzonderlijk, met een

herhalingstijd van 25 tot 50 jaar. Nu is een herhalingstijd van bijvoorbeeld honderd jaar voor de temperatuurafwijking naar boven in één bepaald seizoen niet echt heel uitzonderlijk: gemiddeld komt zo'n seizoen eens per 25 jaar voor. De temperatuurafwijking van de zomer van 1947 had bijvoorbeeld een herhalingstijd van rond de 300 jaar vergeleken met de fluctuaties in de jaren daarvoor. Maar de herhalingstijd van de herfst van 2006 was nog hoger, en werd gevolgd door twee seizoenen met redelijk hoge herhalingstijden. Het is een aanwijzing dat ook iets anders in het klimaat veranderd zou kunnen zijn dan alleen een stijging van de gemiddelde temperatuur.

De resultaten tot nu toe zijn gebaseerd op de aanname dat de fluctuaties rond de trend niet van karakter zijn veranderd. Een alternatieve hypothese is dat het klimaat variabeler geworden is, waardoor uitschieters minder zeldzaam geworden zijn. Deze hypothese is nog niet met waarnemingen te toetsen. Maar we kunnen wel klimaatmodellen gebruiken om te onderzoeken of dit het geval zou kunnen zijn.

#### OPWARMING IN KLIMAATMODELLEN

De belangrijkste hulpmiddelen bij het begrijpen en voorspellen van klimaatveranderingen zijn klimaat-

modellen. Dat zijn computerprogramma's die nabootsen hoe de atmosfeer en oceanen stromen en hoe ze reageren op veranderingen in broeikasgassen, vulkaanuitbarstingen, zonneactiviteit en andere verstoringen. Op het KNMI is met een state-of-the-art klimaatmodel zeventien keer de periode 1950-2100 doorgerekend, telkens met dezelfde stijgende concentraties broeikasgassen, maar met andere dag-op-dag variaties van het weer (zie box 2.2 Essence project). Deze verzameling berekeningen wordt een 'ensemble' genoemd. Het geeft dus voor elk jaar zeventien mogelijke waarden voor de temperatuur.

De gemodelleerde stijging van de wereldgemiddelde temperatuur stemt tot op heden goed overeen met de waargenomen stijging. Ook het grootschalige patroon van de opwarming toont een goede overeenkomst met de waarnemingen: snellere opwarming boven grote landmassa's, in gebieden waar sneeuw en ijs verdwijnt en in droge gebieden. Door deze overeenstemming kunnen we er op vertrouwen dat de voornaamste grootschalige processen die de temperatuurstijging veroorzaken goed gerepresenteerd worden in dit model.

In het Essence project is met een klimaatmodel zeventien keer het klimaat van 1950 tot het jaar 2100 nagebootst. Elke simulatie had een miniem andere begin-toestand in 1950. Door het chaotische karakter van het weer laat elke versie van het klimaatmodel daarom een iets ander klimaat zien (denk aan de spreekwoordelijke 'vlinder van Lorenz'). De verschillen worden veroorzaakt door de natuurlijke variaties. Het gemiddelde van de zeventien berekeningen, waar dus de natuurlijke variaties grotendeels zijn uitgefilterd, toont de klimaatverandering door de toename van broeikasgassen in het recente verleden en wat we mogelijk nog in de toekomst kunnen verwachten. De afwijkingen van het gemiddelde geven een schatting van de natuurlijke fluctuaties ('het weer'). De berekeningen werden uitgevoerd in samenwerking met het IMAU van de Universiteit van Utrecht en het rekencentrum SARA in Amsterdam. De rekentijd op een supercomputer in het Duitse Stuttgart werd door het Europese project DEISA ter beschikking gesteld. Het gebruikte model is ECHAM5/MPI-OM van het Max-Planck-Instituut voor Meteorologie in Hamburg. Voor dit model is gekozen omdat het het huidige klimaat goed nabootst. De uitkomsten van dit model komen in de 21e eeuw ongeveer overeen met het KNMI'06 W+ scenario. De berekeningen hebben in totaal acht maanden geduurd en ongeveer vijftig TeraByte (= ruim duizend Dvd's) aan data opgeleverd.

### Box 2.2 Het Essence project

In de details is de overeenstemming minder goed. Eén van de grootste discrepanties is in West-Europa, wat op de wereldkaart maar een klein gebied is. Hier is de opwarming in werkelijkheid veel sneller verlopen dan het model aangeeft. Dit geldt

overigens ook voor andere klimaatmodellen. In een groot gedeelte van Europa is de discrepantie van de trend tussen de waarnemingen en de modelberekeningen hoogstwaarschijnlijk niet het gevolg van toevallige fluctuaties. De oorzaak van

het verschil tussen het model en de waarnemingen is dat de processen, die hierboven als redenen voor de waargenomen snelle opwarming in Nederland genoemd zijn, in het model minder sterk zijn dan in de waarnemingen. De gemiddelde toe-

name van de (zuid)westen wind in de late winter en vroege lente wordt door klimaatmodellen weliswaar ook voorspeld, maar deze verandering is kleiner dan de waargenomen toename. In de lente en zomer neemt in het klimaatmodel de zonnestraling aan de grond toe, maar minder sterk dan in de waarnemingen. De toename van zonnestraling wordt in het model veroorzaakt door een afname van de bewolking.

Met het klimaatmodel kan ook onderzocht worden of de kans op warme extremen toeneemt. In de berekening van de herhalingstijden uit de waarnemingen werd aangenomen dat die kans niet veranderd is en dus kan worden bepaald uit de fluctuaties in het verleden. In het klimaatmodel zien we echter dat in de zomer de temperatuur van warme extremen sneller stijgt dan die van de gemiddelde zomertemperatuur: de kans op warme extremen neemt toe. Dit wordt veroorzaakt door uitdrogingseffecten, zoals die nu al elk jaar een rol spelen in zuidelijke gebieden van Europa.

In de herfst, winter en lente geeft het model echter geen aanwijzingen dat warme extremen vaker voorkomen. Dit betekent dat de temperaturen in deze seizoenen in 2006/2007 een gevolg van uitzonderlijk toeval waren, of dat de processen die in deze seizoenen voor uitzonderlijk hoge temperaturen zorgden niet goed in het klimaatmodel gerepresenteerd worden.

#### CONCLUSIES

De hoge temperaturen in Nederland van de afgelopen jaren bevestigen dat het klimaat in Nederland opwarmt. De opwarming gaat twee keer zo snel als de wereldgemiddelde temperatuurstijging in een gebied dat zich uitstrekt van Frankrijk tot Polen. De snellere opwarming wordt hoogstwaarschijnlijk niet veroorzaakt door natuurlijke klimaatvariaties. Oorzaken voor de sterkere temperatuurstijging zijn gevonden in een sterke toename van de hoeveelheid westenwind in de late winter en het vroege voorjaar en een toename van de zonnestraling in voorjaar en zomer. Een verband met het versterkte broeikas-effect ligt voor de hand, maar is nog niet aangetoond.

Zelfs bovenop deze snelle opwarming blijven de hoge temperaturen van herfst 2006 en winter 2007 zeer uitzonderlijk, met herhalingstijden van honderden jaren.

Klimaatmodellen beschrijven de klimaatverandering over heel grote gebieden goed, maar onderschatten de temperatuurtrend in West-Europa tot nu toe. Ook voorspellen ze hier alleen in de zomer een toename van de kans op warme extremen bovenop de trend, terwijl die ook zijn waargenomen in de herfst, winter en lente. Het KNMI doet intensief onderzoek om de lokaal waargenomen snellere temperatuurstijging en extreme seizoenen beter te begrijpen.

#### ● ● ● VERDER LEZEN

De volgende informatie is te vinden op:  
[www.knmi.nl/kenniscentrum](http://www.knmi.nl/kenniscentrum)

- *De herfst van 2006*
- *De zachte winter van 2007*
- *Het voorjaar van 2007*
- *De stijging van de wereldgemiddelde temperatuur*
- G.J. van Oldenborgh, *How unusual was autumn 2006 in Europe? Climate of the Past*, 2007, 3, 659-668  
[www.clim-past.net/3/659/2007/cp-3-659-2007.html](http://www.clim-past.net/3/659/2007/cp-3-659-2007.html)
- G.J. van Oldenborgh, S.S. Drijfhout, A. van Ulden, R. Haarsma, A. Sterl, C. Severijns, W. Hazeleger and H. Dijkstra, *Western Europe is warming much faster than expected*, ingediend, *Clim. Dyn.*, 2008  
[www.knmi.nl/publications/fulltexts/why\\_is\\_europe.pdf](http://www.knmi.nl/publications/fulltexts/why_is_europe.pdf)

Het versterkte broeikaseffect komt het duidelijkst boven de natuurlijke variaties uit in de wereldgemiddelde temperatuur. Over de laatste 40 jaar is de wereldgemiddelde temperatuur met zo'n 0,7°C gestegen. Er zijn echter nog meer factoren die de meetwaarden van de wereldgemiddelde temperatuur beïnvloeden.

- Niet alleen broeikasgassen zoals CO<sub>2</sub> bepalen hoeveel straling het aardoppervlak ontvangt en uitstraalt. Stofdeeltjes (aërosolen) afkoeling in sterk vervuilde gebieden. Ook na grote vulkaanuitbarstingen koelt de aarde door stof in de hogere luchtlagen af. In 1991 was er bijvoorbeeld een tijdelijke wereldwijde afkoeling van 0,2°C door de uitbarsting van de vulkaan Pinatuba op de Filipijnen.
- Weer- en klimaatschommelingen zorgen voor toevallige fluctuaties. Van jaar tot jaar zijn El Niño en La Niña het belangrijkste, van maand op maand ook het weer in grote landmassa's, vooral Azië. In 1998 was El Niño uitzonderlijk sterk en heeft de wereldgemiddelde temperatuur meer dan 0,2°C verhoogd. In 2008 veroorzaakt een sterke

La Niña een afkoeling van 0,1 tot 0,2°C.

- De temperatuur wordt niet overal op aarde gemeten, vooral in de poolgebieden staan weinig thermometers. De ontbrekende gebieden worden weggelaten in de reeks die door de Climate Research Unit (CRU) van de Universiteit van East-Anglia wordt gemaakt. Voor de reeks van het NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) wordt een ruwe schatting gemaakt van de temperatuur in deze gebieden op basis van de schaarse gegevens die er wel zijn. Dit veroorzaakt een onzekerheid van ±0,1°C in de wereldgemiddelde temperatuur. De sterke opwarming van het Noordpoolgebied de laatste jaren wordt in de CRU-reeks minder sterk meegenomen.

Door deze effecten wijken trends over korte tijdvakken vaak af van de langjarige trend. De trend over de afgelopen 8 jaar bijvoorbeeld hangt dan ook sterk van de gebruikte dataset af. In de CRU-reeks is de temperatuurstijging gemiddeld 0,01°C per jaar over 2000-2007, in de GISS-reeks is dit 0,03°C per jaar. De onzekerheden daarin zijn echter zo groot dat de langjarige waarde van zo'n 0,02°C per jaar binnen de foutenmarges van beide schattingen ligt.

Box 2.3 Trends in de wereldgemiddelde temperatuur



# Neerslag

## en droogte



Geert Lenderink

Jules Beersma

*In de (late) zomer is de Nederlandse kust gemiddeld natter dan de rest van het land. Ook in de afgelopen zomers is een paar keer sprake geweest van overvloedige regenval en wateroverlast in kustprovincies. In hoeverre heeft het warme Noordzeewater daar mee te maken?*

*Naast die uitzonderlijke regenval waren er ook een paar heel droge periodes. Hoe ongewoon waren die eigenlijk?*

*Het warme Noordzeewater blijkt inderdaad de zomerse neerslag aan de kust te kunnen versterken. Naarmate Nederland verder opwarmt, zal dat effect sterker worden.*

*De droge zomer van 2003 was niet zo uitzonderlijk: zulke droge jaren zijn er zo af en toe in Nederland. Maar droogte zoals in het voorjaar van 2007 is nog nooit gezien. Dit leidde echter niet tot een record droge zomer, want de droge periode was al voorbij toen de zomer begon.*



## DE INVLOED VAN ZEEWATER-TEMPERATUUR OP KUSTNEERSLAG

Dat de Noordzee een sterke invloed op het klimaat in Nederland heeft, zal niemand verbazen. Zowel op temperatuur als neerslag is de invloed van de Noordzee onmiskenbaar. Gedurende het hele jaar heeft de Noordzee een temperende invloed op de temperatuur aan de kust. Voor neerslag is de invloed sterk van het seizoen afhankelijk. In het voorjaar warmt het land snel op ten opzichte van de Noordzee. Het relatief koude Noordzeewater zorgt dan voor een onderdrukking van buienactiviteit aan de kust. De kustzone is daarom in het voorjaar en de vroege zomer droog en zonnig ten opzichte van het binnenland, met name in mei en juni. In de late zomer en het najaar is de situatie precies omgekeerd. De Noordzee is dan relatief warm en buienactiviteit wordt versterkt boven dit relatief warme water. In september, oktober en november valt er in de kustzone de meeste regen (zie KNMI klimaatatlas).

*Betekent dit, als aan het eind van een relatief warme zomer de zee-watertemperaturen relatief hoog zijn, dat we dan ook een natte nazomer of*

*herfst aan de kust kunnen verwachten?*

Nee, niet altijd. Er moet ook (vochtige) lucht worden aangevoerd over zee. Het warme Noordzeewater veroorzaakt op zich geen hevige regen. Maar de buiigheid in lucht die van over zee op ons land afkomt, wordt geactiveerd of versterkt door het warme zeewater.

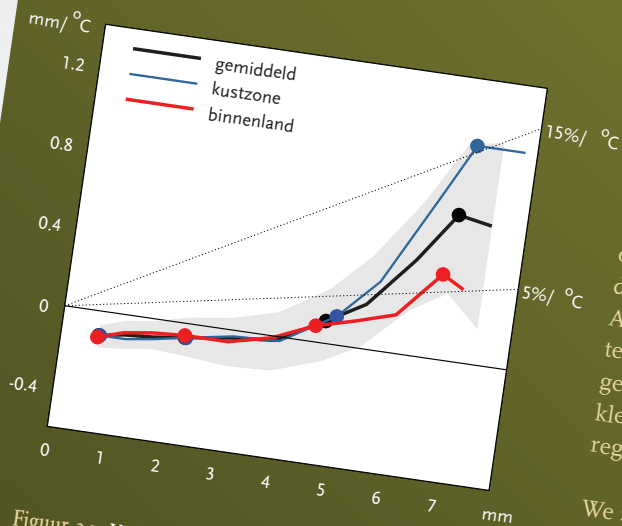
### DE EXTREME NEERSLAG VAN AUGUSTUS 2006

Augustus 2006 was een extreem natte maand (zie het eerste hoofdstuk). Een groot gedeelte van de neerslag viel in deze maand in zogeheten buiencomplexen, met een typische schaal van enkele tientallen kilometers. Augustus 2006 werd voorafgegaan door een lange periode met zeer warm weer. De gemiddelde temperatuur in juli bedroeg 22,3 °C. Dit is bijna 5 graden boven het langjarige gemiddelde voor juli en bijna 1 graad warmer dan enige andere zomermaand sinds het begin van de metingen in De Bilt. De temperatuur van de Noordzee was aan het eind van juli zeer hoog. Aan de kust werden watertemperaturen tot 22 °C gemeten.

*Kunnen de zeer grote neerslaghoeveelheden in augustus 2006 verklaard worden uit de hoge temperatuur van het Noordzeewater? Dat het antwoord*

“ten dele” is, zal na het voorafgaande duidelijk zijn. De hoofdoorzaak van de buiigheid was de atmosferische circulatie. Begin augustus kwam er een sterke noordwestelijke stroming op gang, die koude en onstabiele lucht naar ons land voerde. Deze stroming hield de hele maand aan, en veroorzaakte een zeer sterke buienactiviteit. Deze buienactiviteit werd versterkt door het zeer warme Noordzeewater. *Maar voor hoeveel?*

*Kan dat uit de waarnemingen worden afgeleid?* Om die vraag te beantwoorden, zou je naar augustusmaanden in het verleden kunnen zoeken met een vergelijkbare circulatie maar een andere Noordzeetemperatuur. Zulke ‘analoge maanden’ zouden dan de afhankelijkheid van zee-watertemperatuur laten zien. Maar helaas kunnen ook subtiele verschillen in de circulatie een grote invloed hebben op de neerslag. Er zijn dus nogal veel analoge maanden nodig om de invloed van de Noordzeetemperatuur te kunnen onderscheiden van de variaties in regenval door deze subtiele verschillen in de circulatie. Dit blijkt voor maandgemiddelden niet mogelijk te zijn. Er zijn er simpelweg niet genoeg. Maar voor dagelijkse data lijkt dat wel mogelijk (zie box 3.1).



Figuur 3.1: Verband tussen dagelijkse neerslag en zeewater-temperatuur van de Noordzee in de periode juli, augustus en september.

Om deze figuur te maken zijn waarnemingen van dagelijkse neerslag en van luchtcirculatie uit de periode 1958 – 2006 verdeeld in groepen die min of meer hetzelfde circulatiepatroon hebben. Omdat neerslag sterk van de circulatie afhangt, hoort bij elk circulatiepatroon, dus bij elk van de groepen waarnemingen, een bepaalde gemiddel-

de neerslaghoeveelheid. Die is horizontaal uitgezet in de figuur. Vervolgens is in elke groep waarnemingen gekeken hoe het verband is tussen de hoeveelheid werkelijk gevallen neerslag en de temperatuur van het Noordzeewater, waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen stations aan de kust en meer landinwaarts gelegen stations. Als er weinig of geen verband is tussen Noordzeetemperatuur en de hoeveelheid neerslag is het getal op de linker as (de z.g. regressiecoëfficiënt), klein of nul. Als er een sterk verband is, is de regressiecoëfficiënt groter.

We zien dat in de groepen met 'droge' circulaties (circulaties waarbij gewoonlijk weinig neerslag optreedt, links in de grafiek) weinig afhankelijkheid tussen zeewatertemperatuur en opgetreden neerslag is. In de nattere circulaties, aan de rechterkant van de figuur, zien we dat een warmere Noordzee duidelijk invloed heeft op de hoeveelheid neerslag, vooral in het kustgebied.

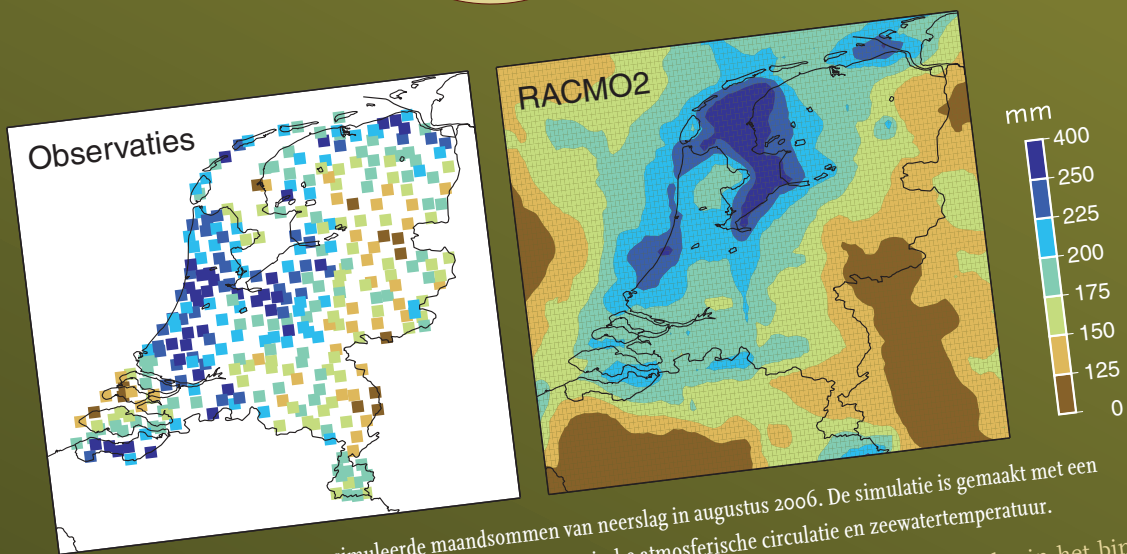
Voor de meest natte circulaties wordt een afhankelijkheid van rond de 15 % per graad gevonden. Bij een twee graden hogere zeewatertemperatuur kan er dus in de kustzone per dag 30 % meer neerslag vallen.

### Box 3.1 Dagelijkse neerslag

#### KUSTNEERSLAG IN EEN MODEL

Het effect van zeewatertemperatuur op kustneerslag kan ook bestudeerd worden in een klimaatmodel. Hierbij kan de atmosferische circulatie aan het model worden opgelegd. We kunnen in de modelwereld dus vrijwel

perfecte analoge maanden met dezelfde circulatie maar met verschillende zeewatertemperaturen creëren. We gebruiken hiervoor het KNMI regionale klimaatmodel RACMO2 (zie box 3.2).



Figuur 3.2: Geobserveerde en gesimuleerde maandsommen van neerslag in augustus 2006. De simulatie is gemaakt met een regionaal klimaatmodel (RACMO2) aangedreven door een realistische atmosferische circulatie en zeevatertemperatuur.

In een regionaal klimaatmodel worden dezelfde natuurkundige wetten en regels gebruikt als in een mondiaal klimaat model. Maar in een regionaal klimaatmodel worden de berekeningen gedaan in een klein gebied en met een veel hogere ruimtelijke resolutie. Aan de rand van het regionale modelgebied (domein) wordt de atmosferische toestand – wind, temperatuur en vochtigheid – voorgeschreven. De berekeningen hier zijn gedaan met een resolutie van 6 km, een factor 30 hoger dan de huidige mondiale modellen. Dit maakt het simuleren van kleinschalige zomerbuiencomplexen mogelijk. Figuur 3.2 laat het door RACMO2 gesimuleerde neerslagpatroon zien, wanneer het model gevoed wordt met de in augustus 2006 waargenomen zeevatertemperatuur en atmosferische circulatie. Het model reproduceert het waargenomen verschil in

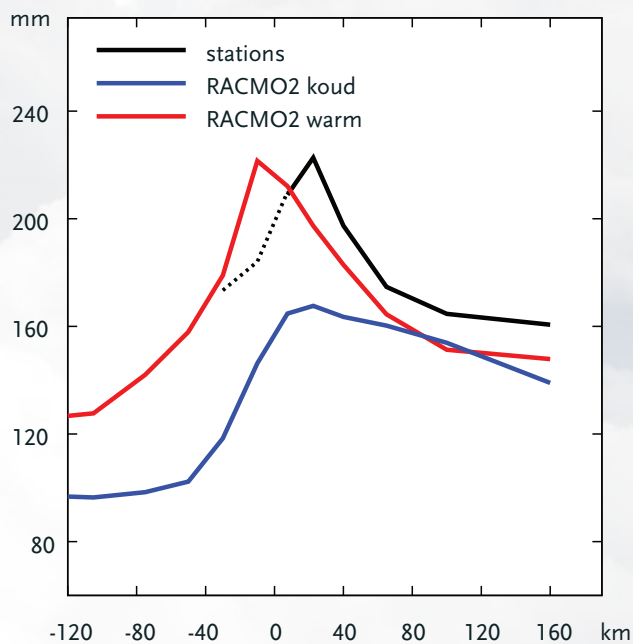
neerslag tussen de kustzone en verder in het binnenland. Ook de typische neerslaghoeveelheden in beide zones zijn correct. Op een meer gedetailleerd niveau zijn er echter verschillen. De gesimuleerde neerslaghoeveelheden op en rond het IJsselmeer zijn duidelijk te hoog. De neerslaghoeveelheden in Noord- en Zuid-Holland zijn te laag. Een gedeelte van de verschillen tussen model en waarnemingen kan worden verklaard uit het feit dat de exacte locatie van buien onvoorspelbaar is. Maar er zijn waarschijnlijk ook tekortkomingen in het model, die voor systematische afwijkingen zorgen. Zo lijken buien zich in het model te snel te ontwikkelen, en heeft het model moeite met de clustering van buien zoals die frequent wordt waargenomen. Er wordt op het KNMI gewerkt aan een nieuw fijnmazig model om deze tekortkomingen te verhelpen.

### Box 3.2 Regionaal klimaatmodel RACMO2

Figuur 3.3 laat de neerslaghoeveelheid zien als functie van de afstand tot de kust. Voor deze figuur is Nederland opgedeeld in verschillende zones afhankelijk van de afstand tot de kust. De neerslaghoeveelheden in de verschillende zones zijn in de figuur gezet voor stationswaarnemingen en voor twee modelsimulaties met RACMO2. Eén modelsimulatie gebruikt waargenomen zeevatertemperaturen ("warm") in augustus 2006, en één gebruikt een twee graden lagere zeevatertemperatuur ("koud").

De simulatie met hogere zeevatertemperatuur reproduceert het typische verschil tussen de kustzone en het binnenland. Wel is het patroon in het model zeewaarts verschoven, en zijn de neerslaghoeveelheden boven land aan de lage kant. In de simulatie met een lagere zeevatertemperatuur is er nauwelijks verschil tussen de neerslag aan de kust en in het binnenland. Aan de kust bedraagt het verschil tussen beide simulaties zo'n 50 millimeter, ofwel 30 procent. Aangezien het verschil in zeevatertemperatuur 2 graden bedroeg, betekent dit een neerslagtoename aan de kust van zo'n 15 procent per graad.

Uit de modelsimulaties kunnen we dus concluderen dat de warme Noordzee een belangrijke bijdrage kan leveren aan sterke buienactiviteit aan de kust,



**Figuur 3.3:** Neerslag op verschillende afstand van de kust in augustus 2006. De zwarte lijn geeft het gemiddelde op basis van stationswaarnemingen weer, boven zee aangevuld met gegevens van de buienradar (gestippeld). De gekleurde lijnen zijn modelsimulaties met een realistische zeevatertemperatuur ('warm') en een twee graden lagere zeevatertemperatuur ('koud').

zoals in augustus 2006. *Is er ook een verandering in de klimatologie te verwachten?* De temperatuur van de Noordzee lijkt vooral sinds de jaren negentig sterk gestegen. Over de laatste vijftig jaar is de trend van de temperatuur in de Noordzee ongeveer twee maal zo groot als de trend in de wereldgemiddelde temperatuur (zie ook het hoofdstuk "Nederland warmt sneller op dan verwacht"). *Heeft de sterke opwarming van de Noordzee een invloed op de klimatologische neerslagverdeling binnen Nederland?*

#### MEER KUSTNEERSLAG DOOR WARMER KLIMAAT?

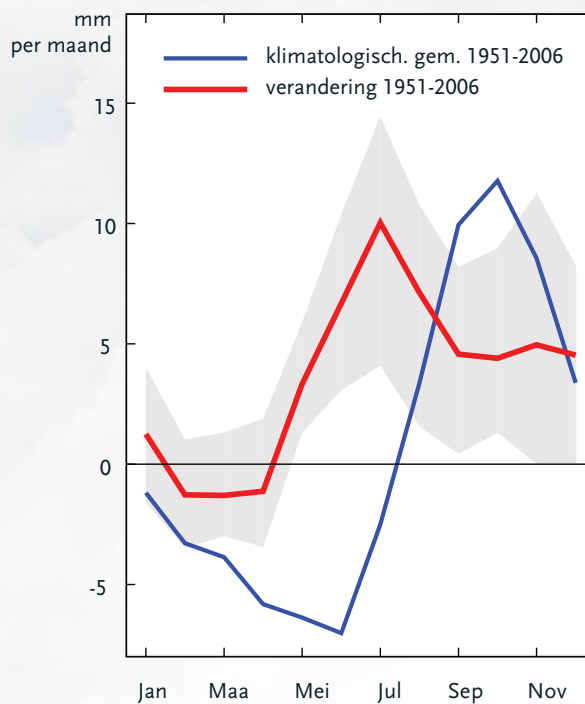
Figuur 3.4 geeft het verschil weer tussen de neerslag aan de kust (minder dan 30 kilometer van de kustlijn) en het binnenland, zoals we dat gemeten hebben. Zowel het klimatologisch gemiddelde als de verandering over de laatste 55 jaar zijn weergegeven. Het klimatologisch gemiddelde laat zien dat de kust in het voorjaar relatief droog is, en in het najaar relatief nat. Interessant is dat er een trend in het neerslagpatroon zichtbaar is; de kust wordt natter ten opzichte van het binnenland. Omdat

de natuurlijke grilligheid van neerslag groot is, is de onzekerheid in de bepaling van de trend ook groot. Toch lijkt de verandering voor de zomer significant te zijn. Het ligt voor de hand deze verandering toe te schrijven aan de sterk oplopende temperatuur van de Noordzee; maar een hard bewijs hiervoor ontbreekt nog.

## DROOGTE

### NEERSLAGTEKORT

Droogte is geen grootte die je direct kan meten. Het is natuurlijk in eerste instantie het gevolg van gebrek aan neerslag. Maar om een goed beeld te krijgen van droogte moet ook rekening worden gehouden met de verdamping. Het verschil tussen de hoeveelheid neerslag en de hoeveelheid verdamping bepaalt of er droogte ontstaat. De verdamping wordt vooral bepaald door aanwezige vegetatie. Het door de vegetatie opgenomen water wordt voor slechts een klein deel in de vegetatie zelf vastgelegd. Het grootste deel verdamt. Die verdamping wordt bepaald door de weersomstandigheden (temperatuur, zonlicht, wind, luchtvochtigheid), het type vegetatie en het beschikbare vocht in de bodem. Verdamping varieert hierdoor ruimtelijk sterk en is moeilijk te meten. Daarom wordt in Nederland, om de verdamping bij bepaalde weersomstandigheden te schatten, vaak de

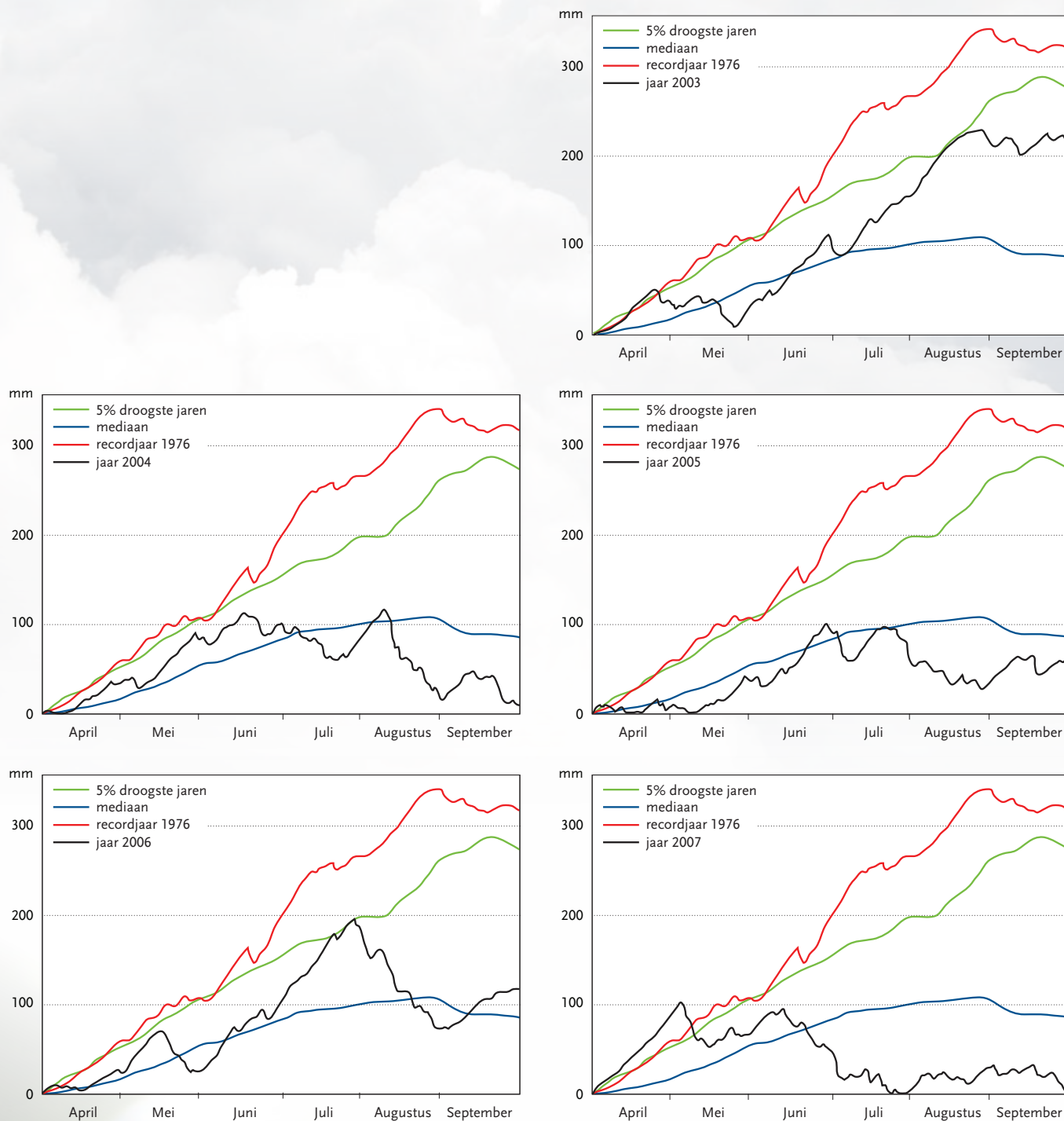


**Figuur 3.4:** Waargenomen verschil tussen neerslag aan de kust en neerslag in het binnenland door het jaar heen op basis van 238 neerslagstations. Het klimatologische gemiddelde over de periode 1951-2006 en de verandering over dezelfde periode zijn weergegeven. In grijs is de 10-90 % betrouwbaarheidsband weergegeven. De figuur is gebaseerd op periodes van 3 maanden; 'Jan' verwijst bijvoorbeeld naar het gemiddelde over december, januari en februari.

verdamping genomen van grasland dat over voldoende water kan beschikken. Als er gedurende het groeiseizoen minder neerslag valt dan deze referentieverdamping, spreken we van een neerslagtekort. Omgekeerd is er sprake van een neerslagoverschot. Het begrip neerslagtekort, dat dus eigenlijk weergeeft dat er niet genoeg neerslag is gevallen voor optimale groei van gras, kan goed gebruikt worden om zomerdroogte in Nederland te karakteriseren.

### ZOMERDROOGTE

Gedurende het groeiseizoen (het zomerhalfjaar) houden periodes met weinig neerslag en/of veel verdamping vaak meerdere maanden aan. Het optreden van een neerslagtekort is dus een normaal verschijnsel. Daarom spreken we meestal pas bij boven-normale neerslagtekorten over droogte.



**Figuur 3.5:** Ontwikkeling van het neerslagtekort gedurende het zomerhalfjaar (1 april t/m 30 september) voor 2003 tot en met 2007 (zwarte lijnen), het recordjaar 1976 (rode lijn), het niveau dat slechts in 5% van de jaren wordt overschreden (groene lijn) en het niveau dat in de helft van de jaren wordt overschreden (mediaan, blauwe lijn).

Figuur 3.5 toont, voor de jaren 2003 tot en met 2007, de ontwikkeling van het neerslagtekort gedurende het zomerhalfjaar (1 april t/m 30 september). Ter vergelijking zijn daarbij steeds drie ontwikkelingen van het neerslagtekort aangegeven:

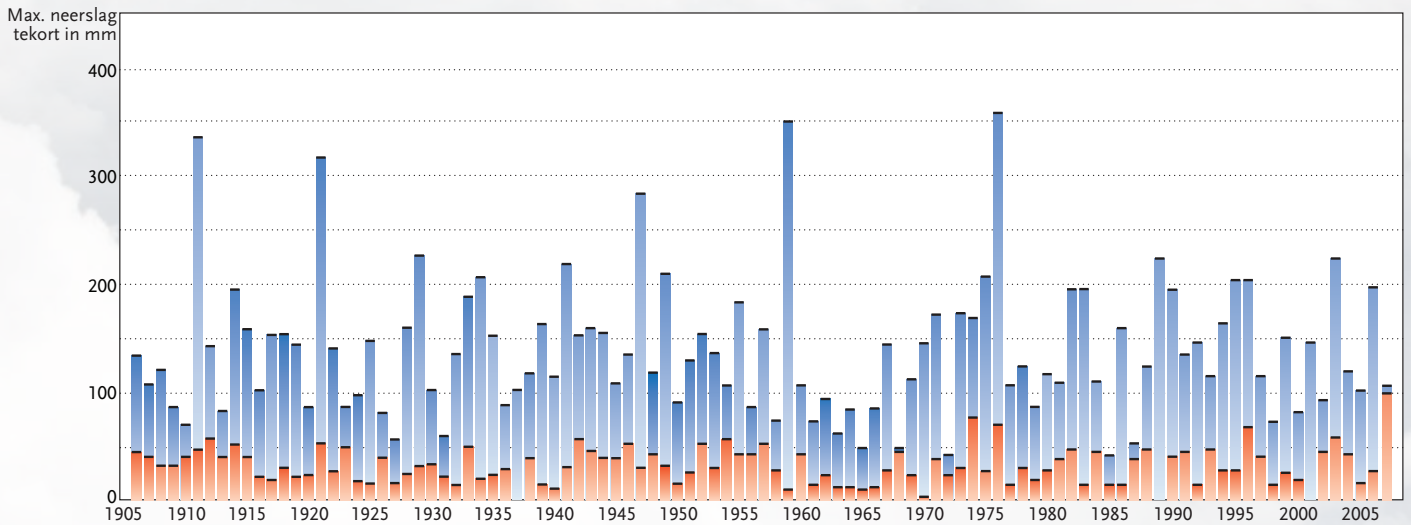
- 1) In het record droge jaar 1976;
- 2) Het niveau dat slechts in 5 procent van de jaren wordt overschreden (gemiddeld eens in de twintig jaar);
- 3) Het niveau dat in de helft van de jaren wordt overschreden (en in de andere helft dus niet).

Figuur 3.5 laat zien dat een groot neerslagtekort (ofwel droogte) tijd nodig heeft om zich te ontwikkelen. Serieuze droogte (bijvoorbeeld een neerslagtekort groter dan 200 millimeter) komt slechts eens in de twintig jaar eerder dan eind juli voor. In recordjaar 1976 werd dit niveau echter al een maand eerder bereikt. Zeer grote neerslagtekorten

(groter dan 300 millimeter) zullen pas tussen half augustus en half september kunnen optreden. Een figuur als 3.5 laat ook duidelijk zien of het voor de tijd van het jaar droog was of niet. Naast de ontwikkeling van het neerslagtekort in de tijd is ook het grootste (maximale) neerslagtekort gedurende het zomerhalfjaar interessant, want dat is een maat voor de absolute droogte van een jaar en dus of dat jaar als 'droog' de geschiedenis in gaat.

In 2003 steeg het neerslagtekort vanaf de derde week van mei vrijwel onafgebroken door tot een maximale waarde van ongeveer 230 millimeter rond de derde week van augustus en bleef daarna tot eind september redelijk constant. Vooral het moment waarop neerslagtekorten van meer dan 200 millimeter werden bereikt (half augustus) maakt 2003 relatief bijzonder. In 2004 en 2005 was de

ontwikkeling van het neerslagtekort heel gemiddeld. In beide jaren lag het maximale neerslagtekort rond de 100 millimeter, een waarde die bij benadering in de helft van de jaren gehaald wordt. De ontwikkeling van het neerslagtekort in 2006 was gemiddeld in april. De eerste helft van mei was droog, maar dat werd gecompenseerd in de tweede helft van mei. Van begin juni tot en met eind juli was het vrijwel droog en steeg het neerslagtekort tot ongeveer 200 millimeter, de maximale waarde dat jaar. Absoluut gezien niet heel uitzonderlijk maar wel redelijk uitzonderlijk voor de tijd van het jaar. 2007, tot slot, kenmerkte zich door een bijzonder droog voorjaar. Het maximale neerslagtekort van dat jaar, iets meer dan 100 millimeter, werd al in de eerste week van mei bereikt. Over de uitzonderlijkheid van het droge voorjaar van 2007 wordt verderop meer verteld.



Figuur 3.6: Het maximale neerslagtekort in het zomerhalfjaar (april t/m september in blauw) en in het voorjaar (maart en april in rood) vanaf 1906.

Figuur 3.6 geeft vanaf 1906 tot en met 2007 het maximale neerslagtekort gedurende het zomerhalfjaar. Het jaar 1976 heeft het record met een maximaal neerslagtekort van ongeveer 360 millimeter en wordt, in de top 5, gevolgd door 1959, 1947, 1911 en 1921. Met ongeveer 230 millimeter komt 2003 op de zevende plek. Er is tussen 1906 en 2007 geen trend in het maximale neerslagtekort waarneembaar. Statistische methodes geven aan dat het maximale neerslagtekort in 1976, van 360 millimeter gemiddeld in Nederland, ongeveer eens per

negentig jaar voorkomt terwijl een maximaal neerslagtekort van 230 millimeter, zoals in 2003, gemiddeld ongeveer eens per tien jaar voorkomt. Als we in 2003 ook rekening houden met het moment in het zomerhalfjaar waarop de grote neerslagtekorten van 200 tot 220 millimeter bereikt werden (rond half augustus), dan geldt daarvoor een herhalingsperiode van ongeveer twintig jaar.

#### REGIONALE VERSCHILLEN IN ZOMERDROOGTE

Doordat er binnen Nederland regionale verschillen zijn in neerslag

en verdamping bestaan er ook regionale verschillen in het maximale neerslagtekort en het moment in het jaar waarop dat wordt behaald. Zoals we hierboven, in het stukje over kustneerslag, al vertellen, hebben de kustregio's in de vroege zomer vaak iets minder bewolking dan meer landinwaarts gelegen regio's. Het gevolg is dat er aan de kust dan vaak iets minder neerslag valt en dat de zonneshijnduur en dus de verdamping er iets groter zijn. Beide effecten leiden tot een groter neerslagtekort.



| Jaar | Kustregio's |            |          | Landregio's |            |            | NL      |
|------|-------------|------------|----------|-------------|------------|------------|---------|
|      | Noordwest   | Middenwest | Zeeland  | Noordoost   | Middenoost | Maasgebied |         |
| 1976 | 410(85)     | 390(90)    | 445(190) | 335(60)     | 310(45)    | 380(95)    | 360(90) |
| 2003 | 290(13)     | 260(12)    | 265(8)   | 180(5)      | 185(7)     | 190(4)     | 230(10) |

Tabel 3.1: Maximaal neerslagtekort (mm) in het zomerhalfjaar in 1976 en 2003 voor zes verschillende regio's en voor Nederland als geheel met de bijbehorende herhalingstijden in jaren tussen haakjes.

In tabel 3.1 is Nederland opgedeeld in zes regio's en wordt voor elk van deze zes regio's zowel voor 1976 als voor 2003 het maximale neerslagtekort in het zomerhalfjaar met de bijbehorende herhalingstijd gegeven.

De tabel laat zien dat in 1976 en 2003 het maximale neerslagtekort in de kustregio's groter is dan in de landregio's. Daarnaast, hoe groter de herhalingstijd hoe zeldzamer de gebeurtenis. In 1976 vallen vooral Zeeland en middenoost Nederland op met hun respectievelijk veel grotere en veel kleinere herhalingstijd. Uit de herhalingstijden voor 2003 blijkt dat het vooral in noordwest- en middenwest Nederland droger was dan in de rest van Nederland.

#### HET DROGE VOORJAAR VAN 2007

In figuur 3.5 hadden we al het uitzonderlijk droge voorjaar van 2007 opgemerkt. Onder normale omstandigheden is het een goede keuze om de berekening van het neerslagtekort op 1 april te starten.

De eerste april wordt beschouwd als het begin van het groeiseizoen. Vanaf 1 april zijn de (lucht)temperatuur en de hoeveelheid zonnestraling voldoende voor de meeste planten en gewassen om te gaan groeien. Begin april is dan ook het moment waarop gemiddeld genomen in Nederland de verdamping groter wordt dan de neerslag en er dus een neerslagtekort gaat ontstaan. Maar wanneer het voorjaar uitzonderlijk droog en warm is, kan er op 1 april al een (klein)

neerslagtekort ontstaan zijn. Zo ook in het voorjaar van 2007 waarin er tussen 22 maart en 6 mei (46 dagen) geen neerslag van betekenis is gevallen en het boven normaal warm was. Deze situatie leidde ertoe dat er al vóór 1 april een neerslagtekort werd opgebouwd, dat uitzonderlijk groot was voor de tijd van het jaar. Hoe uitzonderlijk, is te zien in figuur 3.6 waarin naast het neerslagtekort in het zomerhalfjaar ook het maximale neerslagtekort in de maanden maart en april is weergegeven (de rode staafjes). In 2007 is het voorjaarstekort van bijna 100 millimeter nog ruim 20 millimeter groter dan het voorjaarstekort in 1996, 1974 en 1976, de top drie van de historische reeks tot en met 2006.



# Troposferisch ozon

## en het klimaat



*De chemische samenstelling van de atmosfeer hangt op vele manieren samen met de toestand van het klimaat op mondiale, regionale en lokale schaal.*

*Hier zullen we een aantal aspecten van deze interactie bespreken aan de hand van veranderingen die in recente jaren zijn waargenomen in de ozonconcentraties boven Europa.*

*Troposferisch ozon is na kooldioxide en methaan het belangrijkste broeikasgas. Maar in de schattingen van de invloed van ozon op het klimaat zitten grote onzekerheden. Een beter begrip van troposferisch ozon is daarom van groot belang.*

## TROPOSFERISCH EN STRATOSFERISCH OZON

Het is ten eerste van belang onderscheid te maken tussen ozon op verschillende hoogtes.

Ozon tussen ongeveer 12 en 50 kilometer boven het oppervlak (de stratosferische ozonlaag) is van cruciaal belang voor het leven op aarde, omdat het schadelijke UV-straling van de zon tegenhoudt. In de stratosfeer wordt ozon (O<sub>3</sub>) direct gevormd uit zuurstof (O<sub>2</sub>) onder invloed van zonlicht. De menselijke uitstoot van chloorfluorkoolstoffen (cfk's) heeft een negatieve invloed op de ozonlaag en is de oorzaak van het jaarlijks ontstaan van het ozongat boven de Zuidpool. Na het ondertekenen van het internationale Protocol van Montreal in 1987 is de uitstoot van cfk's sterk afgenomen, en de verwachting is dat de stratosferische ozonlaag zich halverwege deze eeuw zal herstellen.

Veranderingen in de ozonconcentraties in de troposfeer (tot een hoogte van ongeveer 12 km) spelen een belangrijke rol in opwarming van de aarde. Ozon wordt niet direct uitgestoten, maar wordt gevormd in de troposfeer

door oxidatie van precursorgassen zoals koolstofmonoxide (CO), methaan (CH<sub>4</sub>) en andere vluchtige koolwaterstoffen in de aanwezigheid van stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) en zonlicht. De toename van de emissies van deze gassen in de twintigste eeuw heeft de hoeveelheid ozon in de troposfeer sterk verhoogd. Vooral in de hogere troposfeer (tussen 5 en 12 km), waar de temperaturen laag zijn, is ozon een sterk broeikasgas. Volgens de laatste klimaatrapportage van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) is de bijdrage van troposferisch ozon aan de stralingsforcering tussen de 0,25 en 0,65 W/m<sup>2</sup>, met 0,35 W/m<sup>2</sup> als beste schatting. Recente modelberekeningen laten zien dat de toename van troposferisch ozon in de periode 1890 tot 1990 vooral sterk heeft bijgedragen aan de opwarming van het Noordpoolgebied in de winter en de lente (ongeveer 0,4-0,5 °C) en vervuilde gebieden van het Noordelijk Halfrond in de zomer (lokaal meer dan 0,5 °C).

Directe blootstelling aan verhoogde ozonconcentraties is schadelijk voor mens en natuur. In Europa is er regelgeving rond ozon en worden er grenzen gesteld aan de ozoncon-

centraties aan de grond. Vooral in warme zomers vinden er lokaal overschrijdingen plaats, gerelateerd aan de uitstoot van ozonprecursorgassen.

Vanwege de verticale uitwisseling in de atmosfeer, is er sprake van een samenhang tussen de concentraties in de stratosfeer en de troposfeer enerzijds en de vrije troposfeer en de grenslaag aan de grond anderzijds.

## EFFECTEN VAN EMISSIEBELEID IN EUROPA

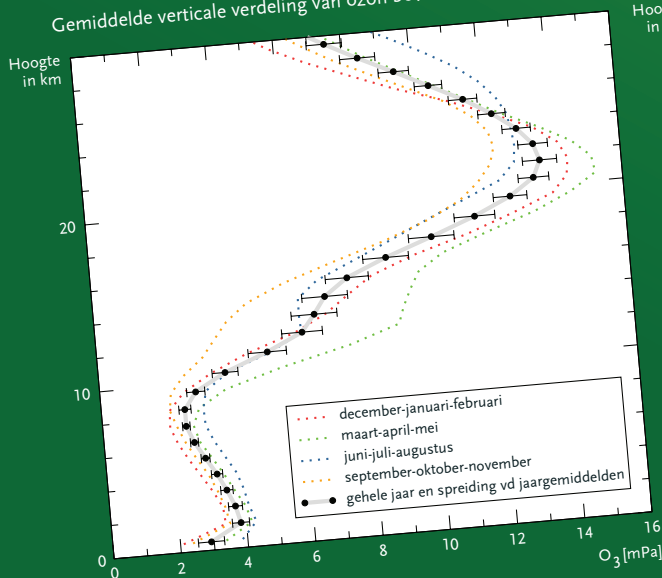
In Europa is de uitstoot van gassen waaruit ozon gevormd kan worden, aanzienlijk gereduceerd sinds eind jaren '80. Dit heeft sterk wisselende effecten gehad op de ozonconcentraties in Europa. De gemeten concentraties op grondniveau laten een gevarieerd beeld zien over de laatste 10-15 jaar, waarbij de trends sterk afhankelijk zijn van de locatie van het meetstation en van het seizoen. De meeste stations in vervuilde gebieden vertonen een verlaging van de hoge ozonconcentraties, met name 's zomers, en een verhoging van de lage concentraties, met name 's winters. Dit patroon is kwalitatief in overeenstemming met een afname

In De Bilt wordt sinds december 1992 wekelijks een ozonsonde opgelaten die de ozonconcentratie meet vanaf de grond tot in de stratosfeer samen met meteorologische grootheden als temperatuur, luchtvochtigheid en windsnelheid.

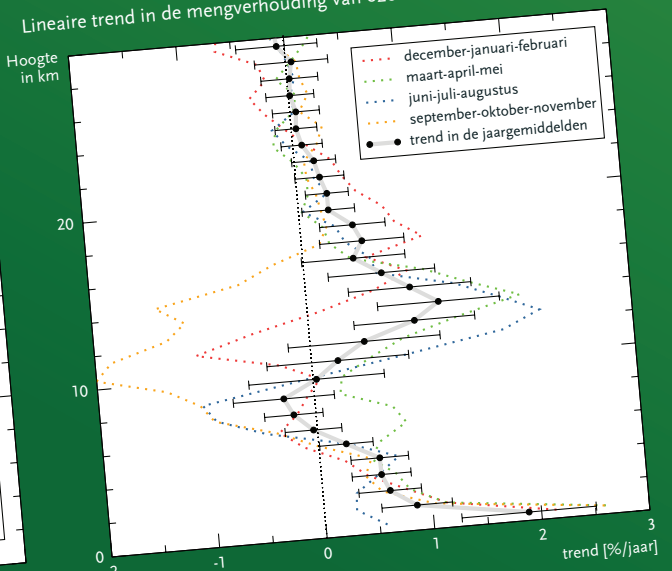
De linkerfiguur toont de waargenomen gemiddelde verticale verdeling van ozon boven de Bilt, waarbij langs de horizontale as de partiële druk van ozon is weergegeven. De datapunten geven de gemiddelde waarden over de volledige jaren 1993 tot en met 2007 en de foutenbalken de standaardafwijkingen in de onderliggende jaargemiddelde waarden. De seizoensgemiddelde verdelingen over de periode december 1992 tot en met november 2007 zijn aangegeven met stippellijnen. De rechterfiguur toont de bijbehorende jaar- en seizoensgemiddelde trends in de mengverhouding van ozon.

De waarnemingen laten een toename van de jaargemiddelde mengverhouding zien in de lagere stratosfeer (12-20 km) met een maximum van meer dan 1% per jaar tussen 12 en 15 km. Boven De Bilt heeft dit echter niet geleid tot een vergelijkbare toename in de troposfeer. Tussen 5 en 12 km is namelijk geen significante verandering in de jaargemiddelde mengverhouding opgetreden. In de lagere troposfeer wordt wel weer een positieve trend gevonden. Tussen 2 en 5 km is de jaargemiddelde mengverhouding met ongeveer 0,5% per jaar toegenomen. Aan de grond loopt dit op tot bijna 2% per jaar gemiddeld en meer dan 2% per jaar in de lente, herfst en winter. Alleen in de zomer is de trend hier niet significant. De veranderingen in de grenslaag en de lagere troposfeer zijn voor een belangrijk deel het gevolg van een afname van de emissies van ozonprecursorgassen in de omgeving van De Bilt.

Gemiddelde verticale verdeling van ozon boven De Bilt (1993-2007)



Lineaire trend in de mengverhouding van ozon boven De Bilt (1993-2007)



Box 4.1 Waargenomen trends in de ozonconcentraties boven De Bilt

van de lokale uitstoot. In brongebieden leidt dat namelijk tot een verlaging van de ozonproductie, die vooral in de zomer plaatsvindt, maar ook tot een afname van de verwijdering van ozon door reactie met stikstofmonoxide (NO), die vooral in de winter van belang is.

Het KNMI-terrein in De Bilt is een voorbeeld van een locatie die sterk beïnvloed wordt door emissies uit de nabije omgeving (zie box 4.1).

#### ACHTERGRONDCONCENTRATIES

De gemeten trends kunnen echter slechts gedeeltelijk worden verklaard door de afname van de lokale emissies. Ook de achtergrondconcentratie in Europa, dat wil zeggen de concentratie die niet door lokale bronnen wordt beïnvloed, is veranderd. Deze vertoont een jaarlijkse cyclus met een maximum in de lente en een minimum in de zomer. Metingen van de achtergrondconcentratie in Mace Head aan de westkust van Ierland vertonen een toename van de hoeveelheid ozon die vanaf de Atlantische Oceaan wordt aangevoerd. Over de afgelopen twintig jaar (1987-2007) is de mengverhouding van ozon (dit is het aantal moleculen ozon op het totale aantal moleculen in een volume lucht) toegenomen met

$0,31 \pm 0,12$  ppb (parts per billion) per jaar. Op een gemiddelde van 38,4 ppb over deze periode, komt dit overeen met een relatieve toename van  $0,81 \pm 0,31$  procent per jaar. Omdat de toename het sterkst is in de lente en in de winter en het zwakst in de zomer, is ook de amplitude van de jaarlijkse cyclus toegenomen. In feite is de achtergrondconcentratie toegenomen tot eind jaren '90 en lijkt deze zich hierna min of meer te hebben gestabiliseerd.

Ook op grotere hoogten vertonen de ozonconcentraties boven Europa een opwaartse trend in de jaren '90, met name 's winters. Dit blijkt uit de meetreeksen van de bergstations Jungfrauoch in de Zwitserse Alpen (3580 m boven zeeniveau) en Zugspitze in Zuid-Beieren (2962 m), uit de met sondes gemeten verticale profielen boven Payerne in Zwitserland, en uit vliegtuigmetingen boven Frankfurt en Parijs.

#### OORZAKEN VAN DE WAARGENOMEN VERANDERINGEN IN DE OZON-CONCENTRATIE

Mogelijk hebben verschillende factoren bijgedragen aan de toename van troposferisch ozon boven Europa in de jaren '90. De belangrijkste zullen we hieronder bespreken.

Intercontinentaal transport van ozon en ozonprecursorgassen zoals NO<sub>x</sub>, CO en koolwaterstoffen vanuit Noord-Amerika en in mindere mate vanuit Azië draagt in belangrijke mate bij aan de achtergrondconcentraties boven Europa, met name in de lente.

Veranderingen in het transport van ozon en ozonprecursorgassen vanuit Noord-Amerika lijken echter van ondergeschikt belang voor het begrijpen van de trend in ozon. De antropogene emissies van ozonprecursorgassen in Noord-Amerika zijn relatief stabiel gebleven of licht afgenomen in de jaren '90. Ook de mogelijkheid dat het transport over de Atlantische Oceaan naar Europa effectiever is geworden in de jaren '90, kan worden uitgesloten. In de lente hangt dit transport namelijk samen met de sterkte van de Noord-Atlantische Oscillatie (NAO), een grootschalig windpatroon. De NAO-index, die de sterkte van de westenwind aangeeft, is echter afgenomen sinds begin jaren '90.

In Azië zijn de antropogene emissies de afgelopen 10-15 jaar enorm snel gegroeid, met name in China. Satellietmetingen laten een verdubbeling zien van de hoeveelheid stikstofdioxide in de troposfeer boven China tussen

1996 en 2005, vergelijkbaar met de economische groei (zie box 4.2). De toename van de emissies in China heeft echter slechts een beperkte invloed gehad op de ozonconcentraties in Europa. Op basis van modelberekeningen zou een verdubbeling van de antropogene emissies in Oost-Azië (inclusief die in Japan en Korea) een toename van de mengverhouding van ozon op grondniveau in Europa opleveren van maximaal ongeveer 1 ppb in de lente – veel minder dan de waargenomen toename.

In 1998-1999 en 2002-2003 vertonen de metingen extra hoge ozonconcentraties door de invloed van bosbranden in Canada en Siberië, waarbij grote hoeveelheden CO<sub>2</sub> en ozonprecursorgassen zijn vrijgekomen. De grootste branden vonden plaats in Siberië in de zomer en herfst van 1998, 2002 en 2003. De Canadese branden zijn weliswaar veel kleiner van

Satellietmetingen spelen een belangrijke rol bij de bepaling van de concentraties van sporengassen in de atmosfeer. Instrumenten zoals GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) op de ERS-2-satelliet van ESA, SCIAMACHY op ESA-Envisat, en OMI (Ozone Monitoring Instrument) op EOS-Aura van NASA zijn in staat om luchtvervuiling dicht bij het oppervlak te meten. Nederland en het KNMI leveren hierbij een belangrijke bijdrage. OMI is een Nederlands-Fins instrument en het KNMI heeft de wetenschappelijke leiding over het OMI-project.

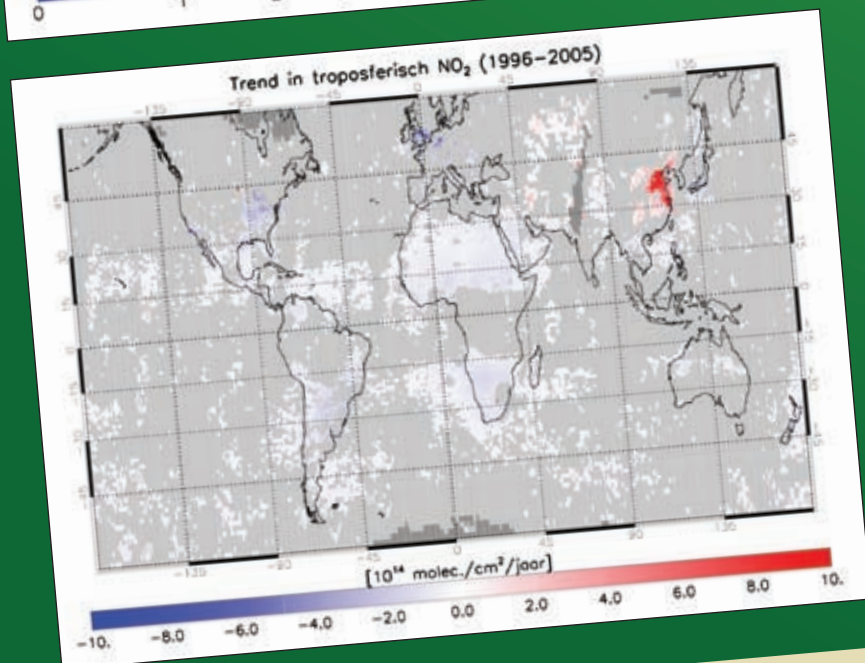
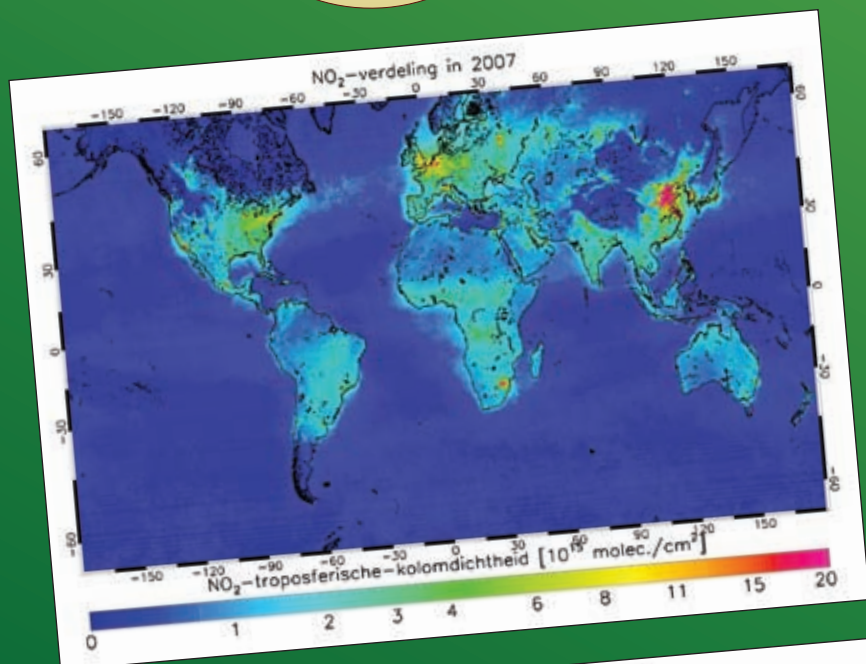
De eerste figuur geeft de mondiale verdeling van stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>) in de troposfeer weer voor het jaar 2007, gemeten door het OMI-instrument. Rood en geel corresponderen met hoge concentraties. Deze komen in het algemeen voor in geïndustrialiseerde gebieden, grote steden en gebieden met een grote bevolkingsdichtheid, waar relatief veel stikstofoxiden (NO<sub>x</sub> is NO en NO<sub>2</sub>) worden uitgestoten. Blauwe kleuren corresponderen met lage concentraties in schone gebieden.

De tweede figuur laat de veranderingen in

de hoeveelheid NO<sub>2</sub> in de troposfeer zien in de periode 1996 tot en met 2005, afgeleid uit de satellietmetingen van GOME en SCIAMACHY. De rode gebieden laten een sterke toename zien, de blauwe gebieden een afname. De witte gebieden corresponderen met een geringe toe- of afname, of met lage concentraties. Gebieden in grijs hebben geen significante trend opgeleverd. Voor de donkergrijze gebieden waren niet genoeg metingen beschikbaar om een tijdserie van troposferisch NO<sub>2</sub> uit te construeren.

Vooraf Oost-Azië en China laten een enorme toename in NO<sub>2</sub> zien, welke wordt veroorzaakt door een toename in de uitstoot van NO<sub>x</sub>. De trend boven China komt gemiddeld genomen overeen met een verdubbeling van de uitstoot in 10 jaar. Deze sterke toename in stikstofoxiden leidt tot een toename van de regionale ozonproductie. Een deel van het geproduceerde ozon wordt over grote afstanden getransporteerd en draagt bij aan de ozonconcentraties boven de vs en Europa, waar de hoeveelheid NO<sub>2</sub> in de troposfeer juist is afgenomen door lokale reducties in de uitstoot van NO<sub>x</sub>.

Box 4.2 Veranderingen in de hoeveelheid stikstofdioxide in de troposfeer, gemeten met satellieten



Vervolg Box 4.2 Veranderingen in de hoeveelheid stikstofdioxide in de troposfeer gemeten met satellieten

omvang geweest, maar hebben een relatief grotere invloed gehad op de ozonconcentraties in Mace Head.

De toename van de emissies van scheepvaart is ook van belang. De huidige bijdrage van scheepvaart aan de mengverhouding van ozon in Mace Head wordt geschat op ongeveer 6 ppb in de zomer en 1 ppb in de winter. Gemiddeld over het jaar is deze bijdrage zo'n 2,5 ppb. Uitgaande van een groei van het scheepverkeer van ongeveer 2% per jaar, levert dit een toename van de jaargemiddelde mengverhouding in Mace Head van 0,05 ppb per jaar. De toename van scheepvaart kan dus slechts een klein gedeelte van de waargenomen trend verklaren.

De mengverhouding van methaan is sinds 1990 met ongeveer 2% toegenomen tot 1751 ppb in 1999 en is daarna vrijwel constant gebleven. In modelstudies leidt een reductie van de huidige mengverhouding van methaan met 20% tot een afname van de jaargemiddelde mengverhouding van ozon op grondniveau in Europa met ongeveer 1,2 ppb, waarbij de impact 's zomers het grootst is. Omgerekend naar de 2%-stijging die in de jaren '90 is waargenomen, levert dat slechts een marginale toename van de ozonconcentratie in deze periode. Een andere factor die uit een aantal recente studies naar voren is gekomen, is dat sinds het midden van de jaren '90 een versterking

van de grootschalige circulatie in de stratosfeer heeft plaatsgevonden. Deze circulatie transporteert ozon van de tropen, waar veel ozon wordt gevormd, naar hogere geografische breedtes en lagere delen van de stratosfeer, waar uitwisseling met de troposfeer plaatsvindt. Een vergelijking van metingen van ozonsondes boven Payerne en Hohenpeissenberg (Zuid-Duitsland) en van de bovengenoemde bergstations Jungfraujoch en Zugspitze over de periode 1992-2004 heeft laten zien dat er in de winter en in de lente een significante correlatie bestaat tussen de ozonconcentraties in de vrije troposfeer en in de lagere stratosfeer. Ook ozonsondes opgelaten boven Canada laten sterk oplopende ozonconcentraties zien in de troposfeer en in de lagere stratosfeer (beneden ongeveer 19 km) tussen 1993 en 2001. Bovendien vertonen de vrije troposfeer en de lagere stratosfeer vergelijkbare trends en een significante correlatie in de tijd. Vliegtuigmetingen boven de Noord-Atlantische Oceaan laten een vergelijkbare correlatie zien. Deze waarnemingen wijzen erop dat ten minste een deel van de toename in troposferisch ozon op gematigde noordelijke breedten en in het Noordpoolgebied is toe te schrijven aan een toename in de ozonconcentraties in de lagere stratosfeer sinds het midden van de jaren '90. Overigens is de laatstgenoemde toename toe te schrijven aan een versterking van de stratosferische circulatie en niet aan

een algemeen herstel van de ozonlaag door veranderingen in de chemie van de stratosfeer.

#### CONCLUSIE EN VOORUITZICHT

De gemeten trends in de ozonconcentraties boven Europa kunnen slechts gedeeltelijk worden verklaard door veranderingen in de emissies van ozonprecursorgassen in and buiten Europa. Het lijkt erop dat een versterking van de stratosferische circulatie een belangrijke oorzaak is geweest van de toename van de ozonconcentraties in de vrije troposfeer sinds de jaren '90.

De meeste klimaatmodellen voorspellen dat de opwarming van de aarde de stratosferische circulatie en daarmee de instroom van ozon vanuit de stratosfeer verder zal versterken. Daar staat tegenover dat de afbraak van ozon in de troposfeer onder invloed van zonlicht, die vooral boven de tropische oceanen plaatsvindt, in de toekomst sneller zal verlopen door een hogere luchtvochtigheid. Ook de frequentie en omvang van bosbranden, de natuurlijke emissies van methaan en andere ozonprecursorgassen, en de productie van stikstofoxiden in de hogere troposfeer door bliksem kunnen veranderen onder invloed van veranderingen in het mondiale klimaat, maar de uitwerkingen van deze koppelingen tussen de chemie van de atmosfeer en het klimaat zijn nog onvoldoende bekend. Een warmer klimaat in Europa kan ook bijdragen



aan het relatief vaker voorkomen van weersomstandigheden die ozonsmog kunnen veroorzaken (zie box 4.3). Klimaatverandering vormt daarmee een belangrijke, maar onzekere factor voor onze toekomstige luchtkwaliteit.

Omgekeerd levert troposferisch ozon een belangrijke bijdrage aan het broeikas effect. De studie die het KNMI maakt van de processen die de ozonconcentratie bepalen is van belang voor het kwantificeren van de klimaatforcering en het verkleinen van de onzekerheden daarin.

#### • • • • VERDER LEZEN

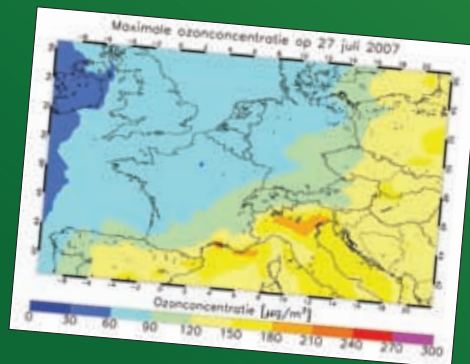
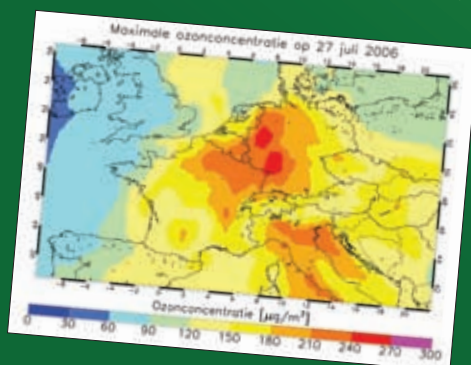
- Voor de bijdrage van troposferisch ozon tot de opwarming van de aarde in de vorige eeuw, zie Shindell, D., G. Falvegi, A. Lacis, J. Hansen, R. Ruedy, E. Aguilar (2006), *Role of tropospheric ozone increases in 20th-century climate change*, *Journal of Geophysical Research*, 111, D08302, doi: 10.1029/2005JD006348.
- De Mace Head-metingen zijn beschreven in Derwent, R.G., P.G. Simmonds, A.J. Manning, en T.G. Spain, *Trends over a 20-year period from 1987 to 2007 in surface ozone at the atmospheric research station, Mace Head, Ireland*, *Atmospheric Environment*, 41, 9091-9098.
- Voor een analyse van de trends in ozonconcentraties in Europa sinds 1990, zie Jonson, J.E., D. Simpson, H. Fagerli, en S. Solberg (2006), *Can we explain the trends in European ozone levels?*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 51-66.
- De laatste inzichten over de bijdragen van intercontinentaal transport aan de ozonconcentraties boven Europa zijn samengevat in het 2007-rapport van de Task Force on Hemispheric Transport of Air Pollution (HTAP), te vinden op: [www.htap.org](http://www.htap.org).

De luchtkwaliteit boven Europa wordt sterk beïnvloed door de meteorologische omstandigheden. Vooral hoge temperaturen en sterke zonne-instraling spelen een belangrijke rol bij de vorming van ozonsmog. Met name gedurende warme, zonnige periodes in de zomer kan de ozonconcentratie daarvoor sterk toenemen.

In de figuren zijn de maximale ozonconcentraties weergegeven op 27 juli 2006 en 2007. Een concentratie van 100 microgram ozon per kubieke meter lucht komt overeen met een mengverhouding van ongeveer 50 ppb. In de Europese regelgeving omtrent luchtkwaliteit zijn de informatie- en waarschuwingsdrempel vastgesteld op respectievelijk 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (oranje) en 240  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (rood). De ozonconcentraties zijn

berekend met het Franse luchtkwaliteitsmodel CHIMERE, en onafhankelijke metingen aan de grond laten vergelijkbare concentraties zien. In de periode 25-29 juli 2006 was het erg warm en zonnig in West-Europa, omstandigheden die hebben geleid tot relatief hoge ozonconcentraties. Dit in tegenstelling tot dezelfde periode in 2007, een koele zomer.

De afname van emissies van precursorgasen in Europa zal naar verwachting leiden tot een verlaging van de hoge ozonwaarden en een vermindering van het aantal overschrijdingen van de Europese normen in de zomer. Hogere zomertemperaturen door klimaatverandering zouden dit effect echter deels teniet kunnen doen.



Box 4.3 De relatie tussen luchtkwaliteit en klimaat



# Temperatuurreksen



Theo Brandsma

Aad van Ulden

Bij het vaststellen van het klimaat is er een speciale rol weggelegd voor de temperatuur als indicator voor klimatologische variaties in tijd (dag, seizoen, jaar, eeuw) en plaats.

Door de eeuwen heen is er veel zorg besteed aan het nauwkeurig meten en vastleggen van de temperatuur onder andere door middel van standaardisatie van instrumenten. Sinds einde 19e eeuw worden er ook internationaal afspraken gemaakt over de directe omgeving en behuizing van de meetinstrumenten.

Toch zijn er weinig meetlocaties waar in de afgelopen eeuw geen wijzigingen in meetomstandigheden zijn opgetreden. Meetstations zijn verplaatst, instrumenten gemoderniseerd, bebouwing is dichterbij gekomen. De meetlocatie

in De Bilt is sinds 1897 weinig veranderd en wordt, mede vanwege haar centrale ligging in Nederland, het meest gebruikt om klimatologische analyses mee te maken. Voor sommige toepassingen is zelfs deze reeks niet nauwkeurig genoeg.

Daarom worden op het KNMI met verschillende methoden temperatuurreksen gemaakt. In dit rapport worden naast de onbewerkte waarnemingen uit De Bilt twee reeksen geïntroduceerd: De Centraal Nederland Temperatuur en de gehomogeniseerde reeks van De Bilt. De reeks uurlijkse waarnemingen van station De Bilt is de basis voor wat betreft onze nationale klimatologie. De hoogste temperatuur ooit gemeten en de langste hittegolf worden bepaald aan de hand van de in De Bilt gemeten waarden.

De Centraal Nederland Temperatuur (CNT) is een samenstelling van waarnemingen van een aantal stations die gezamenlijk het midden van Nederland omspannen. Deze samengestelde reeks is niet zo gevoelig voor lokale veranderingen in de meetomstandigheden van de individuele stations en daardoor zeer geschikt voor vergelijkingen met gegevens van klimaatmodellen.

De gehomogeniseerde reeks van De Bilt is gemaakt om voor één locatie de weersomstandigheden uit het verleden zo nauwkeurig mogelijk te reconstrueren.

Voor wat betreft de jaargemiddelde temperatuur, die als schatter van de voortschrijdende klimaatverandering gebruikt wordt, wijken de 3 reeksen enige tienden graden Celsius van

elkaar af (zie figuur 5.1). Ook voor maandgemiddelden is de standaarddeviatie van het verschil tussen de reeksen slechts 0,2 °C. Dit geeft aan, dat de metingen in De Bilt in hoge mate representatief zijn voor Midden-Nederland en dat de zorg om de metingen goed te verrichten beloond wordt.

#### DE GEHOMOGENISEERDE TEMPERATUURREEKS VAN DE BILT

De temperatuurreeks van De Bilt begint in 1897 en is daarmee de langste ononderbroken en nu nog actuele temperatuurreeks van Nederland. Net als andere waarnemstations heeft De Bilt te maken met veranderingen in meetmethode en waarnemomstandigheden. Dit kan leiden tot inhomogeniteiten (zie meteorologisch taalgebruik) in de temperatuurreeks die een verstoord beeld geven van het klimaat door de eeuwen heen.

Vanaf het begin van de waarnemingen in De Bilt is er veel gedaan om deze inhomogeniteiten te voorkomen dan wel te kwantificeren. Zo werd waar mogelijk een aantal jaren parallel gemeten bij de overgang naar bijvoorbeeld een nieuw type thermometerhut, verandering van huthoogte of -lokatie. Vergelijking van de oude met de nieuwe situatie geeft

dan een beeld van de grootte van de inhomogeniteiten in samenhang met het weer. Een enkele keer, zoals bij de veranderingen van locatie en meetopstelling in 1950-1951, zijn er niet afdoende parallelmetingen verricht. Dan wordt gekozen voor een andere correctiemethode, namelijk vergelijking met naburige stations.

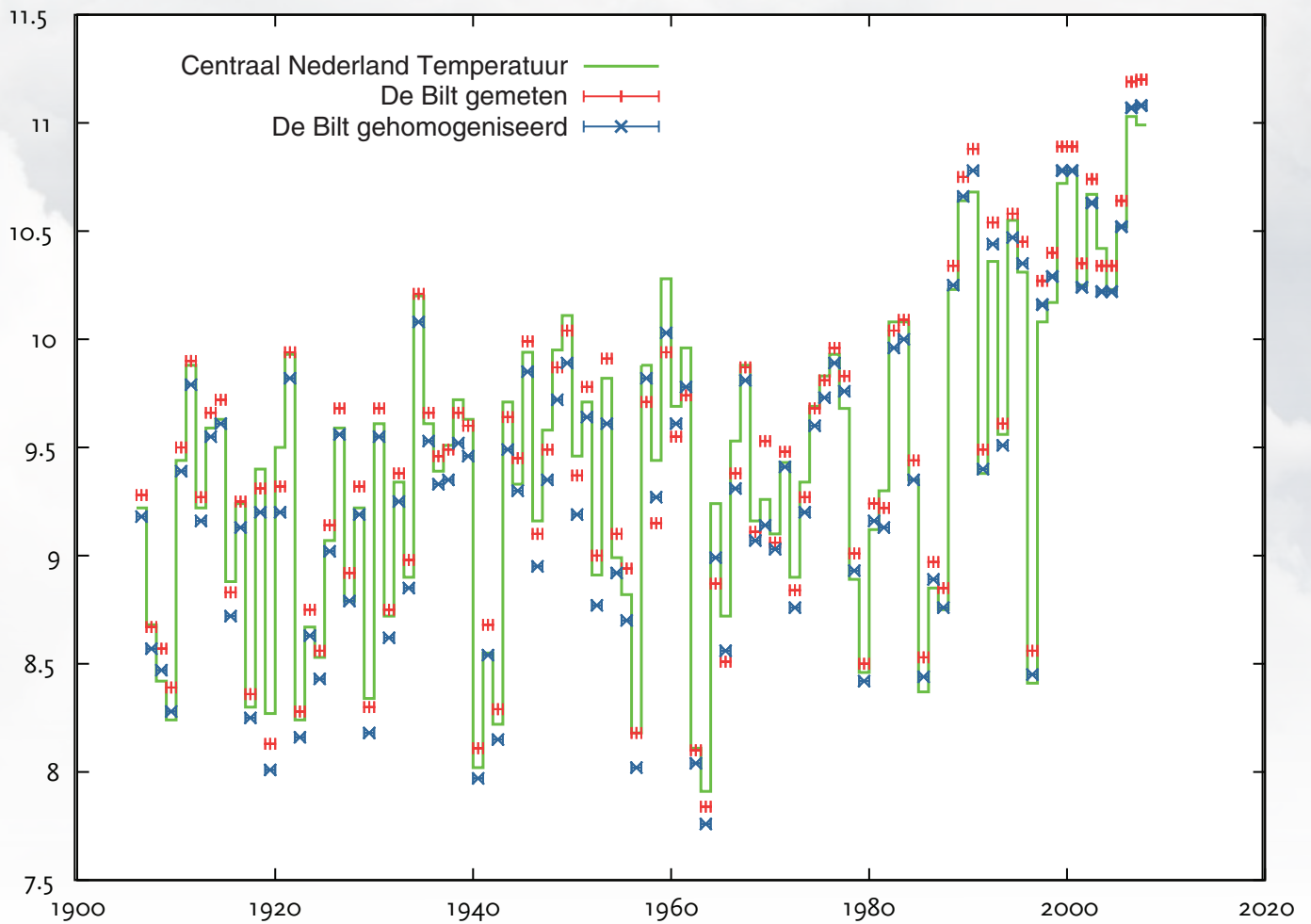
Sinds enige jaren worden er mobiele temperatuurmetingen verricht langs het traject Nieuwegein-Utrecht-De Bilt. Deze metingen zijn bedoeld om meer inzicht te krijgen in het effect van de stad Utrecht op de metingen in De Bilt. In de huidige versie van de gehomogeniseerde reeks van De Bilt is dat effect geschat door onderlinge vergelijking van de stations De Bilt en Soesterberg voor verschillende windrichtingen.

#### DE CENTRAAL NEDERLAND TEMPERATUUR

Klimaatmodellen berekenen meteorologische grootheden met een typische ruimtelijke schaal van 100 km. Lokale effecten ten gevolge van vegetatie, kleine watervlakken en hoogteverschillen worden door het model niet opgelost. Om de kwaliteit van klimaatmodellen te toetsen zijn waarnemingen nodig op dezelfde schaal. De Centraal Nederland Temperatuur voorziet in deze behoefte.

De CNT is geconstrueerd na analyse van de maandgemiddelde temperatuurreeksen van 22 stations in Nederland. Stations aan de kust en in het uiterste noorden en zuiden van het land blijken minder representatief voor de temperatuur in het midden van het land en zijn daarom verder buiten beschouwing gelaten. Alle reeksen zijn statistisch onderzocht op homogeniteit en trend door vergelijking met naburige stations. Er zijn kleine correcties uitgevoerd en een enkele ontbrekende waarde is aangevuld.

Op basis van bovengenoemde analyse zijn er (naast De Bilt) 2 reeksen geselecteerd als referentiereeks voor de periode 1906-1957 (Winterswijk en Oudenbosch) en 7 reeksen voor de periode vanaf 1958 (Rotterdam, Soesterberg, Deelen, Winterswijk/Hupsel, Oudenbosch/Gilze Rijen, Gemert/Volkel en Eindhoven). Een gewogen gemiddelde van deze gecorrigeerde reeksen noemen we de Centraal Nederland Temperatuur. De weegfactoren na 1958 worden zo gekozen dat meetwaarden die veel afwijken van het gemiddelde minder meetellen. De Centraal Nederland Temperatuur is representatief voor het gebied tussen de steden Utrecht, Arnhem, Breda en Eindhoven.




**Figuur 5.1:** De drie temperatuurreeksen die in dit rapport gebruikt zijn verschillen maar heel weinig van elkaar. De gemeten temperaturen in De Bilt vormen de rode reeks. De blauwe waarden geven de gehomogeniseerde De Bilt reeks. De groene reeks, de Centraal Nederland Temperatuur, is representatief voor een groter gebied dan alleen De Bilt.



Het aflezen van thermometers die in een standaard meethut zijn opgehangen behoort in Nederland bijna tot het verleden. Het KNMI beschikt tegenwoordig over een automatisch meteorologische meetnet. Alle Nederlandse weerstations zijn volledig geautomatiseerd. Een groot voordeel van volledig geautomatiseerde waarnemingen is de mogelijkheid om de

gegevens zeer frequent te bepalen, zodat de informatie zo actueel mogelijk is. In feite worden de gegevens iedere seconde ingezameld. Vervolgens worden ze bewerkt en zijn ze elke tien minuten beschikbaar voor gebruik. Ieder uur wordt op basis van deze gegevens een weerrapport gemaakt voor onderlinge uitwisseling tussen weerdiensten.

Box 5.1 Automatisch weerstation



Net als in veel andere vakgebieden hebben de onderzoekers van weer en klimaat een eigen taalgebruik, 'vakjargon'. In een rapportage voor een breed publiek, zoals deze, proberen we dat jargon natuurlijk zoveel mogelijk te vermijden, maar in sommige gevallen is dat niet praktisch. Hieronder leggen we enkele begrippen uit:

**Winter 2006:** Hiermee wordt de winter bedoeld die in 2006 eindigt. Het betreft de maanden december 2005, januari 2006 en februari 2006.

**Normaal:** Langjarige gemiddelden, door meteorologen ook wel 'normalen' genoemd, worden berekend over een tijdvak van 30 jaar (meestal 1971-2000).

**Trend en fluctuaties:** Het woord 'trend' heeft een statistische betekenis. Als we een meetreeks (bv de temperatuur op een bepaalde plek in de loop van de tijd) of een ander signaal dat in de loop van de tijd verandert (uit een model, bv) hebben, dan kan dat vaak gezien worden als een langzaam veranderend deel (de trend) en grillige fluctuaties, die gemiddeld nul zijn, daaromheen.

**Graaddagen:** Als het buiten 17 graden of lager is, doen wij onze verwarming aan. Hoe lager de temperatuur, hoe meer er gestookt wordt. Om het aantal graaddagen in een jaar (of een seizoen) te bepalen wordt van elke dag dat de gemiddelde temperatuur lager is dan 17 graden de afwijking van 17 graden bijgeteld. Een dag waarop het bijvoorbeeld gemiddeld 14 graden was, telt dus voor 3 graaddagen, een dag met -1 graden gemiddelde temperatuur voor 18 graaddagen. De som van graaddagen over een seizoen of een jaar is een goede maat om te zien wat de behoefte aan huisverwarming is.

**Inhomogeniteiten:** Bij meetreeksen van tientallen jaren lang, komt het nogal eens voor dat de omstandigheden of het meetinstrument niet al die tijd exact hetzelfde waren. Dit geeft aanleiding tot kleine ver-

schillen in de metingen die het beeld van de ontwikkelingen in de loop van de tijd verstoren. Klimatologen noemen dit inhomogeniteiten.

**Neerslagsom:** Bij neerslag (regen, sneeuw enz.) is het vaak belangrijk om niet alleen te weten hoeveel er viel, maar ook hoe lang het duurde. 50 millimeter regen in een etmaal wijst op hevige regen, 50 millimeter in een maand kan een droge maand betekenen. Daarom worden neerslaghoeveelheden altijd over een bepaald tijdvak opgeteld en dat tijdvak wordt ook genoemd. Er is dan sprake van bv een 'uursom' of een 'maandsom'.

**Neerslagoverschot en neerslagtekort:** Het neerslagoverschot wordt verkregen door het verschil te berekenen tussen de hoeveelheid gevallen neerslag en de berekende referentiegewasverdamping. Dit verschil wordt dagelijks gesommeerd in het tijdvak van 1 april tot en met 30 september. Een negatief getal geeft een vochttekort aan ('neerslagtekort'). Zie ook het hoofdstuk over Neerslag en droogte)

Meteorologen hanteren bij bepaalde temperatuuromstandigheden een vast taalgebruik:

**Ijsdag:** Maximumtemperatuur lager dan 0,0 °C

**Vorstdag:** Minimumtemperatuur lager dan 0,0 °C

**Warme dag:** Maximumtemperatuur 20,0 °C of hoger

**Zomerse dag:** Maximumtemperatuur 25,0 °C of hoger

**Tropische dag:** Maximumtemperatuur 30,0 °C of hoger

**Hittegolf:** Een hittegolf is een opeenvolging van in De Bilt minimaal 5 zomerse dagen, waarvan er minimaal drie tropisch zijn.

### **Algehele redactie**

Arie Kattenberg

### **Vormgeving**

Studio KNMI, Kim Pieneman

### **Productie en coördinatie**

Kim Pieneman

### **Lithografie en druk**

Drukkerij Opmeer, Den Haag

### **Fotografie**

KNMI beeldbank

[www.sxc.hu](http://www.sxc.hu) Rechtenvrij

### **Papier**

Binnenwerk: Reviva Mega mat, 150 g/m<sup>2</sup>

Omslag: Reviva Mega mat, 250 g/m<sup>2</sup>

*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/toestandklimaat](http://www.knmi.nl/toestandklimaat)

### **Oplage**

5000

© KNMI, De Bilt, juli 2008



*papier karton kringloop*

Colofon

Postadres: Postbus 201, 3730 AE De Bilt



Bezoekadres: Wilhelminalaan 10

Telefoon: 030 - 220 69 11, Telefax: 030 - 221 04 07

Internet: [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl)

