



MNP Rapport 550032010/2007

Kans op extreem warme dagen in Nederland

Een analyse van historische data, modelvoorspellingen en
consequenties voor de volksgezondheid

H. Visser

Contact:

H. Visser (IMP/MNP)

Hans.Visser@MNP.nl

Voorwoord

In dit rapport worden nieuwe indicatoren voor klimaatverandering in Nederland geïntroduceerd. Bij de ontwikkeling van deze indicatoren is zowel aandacht besteed aan hoe aansprekelijk de indicatoren zijn voor maatschappelijke actoren als aan de mate van zekerheid waarmee uitspraken over ontwikkelingen in deze indicatoren kunnen worden gedaan.

Het rapport is het resultaat van het strategisch onderzoek van het Milieu- en Natuurplanbureau (MNP) op het terrein van onzekerheden. De resultaten van dit onderzoek vinden geregeld hun weg naar wettelijke producten van het MNP zoals de jaarlijkse Milieubalans. Dit geldt in het bijzonder voor de expertise die is opgebouwd op het gebied van statistiek en onzekerheid van trends, gerelateerd aan klimaatverandering (zie Tang, 2003; Visser, 2004a,b en 2005). De methode voor het berekenen van onverschrijdingskansen zoals in dit rapport toegepast, is ontleend aan een recente studie van Visser en Petersen (2007) naar de afname van de kans op een Elfstedentocht.

Anton van der Giessen, Arthur Petersen en Bert de Vries (MNP) voorzagen eerdere versies van dit rapport van commentaar. Albert Klein Tank (KNMI) gaf in een externe *review* een reeks van waardevolle opmerkingen die in de eindversie verwerkt zijn.

Abstract

The chance of extremely warm days in the Netherlands

Annually averaged temperatures in the Netherlands are rising and the same seems to hold for peak summer temperatures. July 2006 showed a record high, with two heat waves. This study shows that chances for extremely warm days increased systematically over the period of 1951-2006. For instance, the chance that the temperature peaks to 32.0 °C rose from 13% in 1950 to 76% in 2006. The chance of experiencing extremely warm days in the future is likely to rise further. This is shown in the analysis of four scenarios for the year 2050.

One of the major impacts of extremely warm days are heat-related excess deaths, a number which rose systematically in the period of 1951-2006 by a factor of 2.5. Here, a constant level of health care and a constant age structure over this period is assumed (in order to isolate the heat-related effect). A prominent Dutch example of the societal impact of extremely warm days was seen in 2006 at the International Four-Day March of the city of Nijmegen. These marches are organized each third week of July. This sporting event had to be stopped in 2006 after the first day due to the heat (two people died and 69 people were taken to hospital). The chance that these conditions will be as severe in 2007 as they were in 2006, has been found to be 7% (the chance was less than 1% in 1951). The percentage of 7% equals an average return period of once in every 14 years.

Key words: Climate change, heat waves, heat programmes, temperature extremes, trend analysis, scenarios, uncertainty

Inhoud

Samenvatting	9
1 Inleiding	11
1.1 Het wordt warmer in Nederland.....	11
1.2 Extreme warmte en gevolgen.....	13
1.3 Neemt de kans op extreem warme dagen toe?.....	15
2 Trendanalyses en overschrijdingskansen	17
2.1 Trends en onzekerheden.....	17
2.2 Kans op overschrijding van een drempelwaarde	20
3 Hitte-indicator	23
3.1 Keuze van indicator	23
3.2 Data en homogeniteit	24
3.3 Indicatoren voor duur en percentielen	29
4 De kans op extreem warme dagen	33
4.1 Trend over de periode 1951–2006	33
4.2 Kans op extreem warme dagen.....	36
5 Extra sterfte tijdens warme periodes	41
5.1 Relatie hitte en sterfte	41
5.2 Extra sterfte onder maatschappelijke condities van nu.....	42
5.3 De Vierdaagse van Nijmegen	45
6 Temperatuurscenario's voor het jaar 2050	51
6.1 KNMI-scenario's en onzekerheden	51
6.2 Projecties voor 2050	54
7 Kans op extreem warme dagen in 2050	59
7.1 Van etmaalgemiddeldes naar maximum temperaturen.....	59
7.2 Kans op extreem warme dagen in 2050	62
8 Conclusies en consequenties	65
8.1 Conclusies	65
8.2 Nationaal hitteplan	68

Literatuur73

Appendix A Homogeniteit temperatuurreksen

Samenvatting

Nederland wordt warmer en dat uit zich niet alleen in jaargemiddelde temperaturen. Ook warmte in de zomer lijkt toe te nemen, met onder andere negatieve gevolgen voor de volksgezondheid. Tijdens de hittegolven in de julimaand van 2006 vielen volgens het CBS duizend extra doden, en de Vierdaagse van Nijmegen moest na de eerste dag worden afgebroken. Door de hitte vielen er twee doden; 69 lopers moesten in het ziekenhuis worden opgenomen. De vraag dient zich aan of deze hitte een toevallige fluctuatie is geweest van het klimaat of dat er sprake is van een systematisch patroon. En wat staat ons in de nabije toekomst te wachten? Is het nodig om maatregelen te treffen?

Vanuit deze vraagstelling is in dit rapport onderzocht hoe de kans op extreme temperaturen in Nederland is veranderd over de afgelopen decennia en hoe deze kans zich zal ontwikkelen in de naaste toekomst (tot aan het jaar 2050). Om een antwoord op deze vraag te krijgen, is een statistische methode geïntroduceerd waarmee de kans op overschrijding van drempeltemperaturen kan worden berekend. Door gebruik te maken van een stochastisch model om trends te schatten, kunnen deze overschrijdingskansen direct berekend worden.

Als maat voor extreme temperaturen is gekozen voor het ‘warmste moment per jaar’, dat wil zeggen het maximum van alle dagmaximale temperaturen in een jaar. Voor deze indicator zijn homogene meetreeksen beschikbaar over de periode 1951 tot heden. In de analyse is gebruikgemaakt van de meetreeksen in De Bilt. Deze locatie blijkt qua temperatuur een goede maat voor de gemiddelde temperatuur in grote delen van ons land. Wat betreft de toekomst is gebruikgemaakt van recent door het KNMI ontwikkelde scenario’s. Op basis van vier projecties voor maximale etmaalgemiddelde temperaturen in 2050 zijn veranderingen in het warmste moment per jaar benaderd via een omrekeningsformule.

De resultaten laten zien dat de trend in de historische ontwikkeling van het warmste moment per jaar sterk stijgend is, van gemiddeld 29.9 °C in 1951 naar gemiddeld 33.4 °C in 2006. De toename over deze periode is statistisch significant, namelijk 3.5 ± 1.8 °C (95%-betrouwbaarheidsinterval). Vanuit de geschatte trend en bijbehorende statistische informatie zijn overschrijdingskansen berekend. Deze kanscurves vertonen voor elke drempel een exponentieel stijgend verloop in de tijd. Deze meer dan lineaire stijging is te verklaren uit de niet-lineaire relatie tussen trends in temperaturen en overschrijdingskansen.

In concreto is gevonden dat de kans op overschrijding van 32.0 °C in 1951 nog 13% bedroeg; maar in 2006 is de kans opgelopen naar 76%. Anders uitgedrukt, in 1951 kwamen maximumtemperaturen boven de 32.0 °C gemiddeld eens per acht jaar voor. In 2006 is de frequentie

toegenomen naar gemiddeld eens per 1.3 jaar. Voor de drempeltemperatuur van 36.0 °C zijn de kansen opgelopen van 0% in 1951 naar 8% in 2006. Ofwel uitgedrukt in gemiddelde terugkeertijden, van minder dan eens per 400 jaar in 1951 naar eens per 13 jaar in 2006.

Hitte in de zomer heeft negatieve consequenties voor de volksgezondheid. Gevonden is dat het aantal extra doden in een periode met hittegolven van jaar tot jaar kan variëren. Als we uitgaan van een formule voor extra sterfte onder maatschappelijke condities van nu, dan vinden we dat extra sterfte over de periode 1951-2006 toegenomen is met een factor 2.5 [1.6, 3.9] (95%-betrouwbaarheidsinterval). Daarnaast is gevonden dat de herhalingskans van meteorologische omstandigheden zoals die plaats vonden tijdens de Vierdaagse van Nijmegen in 2006, 7% [2%, 16%] bedraagt (95%-betrouwbaarheidsinterval). Deze kans van 7% komt overeen met een gemiddelde terugkeertijd van eens per 14 jaar.

Voor kansen op extreem warme dagen *in de toekomst* is gevonden dat de warmste temperaturen per jaar over de periode 1990-2050 zullen stijgen met gemiddeld 1.0 tot 3.8 °C, afhankelijk van het klimaatscenario. In specifieke realisaties van het warmste moment per jaar kan de temperatuur oplopen tot 40 °C. Wel is de kans op zo'n gebeurtenis klein (kans van 3% in hoogste KNMI-scenario). De kans op een warmste moment per jaar van 35.0 °C of meer bedraagt in 2006 gemiddeld 20%, dat wil zeggen gemiddeld eens per vijf jaar. In het jaar 2050 ligt deze kans tussen de 18%, 30% (twee scenario's) en 60%; dus gemiddeld eens per 6, 3, 3 en 2 jaar. Evenzo is gevonden dat de kans op overschrijding van 38.0 °C in 2006 nog verwaarloosbaar is. Maar in het jaar 2050 is deze kans opgelopen naar waarden die liggen tussen de 1%, 3% (twee scenario's) en 15%; dus gemiddeld eens per 100, 33, 33 en 7 jaar.

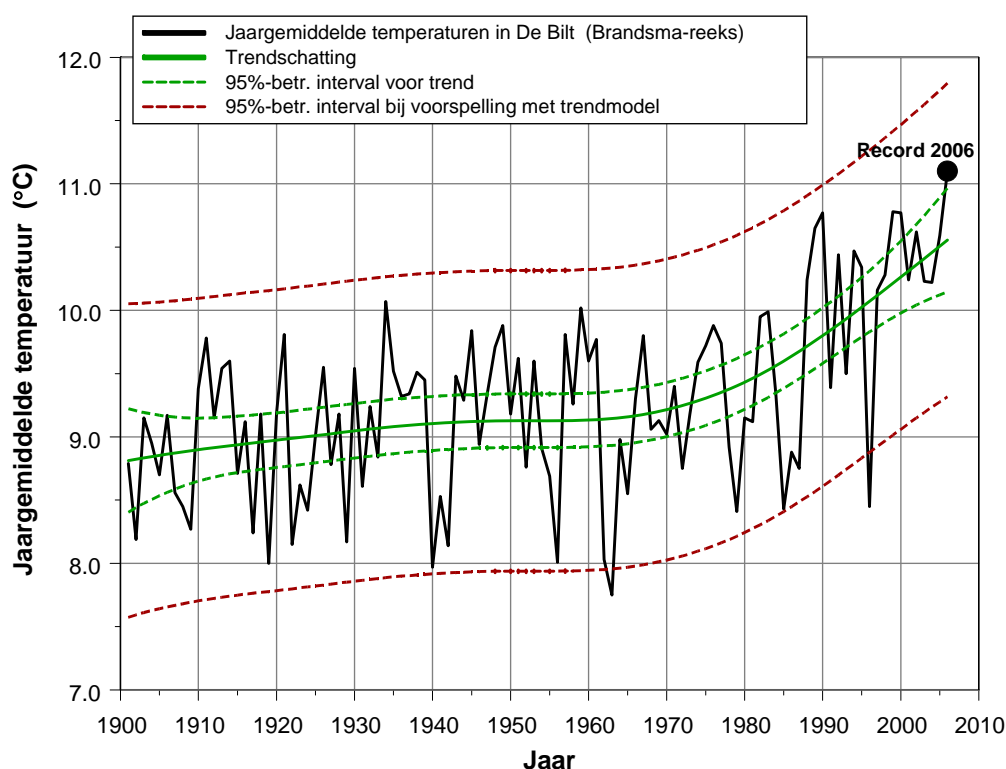
Samenvattend is gevonden dat de kans op extreem hoge temperaturen in Nederland sterk is toegenomen sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw en dat deze ontwikkeling zich volgens drie van de vier KNMI-scenario's zal voortzetten in de komende periode tot aan 2050. Het laagste scenario van het KNMI geeft een opwarming voor 2050 die vrijwel gelijk is aan de opwarming die al plaats heeft gevonden in de historische reeks over de periode 1990-2006.

Door het ministerie van VWS is in samenwerking met het RIVM, het Nederlandse Rode Kruis, GGD Nederland, ActiZ en GHOR Nederland, een *nationaal hitteplan* ontwikkeld. Dit in navolging van andere Europese landen zoals Frankrijk. Het plan is op 3-7-2007 aan de Tweede Kamer aangeboden en bevat maatregelen voor de korte en langere termijn. De verwachte stijging in de kans op extreem warme dagen, zoals afgeleid in dit rapport, onderstreept de urgentie van het hitteplan. Daarbij zij vermeld dat het aantal mensen dat last heeft van hitte, door vergrijzing van de bevolking sterk zal toenemen in de naaste toekomst.

1 Inleiding

1.1 Het wordt warmer in Nederland

Het 'regent' warmterecords in Nederland. Zo was het jaar 2006 een uitzonderlijk warm jaar. Met een jaargemiddelde van 11.1 °C in De Bilt was 2006 het warmste jaar sinds de metingen daar begonnen in 1901 (zie Figuur 1.1). Met uitzondering van de maand augustus verliepen alle maanden van 2006 warmer dan normaal. De maanden juli en september waren record warm.



Figuur 1.1 Het verloop van de jaargemiddelde temperatuur in De Bilt over de periode 1901-2006. De temperatuurreeks is gecorrigeerd voor effecten als verplaatsing van de meethut, verandering van type meethut en het zogenaamde stadseffect (opwarming van de locatie door de groei van Utrecht, De Bilt en Bilthoven). Zie hoofdstukken 2 en 3 voor details over de methode om trends te schatten en de herkomst van de reeks.

Beide blijken de warmste juli- en septembermaand in 300 jaar (dat blijkt uit een temperatuurreeks die door het KNMI gereconstrueerd is uit een aantal historische meetreeksen vanaf het jaar 1707). Oktober en november eindigden op de tweede plaats in de rij van warmste overeenkomstige maanden sinds 1901. De klimatologische herfst (september, oktober en november) was daardoor ook de warmste in 300 jaar.

In 2007 zetten de records zich voort. De winter van 2006/2007 was record warm (sinds 1707) en hetzelfde geldt voor de maand april (warmste, droogste en zonnigste april in 300 jaar). Zie http://www.knmi.nl/klimaat_in_het_nieuws.html voor meer over records.

De uitzonderlijke warmte bleef niet beperkt tot Nederland. Op 80% van alle weerstations in Europa bleek de 2006-julimaand de warmste sinds het begin van de metingen. Zo was in het Zwitserse Zürich juli de warmste maand sinds de metingen begonnen in 1864. In Engeland, Duitsland, Zwitserland, Denemarken en Zweden was de julimaand de warmste maand ooit gemeten.

De vraag bij dit soort records is of ze te wijten zijn aan toeval of dat het klimaat in Nederland (en in Europa en op wereldschaal) systematisch, dat wil zeggen, *trendmatig* warmer wordt. Immers, extreem warme jaren en maanden zullen er altijd zijn, net zoals je met vijf dobbelstenen soms vier dezelfde uitkomsten gooit (een carré) of heel soms zelfs vijf dezelfde uitkomsten (een poker). De kans is klein, maar het gebeurt wèl.

Er is een omvangrijke literatuur ontstaan die antwoord geeft op bovenstaande vraag (het *detectieprobleem* in jargon). Het antwoord is vrijwel unaniem 'ja'. Zie bijvoorbeeld KNMI (2003), het KNMI-IMAU-ESSENCE-project

http://www.knmi.nl/VinkCMS/news_detail.jsp?id=37158),

en IPCC (2007, hoofdstuk 9) met de literatuur daar genoemd.

Figuur 1.1 geeft een voorbeeld voor jaargemiddelde temperaturen in De Bilt. Het jaar 2006 heeft de hoogste gemiddelde temperatuur. Maar ook de langjarige trend vertoont een stijgende tendens, met een versnelling vanaf 1970. Statistische analyse wijst uit dat de trendwaarde in 2006 hoger is dan alle trendwaarden van vóór 2006 (zie ook paragraaf 2.1 en Visser, 2004).

Naar de oorzaken van de opwarming in de twintigste eeuw is veel onderzoek verricht. Dit probleem wordt in jargon het *attributieprobleem* genoemd. Zie bijvoorbeeld IPCC (2007, hoofdstuk 9) voor een uitputtend overzicht. Het blijkt dat de opwarming, zowel op

wereldniveau als in Nederland, verklaard kan worden door een combinatie van natuurlijke en menselijke factoren. Natuurlijke factoren zijn vooral vulkaanuitbarstingen, variaties in zonne-activiteit en de El Niño. Vanaf 1950 tot het midden van de jaren negentig hadden deze natuurlijke factoren per saldo een koelende invloed op het klimaat.

Niettemin is de temperatuur sinds de jaren tachtig van de vorige eeuw sterk gestegen. Dit komt vooral door de uitstoot van broeikasgassen. Maar de mens beïnvloedt het klimaat ook op een andere manier. Antropogene emissies van deeltjes (aërosolen) hebben een overwegend koelende werking en maskeren daarmee een deel van het opwarmend effect van de stijgende concentraties van broeikasgassen. Zie voor Nederlandstalige overzichten KNMI (2003); MNP (2005, 2006); Gore (2006); PCCC (2007) en

http://www.knmi.nl/kenniscentrum/ipcc_2007/inleiding/.

Voor de relatie tussen jaargemiddelde temperaturen in Nederland en temperaturen op wereldschaal zij verwezen naar Van Oldenborgh en Van Ulden (2003).

1.2 Extreme warmte en gevolgen

Ook wat betreft hitte-extremen was 2006 recordhouder. Zo werd op 19 juli in De Bilt een maximum dagtemperatuur gemeten van 35.7 °C. De allerhoogste temperatuur werd gemeten in Westdorpe, namelijk 37.1 °C, een record voor juli. De hittegolf in juli duurde van 15 tot en met 30 juli en behoort daarmee tot de langstdurende hittegolven sinds 1901.

Warme perioden hebben een reeks van negatieve gevolgen: mislukte oogsten door hitte en droogte, toename van warmtegevoelige insecten zoals teken, toename van blauwalgen en het vaker voorkomen van legionella. Legionella is een bacterie die de veteranenziekte kan veroorzaken en zich vermenigvuldigt in waterleidingsystemen bij temperaturen tussen de 30 en 45 graden Celsius. Bij hoge temperaturen bestaat het risico dat elektriciteitscentrales stilgelegd moeten worden: bij hoge watertemperaturen (> 30.0 °C) mag een centrale geen koelwater meer lozen naar het oppervlaktewater. Verder kunnen computersystemen uitvallen in ruimtes waar de temperatuur meerdere dagen boven de 32.0 °C ligt. Voor meer informatie zij verwezen naar MNP (2005) en PCCC (2007).

Warme perioden hebben ook gevolgen voor de volksgezondheid. Het CBS berekende dat door de extreme warmte in juli 2006 duizend extra doden zijn gevallen in Nederland. Uit een

recente ‘wereldranglijst’ voor doden ten gevolge van natuurrampen blijkt Nederland door deze extra doden op de vierde plaats te staan.¹⁾ Zie Figuur 1.2. De Vierdaagse van Nijmegen moest afgebroken worden omdat er op de eerste wandeldag, dinsdag 18 juli, twee doden vielen. Negenenzestig mensen werden opgenomen in het ziekenhuis, vijf van hen moesten gereanimeerd worden. Meer dan driehonderd mensen werden onwel.

Top 10 Natural disasters by number of deaths - 2006		
Earthquake, May	Indonesia	5778
Typhoon Durian, December	Philippines	1399
Landslide, February	Philippines	1112
Heat wave, July	Netherlands	1000
Heat wave, July	Belgium	940
Typhoon Bilis, July	China, P Rep	820
Tsunami, July	Indonesia	802
Cold Wave, January	Ukraine	801
Flash Flood, August	Ethiopia	498
Typhoon Samoai, August	China, P Rep	373

Figuur 1.2 Nederland staat vierde op de wereldranglijst van landen waar natuurrampen in 2006 de meeste dodelijke slachtoffers hebben gemaakt. Dat blijkt uit bovenstaande cijfers van het CRED, het Onderzoekscentrum voor Rampenepidemiologie van de Universiteit Catholique de Louvain (België). Bron: Press release UN/ISDR 29-1-2007.

1) Top-10-lijsten zoals getoond in Figuur 1.2, moeten met enige voorzichtigheid geïnterpreteerd worden. Mogen mensen met een overwegend korte levensverwachting (sterfte bij hitte), direct vergeleken worden met mensen die een veel langere levensverwachting hadden (sterfte door bijvoorbeeld een tsunami)? Daarbij komt nog dat niet alle sterfte hitte-gerelateerd is. Tijdens hittegolven kunnen niveaus van luchtverontreiniging ook hoog zijn. Daarmee is de sterfte niet geheel ‘natuurlijk’.

Net als voor gemiddelde temperaturen dringt zich de vraag op of de hittegolven die Nederland en Europa troffen in de jaren 2003 en 2006, toeval waren: extremen komen hoe dan ook altijd voor. Of passen deze extremen in een trendmatige toename van hoge temperaturen en een systematische trend naar meer en langere hittegolven?

Over deze vraag is recent een uitgebreide internationale literatuur ontstaan. Voor de relatie tussen hitte en sterfte onder de bevolking verwijzen we naar Keatinge (2003); Schär en Jendritzky (2004); Garssen et al. (2005); Laaidi et al. (2006) en Michelozzi et al. (2006). Voor een analyse van historische meetreeksen van hitte-indicatoren zij verwezen naar Klein Tank en Können (2003); Alexander et al. (2006) en Moberg et al. (2006). Voor een analyse van historische data in combinatie klimaatmodellen (GCM's) zij verwezen naar Kharin en Zwiers (2000); Beniston en Diaz (2004); Meehl en Tebaldi (2004); Beniston et al. (2007); IPCC (2007, hoofdstuk 10) en het eerder genoemde ESSENCE-project. Voor Europa komen al deze studies tot dezelfde conclusie: temperatuurextremen en de frequentie van hittegolven nemen toe, en zullen blijven toenemen in de toekomst (tot het jaar 2100 in veel studies).

Overigens is het niet zo dat als gemiddelde temperaturen stijgen, dat dan 'automatisch' ook extreem hoge temperaturen stijgen, en daarmee de frequentie van hittegolven. Bonsal et al. (2001) en Khaliq et al. (2007) tonen met historische meetreeksen aan dat voor (Zuid-)Quebec (Canada) weliswaar jaargemiddelde temperaturen stijgen, maar dat extremen in temperatuur juist dalen. Hetzelfde geldt voor de frequentie van verschillende typen hittegolven: deze frequentie neemt af.

1.3 Neemt de kans op extreem warme dagen toe?

Bovengenoemde literatuur geeft trends in extremen voor Europa of voor *grids* over de wereld (GCM's) waarin ontwikkelingen voor Nederland niet voldoende terug te herkennen zijn. Daarom wordt in dit rapport een gedetailleerde analyse gegeven van veranderingen in extreem hoge temperaturen specifiek voor Nederland. Gebruik wordt gemaakt van de best beschikbare historische meetreeksen en van toekomstscenario's die speciaal door het KNMI voor Nederland zijn afgeleid en berekend.

Via een statistisch trendmodel zijn deze veranderingen vertaald naar overschrijdingskansen van een gekozen drempeltemperatuur. Zo kunnen we de centrale vraag uit dit rapport bepalen: hoe groot is de kans op een warme dag met temperaturen boven (bijvoorbeeld) de 35 graden Celsius? Hierbij wordt deze kans bepaald over de periode 1951-2006. Daarna breiden

we de centrale vraag uit naar de toekomst: hoe zullen overschrijdingskansen verlopen in de toekomst tot aan het jaar 2050?

Belangrijk onderdeel van de analyse is het bepalen van onzekerheden in afgeleide kansen. Voor de historische periode 1950-2006 worden onzekerheden afgeleid uit de gekozen trendschattingmethode. Voor de toekomst worden de genoemde KNMI-scenario's bekeken die alle voorspellingen geven voor Nederland in het jaar 2050. Het meenemen van onzekerheden in de hele analyse maakt het mogelijk om *robuuste* conclusies te trekken over veranderingen in extreme warmte in Nederland. Immers, als de temperatuur stijgt over een bepaalde periode, maar de onzekerheid in de toename groter is dan de toename zelf, dan is het incorrect te concluderen 'dat de temperatuur stijgt', hoewel die uitspraak cijfermatig wel waar is.

Vanwege de gevolgen voor de volksgezondheid zal tevens afgeleid worden wat opwarming doet met extra sterfte, dit op basis van een model van het CBS (Garssen, Harmsen en De Beer, 2005). Daarna wordt afgeleid wat de kans is dat de Vierdaagse van Nijmegen opnieuw zou kunnen worden getroffen door extreem hoge temperaturen zoals die optraden in de derde week van juli 2006.

De opbouw van dit rapport is als volgt. In hoofdstuk 2 wordt beschreven hoe de trendanalyses in dit rapport zijn uitgevoerd (paragraaf 2.1) en hoe daaruit de kans op extreme hitte kan worden bepaald (paragraaf 2.2). In hoofdstuk 3 wordt ingegaan op de keuze van de hitte-indicator (paragraaf 3.1), de herkomst en betrouwbaarheid van de geselecteerde temperatuurreksen (paragraaf 3.2), en de relatie van de hitte-indicator tot de duur van hitte. Daarna wordt in hoofdstuk 4 besproken hoe het trendmatig verloop van het warmste moment per jaar is geweest over de periode 1951-2006. paragraaf 4.2 geeft de kans op jaren met maximumtemperaturen hoger dan een gekozen drempelwaarde, bijvoorbeeld 32 °C of 36 °C. De gevolgen van de stijgende kans op extreem warme dagen worden geanalyseerd in hoofdstuk 5. Hier komt zowel extra sterfte aan bod als de kans op een herhaling van de hitte uit 2006 tijdens de Vierdaagse van Nijmegen.

Als laatste wordt de toekomst tot aan het jaar 2050 bekeken. Het hoe en waarom van de KNMI-scenario's geeft hoofdstuk 6. Ook komt hier de rol van onzekerheden aan bod. In hoofdstuk 7 worden de KNMI-scenariore resultaten gebruikt om te komen tot projecties voor het warmste moment per jaar in 2050. Het rapport sluit af met conclusies (paragraaf 8.1), en een kort exposé over de consequenties voor de volksgezondheid (adaptatie, paragraaf 8.2).

2 Trendanalyses en overschrijdingskansen

Hoofddoel van dit rapport is te komen tot kansuitspraken over extreem hoge temperaturen. Om die te berekenen, wordt te werk gegaan in twee stappen. In de eerste plaats wordt de trend in historische gegevens over extreme warmte in Nederland geanalyseerd. Uit deze trends en de onzekerheid daarin kan vervolgens afleid worden wat de kans is op overschrijding van drempeltemperaturen, bijvoorbeeld 35.0 °C. In paragraaf 2.1 wordt kort de wiskundige benadering van trends uiteengezet en paragraaf 2.2 laat zien hoe uit deze informatie overschrijdingskansen kunnen worden berekend.

2.1 Trends en onzekerheden

Trends in meetgegevens kunnen op vele manieren geschat worden. Naast handmatige schattingen zijn er een reeks van wiskundige technieken voorhanden. Een aantal is: glijdend middelen (met een te kiezen *window*), schatten van een regressielijn of meer algemeen het schatten van polynomen, Loess-schatters, DBM-trends of trends gebaseerd op GAM's. De meeste van deze methoden geven geen informatie over de onzekerheid in de schattingen, en een methode als glijdend middelen heeft nog als nadeel dat er voor het begin en het einde van de meetreeks geen trendwaarden gegeven kunnen worden. Ook met klasse van ARIMA-modellen kunnen trends geschat worden. Deze populaire methode heeft als nadeel dat de trend niet expliciet gegeven wordt door de methode.

Een andere methode om trends te schatten, zijn trendmodellen uit de klasse van structurele tijdreeksmodellen. Deze klasse van modellen is ontwikkeld binnen de econometrie (Harvey, 1989). De modellen hebben de volgende voordelen:

- trendschattingen van begin tot eind van de meetreeks;
- op elk tijdstip onzekerheidsinformatie over de geschatte trendwaarden;
- onzekerheidsinformatie over de trendwaarden tussen willekeurig te kiezen tijdstippen;
- mogelijkheid om naast de trend een cyclische component te bepalen of de invloed van verklarende variabelen te kwantificeren. Hierbij wordt de meetreeks opgedeeld als een som van een trend, een cyclus, een deel dat de verklarende variabele beschrijft en als sluitpost statistische ruis.

In dit rapport zullen we trends schatten met het zogenaamde *Integrated-Random-Walk*-model (IRW-model). Dit trendmodel heeft formeel de volgende vorm:

$$y_t = \mu_t + \varepsilon_t \quad \text{en} \quad \mu_t - 2\mu_{t-1} + \mu_{t-2} = \eta_t \quad (1)$$

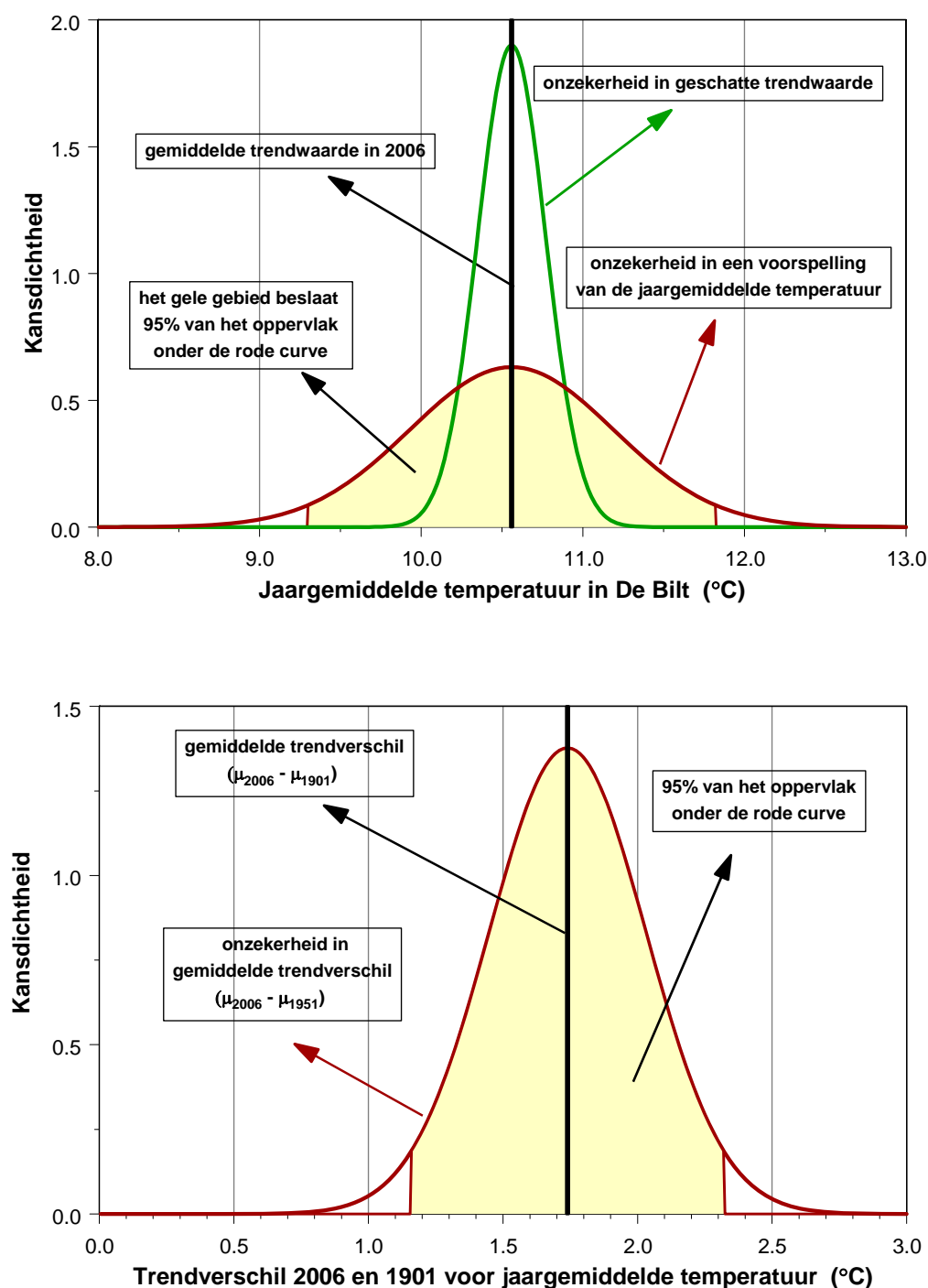
Hierbij staat y_t voor een meting op tijdstip t , μ_t voor de bijbehorende trendschatting, ε_t voor een ruisproces met gemiddelde nul en een nog te bepalen standaarddeviatie, en η_t een tweede ruisproces.

De kansverdeling van deze ruisprocessen kan bepaald worden door de restreeks ($y_t - \mu_t$) te analyseren. In dit rapport blijken alle restreeksen in goede benadering te beantwoorden aan de normale kansverdeling (in gevallen waar dat aanvankelijk niet het geval was is eerst een logaritmische transformatie toegepast op de data). Alle betrouwbaarheidsintervallen op basis van twee maal de standaarddeviatie (2σ -grenzen) zijn bij een normale verdeling gelijk aan 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Voor verdere wiskundige details en informatie over de schattingsmethode (het Kalmanfilter) zij verwezen naar Harvey (1989) en Visser (2002, 2004, 2005).

Een voorbeeld aan de hand van de trendwaarde voor 2006 uit Figuur 1.1. Figuur 2.1, bovenste grafiek, geeft de trendwaarde μ_{2006} voor de jaargemiddelde temperatuur in De Bilt (verticale zwarte lijn bij de waarde 10.6 °C). De getoonde kansdichtheden geven beide een normale verdeling (groene en rode curves). Daarbij geeft de groene curve de kansdichtheid voor de schattingsfout in het gemiddelde μ_{2006} en de rode curve de onzekerheid in een voorspelling van de jaargemiddelde temperatuur op basis van de geschatte trend. Het gele oppervlak beslaat 95% van het oppervlak onder de rode curve, en de onder- en bovengrens van het gele gebied geven de grenzen waartussen de *werkelijke* jaargemiddelde temperatuur zal liggen. Deze grenzen zijn gelijk aan de grenzen getoond in Figuur 1.1 (rode stippellijnen, in 2006).

Alle schattingen in dit rapport zijn uitgevoerd met het tijdreeks-softwarepakket TrendSpotter. Dit pakket is oorspronkelijk ontwikkeld bij KEMA en verder verfijnd bij het MNP (zie Visser, 2004b). Voor het doen van additionele statistische analyses en het maken van grafieken is het softwarepakket S-PLUS gebruikt (Dekkers, 2001).

Opgemerkt zij dat voor de analyse van extreme temperaturen ook andere benaderingen mogelijk zijn. Deze zijn vooral gebaseerd op de zogenaamde extreme-waarden-theorie. Een recent voorbeeld wordt gegeven door Parey et al. (2007) die extremen analyseren in 47 meetreeksen in Frankrijk, over de periode 1950-2003. Voor de analyses in dit rapport is

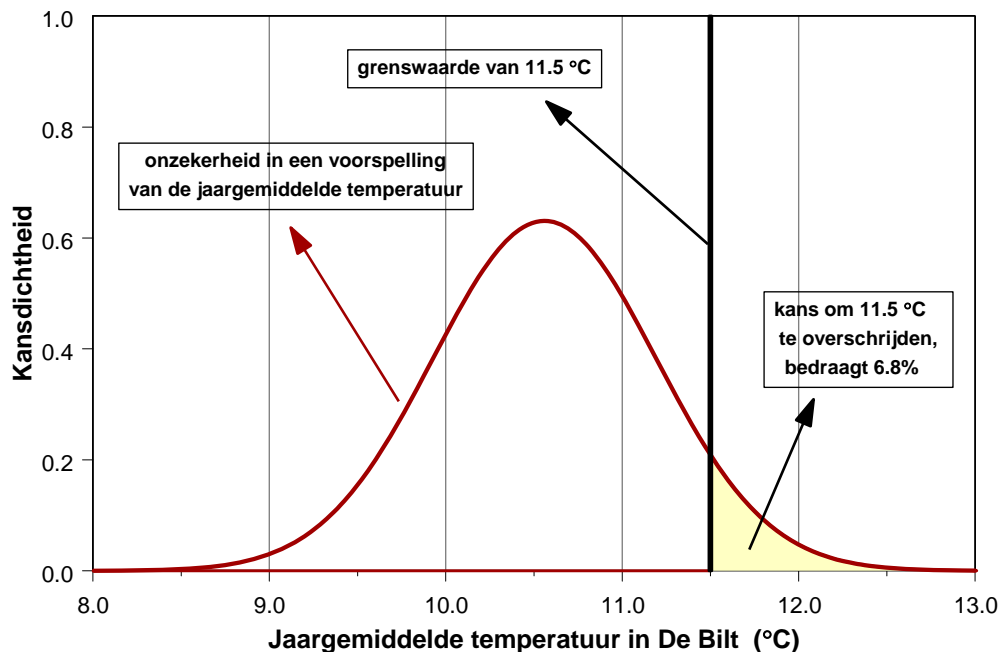


Figuur 2.1 Illustratie van onzekerheidsinformatie op basis van de trendschattingen uit *Figuur 1.1* voor het jaar 2006. De jaargemiddelde temperatuur μ_{2006} bedraagt 10.6 °C (de verticale zwarte lijn). De bovenste grafiek geeft de normale kansdichtheid voor de onzekerheid in het gemiddelde (groene curve) en voor een voorspelling (rode curve). Het gele gebied onder de rode curve geeft 95% van het totale oppervlak onder de rode curve. De onderste grafiek geeft op dezelfde wijze de onzekerheid in het trendverschil ($\mu_{2006} - \mu_{1901}$). Het gemiddelde verschil bedraagt 1.72 °C (de verticale zwarte lijn) en is significant verschillend van 0.0 °C

echter gevonden dat residuen van het geschatte trendmodel in goede benadering een normale kansverdeling volgen. Kansverdelingen zoals de Gumbelverdeling zijn daarom niet nodig. Zie ook Visser (2005) voor een reeks van andere voorbeelden op dit punt.

2.2 Kans op overschrijding van een drempelwaarde

De gekozen trendmethode uit paragraaf 2.1 maakt het eenvoudig om de kans te berekenen dat een temperatuur-indicator T_t een vooraf gekozen drempelwaarde zal overschrijden. Deze kans p_t volgt simpelweg uit de geschatte normale kansverdeling. Zie Figuur 2.2 voor een voorbeeld, gebaseerd op de Figuren 1.1 en 2.1. De figuur geeft de kans op overschrijding van de drempel 11.5 °C voor de jaargemiddelde temperaturen in De Bilt. Het getoonde gele oppervlak beslaat 6.8% van het totaal.



Figuur 2.2 Illustratie van de kans op het overschrijden van de drempelwaarde van 11.5 °C. Gekozen is hierbij de jaargemiddelde temperatuur in De Bilt voor het jaar 2006. De rode curve is gelijk aan de rode curve in de bovenste grafiek van Figuur 2.1.

Wiskundig geldt de volgende relatie voor de kans p_t :

$$p_t = P(T_t > 11.5 \text{ } ^\circ\text{C}) = f(\mu_t) = \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \int_{11.5}^{\infty} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu_t}{\sigma_t} \right)^2} dx = 0.068 \quad (2)$$

De spreiding σ_t volgt uit het trendmodel waarbij voor dit voorbeeld geldt dat $\sigma_t = \sqrt{(\sigma_{\eta,t}^2 + \sigma_\varepsilon^2)} \approx 0.63 \text{ } ^\circ\text{C}$. Hierbij is gebruikt dat de som van varianties $\sigma_{\eta,t}^2 + \sigma_\varepsilon^2$ vrijwel constant in de tijd is ($\sigma_\varepsilon^2 \gg \sigma_{\eta,t}^2$). De 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor p_t kunnen we benaderen met de formule $[f(\mu_t - 2*\sigma_{\eta,t}), f(\mu_t + 2*\sigma_{\eta,t})]$, met f gegeven in (2). Zie verder Visser en Petersen (2007).

3 Hitte-indicator

3.1 Keuze van indicator

In dit rapport wordt de kans op extreem warme dagen geanalyseerd. Als temperatuur-indicator wordt gekozen voor ‘het warmste moment per jaar’. Dit moment wordt gevonden door meetreeksen te selecteren met de maximumtemperatuur per dag. De indicator wordt in de meteorologie wel aangeduid met de notatie TX (evenzo het minimum per dag door TN en het etmaalgemiddelde met TG). Vervolgens wordt uit deze 365/366 dagmaxima TX_i het jaarmaximum gekozen. De indicator wordt hierna aangeduid met de klimaat-notatie TXX.

Voordeel van de keuze van de TXX-indicator is dat:

- maximumtemperaturen routinematig gemeten worden op een reeks van stations in Nederland (een aantal vanaf 1901);
- de indicator een continu karakter heeft en dat daardoor statistische trends en onzekerheden geschat kunnen worden;
- extreme hitte een direct voelbare grootheid is en daardoor aansprekend/herkenbaar is voor een groot publiek (dit in tegenstelling tot bijvoorbeeld een ‘juli-gemiddelde temperatuur’);
- er een directe relatie bestaat tussen extreme hitte en sterfte onder de bevolking;
- er voor maximale etmaalgemiddelden per jaar voor Nederland scenariowaarden bekend zijn voor het jaar 2050. Deze zijn nauw verwant aan maximale temperaturen per dag, zoals we laten zien in paragraaf 7.1.

De gekozen hitte-indicator TXX heeft ook nadelen. In de eerste plaats is de indicator erg gevoelig voor *meetfouten*, omdat hij gebaseerd is op slechts één meting per jaar en genomen is onder extreme condities. Aan dit aspect besteden we aandacht in de volgende paragraaf.

In de tweede plaats hoeft de indicator niet maatgevend te zijn voor de *duur* van een warme periode, terwijl de duur van hitte een belangrijke rol speelt bij de gevolgen van de hitte (omvangrijkere gezondheidsconsequenties, onder andere door verder opwarmen van gebouwen en huizen, toenemende legionellaproblemen doordat temperaturen in waterleidingen boven de 30 graden uitkomen, grotere koelwaterproblemen omdat open water langzaam opwarmt, enzovoort). In hoeverre de TXX-indicator gerelateerd is aan warme aaneengesloten perioden van 5, 10 of 15 dagen, wordt onderzocht in paragraaf 3.3.

Vermeld zij dat er binnen de meteorologie een reeks van indicatoren voor warmte/hitte in omloop zijn. De bekendste is het wel of niet voorkomen van een hittegolf en, eventueel, de lengte van een hittegolf. Verder worden vaak het aantal zomerse dagen (dagen met een maximumtemperatuur hoger dan 25 °C) en het aantal tropische dagen (dagen met een maximumtemperatuur hoger dan 30 °C) berekend. In internationale context worden indicatoren gebruikt op basis van percentielen, bijvoorbeeld op basis van het 90 percentiel van maximumtemperaturen, berekend over de periode 1960-1990. Exacte definities worden hier verder niet gegeven, zie daarvoor bijvoorbeeld (i) de *indices dictionary* op de bovengenoemde ECA-KNMI-site, (ii) IPCC (2007, paragraaf 3.8) en (iii) de 27 indices op de ETCCDI/CRD-site http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/list_27_indices.shtml.

3.2 Data en homogeniteit

Jaargemiddelde temperaturen

Voor maand- en jaargemiddelde temperaturen is een homogene temperatuurreeks beschikbaar. Deze reeks (hier aangeduid als ‘de Brandsma-reeks’, zie Figuur 1.1) is onder andere gecorrigeerd voor veranderingen in de meetlocatie op het KNMI-terrein, verandering in het type meethut rond 1950 en de invloed van het groeien van de stadskernen van Utrecht, De Bilt en Bilthoven (het ‘stadseffect’). Zie voor meer informatie Brandsma et al. (2002) en Tang (2003, hoofdstuk 4). Data zijn te vinden in de *Climate explorer* van het KNMI (<http://climexp.knmi.nl>).

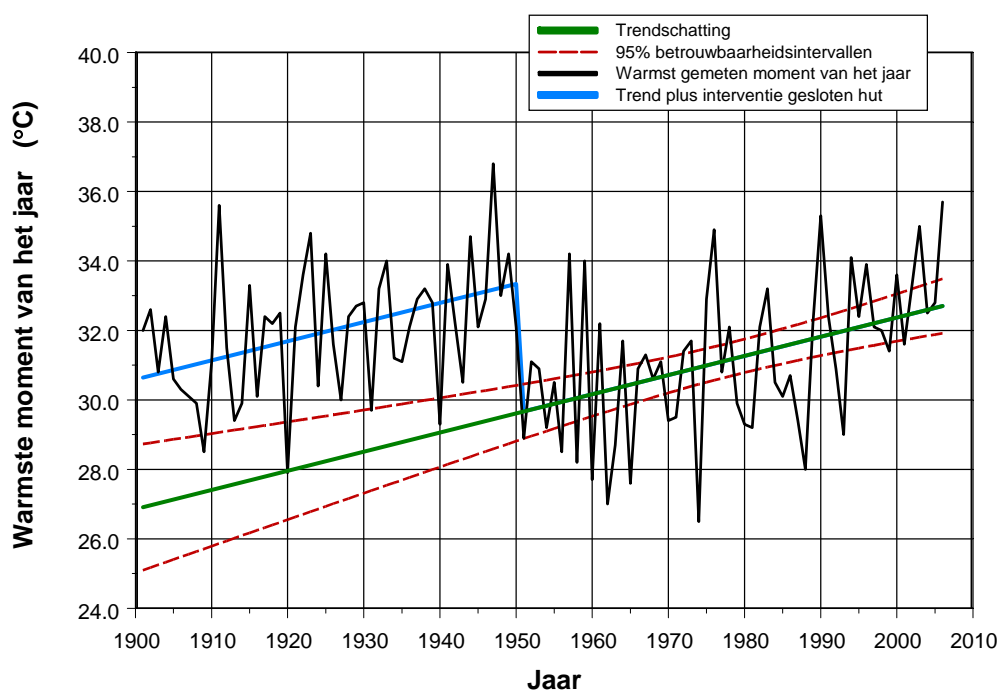
Dagmaximale temperaturen

De ‘Brandsmareeks’ is alleen afgeleid voor maand- en jaargemiddeldes, dus niet voor dagmaxima (TX). Dagmaxima voor Nederland zijn op locatie ‘De Bilt’ beschikbaar vanaf het moment dat het KNMI rond 1900 daar begon te meten. Tegelijkertijd werden de stations Den Helder, Groningen, Vlissingen en Maastricht opgericht. Andere meetpunten begonnen later, bijvoorbeeld vliegveld Twenthe (in 1950). Dagwaarden voor dagmaxima (en etmaalgemiddeldes) zijn te downloaden van de KNMI-ECA-site (<http://eca.knmi.nl>, → daily data). De reeksen zijn getest op homogeniteit. Zie Klein Tank et al. (2002) en Wijngaard et al. (2003).

Normaal gesproken is de betrouwbaarheid van oude meetreeksen een grote zorg en zeker als we trends over de hele meetperiode willen schatten. Maar voor de gekozen temperatuurindicator, ‘het warmste moment per jaar’, moeten we extra voorzichtig zijn, zoals in de vorige paragraaf is gesteld: de indicator is erg gevoelig voor meetfouten.

In de eerste plaats wordt er niet gemiddeld over een reeks van metingen, zoals dat wel het geval is voor een jaargemiddelde, zomergemiddelde of juligemiddelde temperatuur. Door middeling wordt de toevallige fout in de indicator kleiner. Voor de maximumtemperatuur per jaar vindt zo'n middeling niet plaats. In de tweede plaats zijn metingen op zeer warme dagen gevoelig voor het type meethut dat gebruikt is, en (vermoedelijk) ook voor verplaatsingen van een meethut van een stadsomgeving naar het platteland. Dit laatste is bijvoorbeeld gebeurd bij station Den Helder (in 1972 verplaatst naar vliegveld De Kooy) en station Groningen (in 1946 verplaatst naar vliegveld Eelde). Zie voor meer informatie Visser (2005, paragraaf 2.1).

Wat betreft de invloed van het type meethut een voorbeeld voor locatie De Bilt. Figuur 3.1 geeft het warmste moment per jaar over de hele meetperiode 1901-2006. Over de periode



Figuur 3.1 Maximumtemperaturen (TXX) zoals gemeten op het terrein van het KNMI in De Bilt over de periode 1901-2006 (zwarte lijn). Geschat is de trend (groene lijn), de invloed van de hut-interventie (blauwe lijn) en bijbehorende betrouwbaarheidsintervallen (rode stippellijnen).

1901-1950 werden temperaturen gemeten onder een open kap, zie de pagode-hut in ondersteunde foto. Ná 1950 zijn de temperaturen gemeten met de gebruikelijke Stevenson-hut.



Overzicht van het meetterrein van het KNMI in De Bilt in 1932. De pagode-hut staat net links van het pad. Op hete dagen vindt reflectie plaats van het zonlicht op het gras, waardoor de lucht onder de kap van de hut extra verwarmd wordt. Bij weinig wind ontstaat zo een 'mini-broeikasewerking' onder de kap. Foto: KNMI.

Om de invloed van de wisseling qua type meethut op de gemeten temperatuur te bepalen, hebben we een zogenaamd interventiemodel geschat (Harvey, 1989, p.397-408). Dit model geeft aan hoe groot de temperatuursprong in de trend is en of deze sprong statistisch significant is. De blauwe lijn geeft de trend in de metingen met een zeer grote sprong in 1950-1951. De sprong bedraagt 3.7 ± 1.4 °C (95%-betrouwbaarheidsinterval) en is daarmee zeer significant. Opmerkelijk is dat de helling van de trend voor en na 1950/1951 gelijk is.

Bovendien is de spreiding rond de trend in beide perioden gelijk. Men zou dus in feite de meetreeks kunnen corrigeren voor de sprong. Dit is de groene lijn in Figuur 3.1.

Vanwege de sprong in de data van De Bilt en ook vanwege verplaatsingen op andere belangrijke meetlocaties besluiten we om voor de analyses in dit rapport gebruik te maken van KNMI-meetreeksen met maximumtemperaturen *vanaf 1951*. Hiermee voorkomen we inhomogeniteiten in de meetreeksen die anders moeilijk te kwantificeren zouden zijn.

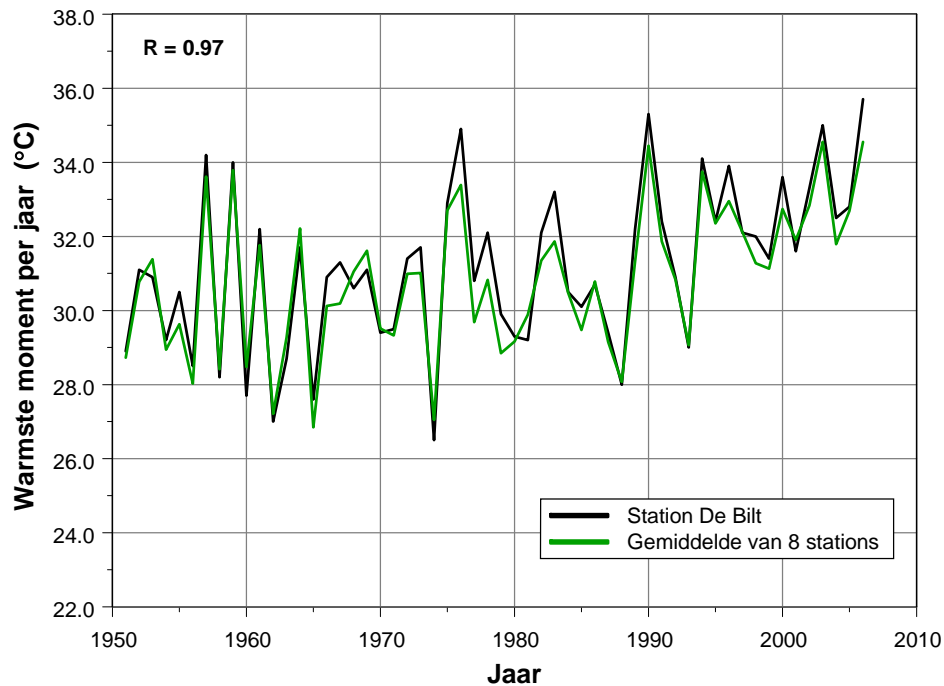
De registraties van een achttal stations, verspreid over Nederland, zijn in Appendix A.1 vergeleken. Figuur A.1 geeft de scatterplotmatrix tussen de geselecteerde stations. De stations zijn De Bilt, vliegveld Twenthe, vliegveld Eelde, Leeuwarden, Eindhoven, Vlissingen, Schiphol en Rotterdam. Vanwege inhomogeniteiten is station Den Helder/De Kooy hier niet meegenomen. De figuur laat zien dat station De Bilt de hoogste correlatie heeft met het gemiddelde van de acht stations (de laatste kolom van de scatterplotmatrix), namelijk $R = 0.97$.

Figuur 3.2 geeft het gemiddelde van de acht stations en de reeks voor De Bilt. De figuur laat zien dat beide reeksen van jaar tot jaar soms licht verschillen, maar qua trendmatig verloop identiek zijn, hetgeen consistent is met de hoge correlatiecoëfficiënt. We kunnen daarmee stellen dat de temperatuurreeks van De Bilt een goede proxy is voor Midden- en Noord-Nederland.

Geconcludeerd wordt dat de jaarmaxima voor 'De Bilt' een homogene reeks vormen over de periode 1951-2006 en een goede afspiegeling zijn voor de jaarmaxima van Nederland als geheel. Daarom wordt in de volgende paragraaf en volgende hoofdstukken verder gegaan met de meetreeks voor De Bilt.

Etmaalgemiddelde temperaturen

In hoofdstuk 6 wordt gebruikgemaakt van *maximale etmaalgemiddelde temperaturen*. Etmaalgemiddelden (aangeduid met de code TG) zijn, net als dagmaxima, te downloaden van de KNMI-ECA-site (<http://eca.knmi.nl>), → daily data). De reeksen zijn getest op homogeniteit. Zie Klein Tank et al. (2002) en Wijngaard et al. (2003). In hoofdstuk 6 wordt de hoogste etmaalgemiddelde waarde per jaar gebruikt, aangeduid met de code TGX.



Figuur 3.2 Warmste moment per jaar (TXX) over de periode 1951-2006. De groene lijn geeft het gemiddelde van acht stations, namelijk De Bilt, vliegveld Twenthe, vliegveld Eelde, Leeuwarden, Eindhoven, Vlissingen, Schiphol en Rotterdam. De zwarte curve geeft het warmste moment per jaar zoals gemeten op locatie De Bilt.

Net als voor het warmste moment per jaar hebben we de homogeniteit van de beschikbare reeksen (9 stations) bekeken, zie Appendix A.3. De conclusie is gelijk aan die voor het warmste moment per jaar: de etmaalgemiddelde temperaturen van station De Bilt zijn maatgevend voor Midden- en Noord-Nederland. Deze reeks is homogeen over de periode 1951-2006.

3.3 Indicatoren voor duur en percentielen

Zoals gesteld in de inleiding van dit hoofdstuk, de *duur* van hitte speelt een belangrijke rol bij de gevolgen die eruit voortvloeien. Maar de gekozen hitte-indicator TXX is per definitie een *piekwaarde* en hoeft niet noodzakelijkerwijs maatgevend te zien voor gelijksoortige trends in aaneengesloten periodes met hitte van bijvoorbeeld 5 dagen (de minimale periode waarop het begrip ‘hittegolf’ is gedefinieerd), 10 dagen of 15 dagen. Zo’n verband is wel te verwachten omdat weerpatronen die leiden tot extreme warmte in Nederland, langere tijd stabiel zijn. In hoeverre TXX gerelateerd is aan langere periodes met hitte, zullen we hierna onderzoeken.

De volgende drie hitte-indicatoren worden gedefinieerd (maatgevend voor respectievelijk 5, 10 en 15 dagen):

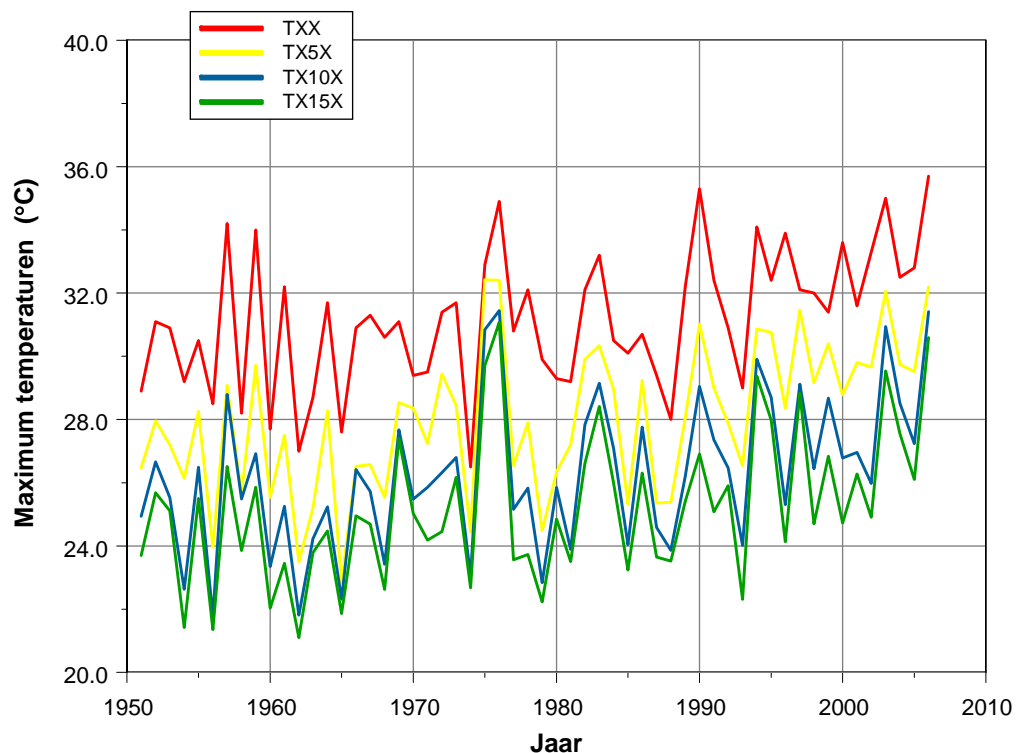
- Glijdend middelen over alle dagwaarden van maximumdagwaarden TX_i in een jaar. De periode is 5 dagen. Daarmee wordt de variabele **TX5_i** gelijk aan het gemiddelde van TX_i , TX_{i-1} , TX_{i-2} , TX_{i-3} en TX_{i-4} . Als hitte-indicator voor een periode van 5 dagen wordt gekozen voor het maximum van $TX5_i$ in een jaar, aangeduid met de code **TX5X**.
- Idem de variabele **TX10X** voor de warmste aaneengesloten periode van 10 dagen in een jaar.
- Idem de variabele **TX15X** voor de warmste aaneengesloten periode van 15 dagen in een jaar.

In Figuur 3.3 zijn de indicatoren TXX, TX5X, TX10X en TX15X grafisch weergegeven over de periode 1951-2006. De figuur laat zien dat de jaar-op-jaar-variaties sterk op elkaar lijken. Nog belangrijker is dat de langjarig trends, afgezien van een constante, gelijk zijn. Dit laatste is onderzocht met lineaire regressie. Er blijkt de volgende eenvoudige relatie te bestaan tussen TXX enerzijds en de indicatoren TX5X, TX10X en TX15X anderzijds:

- $TX5X_t = TXX_t - 3.2 + \varepsilon_{5,t}$ (°C), waarbij t staat voor een bepaald jaar en $\varepsilon_{5,t}$ voor een ruisproces met gemiddelde 0.0 en een standaarddeviatie van 1.2 °C. Uit een zogenaamde normaliteitsplot blijkt dat het ruisproces bij benadering normaalverdeeld is.
- $TX10X_t = TXX_t - 4.9 + \varepsilon_{10,t}$ (°C), waarbij t staat voor een bepaald jaar en $\varepsilon_{10,t}$ voor een ruisproces met gemiddelde 0.0 en een standaard-deviatie van 1.4 °C. Het ruisproces blijkt bij benadering normaalverdeeld te zijn.

- $TX5X_t = TXX_t - 6.0 + \varepsilon_{15,t}$ (°C), waarbij t staat voor een bepaald jaar en $\varepsilon_{15,t}$ voor een ruisproces met gemiddelde 0.0 en een standaarddeviatie van 1.6 °C. Het ruisproces blijkt bij benadering normaal verdeeld te zijn.

Over de periode 1951-2006 blijkt de gevonden relatie tussen TXX_t enerzijds en de duurvariabelen anderzijds stabiel in de tijd. Of deze stabiele relatie ook geldt voor de toekomst (tot aan 2050, zoals in hoofdstuk 6 en 7), is niet onderzocht.

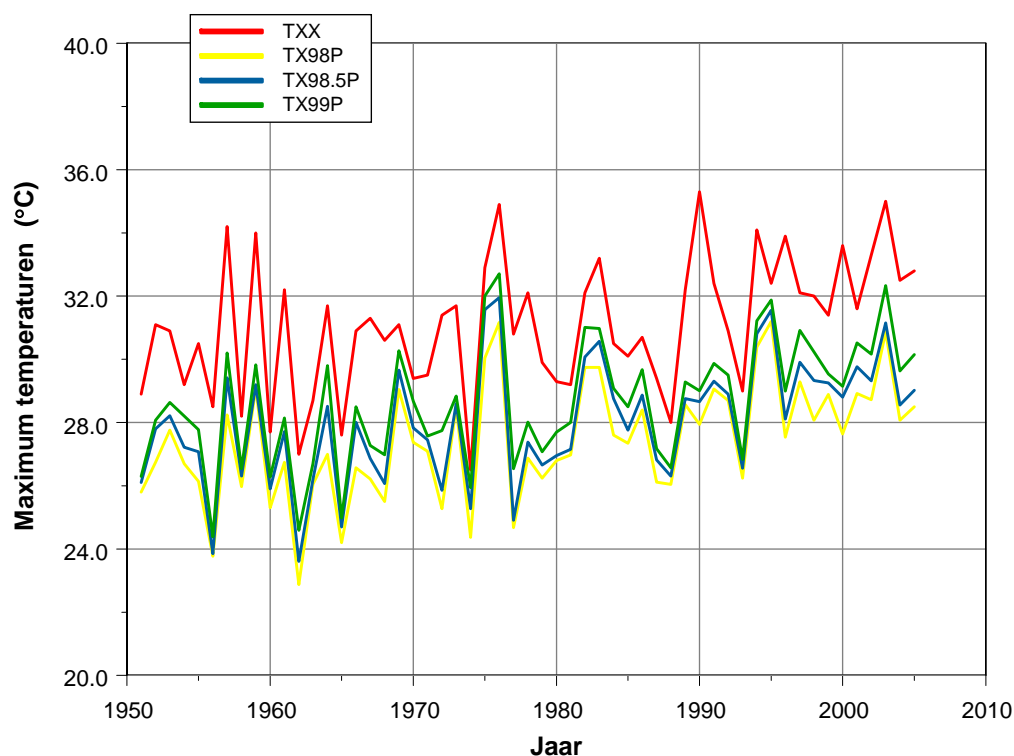


Figuur 3.3 Weergave in de tijd van het warmste moment per jaar (TXX, rode curve), de gemiddeld warmste periode van 5 aaneengesloten dagen per jaar (TX5X, gele curve), idem 10 aaneengesloten dagen (TX10X, blauwe curve) en idem 15 aaneengesloten dagen (TX15X, blauwe curve). Alle reeksen zijn voor station De Bilt, over de periode 1951-2006. De correlatiematrix voor de bovengetoonde reeks volgt hieronder:

	TXX	TX5X	TX10X	TX15X
TXX	1.00	0.85	0.82	0.76
TX5X	0.85	1.00	0.94	0.90
TX10X	0.82	0.94	1.00	0.97
TX15X	0.76	0.90	0.97	1.00

De conclusie is dat de trends in de indicatoren TXX, TX5X, TX10X en TX15X op een constante na gelijk zijn en dat daarmee de in dit rapport gekozen hitte-indicator TXX ook maatgevend is voor trends in hitte over langere perioden. Of deze uitspraak ook geldt voor extrapolatie naar de toekomst, is niet geverifieerd (data niet beschikbaar).

Naast de vergelijking van TXX met duurvariabelen is ook gekeken hoe het verloop van TXX zich verhoudt tot hitte-indicatoren die meer gangbaar zijn in de literatuur (TXX wordt niet vaak toegepast). Gekeken is naar de indicatoren TX98P, TX98.5P en TX99P. Deze indicatoren komen ruwweg overeen met respectievelijk de op 8, 6 en 4 na hoogste maximumdagtemperatuur in een jaar. Deze indicatoren komen ook overeen met respectievelijk TX90, TX92.5 en TX95P voor dagen in de zomer. Het verloop van TXX, TX98P, TX98.5P en TX99P is gegeven in Figuur 3.4.



Figuur 3.4 Weergave in de tijd van het warmste moment per jaar (TXX, rode curve) en percentiel-temperaturen.. Alle reeksen zijn voor station De Bilt, over de periode 1951-2005. De correlatie matrix voor de bovengetoonde reeks volgt hieronder:

	TXX	TX98P	TX98.5P	TX99P
TXX	1.00	0.77	0.79	0.81
TX98P	0.77	1.00	0.98	0.96
TX98.5P	0.79	0.98	1.00	0.98
TX99P	0.81	0.96	0.98	1.00

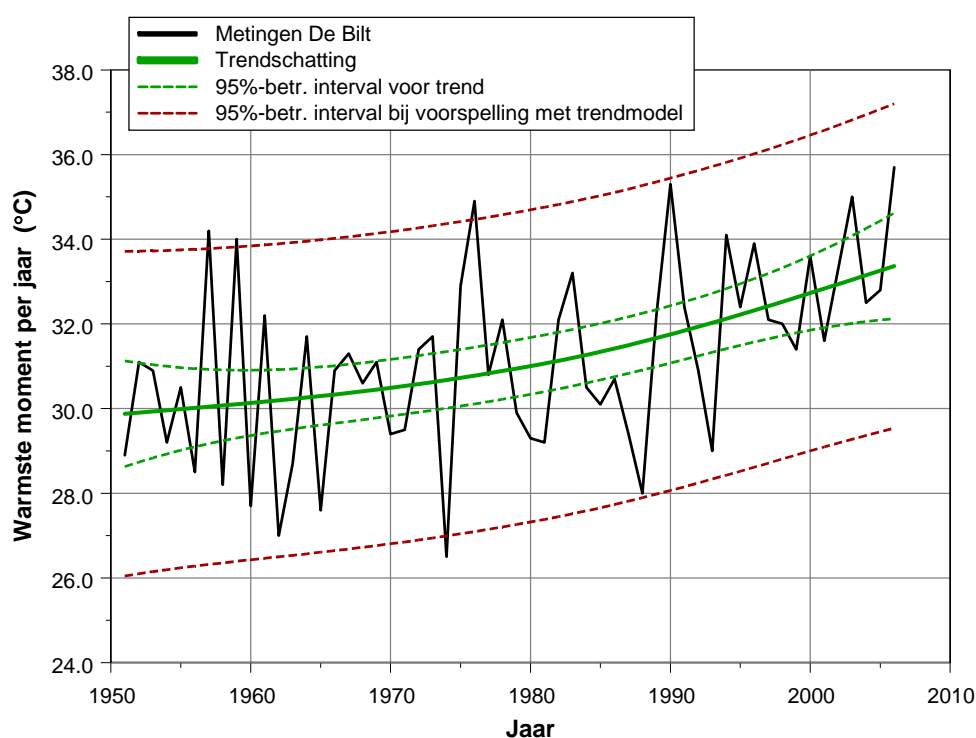
De resultaten getoond in Figuur 3.4 lijken veel op de resultaten die gevonden zijn voor de duurvariabelen (Figuur 3.3). Van jaar op jaar komen er (grote) verschillen voor (bijvoorbeeld in 1990), maar de langjarige trends in percentiel-temperaturen vertonen hetzelfde verloop als de trend in TXX-waarden.

4 De kans op extreem warme dagen

In dit hoofdstuk wordt de kans geschat op extreem warme dagen, zoals uiteengezet in hoofdstuk 2. In paragraaf 4.1 wordt de historische trend met onzekerheden over de periode 1951-2006 besproken en in paragraaf 4.2 de gezochte overschrijdingskansen.

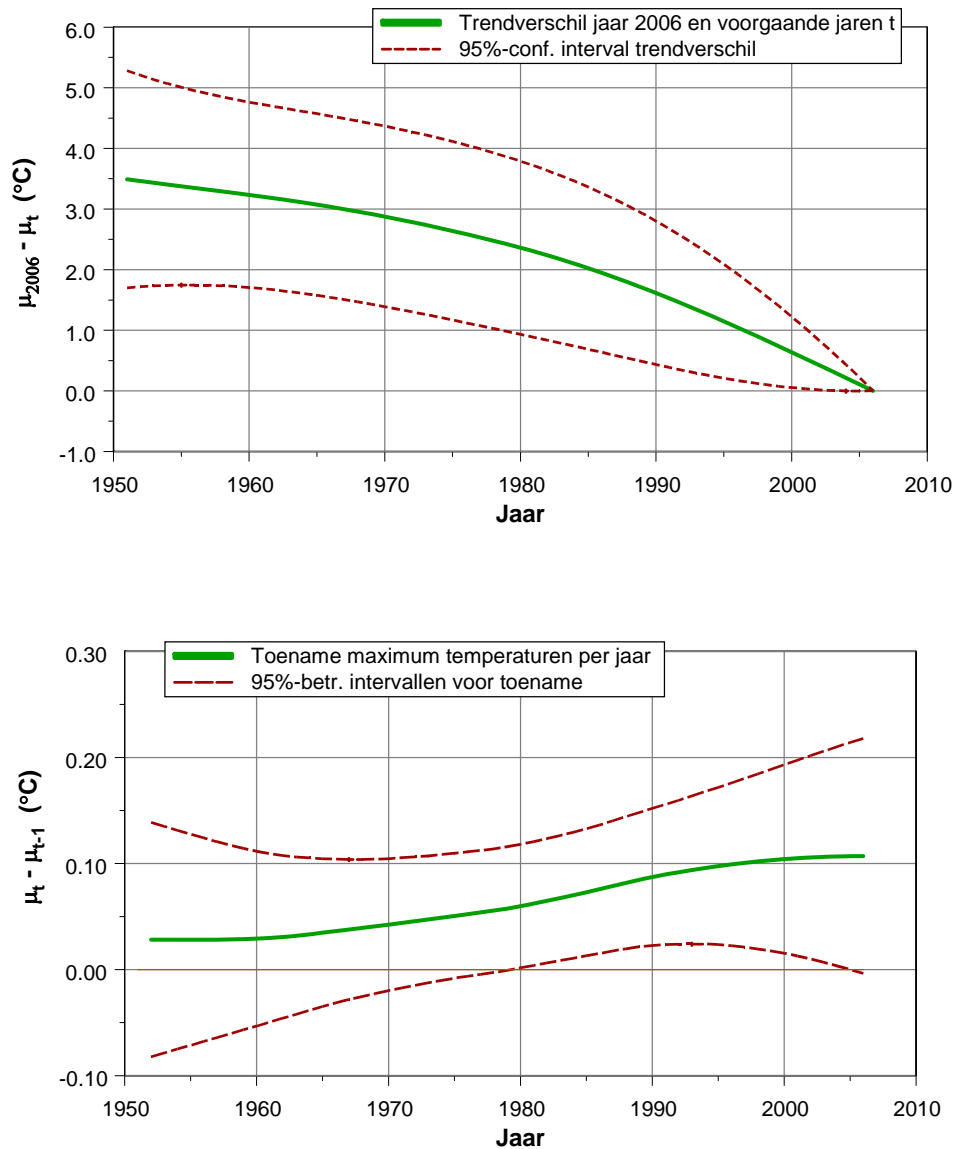
4.1 Trend over de periode 1951–2006

Voor de meetreeks voor De Bilt is met de trendmethodiek uit hoofdstuk 2 de trend geschat met bijbehorende onzekerheden. Het resultaat is gegeven in Figuur 4.1. De trendwaarde voor 1951 (μ_{1951}), bedraagt, met een 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de voorspelling, 29.9 ± 1.3 °C. In 2006 is de trendwaarde (μ_{2006}) opgelopen naar 33.4 ± 1.3 °C.



Figuur 4.1 Trendschatting (groene lijn) voor de hoogst gemeten temperatuur per jaar, op basis van historische metingen over 1951-2006 (zwarte lijn). De groene stippellijnen geven een 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de trendschatting, idem de rode stippellijnen voor een 'voorspelling' in een willekeurig gekozen jaar.

Daarnaast zijn ook trendverschillen en onzekerheden geschat. Zie Figuur 4.2. De bovenste grafiek geeft het trendverschil ($\mu_{2006} - \mu_t$). De figuur laat zien dat het verschil tussen



Figuur 4.2 Bovenste grafiek geeft het verschil van de trendwaarde in 2006 (μ_{2006}) en een willekeurig ander jaar t (μ_t). Rode stippellijnen geven een 95%-betrouwbaarheidsinterval. Voor het verschil ($\mu_{2006} - \mu_{1951}$) geldt 3.5 ± 1.8 °C. De onderste grafiek geeft de jaarlijkse toename (differentie) van de trend (dus de waarden $\mu_t - \mu_{t-1}$) met bijbehorende 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Aan het begin van de reeks is de differentie $\mu_{1951} - \mu_{1950} = 0.03 \pm 0.12$ °C. Naar het einde van de reeks loopt de differentie $\mu_{2006} - \mu_{2005}$ op naar 0.11 ± 0.12 °C.

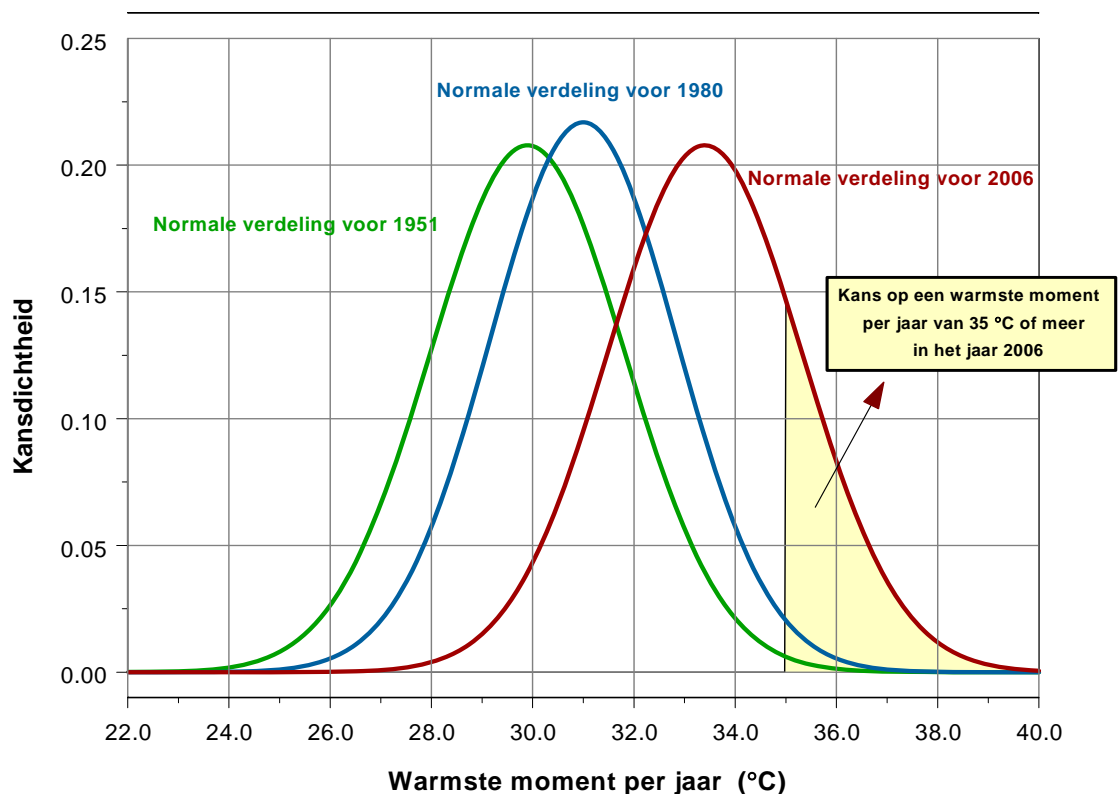
de trend in 2006 en 1951 oploopt naar 3.5 ± 1.8 °C. De toename van de trend is dus sterk significant. De onderste grafiek in Figuur 4.2 geeft de toename per jaar (de eerste differentie van de trend, ofwel het verschil $\mu_t - \mu_{t-1}$). Aan het eind van deze reeks is de toename opgelopen naar een zeer hoge waarde: $\mu_{2006} - \mu_{2005} = 0.11 \pm 0.12$. Deze toename is op de grens van statistisch significant ($\alpha = 0.05$). Wel lijkt de stijging wat af te vlakken.

Geconcludeerd wordt uit bovenstaande analyse dat het warmste moment per jaar over de periode 1951-2006 statistisch significant is toegenomen met gemiddeld 3.5 ± 1.8 °C. De verwachting voor het warmste moment in 2006 bedraagt 33.4 °C, met een 95%-voorspelinterval van [32.1, 34.7] °C.

4.2 Kans op extreem warme dagen

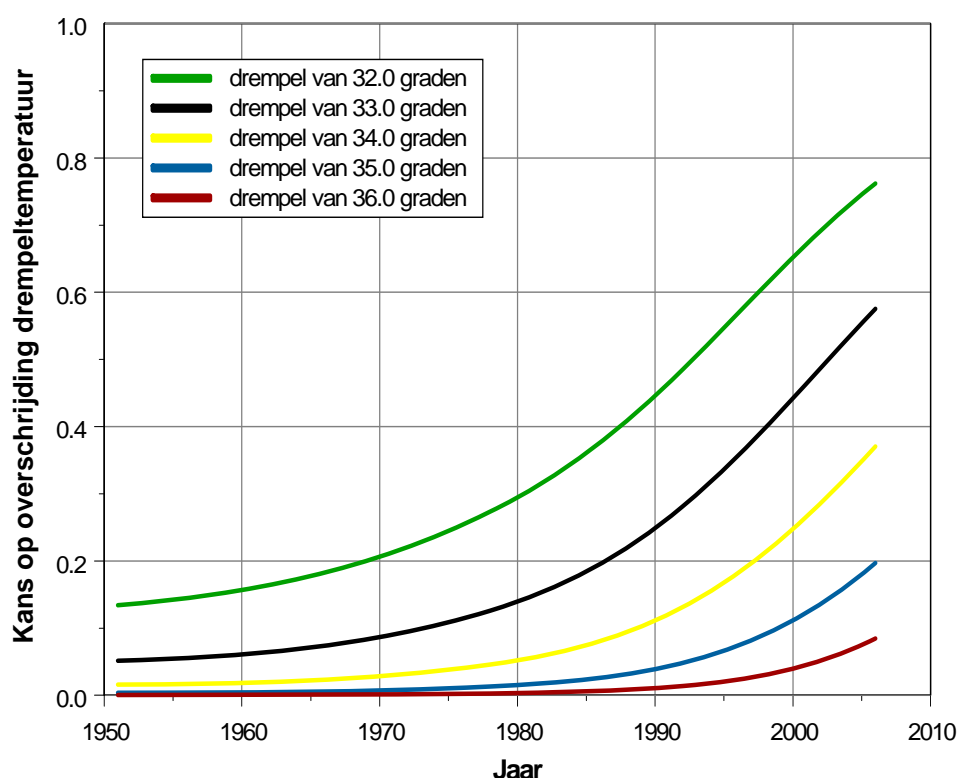
Voor een drietal jaren - 1951, 1980 en 2006 - zijn de resultaten uit Figuur 4.1 samengevat in de vorm van normale kansdichtheden in Figuur 4.3. De figuur laat zien dat vooral de kansdichtheid in 2006 sterk is opgeschoven naar hogere temperaturen. De figuur geeft ook een voorbeeld voor de kans op overschrijden van een drempel, hier de waarde van 35.0 °C.

Figuur 4.3 laat verder zien dat de kans op een maximumtemperatuur hoger dan 35.0 °C in 2006 20% bedraagt (oppervlak gele gebied onder de rode kansdichtheid). In 1980 was dat 2% (oppervlak gele gebied onder de blauwe kansdichtheid) en in 1950 was die kans 0.4% (oppervlak gele gebied onder de groene kansdichtheid).



Figuur 4.3 Normale verdelingen voor het warmste moment per jaar. De groene curve is voor het jaar 1951, de blauwe curve voor het jaar 1980 en de rode curve voor het jaar 2006. De kans op overschrijden van 35.0 °C bedraagt 20% (gele oppervlak) in 2006.

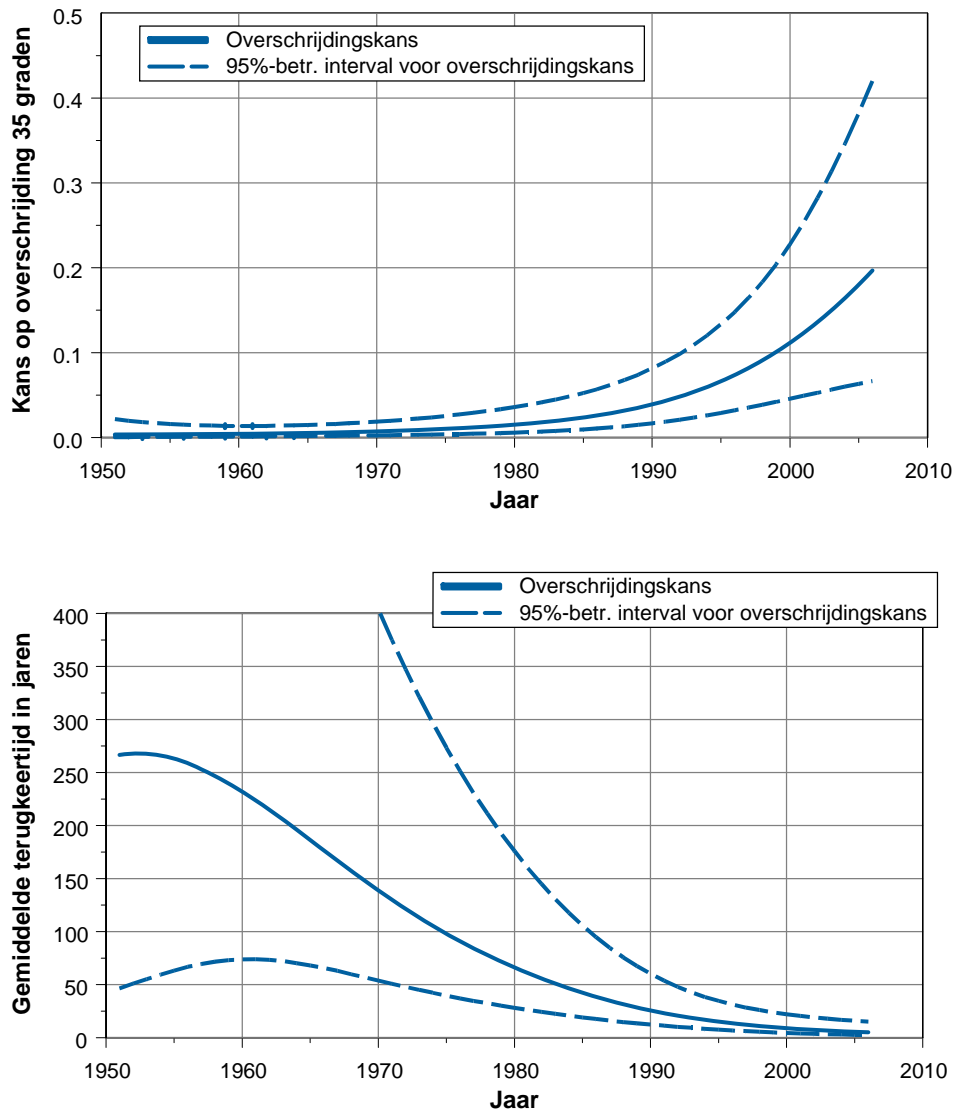
Op deze wijze is voor alle jaren in de periode 1951-2006 en voor de drempels 32.0, 33.0, 34.0, 35.0 en 36.0 °C de kans op overschrijding van de drempel berekend. De resultaten zijn samengevat in Figuur 4.4, in de vorm van een nomogram. De figuur laat zien dat voor elke curve de kans op overschrijding sterk toeneemt naar het eindjaar 2006.



Figuur 4.4 Kans op overschrijding van een gegeven drempeltemperatuur. Het nomogram geeft vijf drempels en een verloop van de overschrijdingskansen over de periode 1951-2006.

Figuur 4.5 geeft in de bovenste grafiek de kanscurven voor de grens van 35.0 °C, met een benadering voor de 95%-betrouwbaarheidsintervallen (formule (2)). De onderste grafiek geeft dezelfde informatie maar dan nu in de vorm van *gemiddelde terugkeertijden*. Een gemiddelde terugkeertijd is gelijk aan de inverse van de kans. Dus als de kans op overschrijding van de maximumtemperatuur van 35.0 °C in een jaar 20% is, dan is de gemiddelde terugkeertijd van deze gebeurtenis gelijk aan $1/0.20$ ofwel *eens in de vijf jaar*.

De grafiek laat zien dat deze terugkeertijd in 1951 eens in de 266 jaar was. Maar in 2006 is de terugkeertijd afgenomen tot eens in de vijf jaar!



Figuur 4.5

Bovenste grafiek geeft de kans op een warmste moment van 35.0 °C of meer met 95%-betrouwbaarheidsintervallen. De onderste grafiek geeft de bijbehorende gemiddelde terugkeertijden (terugkeertijd is de inverse van de kans).

De toename in de kansen over de periode 1951-2006 verloopt sneller dan de stijging van de trends in paragraaf 3.2 suggereren. Dat komt doordat het oppervlak onder de 'staart' van een

normale verdeling veel sneller toeneemt dan een verschuiving van het gemiddelde in de opwarming (Figuur 4.3 geeft een illustratie).

Geconcludeerd wordt uit bovenstaande analyses dat de kans op het overschrijden van hoge drempeltemperaturen sterk is toegenomen over de periode 1951-2006. In concreto is de kans op maximum temperatuur van 32.0 °C toegenomen van 13% in 1951 naar 76% in 2006. Anders uitgedrukt, in 1951 kwamen maximumtemperaturen boven de 32.0 °C gemiddeld eens per 8 jaar voor. In 2006 is dat afgenomen naar gemiddeld eens per 1.3 jaar. Voor de drempeltemperatuur van 36.0 °C zijn de kansen opgelopen van 0% in 1951 naar 8% in 2006. Ofwel uitgedrukt in gemiddelde terugkeertijden: van minder dan eens per 400 jaar in 1951 naar eens per 13 jaar in 2006.

Aan de gevolgen voor de volksgezondheid van de geconstateerde opwarming wordt aandacht besteed in het volgende hoofdstuk.

5 Extra sterfte tijdens warme periodes

Onderzoek laat zien dat er tijdens warme periodes (hittegolven) veel meer mensen overlijden dan zou mogen worden verwacht volgens de overlijdensstatistieken (zie ook paragraaf 1.2). Zo onderzochten Huynen et al. (2001) sterfte in Nederland tijdens zeven hittegolven over de periode 1979-1997. Tijdens deze hittegolven vonden zij een significante extra sterfte onder de Nederlandse bevolking van gemiddeld 12% per dag, of in absolute cijfers, veertig doden per dag. De doden vielen vooral onder mensen ouder dan 65 jaar.

Opgemerkt zij dat in de (internationale) pers en literatuur hittegerelateerde sterfgevallen vaak betrokken zijn in de context van klimaatverandering. Hierbij wordt gesteld dat door opwarming het aantal doden *in de winter* juist afneemt. Dit effect zou zelfs groter zijn dan het aantal extra sterfgevallen in warmer wordende zomers. Zie bijvoorbeeld Keatinge et al. (2000); Huynen et al. (2001) en Laaidi et al. (2006). In dit rapport wordt niet ingegaan op deze discussie.

5.1 Relatie hitte en sterfte

Garssen et al. (2005) onderzochten sterfte in Nederland tijdens de hittegolf in 2003. Zij schatten dat de extra sterfte in deze zomer ligt tussen de 1400 en 2200 doden. Zij vinden deze extra sterfte net als Huynen et al. bij de hoogste leeftijdsgroepen. Maar ook voor de leeftijdsgroep van 40 tot 59 jaar was de sterfte in augustus 2003 11% hoger dan normaal. In jongere leeftijdsgroepen nam sterfte niet toe.

Uit de CBS-analyse volgt een regressiemodel tussen de gemiddelde maximumtemperatuur in een week en extra sterfte:

$$S_t = (T_{\max,t} - 21.3) * 33.5 [26.0, 41.0] \text{ (doden/week)} \quad (3)$$

waarbij S_t staat voor het aantal doden in week t en $T_{\max,t}$ voor de gemiddelde maximumtemperatuur in die week (met een tijdvertraging van drie dagen). De range [26, 41] is een 68%-betrouwbaarheidsinterval voor de constante 33.5.

Voor de julimaand van 2006 becijferen Harmsen en Garssen (CBS-webbericht van 30-8-2006 en Figuur 2.1) dat er duizend mensen meer zijn overleden dan in een gemiddelde julimaand. De sterfte blijkt het hoogst bij vrouwen in de leeftijdsklasse 65-79 jaar. Verder had de warmte naar verhouding het meeste effect in het zuiden van het land.

Aangenomen wordt dat de formule voor extra sterfte, zoals afgeleid door het CBS voor de zomer van 2003, indicatief is voor sterfte onder de huidige maatschappelijke en sociale verhoudingen in Nederland. Indicatief, omdat de formule en bijbehorende onzekerheden alleen gebaseerd zijn op data uit 2003. De formule is vooral geschikt om te laten zien hoe wisselende zomerse condities de extra sterfte onder de bevolking *trendmatig* kunnen beïnvloeden.

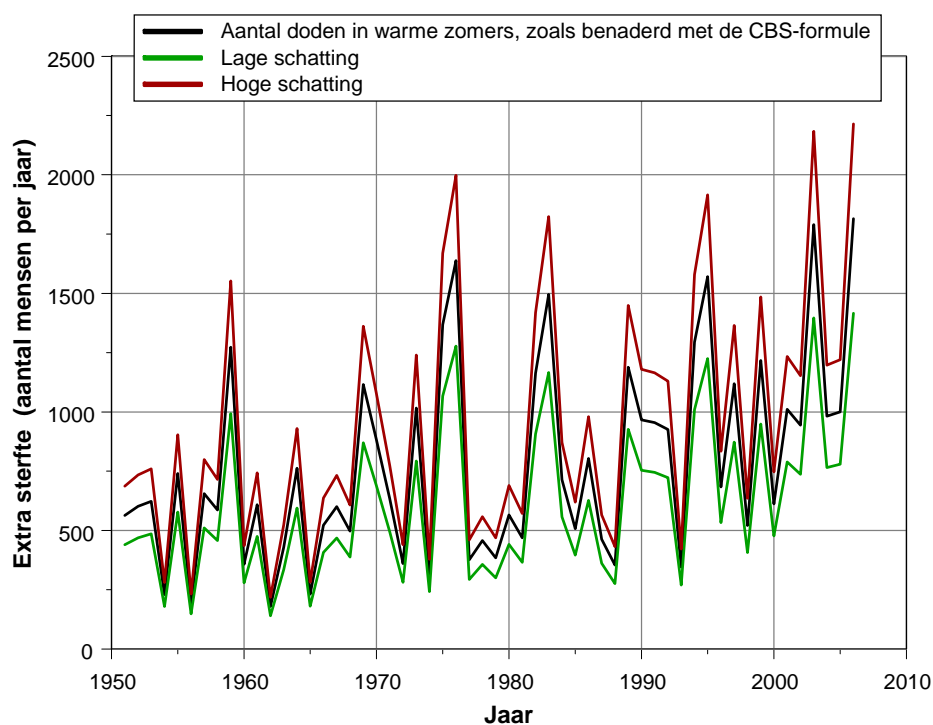
Zoals in de inleiding al gesteld, is het niet geheel duidelijk in hoeverre sterfte optreedt door hitte alleen, of door hitte in combinatie met verhoogde niveaus van luchtverontreiniging. Zie bijvoorbeeld Fisher et al. (2004) voor een discussie over de oorzaak van de extra doden in de zomer van 2003. Omdat een groot deel van de verhoogde concentraties van luchtverontreiniging ook weer samenhangt met de hoge temperaturen (dat geldt vooral voor ozon en in mindere mate voor fijnstof), zal in dit rapport gesproken worden over extra sterfte door *hitte* (hoewel dat dus strict genomen niet geheel correct is).

5.2 Extra sterfte onder maatschappelijke condities van nu

De CBS-formule (3) is toegepast om het aantal extra sterfgevallen te berekenen als functie van historische meteorologie. Dit betekent dat het aantal extra sterfgevallen berekend wordt met de zorgvoorzieningen, bevolkingsomvang en leeftijdsopbouw van nu, maar met de meteorologie uit bijvoorbeeld 1960.

Het resultaat is gegeven in Figuur 5.1. De zwarte curve is de *best-guess*-schatting terwijl de groene en rode curves een 68% betrouwbaarheidsinterval geven. De figuur laat zien dat het extra aantal doden door zomerse warmte in 2006 het hoogst was: 1820 [1410, 2220] extra doden. Daarna komen de jaren 2003 met 1790 [1390, 2190] doden en 1976 met 1640 [1270, 2000] doden. Maar, zoals gezegd in de vorige paragraaf, deze aantallen worden beschouwd als indicatief. Het gaat vooral om de trend in extra sterfte, zoals hierna geanalyseerd.

De trend in extra sterfte is geschat voor de *best-guess*-curve uit Figuur 5.1. Bij het opstellen van het tijdreeksmodel bleek dat de ruisprocessen in het kansmodel geen normale verdeling volgden en daarom zijn de data eerst logaritmisch getransformeerd alvorens de trend te

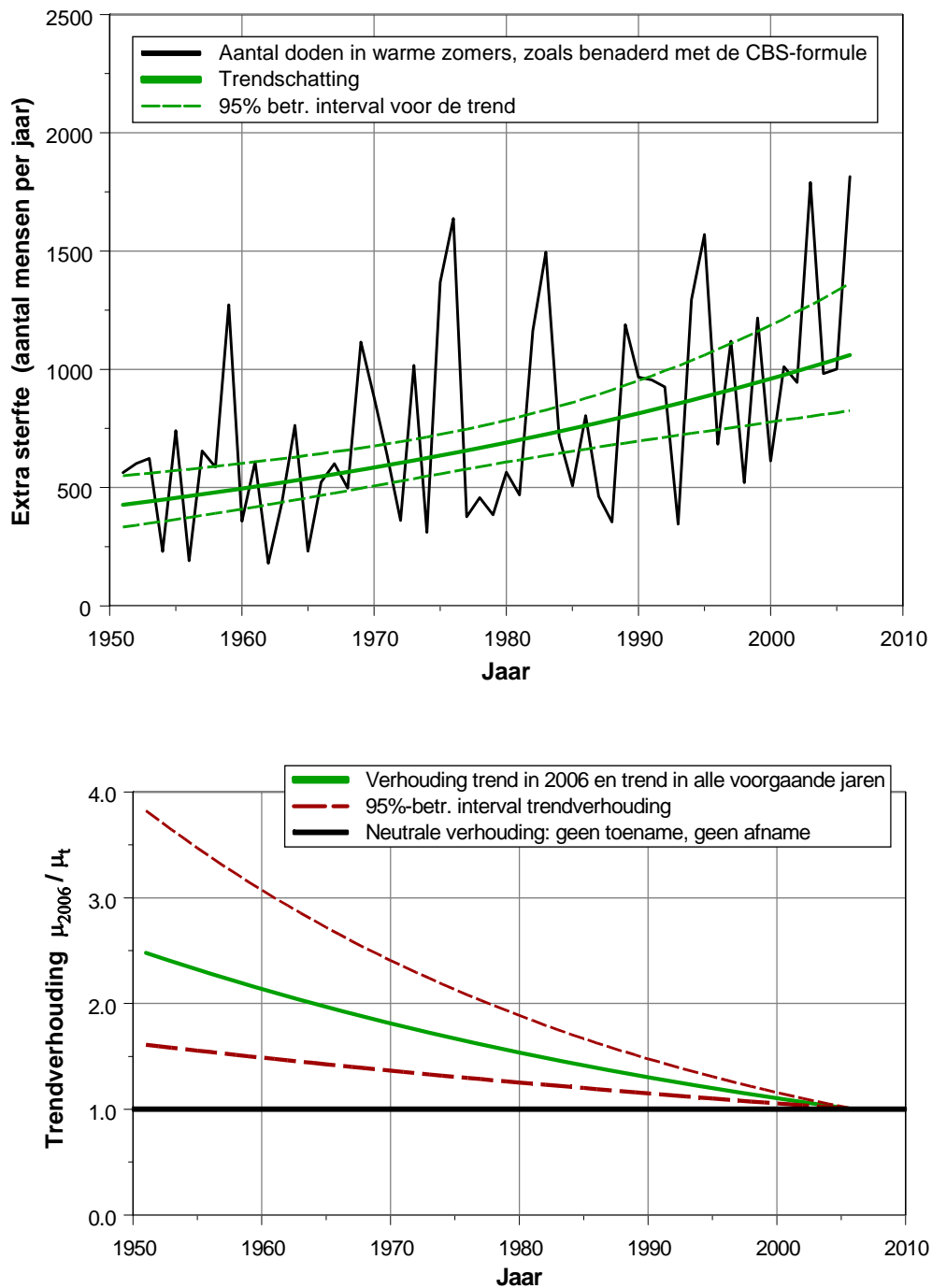


Figuur 5.1 Aantal extra doden in warme zomers. De grafiek geeft het aantal doden voor de maatschappij van nu, maar met de meteorologische omstandigheden van vroeger (1951 tot en met 2006). Curves zijn bepaald met formule (3), zoals afgeleid door het CBS voor extra sterfte in de zomer van 2003.

schatten. Figuur 5.2 geeft de schattingsresultaten na terugtransformatie. De bovenste grafiek geeft de trendschatting die een stijgende tendens vertoont over de hele meetreeks.

De onderste grafiek geeft de trendverhouding μ_{2006} / μ_t . Deze verhouding ligt vlak bij het jaar 2006 nog dicht bij 1.0. Maar verder terug in de tijd loopt de verhouding sterk op naar 2.5 (de verhouding μ_{2006} / μ_{1951}). Deze waarde is statistisch sterk significant, gezien de 95%-betrouwbaarheidsintervallen.

Opgemerkt zij dat de trendverhouding μ_{2006} / μ_t , zoals getoond in de onderste grafiek van Figuur 5.2, robuust is voor het exacte aantal doden per graad opwarming (het getal 33.5 in formule (3)). Wiskundig kan aangetoond worden dat de verhouding μ_{2006} / μ_t ongevoelig is voor de exacte waarde van dit getal.



Figuur 5.2 Bovenste grafiek geeft een trendschatting voor het aantal extra doden tijdens zomerse warmte (volgens middenschatting van het CBS, formule (3)). De onderste grafiek geeft de verhouding van de trendwaarde in 2006 (μ_{2006}) en voorafgaande trendwaarden (μ_t). De waarde 1.0 staat voor geen verandering.

De conclusie is dat, hoewel de exacte aantallen voor extra sterfte niet precies bekend zijn (door het CBS benaderd met een regressiemodel voor de zomer van 2003), er een duidelijke tendens bestaat naar hogere sterftecijfers. Gemiddeld genomen is de extra sterfte in warme zomers over de periode 1951-2006 toegenomen met een factor 2.5 [1.6–3.9] (95%-betrouwbaarheidsintervallen).

5.3 De Vierdaagse van Nijmegen

Zoals beschreven in de inleiding, viel de negentigste editie van de Vierdaagse van Nijmegen precies in de tweede hittegolf van juli (18 tot en met 21 juli, 2006). De temperaturen liepen op de eerste dag op tot boven de 34 °C in de schaduw. De hoge temperatuur leidde tot problemen voor een aantal deelnemers. Vijf personen moesten worden gereanimeerd, waarvan er twee overleden. Het ging om mannen van 58 en 65 jaar, ervaren Vierdaagse-deelnemers met een goede gezondheid. Negenenzestig mensen met leeftijden tussen de 17 en 89 jaar moesten in ziekenhuizen opgenomen worden. In totaal kwamen er meer dan 300 meldingen binnen van deelnemers die onwel waren geworden.

De vraag die hier beantwoord wordt, is: hoe groot de kans is op herhaling van de hitte zoals die optrad tijdens de vierdaagse van 2006? Hiertoe wordt een eenvoudige temperatuur-indicator gekozen, namelijk de maximale temperatuur die is opgetreden tijdens een vierdaagse (altijd georganiseerd tijdens de derde week in juli). Dit is dezelfde indicator die behandeld is in hoofdstuk 4; alleen wordt nu naar de kans gekeken op extreme hitte die precies valt tijdens de Vierdaagse.

Uiteraard is deze indicator een benadering voor wat de wandelaars voelen tijdens de tocht. Voor de zogenaamde gevoelstemperatuur zijn veel benaderingen bekend, zoals de hitte-index van Steadman (zie bijvoorbeeld J. Simmelink op www.Weerlink.com voor details). Relatieve vochtigheid en wind spelen hierbij een rol.

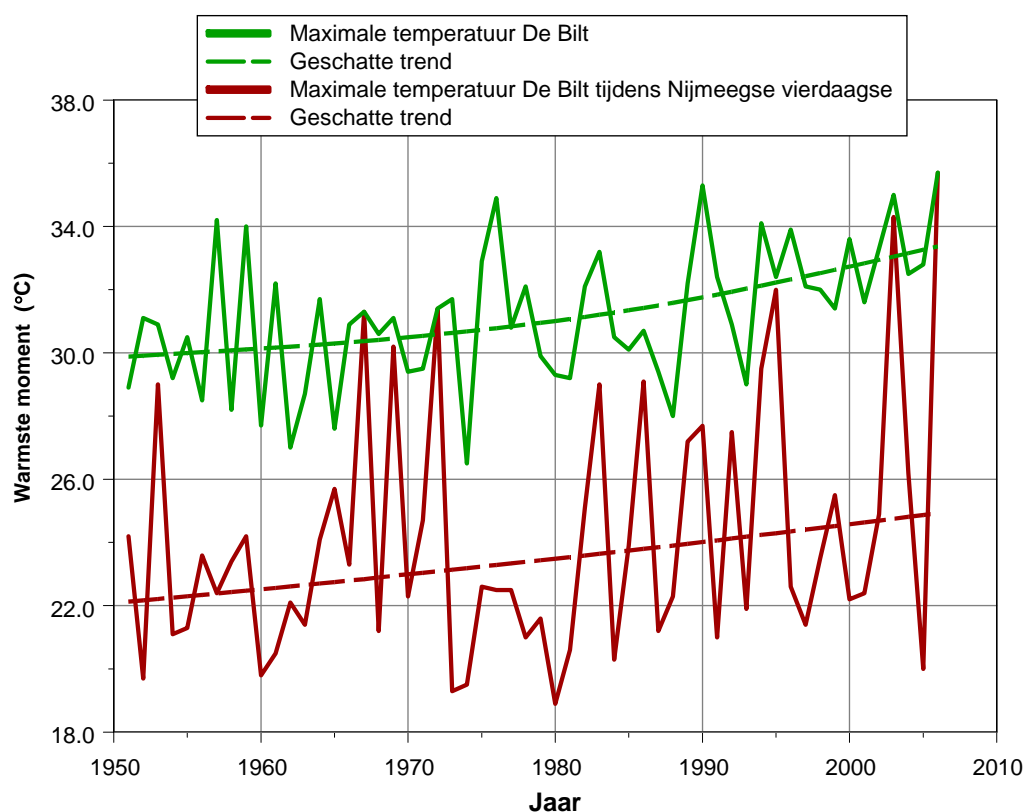
Omdat enerzijds betrouwbare historische meteorologie langs de route van de Vierdaagse niet beschikbaar is en er anderzijds geen wetenschappelijke consensus bestaat over de berekening van een gevoelstemperatuur onder zeer warme condities, wordt de hoogst gemeten temperatuur tijdens een van de vier dagen, afkomstig van een KNMI-station, beschouwd als een redelijke *indicator* voor de omstandigheden tijdens een Vierdaagse.



Op de eerste dag van de laatste gehouden Nijmeegse Vierdaagse (18 juli 2006) worden wandelaars besproeid. Foto: F. Franssen, NRC Handelsblad.

De rationale voor deze keuze is gegeven in Appendix A.2, Figuur A.4. De maximumtemperaturen gemeten in De Bilt blijken goed corresponderen met het meer oostelijk gelegen station Vliegveld Twenthe ($R = 0.93$). Station De Bilt is daarmee een redelijke keuze voor de condities in de omgeving van Nijmegen, in ieder geval in trendmatige zin (dus niet qua absolute waarden van de maxima). Als Vierdaagse-indicator wordt daarom gekozen voor de maximale dagtemperatuur tijdens de tocht, op basis van metingen in De Bilt. De indicator wordt hierna aangeduid met de notatie TXXV.

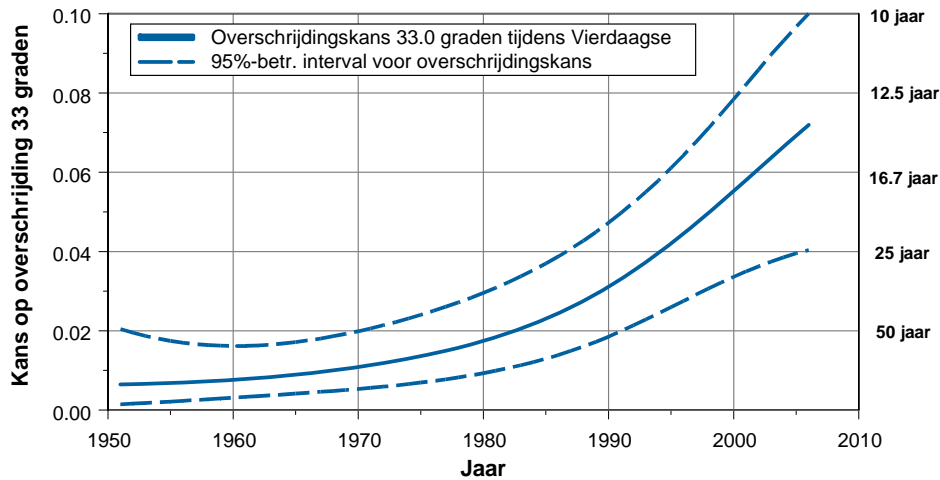
De maximum temperaturen TXXV zijn gegeven in Figuur 5.3 over de jaren 1951-2006. In de figuur zijn ook de warmste temperaturen *over het hele jaar* gegeven (TXX). Tevens geeft de figuur de geschatte trend voor beide reeksen (de groene curve uit Figuur 4.1). De figuur suggereert dat het samenvallen van zeer warme condities, precies in de periode van de Nijmeegse Vierdaagse, een toevalsproces is. Over de hele periode vallen beide maxima in 7 jaar (vrijwel) samen, namelijk in de jaren 1953, 1967, 1969, 1973, 1995, 2003 en 2006. In de overige jaren bestaat er een groot verschil tussen beide reeksen.



Figuur 5.3 Maximumpertemperaturen per jaar (TXX, groene lijn) en maximumtemperaturen tijdens de Vierdaagse van Nijmegen (TXXV, rode lijn). De trends zijn geschat met TrendSpotter. Beide reeksen zijn gebaseerd op KNMI-metingen in De Bilt.

Omdat de temperatuur in De Bilt tijdens de eerste dag van de Vierdaagse (18 juli 2006) opliep tot ruim 33 °C, formuleren we de kans op het herhalen van de Vierdaagse-condities uit 2006 als *de kans dat er tijdens de Vierdaagse een maximumtemperatuur optreedt van 33.0 °C of meer (volgens de registratie van De Bilt)*. Dit is dus de kans dat $TXXV > 33.0$ °C. Nogmaals zij opgemerkt dat dit dus niet precies de temperatuur is die de wandelaars ervaren in Nijmegen (die temperaturen zijn vermoedelijk een graad hoger, als de in de kranten genoemde temperaturen in Nijmegen kloppen).

Een eenvoudige benadering van deze kans is gegeven in Figuur 5.4. Deze figuur is direct afgeleid uit de bovenste grafiek van Figuur 4.4 (zwarte curve), waarbij de kansen vermenigvuldigd zijn met een factor 7/56. Immers door het toeval zullen van 56 willekeurige jaren er 7 een hoge waarde hebben precies tijdens de derde week van juli (Figuur 5.3). De aanname is hier dat de hoge waarden *random* verdeeld liggen over de tijdspanne 1951-2006.

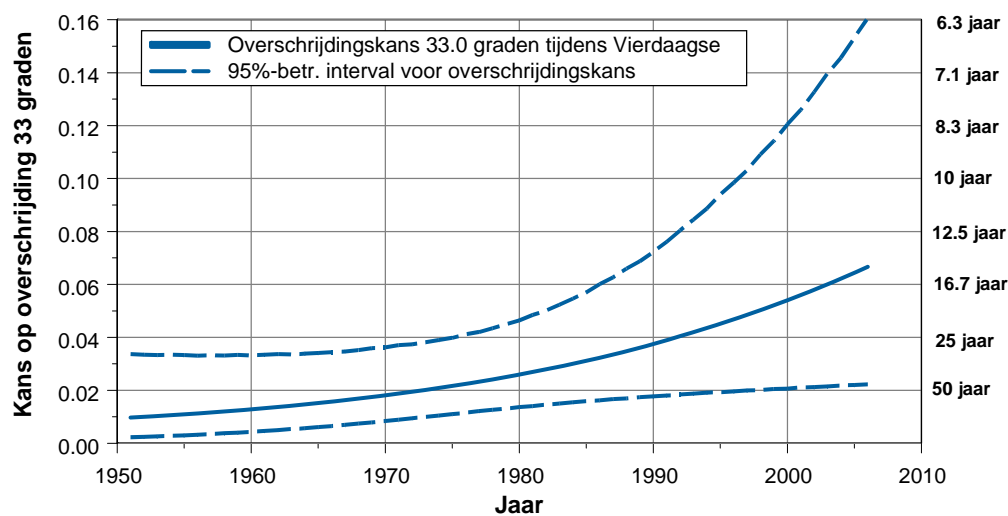


Figuur 5.4 Kans op overschrijding van 33.0 °C In De Bilt tijdens de Vierdaagse, zoals benaderd uit de figuren 4.4 en 5.3. De kanscurve is berekend door de zwarte kanscurve uit Figuur 4.5 te vermenigvuldigen met de correctiefactor 7/56.

Figuur 5.4 laat zien dat de kans op maxima van 33.0 °C of meer in 1951 nog klein is, namelijk 1%. Maar in 2006 is deze kans opgelopen naar 7%. De kans kan ook uitgedrukt worden in termen van terugkeertijden (rechter y-as). In het jaar 2006 bedraagt de gemiddelde terugkeertijd eens in de 14 jaar.

Een andere benadering voor de gezochte overschrijdingskans kan verkregen worden door een tijdreeksanalyse toe te passen op de temperatuurmaxima tijdens de Vierdaagse over de periode 1951-2006 (rode lijn in Figuur 5.3), volgens de methodiek uit hoofdstuk 2. Het resultaat van deze analyse is gegeven in Figuur 5.5. Details zijn hier verder achterwege gelaten.

Vergelijking van de kanscurves uit de Figuren 5.4 en 5.5 laat zien dat de berekende overschrijdingskansen vrijwel gelijk zijn. Alleen de onzekerheidsbanden voor de kansen is volgens de tijdreeksbenadering uit Figuur 5.5 veel breder. Welke van de twee benaderingen beter is, is moeilijk te zeggen.



Figuur 5.5 Kans op overschrijding van 33.0 °C in De Bilt tijdens de Vierdaagse, zoals benaderd via een trendanalyse (trendschatting getoond in Figuur 5.3).

Uit bovenstaande analyse wordt geconcludeerd dat de kans op herhaling van temperaturen van 33.0 °C of meer (op basis van registratie in De Bilt), en dus op vergelijkbare wandelcondities als gerealiseerd in 2006, 7% bedraagt. Dit komt overeen met een gemiddelde terugkeertijd van eens per 14 jaar. Verder laten de Figuren 5.4 en 5.5 zien dat de kansen fors gestegen zijn over de periode 1951-2006.



Ambulancepersoneel overlegt tijdens de Vierdaagse van Nijmegen (2006) bij een militair die aan medische meetapparatuur is gelegd. Later die dag zou de organisatie de Vierdaagse afbreken vanwege de aanhoudende hitte. De analyse in deze paragraaf laat zien dat de kans op herhaling van de hitte in de derde week van juli op korte termijn 7% bedraagt, ofwel gemiddeld eens per 14 jaar. Foto: ANP, De Volkskrant.

6 Temperatuurscenario's voor het jaar 2050

Zoals genoemd in de inleiding is er de afgelopen jaren een reeks studies verricht naar de ontwikkeling van (temperatuur)extremen in de toekomst. Bijvoorbeeld Schär et al. (2004); Kharin en Zwiers (2005); Beniston et al. (2007) en IPCC (2007, hoofdstuk 10/11).

In 2006 publiceerde het KNMI vier algemene klimaatscenario's voor Nederland, aangeduid met de afkortingen 'G', 'G⁺', 'W' en 'W⁺' (KNMI 2006a,b). Deze scenario's zijn opgesteld op basis van de op dat moment recentste resultaten van het klimaatonderzoek en door toepassing van regionale klimaatmodellen (RCM's) toegesneden op verwachte veranderingen in Nederland. Daarom worden de resultaten van de KNMI-studie hierna gebruikt om te komen tot overschrijdingskansen in de toekomst.

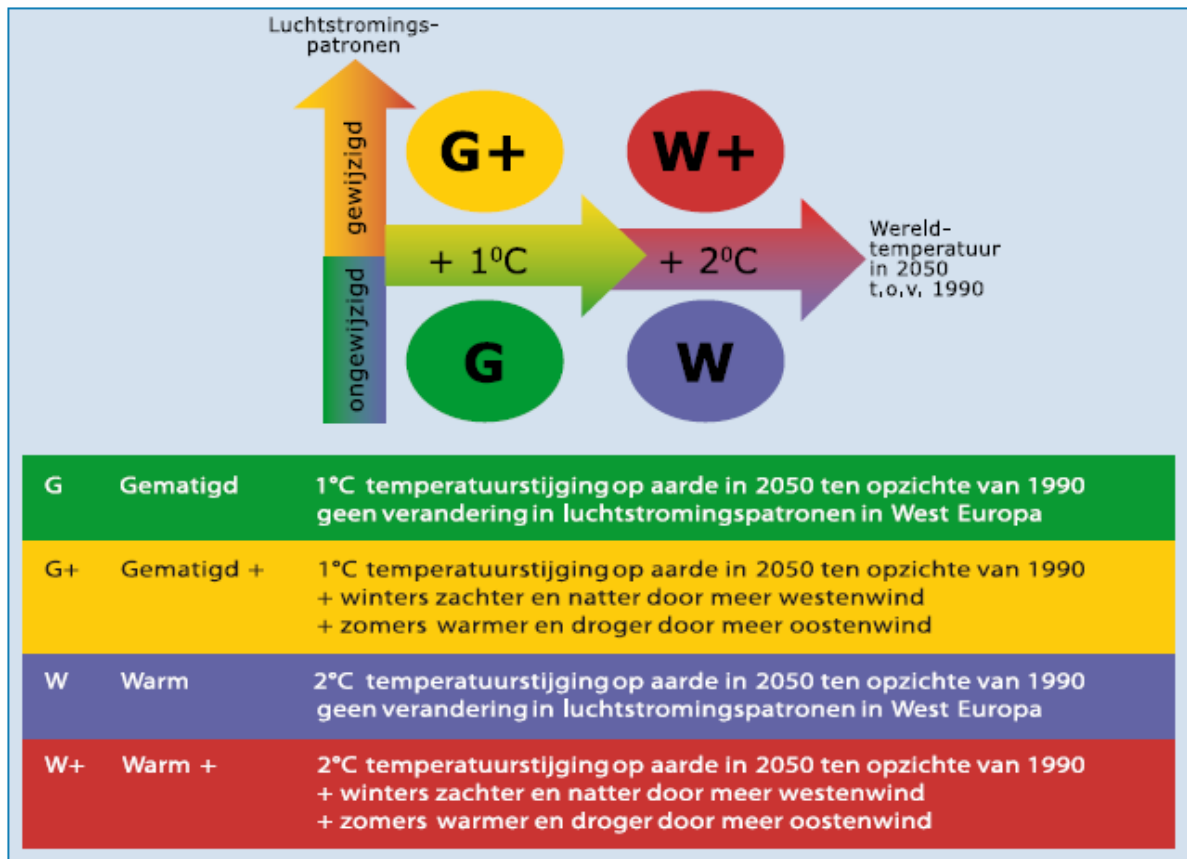
6.1 KNMI-scenario's en onzekerheden

De KNMI-scenario's schetsen het beeld dat Nederland in de komende eeuw te maken krijgt met hogere temperaturen, heviger neerslag en een verdere stijging van de zeespiegel. Zie Figuur 6.1 voor een korte toelichting.

De klimaatscenario's zijn consistente en plausibele beelden van de *range* waarbinnen het toekomstige klimaat zich hoogstwaarschijnlijk zal bewegen. Zij gaan uit van natuurlijke klimaatschommelingen in de 21^e eeuw die niet veel groter uitvallen dan waargenomen in de laatste honderd jaar. Zie voor een uitvoerige beschrijving van de scenario's KNMI (2006b) en Lenderink et al. (2007).

Onzekerheid is een belangrijk aspect bij het verkennen van mogelijke klimaatveranderingen. Hoewel wetenschappers hebben vastgesteld dat de mens met meer dan 90% zekerheid bijdraagt aan de opwarming van de aarde door de uitstoot van broeikasgassen (IPCC, 2007), bestaat er wel onzekerheid over de toekomstige uitstoot van deze gassen. Ook is de gevoeligheid van het klimaat voor natuurlijke en menselijk verstoringen niet precies bekend. Voor relatief kleinschalige regio's, zoals West-Europa of Nederland, is de onzekerheid nog groter. Om met deze onzekerheden om te gaan, heeft het KNMI uit een brede waaier van

toekomstberekeningen de vier oplossingen uit Figuur 6.1 gekozen. Deze oplossingen geven een zo compleet mogelijk beeld van ons toekomstige klimaat tot aan 2050.



Figuur 6.1 Karakteristieken van de vier door het KNMI ontwikkelde scenario's voor Nederland en het toekomstjaar 2050. Bron: KNMI en PCCC (2007, p. 13).

Met de huidige kennis is niet aan te geven welk scenario het waarschijnlijkst is. Klimaatscenario's zijn geen weersverwachting voor de lange termijn: ze doen geen uitspraken over het weer op een bepaalde datum, maar gaan alleen over het *gemiddelde* weer en de kans op extreem weer in de toekomst, onder een consistente set van aannames. Ook komt informatie over jaarlijkse variatie en natuurlijke schommelingen op langere termijn, zoals die in het verleden zijn voorgekomen, niet tot uitdrukking. Voor deze variabiliteit hanteert het KNMI de variabiliteit uit historische meetreeksen in Nederland (dit is een eerste-orde-benadering waarnaar het KNMI nog verder onderzoek zal verrichten).

Over de scenario's en hun verschillende projecties zij nog opgemerkt dat de verschillen toegekend moeten worden aan de verschillen in klimaatmodellen, afkomstig van verschillende onderzoeksgroepen. De verschillende emissiescenario's beïnvloeden de temperatuurverandering ook wel, maar tot aan het jaar 2050 veel minder dan de verschillen die klimaatmodellen genereren.

Over de rol van onzekerheid in klimaatprojecties voor de toekomst organiseerde het MNP, in samenwerking met het Instituut voor Milieuvraagstukken (IVM) van de Vrije Universiteit Amsterdam een symposium met als thema: 'Niets is zeker. Omgaan met onzekerheden in klimaatassessments'. Het symposium werd gehouden op 6-12-2006 (Foto). Naast sprekers als Koomen van het KNMI waren ook klimaatsceptici aanwezig. Klimaatsceptici ontkennen de rol die de mens speelt bij klimaatverandering. Zie bijvoorbeeld een recente discussie in *De Volkskrant* (2007) en reacties daarop.



Impressie van het symposium 'Niets is zeker. Omgaan met onzekerheid in klimaatassessments'. Boven: sprekers en panel. In het panel zaten (van links naar rechts): prof. dr. J. Keulartz (WUR/RU), dr. M. Hisschemöller (IVM), dr. R. Swart (MNP), dr. A.C. Petersen (MNP), prof. dr. G. Koomen (KNMI/UU) en prof. dr. F. Berkhout (IVM).

Daarnaast zijn er onderzoekers die niet de rol van de mens ontkennen bij klimaatverandering, maar wel kritisch zijn over het huidige gebruik van klimaatmodellen. Onderzoekers als R. Pielke (Crok en Jaarsma, 2007) stellen dat er nog zoveel factoren slecht meegenomen worden in de huidige generatie klimaatmodellen, dat projecties voor de jaren 2050 of 2100 hun betekenis verliezen. De onzekerheden zijn in deze visie te groot.

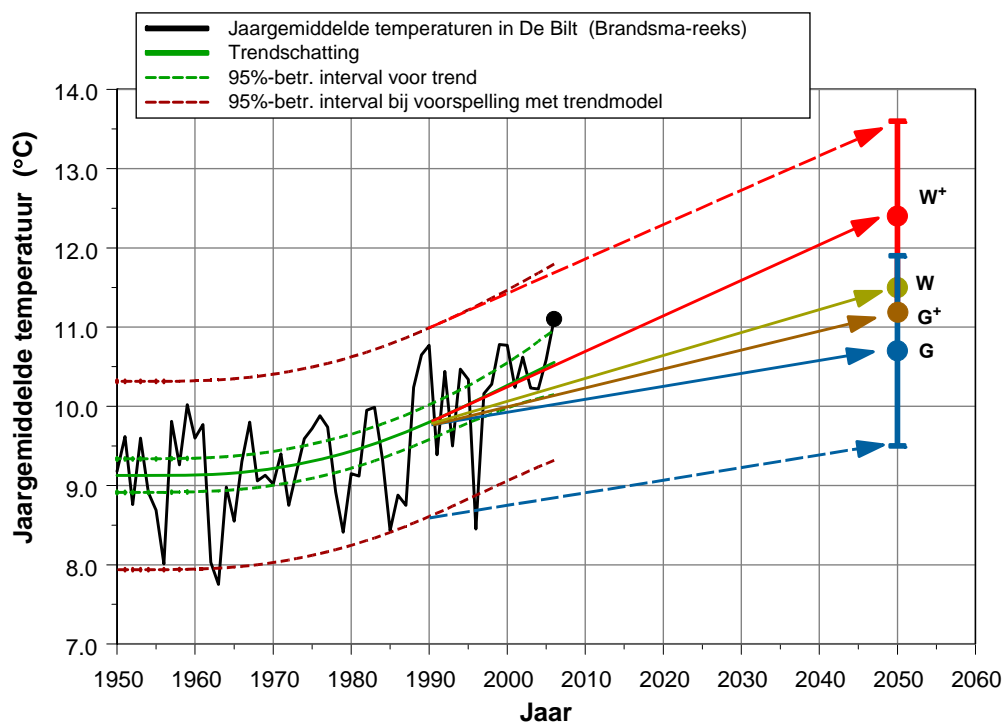
In dit rapport wordt de zienswijze van het KNMI (2006) en het IPCC (2007) gevolgd, waarin toekomstprojecties van een groot aantal klimaatmodellen geëvalueerd worden, inclusief de keten van onzekerheden in deze modellen. Verschillende klimaatmodellen, gevoed door een range van emissiescenario's, genereren een waaier aan projecties, met elk een eigen onzekerheidsband. Deze benadering geeft een goed inzicht in de te verwachten klimaatveranderingen in de komende honderd jaar.

6.2 Projecties voor 2050

De KNMI-klimaatscenario's geven de gemiddelde opwarming voor Nederland voor de zomer en in de winter, en voor het hoogste etmaalgemiddelde per jaar. De geschatte toename in zomergemiddelde temperaturen over de periode 1990-2050 varieert van 0.9 °C (G-scenario) tot 1.4 °C (G⁺-scenario), 1.7 °C (W-scenario) en 2.8 °C (W⁺-scenario). De winterwaarden zijn slechts een fractie lager: van 0.9 °C (G-scenario) tot 1.1 °C (G⁺-scenario), 1.8 °C (W-scenario) en 2.3 °C (W⁺-scenario). De G⁺- en de W⁺-scenario's geven een iets hogere opwarming in de zomer dan in de winter.

Hoogste etmaalgemiddelde temperaturen zullen over 1990-2050 toenemen van 1.0 °C (G-scenario) tot 1.9 °C (G⁺-scenario), 2.1 °C (W-scenario) en 3.8 °C (W⁺-scenario). Opvallend is de zeer hoge waarde van 3.8 °C in het W⁺-scenario. Deze waarde is een volle graad hoger dan de zomergemiddelde opwarming in hetzelfde scenario.

In Figuur 6.2 zijn de historische schattingen voor de jaargemiddelde temperatuur in De Bilt uit Figuur 1.1 en de KNMI-scenario-waarden samengevoegd in één figuur, over de periode van een eeuw, namelijk 1950-2050. De jaargemiddelde opwarming in 2050 is benaderd door het gemiddelde van de zomer- en winteropwarming per scenario. De onzekerheidsgrenzen zijn gelijk gekozen aan de historische variabiliteit uit het jaar 1990. ¹⁾



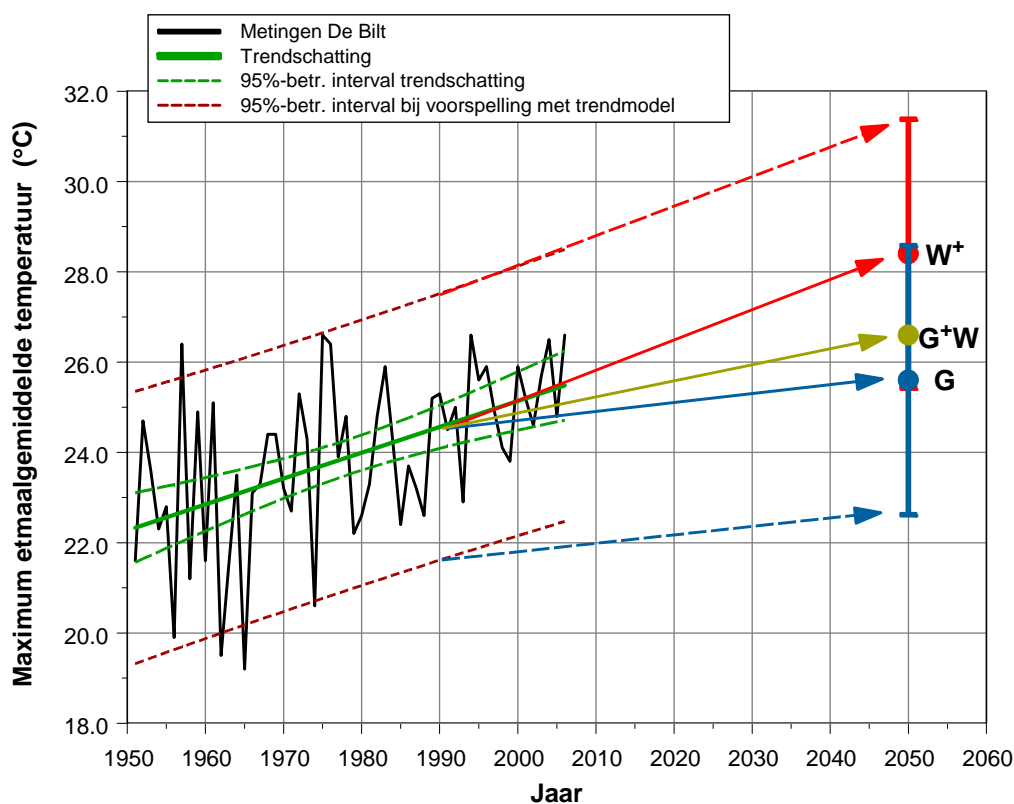
Figuur 6.2 Jaargemiddelde temperatuur voor De Bilt. De historische data lopen van 1951 tot en met 2006. De KNMI-scenario-waarden zijn voor 2050. Onzekerheden in 2050 zijn gelijk aan die van de historische reeks in 1990 (blauwe en rode stippelpijlen).

De figuur laat zien dat de combinatie van scenario-onzekerheid en natuurlijke variabiliteit een brede *range* geeft voor het jaar 2050. Verder valt op dat de trend in de historische data vloeiend overloopt in de hoogste extrapolatie voor 2050 (rode pijl en waarde in 2050, behorend bij het W⁺-scenario. Dit betekent daarmee niet dat het W⁺-scenario daarmee waarschijnlijker is dan de andere drie scenario's (het KNMI kent geen waarschijnlijkheden toe aan de vier scenario's). Verder lijkt de geringe opwarming van 0.9 °C in het G-scenario minder realistisch: de opwarming van 0.9 °C heeft in zijn geheel al bijna plaatsgevonden in

1) Projecties voor specifieke stations moeten uitgevoerd worden op getransformeerde stationsgegevens, zoals uitgelegd in KNMI (2006b, p.36). Omdat metingen in De Bilt echter representatief blijken voor Midden- en Noord-Nederland (zie bijvoorbeeld figuur 7.1), worden transformaties in dit rapport achterwege gelaten.

de periode 1990-2006 (blauwe pijl valt in 2006 buiten het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de trend).

Op dezelfde wijze is de maximale jaargemiddelde etmaaltemperatuur (TGX) geplot in Figuur 6.3. De historische trendschattingen zijn net zo geschat als die voor het warmste moment per jaar (zie paragraaf 3.2). De homogeniteit van de etmaalgemiddelde reeks wordt besproken in Appendix A.3.



Figuur 6.3 Hoogste etmaalgemiddelde temperatuur voor De Bilt. De historische data lopen van 1951 tot en met 2006. De KNMI-scenario-waarden zijn voor 2050. Onzekerheden in 2050 zijn gelijk aan die van de historische reeks in 1990 (blauwe en rode stippelpijlen).

De figuur laat wederom zien dat de range in 2050 zeer breed is, en dat de historische trend bij extrapolatie het beste aansluit bij de opwarming van het hoogste KNMI-scenario (3.8 °C in het W⁺-scenario). Het G-scenario is wederom laag, maar is nu wel in overeenstemming met de geschatte trend en onzekerheden daarin (groene stippellijnen).

In het volgende hoofdstuk zal blijken hoe maximale etmaalgemiddeldes (TGX) en maximumtemperaturen per jaar (TXX) samenhangen, en hoe deze samenhang gebruikt kan worden om voor het warmste moment per jaar een figuur te maken vergelijkbaar aan Figuur 6.3.

7 Kans op extreem warme dagen in 2050

De KNMI-scenario's uit hoofdstuk 6 geven wel 2050-waarden voor de hoogste etmaalgemiddelde temperaturen (TGX), maar niet voor het warmste moment per jaar (TXX). In dit hoofdstuk wordt aangetoond dat TGX en TXX eenvoudig in elkaar kunnen worden omgerekend waardoor de KNMI-scenario-waarden beschikbaar komen voor TXX (paragraaf 7.1). Daarna wordt in paragraaf 7.2 de kans bepaald op extreem warme dagen in 2050.

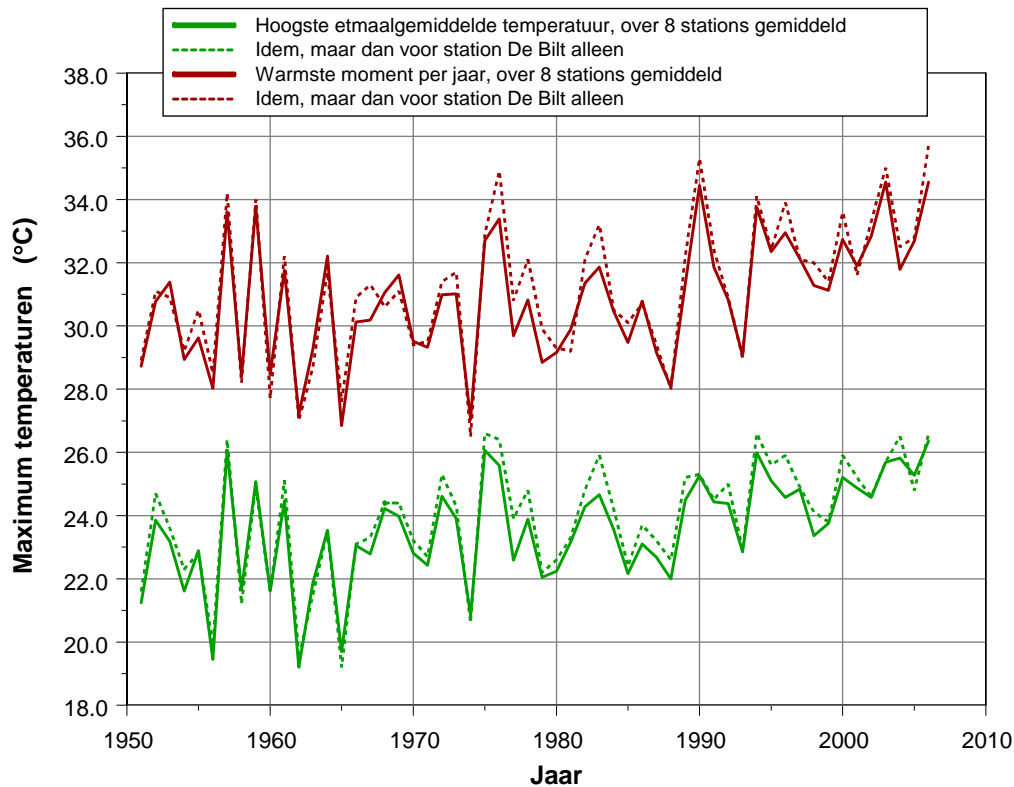
7.1 Van etmaalgemiddeldes naar maximum temperaturen

Om te kijken of er een eenvoudige relatie bestaat tussen etmaalgemiddelde temperaturen en het warmste moment per jaar, zijn de historische data samengevat in Figuur 7.1. De figuur laat zien dat er ruwweg een verschil van 7 graden bestaat tussen beide indicatoren en dat het trendmatige verloop sterk op elkaar lijkt. Ook liggen de reeksen voor station De Bilt vrijwel op die van het gemiddelde van de geselecteerde acht stations. Overigens zij hier opgemerkt dat de dag waarop een maximale etmaalgemiddelde temperatuur valt helemaal niet dezelfde dag hoeft te zijn waarop voor datzelfde station het warmste moment per jaar valt. Ook het warmste moment per jaar hoeft voor verschillende stations niet op dezelfde dag van een bepaald jaar te vallen.

Voor station De Bilt zijn een aantal regressiemodellen geschat waarmee maximale etmaalgemiddelde temperaturen (TGX_t) kunnen worden vertaald naar warmste momenten per jaar (TXX_t). Hierbij zijn jaren met een warmste moment per jaar lager dan 29.0 °C weggelaten. Het blijkt dat het eenvoudigste regressiemodel het best voldoet:

$$TXX_t = 7.3 + TGX_t + \varepsilon_t \text{ °C} \quad (4)$$

In vergelijking (4) is ε_t een normaalverdeeld ruisproces met gemiddelde nul en een standaarddeviatie van 0.96 °C. Om dus etmaalgemiddeldes te vertalen naar warmste momenten per jaar, hoeven etmaalgemiddeldes alleen opgehoogd te worden met 7.3 °C. Maar wel neemt de onzekerheid toe.



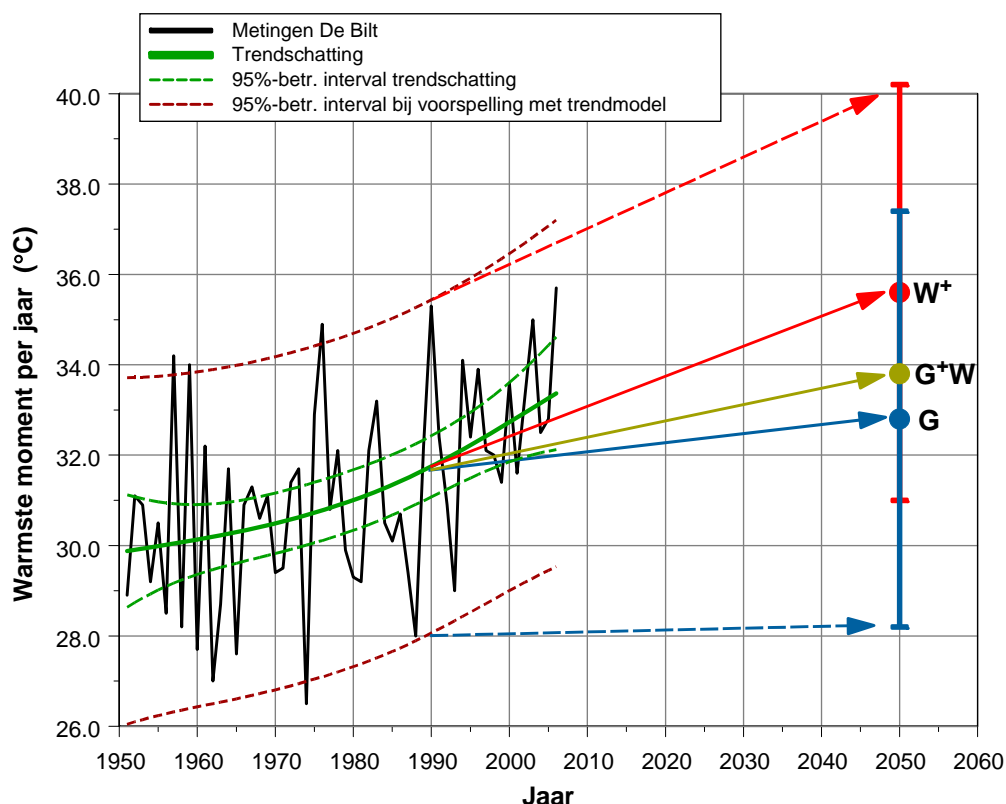
Figuur 7.1 Historische meetreeksen voor de maximale etmaalgemiddeldes per jaar (groen) en warmste moment per jaar (rood). De figuur is een samenvoeging van de Figuren 3.2 en A.6 (onderste grafiek).

Als nu voor bijvoorbeeld scenario W^+ de voorspelde opwarming over de periode 1990-2050 $3.8 \text{ }^\circ\text{C}$ bedraagt, dan geeft formule (4) de volgende toename voor het warmste moment $TXX_{2050} - TXX_{1990}$:

$$\Delta_{W^+} = TXX_{2050} - TXX_{1990} = TGX_{2050} - TGX_{1990} + \varepsilon_{2050} - \varepsilon_{1990} = 3.8 + \varepsilon_{2050} - \varepsilon_{1990} \text{ }^\circ\text{C} \quad (5)$$

Hierbij maakt het in formule (5) niet uit of het bij TXX gaat om een gemiddelde trendwaarde of een mogelijke realisatie. Formule (5) laat zien dat de toename voor het warmste moment ook uitkomt op $3.8 \text{ }^\circ\text{C}$, waarbij de standaarddeviatie van het ruisproces $\varepsilon_{2050} - \varepsilon_{1990}$ gelijk is aan $0.96 * \sqrt{2} = 1.36 \text{ }^\circ\text{C}$.

Gebruikmakend van de relaties (4) en (5) kan Figuur 6.3 vertaald worden naar het warmste moment in 2050. Zie Figuur 7.2. In de onzekerheidsbanden voor 2050 is ook genoemde onzekerheid in $\varepsilon_{2050} - \varepsilon_{1990}$ verwerkt. Hierbij is dus aangenomen dat de relatie (4) behouden blijft in de naaste toekomst (tot aan 2050).



Figuur 7.2 Warmste moment per jaar voor De Bilt. De historische data lopen van 1951 tot en met 2006 en zijn overgenomen uit Figuur 4.1. De KNMI-scenario-waarden zijn voor 2050. Onzekerheden in 2050 zijn gelijk aan die van de historische reeks in 1990 waarbij de onzekerheden uit (5) zijn verdisconteerd (blauwe en rode stippelpijlen).

De figuur laat zien dat het warmste moment per jaar gestegen is van gemiddeld 31.8 °C in 1990 naar 32.8 °C in 2050 volgens het G-scenario en naar 35.6 °C volgens het W⁺-scenario. De range voor een voorspelling is zeer breed, variërend van een 95%-ondergrens van 28.1 °C (blauwe stippelpijl) naar een 95%-bovengrens van 40.1 °C (rode stippelpijl).

Als het patroon van de historische trend vergeleken wordt met de scenarioprojecties voor 2050, dan blijkt dat de historische trend harder stijgt in de periode 1990-2006 dan het hoogste KNMI-scenario aangeeft (W+, de rode pijl). Verder lijkt de opwarming volgens het G-scenario minder realistisch gezien de opwarming in de historische data tot aan 2006. De blauwe pijl valt buiten het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de trend (de groene stippellijnen). De trends voor de G⁻, W- en W⁺-scenario's vallen wel binnen de onzekerheidsgrenzen.

Overigens concludeert ook het KNMI dat de opwarming die het G-scenario aangeeft voor het jaar 2050 (1.0 °C over de periode 1990-2050), relatief laag is (KNMI, 2006, p. 71). Deze waarde wordt bijna door de trend in de metingen over de periode 1990-2006 ingehaald, zoals blijkt uit Figuur 7.2. Voor etmaalgemiddeldes is de relatief geringe opwarming in het G-scenario minder uitgesproken (Figuur 6.3).

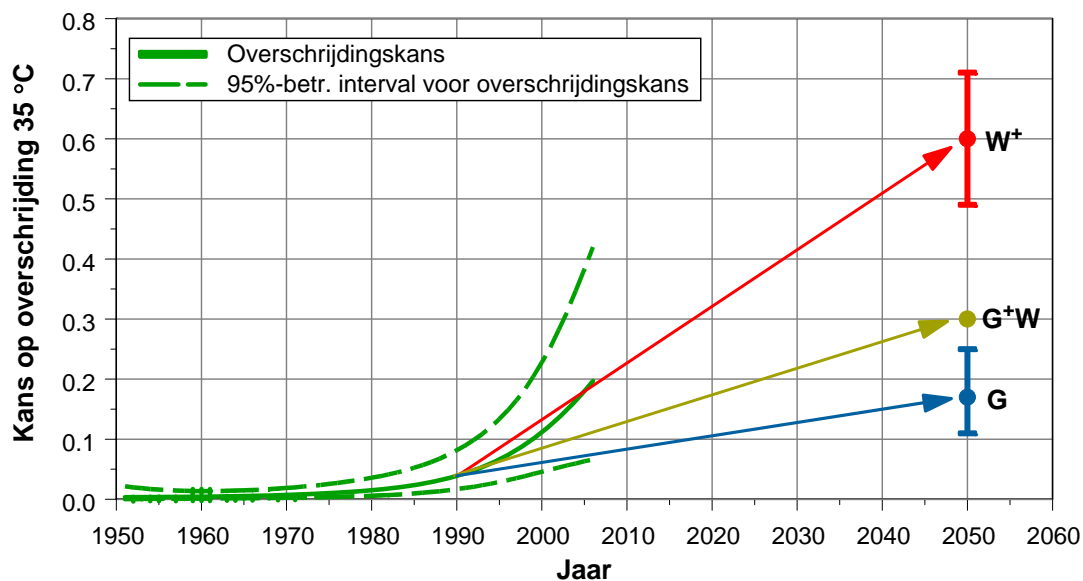
Meer in detail, voor de toename in maximale etmaalgemiddeldes TGX blijkt een gemiddelde opwarming van $\mu_{2006} - \mu_{1990} = 0.92 \pm 0.40$ °C (95%-betrouwbaarheids-grenzen). En voor de toename in het warmste moment per jaar wordt gemiddeld een nog sterkere toename gevonden: $\mu_{2006} - \mu_{1990} = 1.6 \pm 1.2$ °C (95%-betrouwbaarheids-grenzen).

De conclusie hier is dat het warmste moment per jaar in 2050 zal stijgen naar gemiddeld hoge waarden: van gemiddeld 32.8 °C in 2050 volgens het G-scenario naar 35.6 °C volgens het W⁺-scenario. In uitzonderlijke jaren zijn door de natuurlijke variabiliteit van het klimaat zelfs uitschieters naar 40.0 °C mogelijk (al is die kans wel klein: 3% in het W⁺-scenario).

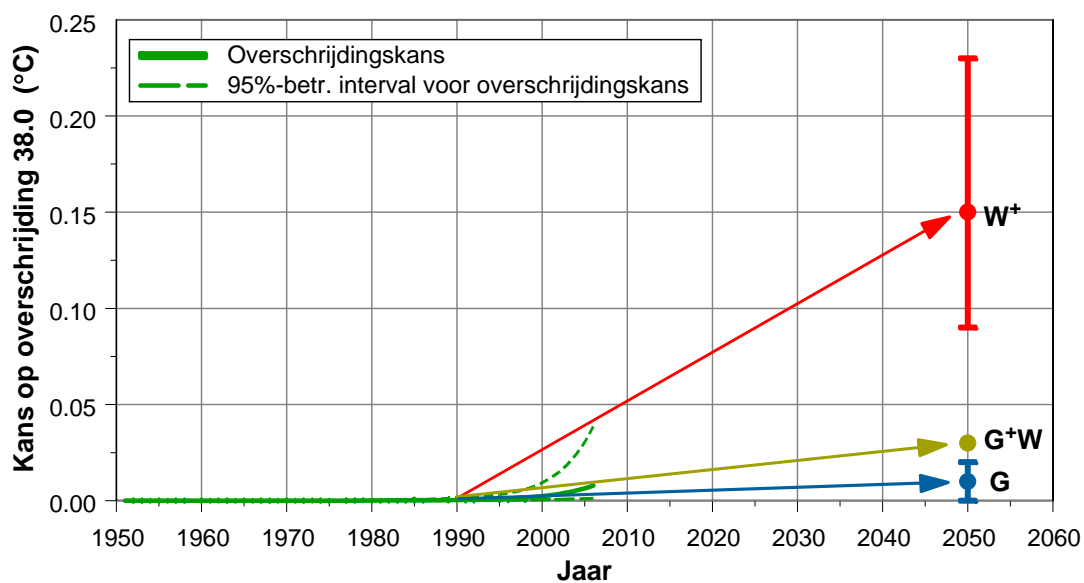
7.2 Kans op extreem warme dagen in 2050

Met de methodiek uit hoofdstuk 2 kunnen de resultaten uit de vorige paragraaf gebruikt worden om de kans op overschrijding van drempeltemperaturen te berekenen tot aan het jaar 2050. De Figuren 7.3 en 7.4 geven de berekende kanscurves voor respectievelijk de grenswaardes 35.0 °C en 38.0 °C.

Uit beide figuren blijkt dat de kanscurves sterk kunnen toenemen in de komende jaren. Bedroeg de kans op temperaturen boven de 35.0 °C in 2006 nog 20%, in het jaar 2050 kunnen deze kansen oplopen tot 60% volgens het W⁺-scenario. De laagste projectie, die volgens het



Figuur 7.3 Kans op overschrijden van 35.0 °C over de historische periode 1951-2006 en voor 2050. Opgemerkt zij dat de pijlen een lineaire interpolatie tussen 2006 en 2050 suggereren. Het verloop tussen 2006 en 2050 is niet precies bekend maar zal bij benadering exponentieel verlopen over de periode 2006-2050 (zoals de groene kanscurves dat doen).



Figuur 7.4 Kans op overschrijden van 38.0 °C over de historische periode 1951-2006 en voor 2050.

G-scenario, komt uit op 17%. Voor de kans op overschrijding van 38.0 °C blijkt dat de kans in 2006 nog vrijwel 0% was, maar in 2050 opgelopen is naar 15% (W⁺-scenario) en naar 2% in het G-scenario.

8 Conclusies en consequenties

8.1 Conclusies

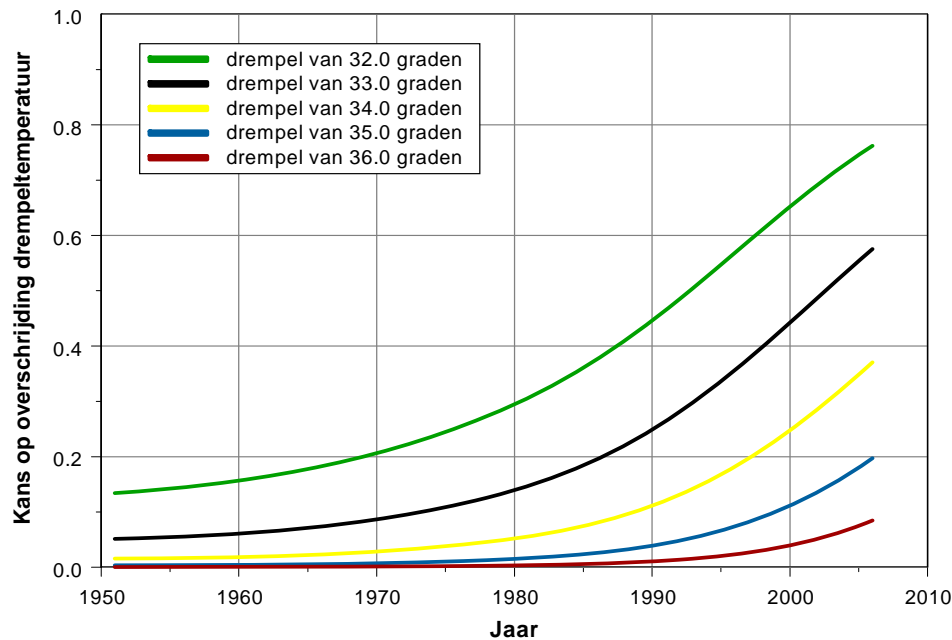
De hoofdvraag uit dit rapport is hoe de kans op extreme temperaturen in Nederland is veranderd over de afgelopen decennia en hoe deze kans zich wellicht zal ontwikkelen in de toekomst (tot aan het jaar 2050). Om een antwoord op deze vraag te krijgen, is in hoofdstuk 2 een statistische methode geïntroduceerd waarmee de kans op overschrijding van drempeltemperaturen kan worden berekend. Door gebruik te maken van een stochastisch model om trends te schatten, met bijbehorende onzekerheden, kunnen deze overschrijdingskansen direct berekend worden.

Als indicator voor extreme temperaturen is gekozen voor het ‘warmste moment per jaar’. In hoofdstuk 3 is gevonden dat de KNMI-meetreeks met maximumdagtemperaturen over de periode 1951-2006 een homogene reeks vormt en daarmee geschikt is om trends in de tijd te bepalen. Deze reeks blijkt een goede proxy voor maximale temperaturen in grote delen van Nederland. Daarnaast blijkt de indicator ook maatgevend voor veranderingen in hitte over periodes van 5, 10 en 15 aaneengesloten dagen (Figuur 3.3).

Voor de historische ontwikkelingen in het warmste moment per jaar worden volgende conclusies getrokken:

- Het warmste moment per jaar is in 56 jaar sterk gestegen, gemiddeld van 29.9 °C in 1951 naar 33.4 °C in 2006. De toename over deze periode is statistisch significant, namelijk 3.5 ± 1.8 °C (95%-betrouwbaarheidsintervallen).
- Uit het trendmatige verloop zijn kanscurves afgeleid voor een vijftal drempeltemperaturen (Figuur 4.4). Deze kanscurves vertonen voor elke drempel een exponentieel stijgend verloop in de tijd. Deze meer dan lineaire stijging is te verklaren uit de niet-lineaire relatie tussen trends en overschrijdingskansen (Figuur 4.3).
- In 1951 bedroeg de kans op overschrijding van 32.0 °C 13%. In 2006 is deze kans opgelopen naar 76%. Voor de drempeltemperatuur van 36.0 °C zijn de kansen opgelopen van 0% in 1951 naar 8% in 2006. Zie Figuur 8.1.

Hitte in de zomer heeft een aantal negatieve gevolgen, zoals mislukte oogsten, toename van warmtegevoelige insecten (zoals teken) en het vaker voorkomen van legionella. Elektriciteitscentrales zullen vaker stilgelegd moeten worden vanwege koelwaterproblemen.



Figuur 8.1 De kans op overschrijding van drempeltemperaturen is over de periode 1951-2006 sterk toegenomen (figuur identiek aan Figuur 4.4).

Daarnaast heeft hitte directe consequenties voor de volksgezondheid. In hoofdstuk 5 is afgeleid hoe het aantal hittegerelateerde ('extra') doden in een periode met hittegolven van jaar tot jaar kan variëren en hoe hogere zomerse temperaturen deze sterfte negatief beïnvloedt. Gegeven de gezondheidszorg en leeftijdsopbouw in het Nederland van nu is afgeleid dat de extra sterfte over de periode 1951-2006 toegenomen is met een factor 2.5 [1.6, 3.9] (95%-betrouwbaarheidsinterval).

Daarnaast is gekeken wat de consequenties van de toenemende hitte zijn voor een groot-schalig sportevenement als de Vierdaagse van Nijmegen. Tijdens de eerste dag van 90^e editie van deze Vierdaagse vielen in 2006 twee doden onder de deelnemers. Uit analyse blijkt dat de kans op herhaling van zulke hitte, precies in de derde week van juli, 7% [2%, 16%] bedraagt (95%-betrouwbaarheidsinterval). Dit is dus gemiddeld eens in de 14 jaar.

Voor een benadering van de kans op extreem warme dagen in de toekomst is gebruikgemaakt van vier scenario's, recentelijk ontwikkeld door het KNMI (hoofdstuk 6). Omdat deze scenario's projecties geven voor de hoogste etmaalgemiddelde temperaturen per jaar, en niet voor het warmste moment per jaar, is een eenvoudige omrekeningsformule afgeleid.

Met deze formule zijn scenarioprojecties en overschrijdingskansen berekend voor het warmste moment per jaar in 2050.

De volgende conclusies worden getrokken voor de komende decennia:

- De warmste temperaturen per jaar zullen over de periode 1990-2050 met gemiddeld 1.0 tot 3.8 °C stijgen, afhankelijk van het klimaatscenario. De *range* in deze prognose wordt vooral bepaald door onzekerheden in verschillende klimaatmodellen en in veel mindere mate door verschillende scenario's voor de emissies van broeikasgassen (hoge of juist lage emissies spelen wèl een belangrijke rol voor de opwarming in de periode 2050-2100).
- In specifieke realisaties van het warmste moment per jaar kan de temperatuur oplopen tot 40 °C, zij het dat de kans op zo'n gebeurtenis wel klein is (kans van 3% in het hoogste KNMI-scenario).
- De trend in de historische reeks van de hoogste etmaalgemiddelde temperatuur per jaar loopt letterlijk en figuurlijk 'in lijn' met het hoogste KNMI-scenario. Maar aangezien er aan scenario's geen kansen worden toegekend, kan niet gesteld worden dat deze hoge temperatuurvoorspellingen waarschijnlijker zijn dan de veel lagere voorspelling van een ander KNMI-scenario. Deze conclusie geldt ook voor het warmste moment per jaar (Figuur 7.2). Voor deze indicator lijkt het hoogste KNMI-scenario *zelfs nog aan de lage kant*. Wel valt de projectie binnen de onzekerheidsgrenzen rondom de geschatte historische trend. Voor het lage KNMI-scenario is dat laatste niet het geval.
- De kans op een warmste moment per jaar van 35 °C of meer bedraagt in 2006 gemiddeld 20%. In het jaar 2050 is deze kans opgelopen naar 30% in twee scenario's, en naar 60% in het hoogste scenario. Het laagste KNMI-scenario geeft een lichte daling van de kans, namelijk 18% (Figuur 7.3).
- Evenzo is gevonden dat de kans op overschrijding van 38 °C in 2006 nog verwaarloosbaar is. Maar in het jaar 2050 is de kans opgelopen naar 1%, 3%, 3% en 15% (Figuur 7.4).

Het hitte-gerelateerd aantal sterfgevallen is niet geprojecteerd naar het jaar 2050. Enerzijds zijn de daartoe benodigde data niet voorhanden, anderzijds is het niet in te schatten hoe de gezondheidszorg er anno 2050 uit zal zien. Wel zijn er CBS-schattingen voor het aantal mensen boven de 65 jaar. Dit aantal zal sterk toenemen: van 2.3 miljoen (14% van de bevolking in 2006) naar 4.0 miljoen in 2050 (24% van de bevolking in 2050) (CBS-persbericht PB06-117). Het aantal mensen dat gevoelig is voor perioden met hitte, zal dus sterk toenemen in de toekomst.

Dit onderzoek samenvattend kan gesteld worden dat de kans op extreem hoge temperaturen in Nederland sterk is toegenomen sinds de jaren vijftig van de vorige eeuw en dat deze

ontwikkeling zich volgens drie van de vier KNMI-scenario's zal voortzetten in de komende decennia.

In de volgende paragraaf wordt kort ingegaan op de gevolgen van deze eindconclusie. Hoe kan Nederland zich aanpassen, zowel op korte als lange termijn?

8.2 Nationaal hitteplan

Wat zijn de consequenties van de toenemende hitte in Nederland en wat kan daar aan gedaan worden? Het antwoord op deze vraag hangt natuurlijk af voor welk probleem een oplossing moet worden aangedragen. Zo vraagt de sterfte onder ouderen, door oververhitting of uitdroging, om andere maatregelen dan het tegengaan van legionellagroei in waterleidingen. Het verminderen van de koelwaterproblemen bij elektriciteitscentrales vraagt om andere oplossingen dan het uitvallen van cruciale computersystemen in te warme ruimtes. Verder zullen maatregelen op de korte termijn, zeg de komende vijf jaar, er anders uitzien dan maatregelen op de langere termijn.

Hoe Nederland zich zou moeten aanpassen (adaptatie), is op dit moment onderwerp van breed opgezet onderzoek. Zie bijvoorbeeld Nillesen en Van Ierland (2006), PCCC (2007, hoofdstuk 6) en RIVM et al. (2006). In deze paragraaf wordt kort ingegaan op de gevolgen van hitte(golven) voor de volksgezondheid, in het bijzonder op extra sterfte bij ouderen. En op het wel of niet door laten gaan van sportevenementen onder extreem warme condities.

Hittegolven hebben een grote impact voor de gezondheid van ouderen (Garssen et al. 2005). Maar Nederland is nog niet voldoende voorbereid op extreem hoge temperaturen, zoals bleek tijdens de hittegolven in juli 2006. Zo ontbreken in verpleeghuizen nog vaak goede zonweringen, ventilatoren, of een of andere vorm van *airconditioning* (zie krantenbericht hiernaast). Op korte termijn zouden op dit soort punten maatregelen getroffen moeten worden.

Naar aanleiding van de hitte in de julimaand van 2006 is door het Nederlandse Rode Kruis, het ministerie van VWS en het RIVM een conferentie gehouden met als doel te komen tot een *nationaal hitteplan*. De conferentie werd gehouden op 10 november 2006 en had de titel 'De hitte de baas'. Tijdens de conferentie kwam een groot aantal maatregelen aan bod om nadelige gezondheidseffecten te voorkomen.

maandag 31 juli 2006

Drie doden door hitte in verpleeghuis

Door HELMA VAN DEN BERG

NIEUWEGEIN - De hitte heeft in verpleeghuis De Geinsche Hof in Nieuwegein levens gekost. Op de afdeling Ram,...



Buiten of binnen, het maakt voor de bewoners van verpleeghuis De Geinsche Hof in Nieuwegein nauwelijks uit: het is overal even heet.

FOTO MARK PRINS

Geinsche Hof onderdeel is, is het gebouw verouderd en wacht hij op toestemming voor renovatie. Voor mobiele airco's is 'geen budget'. „We hopen dat het binnen een paar graden koeler is dan buiten,” zegt Irene de Jong, woordvoester van de Raad van Bestuur. „De lichtkoepels zijn wit gekalkt, de lampen laten we uit en op elke afdeling hebben we een ventilator gezet.”

Zondag ontdekte het personeel dat acht van de dertig bewoners hoge koorts hadden. De GGD Midden Nederland en het St. Antonius Ziekenhuis in Nieuwegein werden ingeschakeld. Zij meldden dat er geen sprake was van een legionellabesmetting of virusontsteking, zegt Frits Woonink, arts infectieziekten van de GGD. „We gaan ervan uit dat de mensen het slachtoffer van de hitte zijn geworden.”

De hitte is voor bejaarde zieken extra belastend. Hulpmiddelen als incontinentiemateriaal, catheters en kunststof beddenhoezen verergeren de situatie. Dekker: „Het seizoen werkt ook niet mee. Familie is nu vaak op vakantie, daar worden ouderen soms ook depressief van.”

...een vleugel voor dertig mensen met lichamelijke kwalen, stierven het afgelopen weekeinde drie bejaarde bewoners. Vijf anderen zijn in het ziekenhuis opgenomen. Ook een verpleegkundige werd door de hitte ziek.

Het lage verpleeghuis heeft een plat dak, geen zonwering en geen airconditioning. Volgens Maarten Dekker, directeur van de stichting Zorgspectrum waarvan De

Verpleeghuizen met een plat dak, geen zonwering en geen airconditioning zijn niet aangepast aan het veranderende klimaat in Nederland. Artikel overgenomen uit het AD van 31 juli 2006.

Op de conferentie, waar ook vertegenwoordigers van zorginstellingen, vrijwilligersorganisaties en GGD Nederland aanwezig waren, werd besloten om in de zomer van 2007 te komen met een uitgewerkt hitteplan waarin geanticipeerd wordt op klimaat-verandering. De volgende conclusies/aanbevelingen zijn overgenomen uit het conferentieverlag (RIVM et al., 2006):

- Diverse landen binnen Europa hebben reeds een hitteplan opgesteld sinds de warme zomer van 2003. Uit deze plannen kan een reeks maatregelen worden overgenomen. Zie <http://www.euro.who.int/globalchange> .
- Beter scholing van zorgverleners in professionele instellingen is nodig om beter om te gaan met patiënten/bewoners tijdens hitteperiodes. Aandachtspunten zijn: (i) het 's nachts luchten van kamers en ruimtes, (ii) aanbrengen van zonwering, (iii) aanschaf van mobiele airco's en (iv) verstandig gebruik van ventilatoren.
- Er zou een *early warning system* moeten komen, dit om een noodprogramma in werking te stellen. Zie Kovats en Kristie (2006) en Diaz et al. (2006) voor een discussie. Verspreid tips over wat te doen bij hitte.
- Vrijwilligers en mantelzorgers moeten in de zomermaanden kunnen bellen naar een algemeen informatienummer over hitteproblemen, bijvoorbeeld gecoördineerd door GGD Nederland (mantelzorg beslaat 80 tot 90% van alle zorg die in Nederland wordt geboden).
- Bij nieuwbouw en renovatie moet voldaan worden aan duidelijke klimaatcriteria (binnen proefprojecten op het gebied van duurzaam bouwen zijn reeds huizen gebouwd die nauwelijks traditionele energie gebruiken, en uitgerust zijn met verwarmingssystemen die energiezuinig koelen in de zomer. Zie bijvoorbeeld het recente Cahier 'De hitte de baas. Koeling in zorginstellingen' :
<http://www.bouwcollege.nl/Pdf/CBZ%20Website/Publicaties/Overige%20Publicaties/hitte%20webPDF1.pdf> .
- Op kennisgebied zijn er nog lacunes. Zo is niet duidelijk hoe een warme periode van 3 dagen zich verhoudt tot een warme periode van drie weken. Wat zijn de effecten van warme nachten? Wat zijn kritische waarden om mee te werken (wanneer moet er alarm gegeven worden)? Wat is precies de rol van verhoogde niveaus van luchtverontreiniging en beïnvloedt luchtverontreiniging het type hulp dat geboden moet worden? Tenslotte, hoe moet publieksvoorlichting er precies uitzien (het moet in ieder geval meer zijn dan alleen het vermelden van sterftcijfers)?

Op 3-7-2007 is het nationaal hitteplan door de Staatssecretaris van Volksgezondheid, Welzijn en Sport (VWS), mw. Dr. J. Bussemaker, aangeboden aan de Tweede Kamer. Het hitteplan is een nauwe samenwerking tussen VWS, het RIVM, het Nederlandse Rode Kruis, GGD Nederland, ActiZ en GHOR Nederland. Het plan is te vinden op de VWS-site

<http://www.minvws.nl/kamerstukken/lz/2007/nationaal-hitteplan.asp> en de links daar vermeld. Aanbevelingen over wat te doen bij hitte, zijn samengevat op de RIVM-site: <http://rivm.nl/hitte> .

Verder hebben het RIVM en het KNMI een gefaseerd waarschuwingssysteem ontwikkeld dat binnenkort in werking zal treden. Zie het KNMI-persbericht van 3-7-2007 op <http://knmi.nl> .

Daarbij zij vermeld dat op Europese schaal onlangs een *early-warming system* is gestart dat waarschuwingen afgeeft over extreem weer, waaronder hitte. Zie <http://www.meteoalarm.eu> .

De verwachte stijging van de kans op extreem warme dagen, zoals afgeleid in dit rapport, onderstreept de urgentie van het hitteplan.

Literatuur

- Alexander, L.V., et al., 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J. Geophysical Research* 111, D05109.
- Bell, J.L., Sloan, L.C., Snyder, M.A., 2004. Regional changes in extreme climatic events: a future climate scenario. *J. of Climate* 17, 81-87.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylha, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K., 2007. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change* 81, 71-95.
- Bonsal, B.R., Zhang, X., Vincent, L.A., Hogg, W.D., 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada. *J. of Climate* 14, 1959-1976.
- Brandsma T., Können G. P., Wessels H. R. A., 2002. Empirical estimation of the effect of urban heat advection on the temperature series of De Bilt (The Netherlands). *Int. J. Climatology* 23, 829-845.
- Crok, M., Jaarsma, T., 2007. Mist in kristallen bol. *Natuur, Wetenschap en Techniek*, maartnummer, 22-31.
- Dekkers A.L.M., 2001. S-PLUS voor het RIVM. Krachtig statistisch software-gereedschap. RIVM-rapport 442516001.
- De Volkskrant, 2007. Mens niet schuldig aan opwarming. Rubriek Forum, 11 januari. Reactie op dit artikel door A.C. Petersen (MNP) op 16 januari 2007, B. Thijsse (TU Delft) op 16 januari 2007 en M. van Calmthout (wetenschapsredacteur De Volkskrant) op 22 februari 2007.
- Diaz, J., Linares, C., Tobias, A., 2006. A critical comment on heat wave response plans. *The European Journal of Public Health* 16(6), p. 600.
- Fisher, P.H., Brunekreef, B., Lebet, E., 2004. Air pollution related deaths during the 2003 heat wave in the Netherlands. *Atm. Environment* 38, 1083-1085.
- Garssen, J., Harmsen, C., Beer, J. de, 2005. The effect of the summer 2003 heat wave on mortality in the Netherlands. *Eurosurveillance* 10 (issues 7-9), 165-167.
- Gore, A., 2006. Een ongemakkelijke waarheid. Het gevaar van het broeikaseffect en wat we eraan kunnen doen. Meulenhoff bv, Amsterdam. Tevens verkrijgbaar als film op DVD. Zie ook: <http://www.mnp.nl/nl/publicaties/2006/MNP-recentieVanDeFilmAnInconvenientTruth.html> voor een toelichting.

- Harvey, A.C., 1989. Forecasting, structural time series models and the Kalman filter. Cambridge University Press, Cambridge.
- Huynen, M.M.T.E., Martens, P., Schram, D., Weijnen, M.P., Kunst, A.E., 2001. The impact of heat waves and cold spells on mortality rates in the Dutch population. *Environmental Health Perspectives* 109 (5), 463-470.
- IPCC, 2007. Climate change 2007: the physical science basis. Eds: Solomon, S., Qin, D. and Manning M. Cambridge University Press.
- Katz R.W. and Brown B.G., 1992. Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. *Climatic Change* 21, 289-302.
- Keatinge, W.R., 2003. Deaths in heat waves. *British Medical Journal (BMJ)* 327, 512-513.
- Keatinge, W.R., Donaldson, G.C., Cordioli, E., Martinelli, M., Kunst, A.E., Mackenbach, J.P., Nayha, S. Vuori, I., 2000. Heat related mortality in warm and cold regions of Europe: observational study. *British Medical Journal (BMJ)* 321, pp. 670-673.
- Khaliq, M.N., Gachon, P., St.-Hilaire, A., Ouarda, T.B.M.J., Bobée, B., 2007. Southern Quebec (Canada) summer-season heat spells over the 1941-2000 period: an assessment of observed changes. *Theor. Applied Climatology* 88, 83-101.
- Kharin, V.V., Zwiers, F., 2000. Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *J. of Climate* 13, 3760-3788.
- Kharin, V.V., Zwiers, F., 2005. Estimating extremes in transient climate change simulations. *J. of Climate* 18, 1156-1173.
- Klein Tank, A.M.G. et al., 2002. Daily series of temperature and precipitation observations. *Int. J. Climatology* 22, 1441-1453.
- Klein Tank, A.M.G., Können, G.P., 2003. Trends in daily temperature and precipitation extremes. *J. Climate* 16, 3665-3680.
- KNMI, 2003 (Verbeek, K., ed.). De toestand van het klimaat in Nederland 2003. KNMI-rapport. De Bilt.
- KNMI, 2006a. Klimaat in de 21^e eeuw. Vier scenario's voor Nederland. KNMI-brochure.
- Te downloaden van:
http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/samenvatting/KNMI_NL_LR.pdf
- Laatst bezocht: juni 2007.
- KNMI, 2006b. Climate change scenarios 2006 for the Netherlands. Scientific report WR 2006-01. Te downloaden van:
<http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/achtergrond/WR23mei2006.pdf>
- Laatst bezocht: juni 2007.
- Kovats, R.S., Kristie, L.E., 2006. Heatwaves and public health in Europe. *The European Journal of Public Health* 16(6), 592-599.

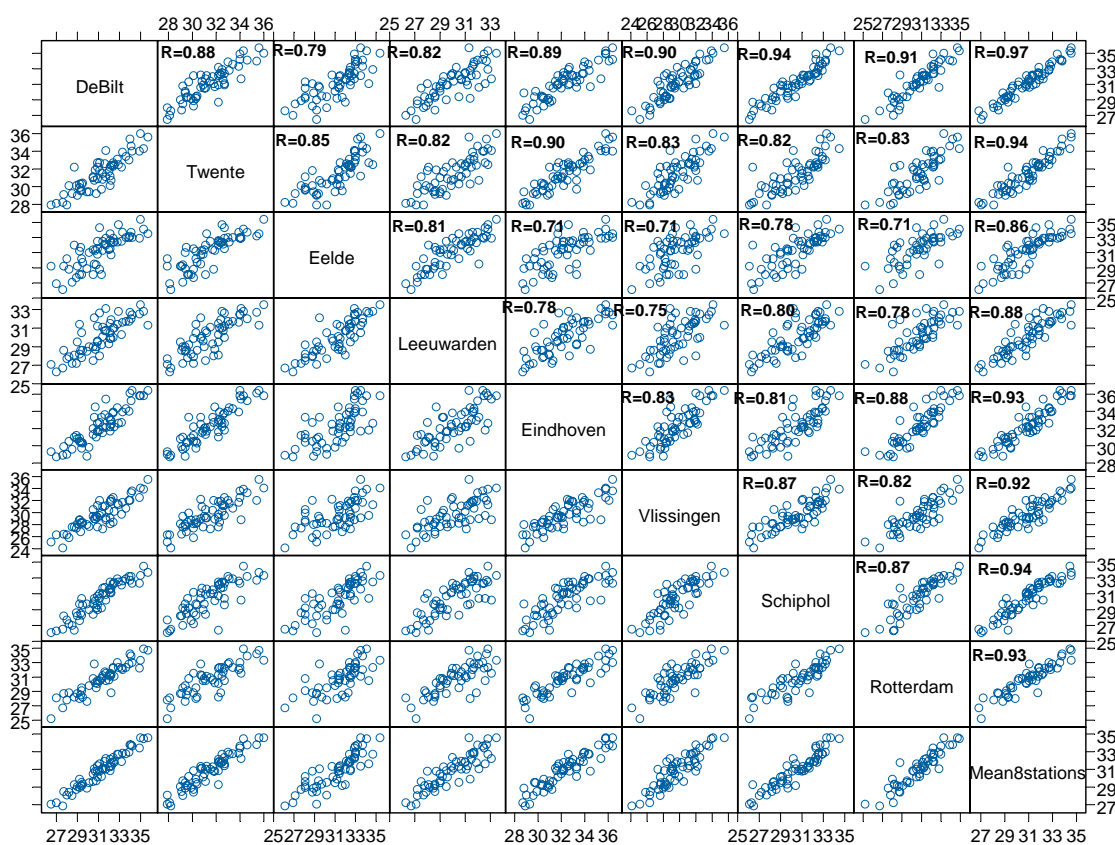
- Laaidi, M., Laaidi, K., Besancenot, J., 2006. Temperature-related mortality in France, a comparison between regions with different climates from the perspective of global warming. *Int. Journal of Biometeorology* 51, 145-153.
- Lenderink, G., Ulden, A. van, Hurk, B. van den, Keller, F., 2007. A study on combining global and regional climate model results for generating climate scenarios of temperature and precipitation for the Netherlands. *Clim. Dynamics* 29, 157-176.
- Meehl, G.A., Tebaldi, C., 2004. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science* 305(5686), 994-997.
- Michelozzi, P., De Sario, M., Accetta, G., Donato, F. de, Kirchmayer, U., D'Ovidio, M., Perucci, C.A., 2006. Temperature and summer mortality: geographical and temporal variations in four Italian cities. *J. Epidemiol. Community Health* 60, 417-423.
- MNP, 2005. Effecten van klimaatverandering in Nederland. Milieu- en Natuurplanbureau, rapport 773001034. Bilthoven.
- Moberg, A. et al., 2006. Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901-2000. *J. of Geophysical Research* 111, D22106.
- Nillesen, E.E.M., Van Ierland, E.C. (eds.), 2006. Climate adaptation in the Netherlands. WAB report 500102 003. Bilthoven.
- Parey, S., Malek, F., Laurent, C., Dacunha-Castelle, D., 2007. Trends and climate evolution: statistical approach for very high temperatures in France. *Climate Change* 81 (3-4), 331 e.v.
- PCCC, 2007. De staat van het klimaat 2006. Actueel onderzoek en beleid nader verklaard (Platform Communication on Climate Change). Uitgave ECN, KNMI, MNP, NWO, VU, UU en WUR. Onder redactie van R. van Dorland, KNMI.
- Petersen, A.C., Janssen, P.H.M., Van der Sluijs, J.P., Risbey, J.S., Ravetz, J.R., 2003. RIVM/MNP guidance for uncertainty assessment and communication. Uitgave RIVM. Bilthoven.
- RIVM, VWS, Het Nederlandse Rode Kruis, hier, 2006. Conferentieverslag 'De hitte de baas. Toename van hittegolfrisico's en het antwoord van de zorgsector.' Bilthoven.
- Schär, C., Jendritzky, G., 2004. Hot news from summer 2003. *Nature* 432, 559-560.
- Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heat waves. *Nature* 427, 332-336.
- Stedman, J.R., 2004. The predicted number of air pollution related deaths in the UK during the August 2003 heatwave. *Atm. Environment* 38, 1087-1090.
- Tang, J.M., 2003. Veranderingen in klimaatextremen en weergeerelateerde indicatoren in Nederland. KNMI-RIVM-TU Delft-stagerapport. Bilthoven.

- Van Oldenborgh, G.J., van Ulden, A., 2003. On the relationship between global warming, local warming in the Netherlands and changes in circulation in the 20th century. *Int. J. of Climatology* 23 (14), 1711-1724.
- Visser, H., 2002. Detectie van milieuveranderingen. Een toepassing van Structurele Tijdreeksmodellen en het Kalmanfilter. MNP/RIVM-rapport 550002002.
- Te downloaden van: <http://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/550002002.pdf> . Laatste bezocht: juni 2007.
- Visser, H. 2004a. Estimation and detection of flexible trends. *Atm. Environment* 38, 4135-4145.
- Visser, H., 2004b. Description of the TrendSpotter software. Intern RIVM Memo IMP-007/2004. Bilthoven.
- Visser, H., 2005. The significance of climate change in the Netherlands. An analysis of historical and future trends (1901-2020). RIVM/MNP report 550002007.
- Te downloaden van:
http://www.mnp.nl/en/publications/2005/The_significance_of_climate_change_in_the_Netherlands.html . Laatste bezocht: juni 2007.
- Visser, H., Molenaar, J., 1995. Trend estimation and regression analysis in climatological time series: an application of structural time series models and the Kalman filter. *Journal of Climate* 8(5), 969-979.
- Visser, H., Petersen, A.C., 2007. The likelihood of holding outdoor skating marathons in the Netherlands as a policy-relevant indicator of climate change. To appear in *Climatic Change*.
- Wijngaard, J.B., Klein Tank, A.M.G., Können, G.P., 2003. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *Int. J. Climatology* 23, 679-692.

Appendix A Homogeniteit temperatuurreeksen

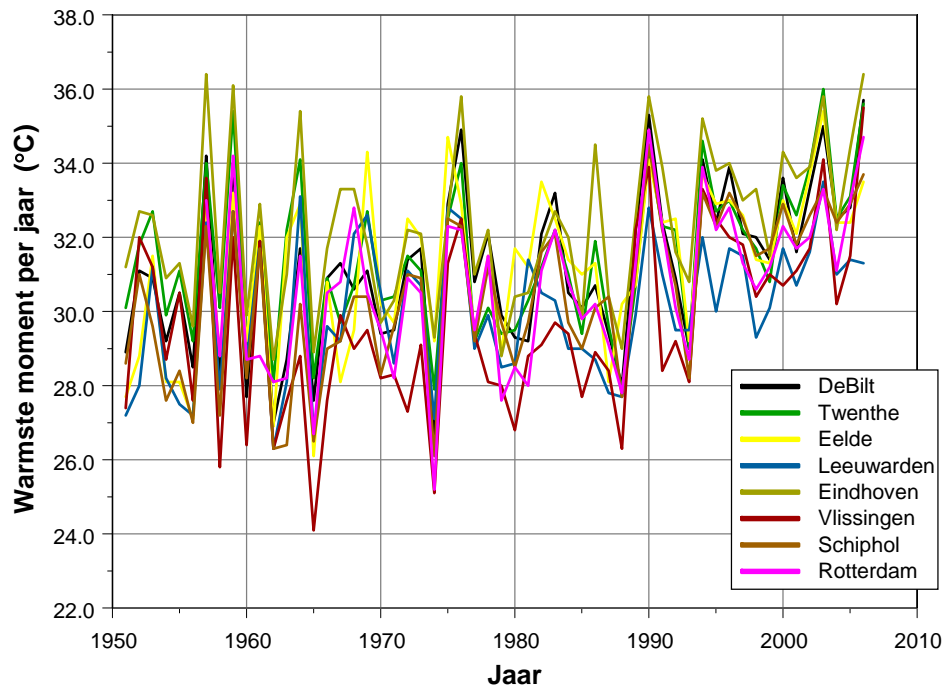
A.1 Homogeniteit maximumtemperaturen per jaar

Om de homogeniteit van lange meetreeksen voor de hitte-indicator TXX te onderzoeken, zijn voor een negental stations in Nederland TX-reeksen gedownload van de ECA-KNMI-website. TXX-waarden zijn berekend over de periode 1951-2006 en grafisch weergegeven in Figuur A.1. Opgemerkt zij dat een warmste moment, gemeten in De Bilt, niet op dezelfde dag hoeft te vallen als bijvoorbeeld in Leeuwarden of Eindhoven. In de figuur zijn ook de correlaties per scatterplot weergegeven. Verder, het station Den Helder/De Kooy is niet weergegeven wegens sterke inhomogeniteiten (station verplaatst in 1972).



Figuur A.1 Scatterplotmatrix voor de grootte TXX (het warmste moment per jaar), gemeten op acht stations. De laatste kolom en rij geeft de reeks die ontstaat door middelen van de acht stations. Meetperiode is 1951-2006 ($N = 56$).

De acht meetreeksen zijn in Figuur A.2 geplot in de tijd. In de hoofdtekst zijn in Figuur 3.2 evenzo de metingen in De Bilt geplot, samen met de gemiddelde reeks over alle acht stations.



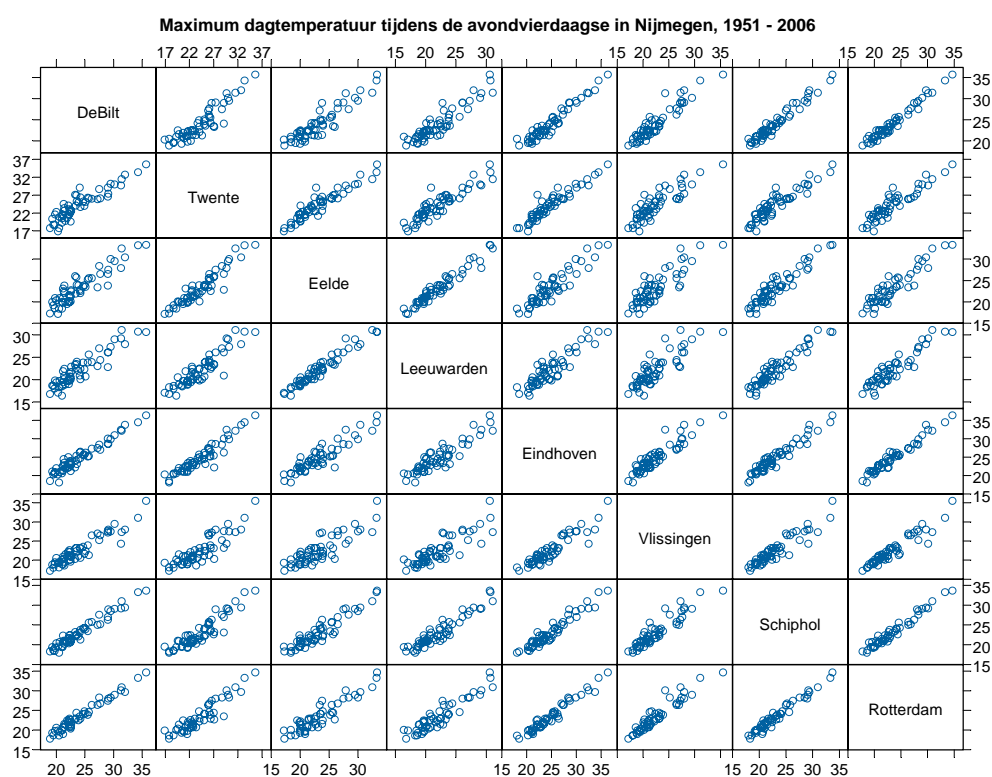
Figuur A.2 TXX voor acht stations over de periode 1951-2006.

De correlaties in Figuur A.1 vertonen een vrij grote range. Voor station De Bilt is de range [0.79, 0.94]. Hoogste correlatie voor De Bilt is met station Schiphol ($R= 0.94$). Verder heeft station De Bilt de hoogste correlatie met de gemiddelde reeks over alle acht stations: $R= 0.97$. De laagste correlaties worden gevonden voor station Eelde (bij Groningen): [0.71 – 0.85]. Overigens zijn verschillen tussen stations voor een belangrijk deel te verklaren uit de verschillen in geografische ligging (aan de kust of aan de oostgrens?) of lokale omstandigheden (open liggend of beschut?). Het andere deel hangt samen met meetfouten.

De Figuren 3.2 en A.2 laten zien dat de trends in alle meetreeksen gelijk zijn: licht stijgend over de periode 1951-1990 en een versnelling daarna. Geconcludeerd wordt dat de metingen in station De Bilt een homogene reeks vormen en tevens een goede TXX-proxy zijn voor Midden- en Noord-Nederland.

A.2 Homogeniteit maximum temperaturen Vierdaagse van Nijmegen

Analoog aan Figuur A.1 is in Figuur A.3 een scatterplotmatrix gegeven voor dezelfde acht stations voor de grootheid TXXV (de maximum dagtemperatuur tijdens de Vierdaagse van Nijmegen). De bijbehorende correlatiematrix is gegeven in het figuuronderschrift. Wederom

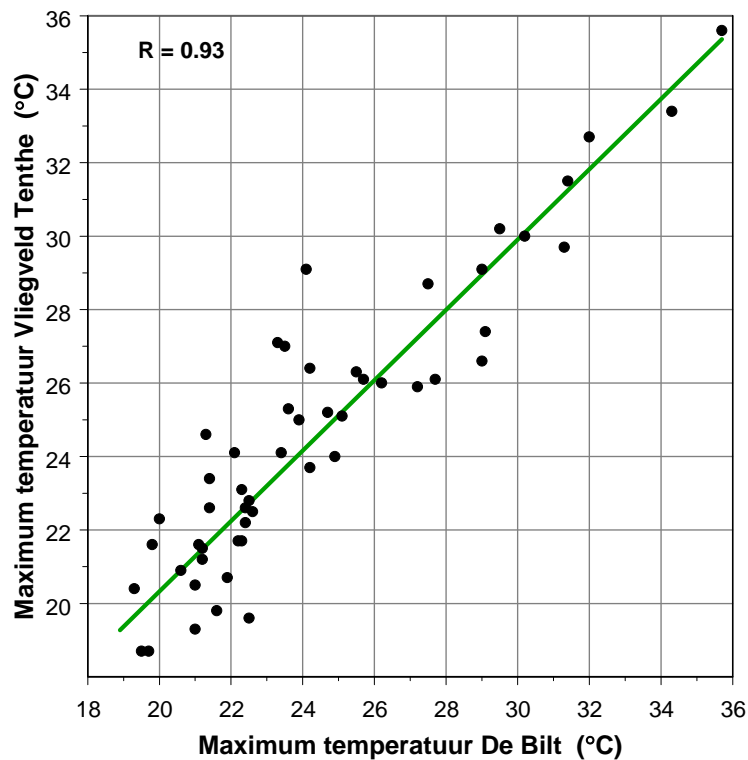


Figuur A.3 Scatterplotmatrix voor TXXV (de hoogst gemeten temperatuur tijdens de Vierdaagse van Nijmegen, vallend in de derde week van juli). Periode is 1951-2006 (N= 56). De bijbehorende correlatiematrix is hieronder gegeven.

	DeBilt	Twente	Eelde	Leeuwarden	Eindhoven	Vlissingen	Schiphol	DeKooy	Rotterdam
DeBilt	1.00	0.93	0.92	0.92	0.97	0.94	0.98	0.92	0.98
Twente	0.93	1.00	0.94	0.92	0.95	0.88	0.93	0.88	0.93
Eelde	0.92	0.94	1.00	0.97	0.92	0.86	0.94	0.94	0.93
Leeuwarden	0.92	0.92	0.97	1.00	0.92	0.85	0.95	0.95	0.93
Eindhoven	0.97	0.95	0.92	0.92	1.00	0.93	0.97	0.91	0.98
Vlissingen	0.94	0.88	0.86	0.85	0.93	1.00	0.93	0.86	0.95
Schiphol	0.98	0.93	0.94	0.95	0.97	0.93	1.00	0.95	0.98
DeKooy	0.92	0.88	0.94	0.95	0.91	0.86	0.94	1.00	0.92
Rotterdam	0.98	0.93	0.93	0.93	0.98	0.95	0.98	0.92	1.00

wordt geconcludeerd dat de metingen van station De Bilt een goede keuze zijn als indicator voor TXXV. Belangrijk hierbij is dat de temperatuur in De Bilt niet hetzelfde is als de temperatuur langs de route van de Vierdaagse, maar dat de langjarige trend in deze maxima wel (vrijwel) gelijk is.

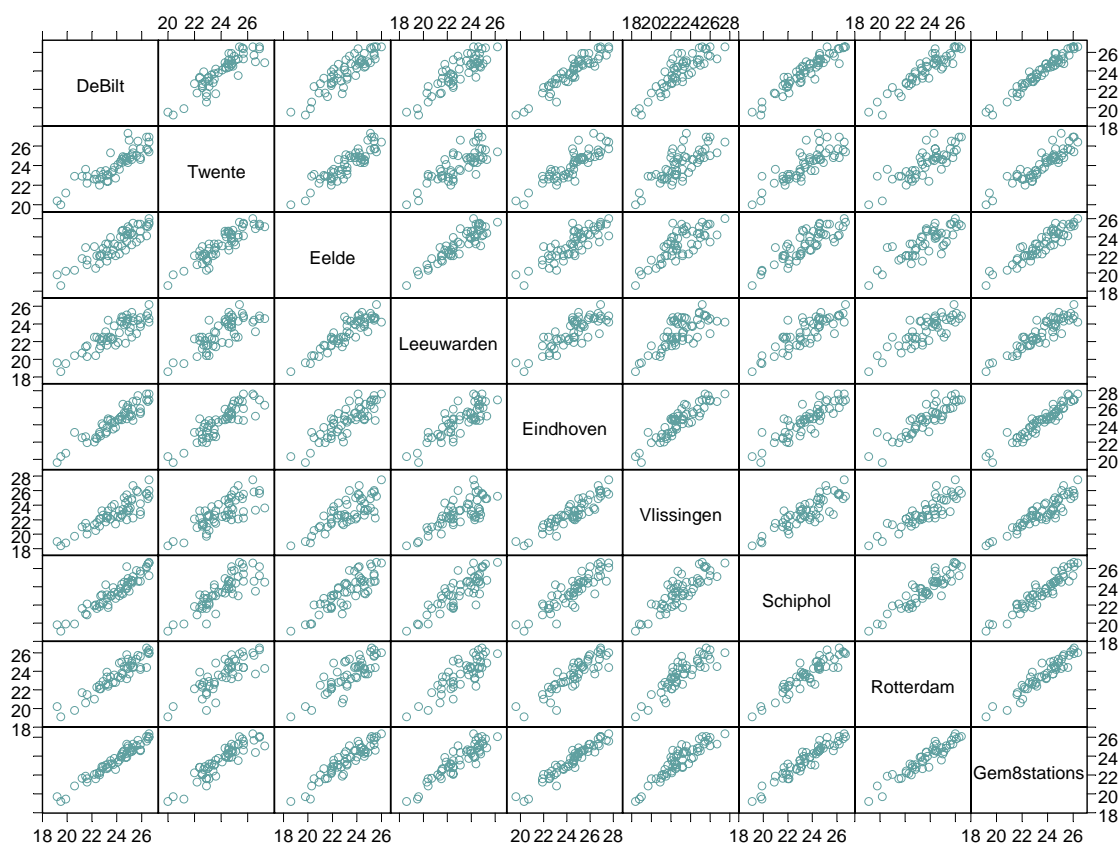
Dit aspect is apart bekeken in Figuur A.4 waarin TXXV-waarden voor De Bilt vergeleken zijn met die voor vliegveld Twenthe, een veel oostelijker gelegen station. De figuur laat zien dat er weliswaar enige scatter is, maar dat de zeer hoge temperaturen vrijwel identiek zijn.



Figuur A.4 Scatterplot voor TXXV-waarden van De Bilt (x-as) en vliegveld Twenthe (y-as), over de periode 1951-2006 (N= 56).

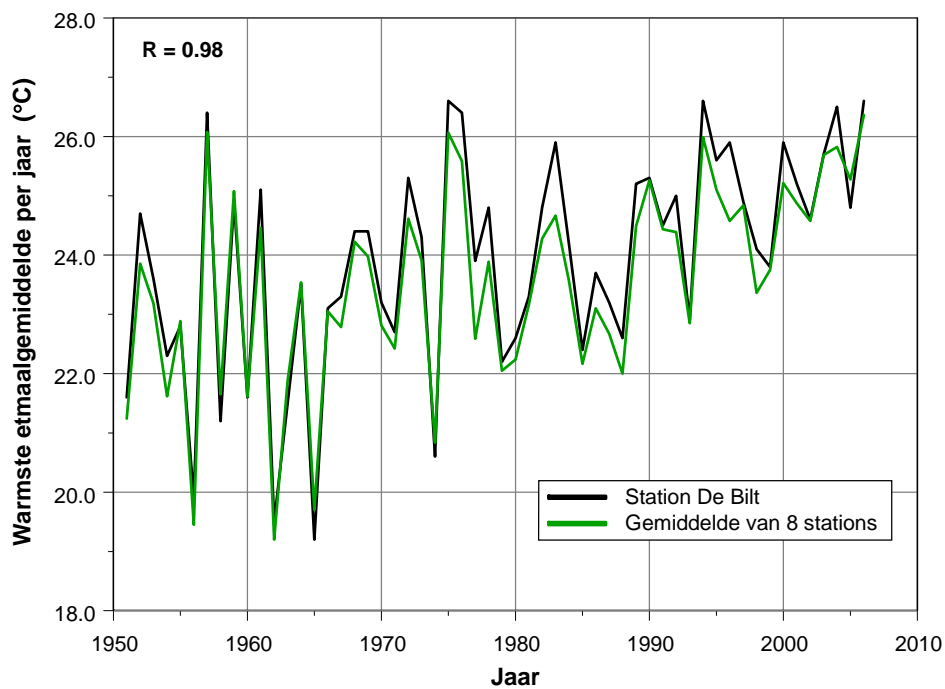
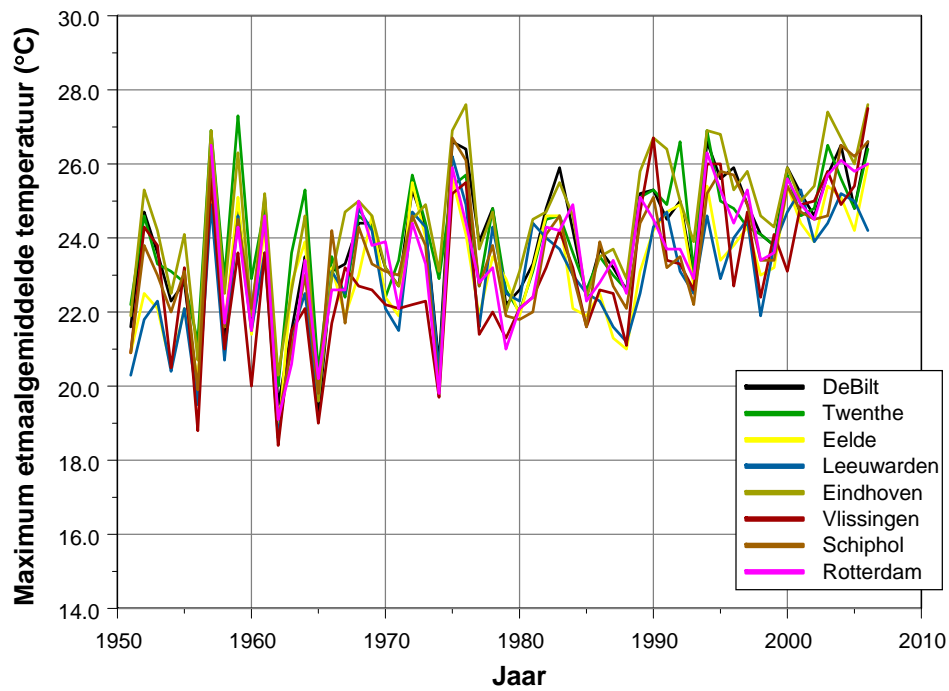
A.3 Homogeniteit etmaalgemiddeldes per jaar

Analoog aan Figuur A.1 is in Figuur A.5 een scatterplotmatrix gegeven voor dezelfde acht stations voor de grootheid TGX (de maximum etmaalgemiddelde temperatuur per jaar). De bijbehorende correlatiematrix is gegeven in het figuuronderschrift. Reeksen in de tijd zijn geplot in Figuur A.6. Conclusies zijn gelijk aan die in Appendix A.1.



Figuur A.5 Scatterplotmatrix voor TGX (maximum etmaalgemiddelde temperatuur per jaar). Periode is 1951-2006 (N= 56). Bijbehorende correlatiematrix is:

	DeBilt	Twente	Eelde	Leeuwarden	Eindhoven	Vlissingen	Schiphol	Rotterdam
DeBilt	1.00	0.87	0.89	0.87	0.93	0.86	0.94	0.93
Twente	0.87	1.00	0.90	0.78	0.88	0.77	0.82	0.81
Eelde	0.89	0.90	1.00	0.89	0.84	0.77	0.84	0.82
Leeuwarden	0.87	0.78	0.89	1.00	0.83	0.75	0.83	0.82
Eindhoven	0.93	0.88	0.84	0.83	1.00	0.91	0.86	0.88
Vlissingen	0.86	0.77	0.77	0.75	0.91	1.00	0.85	0.87
Schiphol	0.94	0.82	0.84	0.83	0.86	0.85	1.00	0.92
Rotterdam	0.93	0.81	0.82	0.82	0.88	0.87	0.92	1.00
Gem8stations	0.97	0.91	0.93	0.90	0.96	0.91	0.95	0.95



Figuur A.6 TGX-waarden over de periode 1951-2006. De bovenste grafiek geeft de individuele stations. De onderste grafiek geeft de TGX-waarden van De Bilt en het gemiddelde van de acht stations per jaar.