



Effectieve temperatuur en graaddagen

Klimatologie en
klimaatscenario's

Nander Wever

KNMI publicatie 219

De Bilt, 2008

P.O. Box Postbus 201
3732 GK De Bilt
Wilhelminalaan 10
Telephone +31 302206911
Telefax +31 302210407

UDC :

ISSN:

ISBN:





Effectieve temperatuur en graaddagen Klimatologie en klimaatscenario's

Nander Wever

Indeling

Samenvatting *vii*

1	Inleiding tot het onderzoek	1	5	Conclusies en nawoord	23
1.1	Definities	1	5.1	Conclusies	23
1.2	Onderzoeksvragen	2	5.2	Nawoord	24
1.3	Veranderingen in wintertemperatuur in de KNMI '06 klimaatscenario's	2	6	Referenties	25
2	Gebruikte meetgegevens	3	Appendix A:		
3	Effectieve temperatuur	5	De KNMI '06 Klimaatscenario's	26	
3.1	Analyse van de periode 1905-2007	5	Appendix B:		
3.2	Analyse van de periode 1976-2005 ten opzichte van de periode 1905-1975	9	Transformatie van tijdreeksen	29	
3.3	Verlengen historische referentieperiode	10	Appendix C:		
3.3.1	<i>Methode 2: Het gelijk maken van het gemiddelde</i>	11	De Gumbel- en GEV-verdeling	30	
3.3.2	<i>Methode 3: Het verwijderen van de trend</i>	11	Appendix D:		
3.4	Analyse van de effectieve temperatuur rond 2030	13	De 3 parameter-gammaverdeling en de normale verdeling	32	
4	Graaddagen	17	Appendix E:		
4.1	Analyse van de periode 1905-2007	17	De bootstrapmethode	32	
4.2	Analyse van de periode 1976-2005 ten opzichte van de periode 1905-1975	17	Appendix F:		
4.3	Verlengen historische referentieperiode	18	Metadata voor station De Bilt	33	
4.4	Analyse van het aantal graaddagen rond 2030	20			

Samenvatting

In dit rapport is door het KNMI onderzoek gedaan naar het voorkomen van effectieve temperatuur (gedefinieerd aan de hand van daggemiddelde temperatuur en daggemiddelde windsnelheid) en graaddagen in het verleden. Ook is onderzocht hoe deze variabelen rond 2030 zullen veranderen op basis van de vier KNMI'06 klimaatscenario's. Variabelen zoals deze worden onder meer in de gasindustrie gebruikt voor de planning van leveringscapaciteit en voorraden.

Voor het onderzoek zijn de temperatuur- en windgegevens van het station De Bilt gebruikt. Om de betrouwbaarheid van de statistische analyses te vergroten is de beschikbare reeks over de periode 1904-2007 gebruikt. Omdat in de periode vanaf ongeveer 1975 sprake is van een significante opwarmende trend in gemiddelde wintertemperatuur, is de temperatuurreeks 1904-2007 aangepast, zodat deze past bij het klimaat in de periode 1976-2005. Deze laatstgenoemde periode is ook de referentieperiode die aan de KNMI'06 klimaatscenario's ten grondslag ligt. Uit de aangepaste temperatuurreeks is afgeleid dat gemiddeld eens per 37 jaar op één of meer dagen in de winter de effectieve temperatuur lager dan $-16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ komt. De term "één of meer dagen" wordt gebruikt om aan te geven dat er een clustering van koude dagen plaats kan vinden. Dat wil zeggen dat binnen een extreem koude periode er meer dagen kunnen voorkomen met een zeer lage effectieve temperatuur.

Het voorkomen van lage effectieve temperaturen is ook onderzocht voor de toekomstige periodes rond 2020 en 2030 onder de vier KNMI'06 klimaatscenario's. Door de verwachte opwarming wordt in alle vier de scenario's de herhalingstijd van lage effectieve temperaturen groter. Zo varieert rond 2030 de herhalingstijd van winterseizoenen waarin op één of meer dagen de effectieve temperatuur lager dan $-16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ wordt van 54 jaar in het G scenario tot 125 jaar in het W+ scenario.

Tevens is gekeken naar de verandering in aantal graaddagen rond 2020 en 2030 onder vier KNMI'06 klimaatscenario's. De mediaan¹ van het aantal graaddagen in de aangepaste

temperatuurreeks (die dus past bij het klimaat 1976-2005) is 2252. Door de verwachte opwarming wordt in alle vier KNMI'06 klimaatscenario's de mediaan van het aantal graaddagen per winter kleiner. Voor rond het jaar 2030 varieert de mediaan van 2141 graaddagen in het G scenario (afname van 111 graaddagen), tot 1960 graaddagen in het W+ scenario (afname van 292 graaddagen).

In het nawoord wordt een vervolgonderzoek naar de veranderingen van extremen in effectieve temperatuur en graaddagen met behulp van een ensemble van klimaatmodellen voorgesteld

¹ De mediaan geeft het midden van de verdeling aan. Precies de helft van de winters heeft een kleiner aantal graaddagen en de andere helft heeft een groter aantal graaddagen dan de mediaan.

1. Inleiding tot het onderzoek

In 2005 heeft het KNMI een verkenning uitgevoerd naar de huidige en toekomstige waarden van een aantal temperatuurindicatoren die relevant zijn voor de gasproductie en -distributie (Bessembinder, 2005). Het ging hier om een analyse van waarnemingen om de herhalingstijd van effectieve temperaturen lager dan -16.5 °C en de frequentieverdeling van graaddagen in het winterhalfjaar te bepalen. Ook is het aantal zomerse dagen met een gemiddelde of maximum temperatuur boven 25 °C bepaald. Daarnaast is de RACMO-simulatie¹ uit het PRUDENCE-project² ook geanalyseerd, om een eerste indicatie te krijgen van de mogelijke veranderingen van deze grootheden in de komende decennia (specifiek voor rond 2030). In deze studie werd een verandering in de herhalingstijd voor effectieve temperaturen lager dan -16.5 °C gevonden van 18 jaar voor de periode 1906-1990 tot 37 jaar voor rond 2030³. Deze verandering was niet significant, omdat de natuurlijke variabiliteit van deze extreme omstandigheden groot is ten opzichte van de verwachte trend ten gevolge van een versterkt broeikas effect tot 2030. Op basis van dezelfde simulatie werd een afname van het gemiddelde aantal graaddagen per winterhalfjaar gevonden van 2389 graaddagen voor de periode 1961-1990 tot 2186 voor rond 2030. Deze afname van 203 graaddagen bleek net significant.

In het voorjaar van 2006 heeft het KNMI nieuwe klimaatscenario's gepubliceerd. Deze klimaatscenario's zijn gebaseerd op een analyse van een grote groep mondiale en regionale klimaatmodellen. Deze aanvullende informatie is aanleiding om de eerste verkenning van veranderende wintertemperaturen nogmaals uit te voeren, nu in het licht van deze KNMI'06 klimaatscenario's.

1.1 Definities

De gasvraag wordt deels beïnvloed door de temperatuur. Daarnaast is er nog invloed van de windsnelheid en mogelijk ook van andere factoren zoals de zonnestraling. Op dagen met meer wind is de gasvraag groter. Om het gecombineerde effect van wind en temperatuur uit te drukken, kan de zogenaamde effectieve temperatuur (T_{eff}) gedefinieerd worden. Een eenvoudige versie hiervan is:

$$T_{eff} = T_{gem} - \frac{2}{3} u_{gem} \quad (1)$$

Met:

T_{eff} : de effectieve temperatuur (°C)

T_{gem} : de daggemiddelde temperatuur (°C)

u_{gem} : de daggemiddelde windsnelheid (m/s)

Voor dit rapport gaan we uit van de effectieve temperatuur in De Bilt.

¹ RACMO: Regional Atmospheric Climate Model. Het regionale klimaatmodel van het KNMI.

² PRUDENCE: Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects. Europees project waarin diverse klimaatmodellen zijn gebruikt om veranderingen in het Europese klimaat te bestuderen.

³ In Bessembinder (2005) zijn de herhalingstijden uitgerekend voor drempelwaarde -17.0 °C . De hier genoemde getallen zijn herberekend voor drempelwaarde -16.5 °C .

Het aantal graaddagen in een winterhalfjaar is een maat die gebruikt wordt om aan te geven hoe streng een winter is. Deze maat correleert sterk met de totale gasafname in het winterhalfjaar. Graaddagen zijn gedefinieerd als de som over alle dagen in het winterhalfjaar (1 oktober tot en met 31 maart) met een daggemiddelde temperatuur (T_{gem}) kleiner dan 18 °C:

$$D = \sum \max[(18 - T_{gem}), 0] \quad (2)$$

Met:
 D: het aantal graaddagen (°C dag).
 T_{gem} : de daggemiddelde temperatuur (°C).

Hierbij is 18 °C gekozen als de grens die bepaalt of er gas gebruikt wordt voor verwarming. De aanname is dat bij daggemiddelde temperaturen beneden 18 °C wel gas gebruikt wordt voor verwarming en daarboven weinig tot geen. Een groter aantal graaddagen duidt dus op een strengere winter, terwijl een kleiner aantal graaddagen duidt op een zachte winter. Maar aan het aantal graaddagen kan niet worden afgemeten of bijvoorbeeld een strenge winter gekenmerkt wordt door een langere periode met matige koude, of door een kortere periode met extreme koude. In de periode van 1-10-1904 tot en met 31-3-2007 is de gemiddelde dagtemperatuur in de winterhalfjaren (oktober tot en met maart) op slechts vier dagen boven 18.0 °C uitgekomen (0.02 %). Dit houdt in dat het aantal graaddagen zeer nauw verband houdt met de gemiddelde wintertemperatuur. Een stijging van de gemiddelde wintertemperatuur met 1.0 °C, geeft een afname in graaddagen van ongeveer 182 (aantal dagen in winterhalfjaar).

Voor de planning van de gasvoorraden wordt gebruik gemaakt van het aantal graaddagen in De Bilt.

1.2 Onderzoeksvragen

De vragen, die in dit rapport aan de orde komen zijn:

1. Is de herhalingstijd van zeer lage jaarminima van effectieve temperatuur veranderd in de periode 1976-2005 ten opzichte van de periode 1905-1975?
2. Wat is een betrouwbare schatting van de herhalingstijd van extreem lage jaarminima van effectieve temperatuur in de referentieperiode 1976-2005?

3. Hoe verandert de herhalingstijd van zeer lage jaarminima van effectieve temperatuur rond 2030 volgens de vier KNMI '06 klimaatscenario's?
4. Is de frequentieverdeling van het aantal graaddagen veranderd in de periode 1976-2005 ten opzichte van de periode 1905-1975?
5. Wat is een betrouwbare schatting van het aantal graaddagen in de referentieperiode 1976-2005?
6. Hoe verandert de frequentieverdeling van het aantal graaddagen rond 2030 volgens de vier KNMI '06 klimaatscenario's?

1.3 Veranderingen in wintertemperatuur in de 4 KNMI'06 klimaatscenario's

In de KNMI'06 klimaatscenario's wordt op basis van de veranderingen in de gemiddelde wintertemperatuur en de 10% en 90% kwantilen van de dagwaarden bepaald hoeveel de koudste winterdag en de warmste winterdag per jaar veranderen. De opwarming in de scenario's is asymmetrisch. Dat wil zeggen dat de koudste winterdagen sterker opwarmen dan de gemiddelde winterdagen en dat de zachtste winterdagen minder sterk opwarmen dan het gemiddelde. De veranderingen van de gemiddelde dagtemperatuur en de koudste winterdag in de 4 KNMI'06 klimaatscenario's staan weergegeven in tabel 1.

De KNMI'06 klimaatscenario's doen geen uitspraken over het karakter van de verandering van de winters. Het enige onderscheid wat op dit moment gemaakt wordt is de mogelijkheid dat stromingspatronen gaan veranderen (G+ en W+), waardoor in de winter westenwind vaker gaat optreden dan nu het geval is. Als dat het geval is, dan neemt de frequentie van oostenwinden (die in de winter relatief koud weer brengen) af. In de andere twee scenario's (G en W) blijft de frequentie westen- en oostenwind gelijk. Impliciet worden oostenwinden dus sneller warmer dan westenwinden. Dit wordt geïllustreerd in tabel 1 doordat de opwarming op de koudste dag in alle scenario's groter is dan de opwarming van de gemiddelde temperatuur.

	2020				2030			
	G	G+	W	W+	G	G+	W	W+
Gemiddelde (T_{gem})	0.5	0.6	0.9	1.2	0.6	0.7	1.2	1.5
Koudste dag (bij benadering Q_{01})	0.5	0.8	1.1	1.5	0.7	1.0	1.4	1.9

Tabel 1: Veranderingen in gemiddelde wintertemperatuur (Q_{50}) en het 99%-kwantiel (Q_{99}).

2. Gebruikte meetgegevens

Voor de berekening van effectieve temperaturen en graaddagen wordt gebruik gemaakt van de gemeten temperatuur- en windreeks van De Bilt. Vooraf aan het gebruik van een meetreeks moet de reeks altijd gecontroleerd worden op zogenaamde inhomogeniteiten. Veranderingen in meetopstelling, meetmethode of (de omgeving van) de meetlocatie kunnen namelijk voor inhomogeniteiten zorgen, zoals bijvoorbeeld sprongen in de meetreeksen. Figuur 1 laat de daggemiddelde temperatuur voor de Bilt zien van 1 januari 1901 tot en met 30 juni 2007.

Figuur 2 laat de meetreeks voor windsnelheid zien van 1 januari 1904 tot en met 30 juni 2007. Daggemiddelde windsnelheden in de Bilt zijn beschikbaar vanaf 1 januari 1904. Voor de windmetingen in De Bilt bestaat geen gehomogeniseerde reeks. Zo is er bijvoorbeeld een duidelijke sprong waarneembaar rond 1960. Deze wordt veroorzaakt door een verandering van meethoogte (zie Appendix F). Metingen na 1961 zijn gecorrigeerd naar de WMO (Wereld Meteorologische Organisatie) standaard meethoogte van 10 m (KNMI, 2001).

In Bessembinder (2005) is hiervoor gecorrigeerd door de frequentieverdeling van de metingen voor 1961 te vergelijken met de frequentieverdeling na 1961. Vervolgens kon de verdeling van voor 1961 gecorrigeerd worden naar de verdeling na 1961 door voor verschillende percentielwaarden een correctiefactor te bepalen (Bessembinder, 2005). In dit rapport wordt voor een andere methode gekozen, gebaseerd op fysische principes. Voordeel van deze methode is dat alleen veranderingen in meethoogte beschouwd worden, waarbij eventuele variaties als gevolg van veranderingen in het windklimaat behouden blijven.

De wind ondervindt wrijving van het aardoppervlak. Die wrijving zorgt ervoor dat de luchtstroming met name bij het oppervlak wordt afgeremd. Deze afremming is sterker naarmate er hogere en/of grotere objecten (zoals bomen, struiken en gebouwen) op het oppervlak staan en het aardoppervlak dus ruwer is. De ruwheid van het aardoppervlak wordt gekarakteriseerd met behulp van de zogenaamde ruwheidslengte (z_0). De ruwheidslengte neemt toen naarmate de objecten op het aardoppervlak hoger zijn. Zo kan de ruwheidslengte variëren van ongeveer 0.03 m voor grasland tot 1.0 m voor bossen (Wieringa, 1983). Voor het meetveld in de Bilt wordt een ruwheidslengte van 0.4 m aangenomen (Verkaik, 2006).

Gebruik makend van de ruwheidslengte, kan worden uitgerekend hoe de wind wordt afgeremd door het aardoppervlak. Het windprofiel nabij het aardoppervlak kan dan worden beschreven met het zogenaamde logaritmische windprofiel (Garratt, 1992):

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (3)$$

Hierin is:

z : de hoogte boven het aardoppervlak (m).
 z_0 : de ruwheidslengte (m). Voor de Bilt 0.4 m.
 $u(z)$: de windsnelheid op hoogte z (m/s).
 u_* : de wrijvingsnelheid (m/s).
 κ : de von Karman constante, voor atmosferische grenslagen bepaald als 0.4.

Strikt genomen is de formulering in vergelijking 3 alleen geldig voor een neutrale grenslaag. Voor een stabiele of onstabiele opbouw van de grenslaag zijn geen correctiemethoden op historische windreeksen beschikbaar. Wanneer het logaritmisch windprofiel gebruikt wordt om de windsnelheid om te rekenen van een meethoogte naar een referentiehoogte, kan men vergelijking 3 schrijven als:

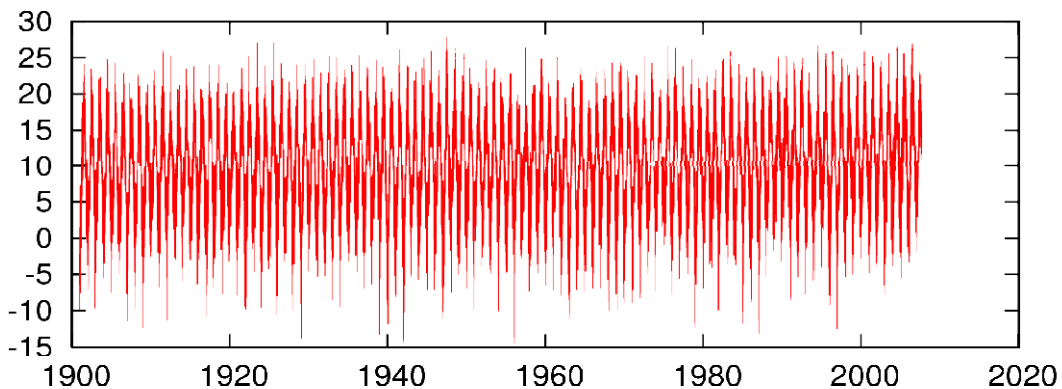
$$u_{ref} = u(z) \frac{\ln(z_{ref}/z_0)}{\ln(z/z_0)} \quad (4)$$

Hierin is:

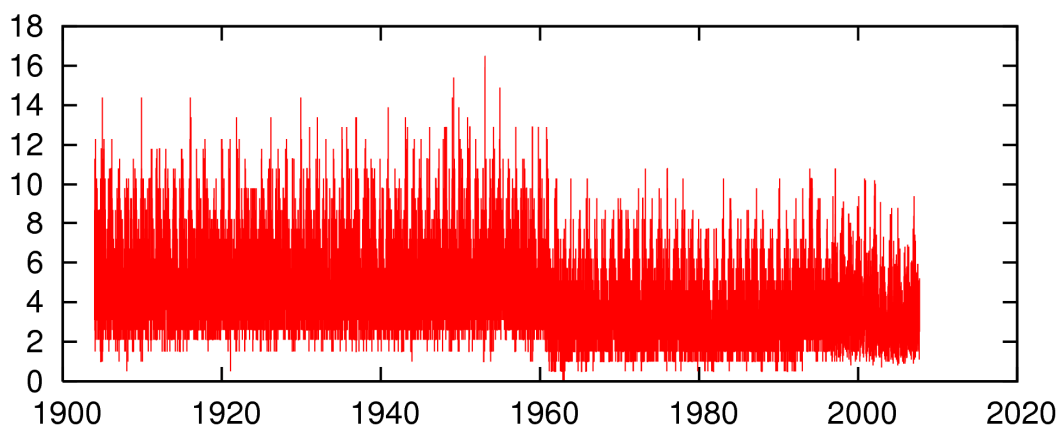
z : de meethoogte.
 $u(z)$: de windsnelheid gemeten op meethoogte z .
 z_{ref} : de referentiehoogte (in dit geval 10 m)
 u_{ref} : de windsnelheid op referentiehoogte.

De correctie die wordt toegepast door vergelijking (4) komt neer op het vermenigvuldigen van de windsnelheid met een constante, die alleen afhankelijk is van de meethoogte. Voor de meetreeks van De Bilt komt dit neer op vermenigvuldiging met een factor 0.706 – 0.711, afhankelijk van de oorspronkelijke meethoogte. In Bessembinder (2005) werden factoren gevonden die varieerden van 0.623 – 0.749, afhankelijk van de percentielen.

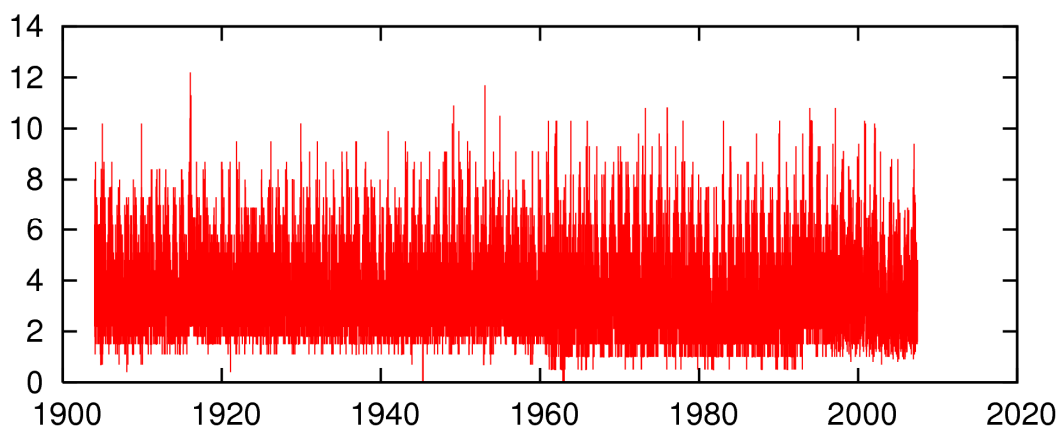
Na correctie van de windsnelheid voor verschillen in meethoogte op basis van vergelijking 4, is een gecorrigeerde windreeks voor de Bilt verkregen (figuur 3). We zien nog een inhomogeniteit in de lage windsnelheden voor de periode 1960-1993. Deze wordt veroorzaakt door veranderingen in de conventie over het afronden van lage gemiddelde windsnelheden op discrete waarden. Het effect op de bepaling van effectieve temperatuur is echter klein, omdat deze inhomogeniteit alleen in de lage windsnelheden (<1 m/s) voorkomt.



Figuur 1: Daggemiddelde temperaturen (°C) voor station De Bilt voor de periode 01-01-1901 tot en met 30-06-2007.



Figuur 2: Daggemiddelde windsnelheid (m/s) voor station De Bilt voor de periode 01-01-1904 tot en met 30-06-2007.



Figuur 3: Dagelijkse gemiddelde windsnelheid (m/s) voor station De Bilt voor de periode 01-01-1904 tot en met 30-06-2007. De reeks is gecorrigeerd voor veranderingen in meethoogte op basis van het logaritmisch windprofiel (vergelijking 4).

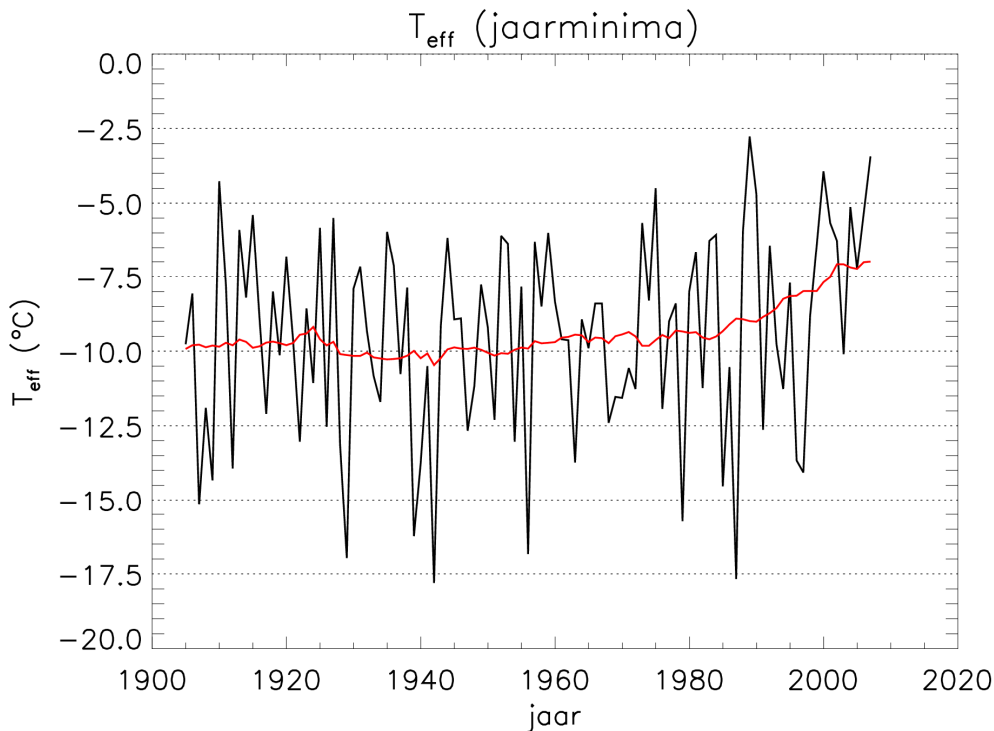
3. Effectieve temperatuur

3.1 Analyse van de periode 1905-2007

Met de gegevens van daggemiddelde temperatuur- en windsnelheid in de Bilt, kunnen we het optreden van lage effectieve temperaturen onderzoeken voor de periode van 1 oktober 1904 tot en met 31 maart 2007 (winterhalfjaar 1905 tot en met winterhalfjaar 2007). Figuur 4 laat de jaarlijkse minima van de effectieve temperatuur zien. Er is een grote jaar-op-jaar variatie zichtbaar, als gevolg van de klimatologische variabiliteit in wind en temperatuur. In de meetreeks bedraagt de totale range van de jaar-op-jaar variaties ongeveer 15 °C. Tegelijkertijd is er wel een stijgende trend waarneembaar vanaf ongeveer 1980.

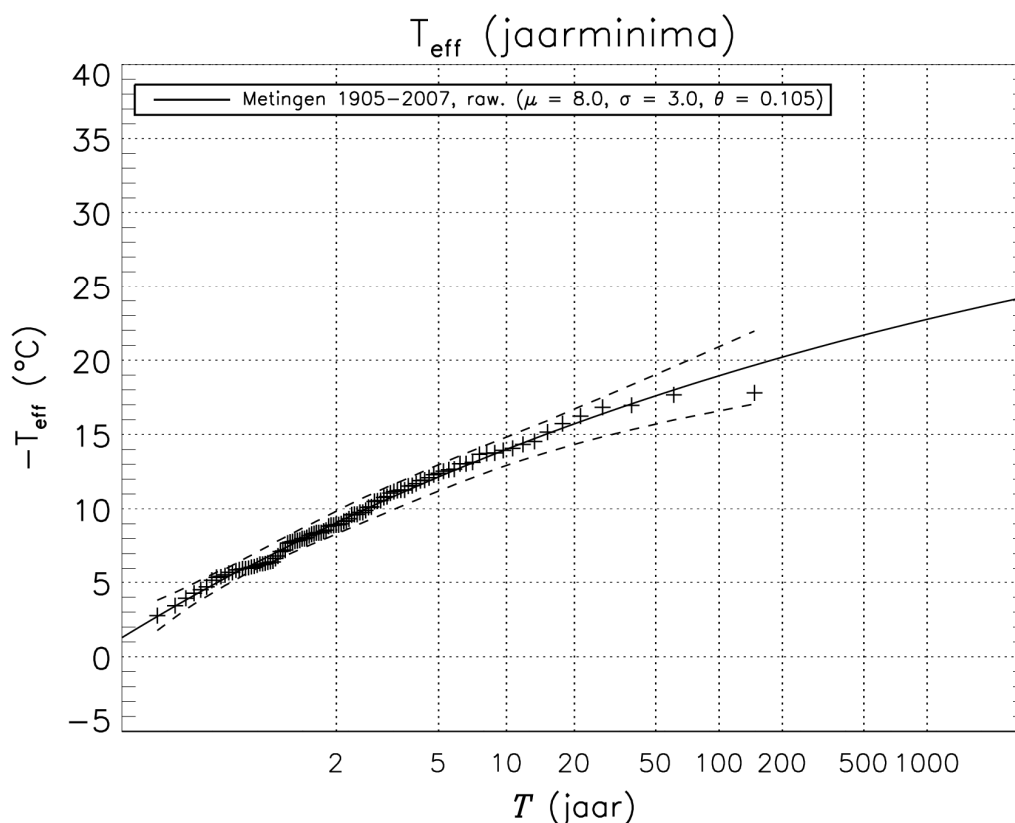
Figuur 5 laat de herhalingsstijden van jaarminima in effectieve temperatuur zien in een Gumbel plot¹. Tevens is in deze figuur door de waarnemingen een Generalized Extreme Value (GEV, zie Appendix C) distributie gefit. Deze figuur geeft informatie over de herhalingsstijd van jaarlijkse minimum effectieve temperaturen. Tabel 2 geeft de frequentieverdeling van dagelijkse effectieve temperaturen weer. In deze tabel is dus niet de frequentie van onderschrijdingen van jaarlijkse minimum effectieve temperatuur weergegeven, maar het aantal dagen in de tijdreeks waarbij een bepaalde lage effectieve temperatuur werd onderschreden.

Meestal komen in een winter koude dagen min of meer aaneengesloten voor. Dit blijkt uit een sterke correlatie van dag-op-dag in de effectieve temperatuur, zoals geïllustreerd door de grafiek van de autocorrelatie (figuur 6). De autocorrelatie is een maat voor de sterkte van de lineaire samenhang tussen de effectieve temperatuur op dag X en een aantal dagen later (X + lag). Te zien is dat in de eerste 8 dagen de correlatiecoëfficiënt groter dan 0.8 is tussen de effectieve temperatuur op die dagen. Het verloop in die periode hangt samen met de persistentie van hoge- en lagedrukgebieden. Daarna gaat de autocorrelatiecoëfficiënt over in het verloop behorend bij de jaarlijkse gang. De autocorrelatie van de jaarlijkse minimum effectieve temperatuur (figuur 7) laat zien dat de er geen correlatie bestaat tussen opeenvolgende jaren. Bovenstaande betekent dat dagen met een lage effectieve temperatuur vaak geclusterd voorkomen, maar dat jaren met lage effectieve temperaturen niet geclusterd (en dus onafhankelijk) zijn. Dit effect komt ook terug bij het vergelijken van figuur 5 en tabel 2. Met name bij minder extreme onderschrijdingen van lage effectieve temperaturen, is de herhalingsstijd in figuur 5 groter dan in tabel 2.



Figuur 4: Jaarlijks laagste effectieve temperatuur (T_{eff}) in de Bilt, gebaseerd op de gecorrigeerde windreeks. In rood is een 30-jaar lopend gemiddelde weergegeven, die met behulp van een autoregressie model (centraal, 1^oe orde) is uitgebreid tot het begin en eind van de meetreeks.

¹ In een Gumbel plot is het assenstelsel dusdanig gekozen, dat de Gumbel verdeling, die een bijzondere vorm van de GEV verdeling is (vormparameter gelijk aan nul), weergegeven wordt als een rechte lijn. Hoe sterker de kromming van de gefitte GEV verdeling, hoe groter de waarde van de vormparameter.



Figuur 5: Gumbelplot van de jaarlijkse minimum effectieve temperatuur over de gehele meetreeks van De Bilt (1905-2007). De plustekens geven de waargenomen jaarlijkse minima van effectieve temperatuur weer. De doorgetrokken lijn geeft de aan de waarnemingen gefitte GEV-verdeling weer (zie Appendix C). De stippellijnen begrenzen het 95% betrouwbaarheidsinterval, bepaald met de bootstrap methode (zie Appendix E), waarbij aan ieder bootstrap sample een GEV-verdeling is gefit. Merk op dat langs de y-as $-T_{eff}$ is uitgezet.

	Percentage dagen	Herhalingstijd (jaren)
< -0.5	24.2	0.023
< -1.5	17.8	0.031
< -2.5	12.8	0.043
< -3.5	9.1	0.060
< -4.5	6.6	0.084
< -5.5	4.8	0.12
< -6.5	3.6	0.15
< -7.5	2.6	0.21
< -8.5	1.7	0.32
< -9.5	1.2	0.47
< -10.5	0.77	0.71
< -11.5	0.48	1.1
< -12.5	0.27	2.0
< -13.5	0.17	3.2
< -14.5	0.096	5.7
< -15.5	0.064	8.6
< -16.5	0.027	21
< -17.5	0.011	51
< -18.5	0.0000	-

Tabel 2: Frequentietabel van het voorkomen van lage effectieve temperaturen, over de periode 01.01.1904-31.06.2007. De relatieve frequentie is gebaseerd op het aantal dagen in het winterhalfjaar (1 oktober tot en met 31 maart). Voor de onderzochte periode zijn dit 18771 dagen. Gemiddeld zitten er in een winterhalfjaar 182.25 dagen. De eerste kolom geeft de grenswaarde van de effectieve temperatuur aan. De tweede kolom geeft aan op hoeveel procent van de dagen in het winterhalfjaar de effectieve temperatuur lager was dan de grenswaarde. De laatste kolom geeft de herhalingstijd die hierbij hoort.

De clustering van dagen met lage effectieve temperatuur wordt ook duidelijk geïllustreerd door het lijstje met de top 25 laagst opgetreden effectieve temperaturen in het verleden. Zoals te zien is, komt een koude periode in een bepaald jaar meerdere keren voor in deze top 25. Zo staan bijvoorbeeld 5 dagen uit de koude periode eind januari 1942 in de top 25.

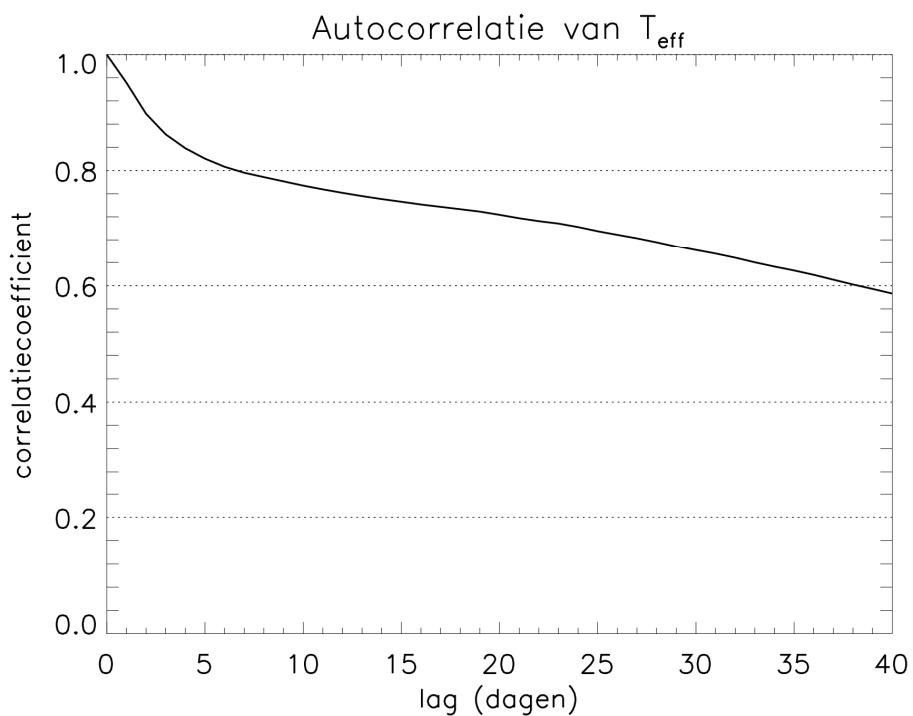
Deze clustering heeft een belangrijk gevolg voor de vraagstelling. Het gaat er namelijk om of het van belang is dat na een dag met een extreem lage effectieve temperatuur er nog zo'n dag zou kunnen volgen. In het ene geval (het maakt niet uit of meerdere keren in korte tijd de ondergrens wordt overschreden) moet gebruik gemaakt worden van de GEV analyse. De GEV analyse geeft de herhalingsperiode van winterseizoenen waarin op één of meer dagen de effectieve temperatuur onder een bepaalde waarde komt. In het andere geval (het is ook van belang of een ondergrens meerdere keren in korte tijd wordt overschreden) moet naar de frequentietabel gekeken worden. De frequentietabel geeft aan hoe vaak (op hoeveel dagen) de effectieve temperatuur beneden een bepaalde waarde komt.

Om dit verschil in opvatting over herhalingsperiode te illustreren, zal iedere keer naast een GEV analyse ook de frequentietabel (zie tabel 2) worden gepresenteerd.

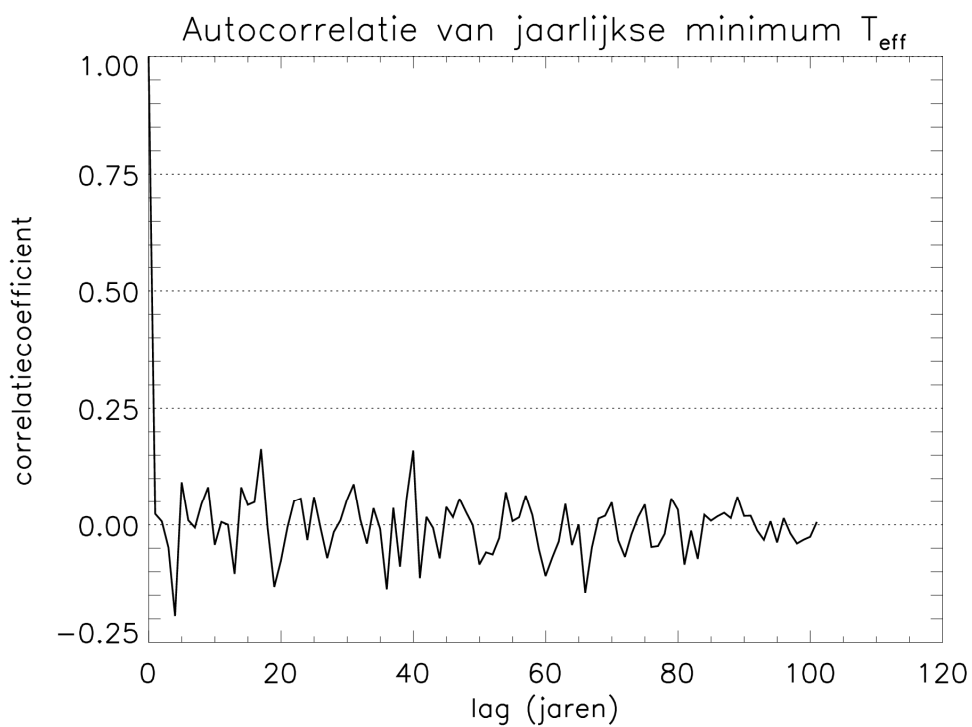
De top-25 laagst opgetreden effectieve temperaturen in de periode 1904-2007.

Dagen uit hetzelfde winterseizoen hebben dezelfde kleur. Dagen in zwart geven aan dat het winterseizoen slechts 1 keer voorkomt in de top 25.

1.	19420127	-17.8
2.	19870114	-17.7
3.	19420126	-17.3
4.	19290211	-17.0
5.	19560201	-16.8
6.	19381219	-16.2
7.	19560216	-16.2
8.	19290214	-15.8
9.	19781231	-15.7
10.	19290212	-15.6
11.	19420121	-15.6
12.	19381220	-15.5
13.	19420122	-15.4
14.	19070123	-15.2
15.	19420120	-14.9
16.	19870115	-14.8
17.	19290215	-14.5
18.	19850107	-14.5
19.	19081229	-14.3
20.	19970102	-14.1
21.	19381218	-14.1
22.	19970101	-14.1
23.	19560131	-14.1
24.	19560223	-14.0
25.	19120203	-13.9



Figuur 6: Dag-op-dag autocorrelatie van de effectieve temperatuur, gebaseerd op dagelijkse waarden.



Figuur 7: Jaar-op-jaar autocorrelatie van de effectieve temperatuur, gebaseerd op jaarlijkse minimumwaarden.

3.2 Analyse van de periode 1976-2005 ten opzichte van de periode 1905-1975

In figuur 4 zien we vanaf ongeveer 1980 een opwarmende trend in de jaarminima van effectieve temperatuur. Om de vraag te beantwoorden hoe de herhalingsstijden van lage effectieve temperaturen in de laatste 30 jaar t.o.v. de rest van de historische meetreeks zijn veranderd, is nog specifiek naar de periode 1976-2005 gekeken. Deze periode is de referentieperiode voor de KNMI '06 klimaatscenario's. Het winterhalfjaar 1975-1976 is het eerste van deze periode, winterhalfjaar 2004-2005 de laatste. In deze periode zitten 30 winterseizoenen.

In figuur 8 wordt de jaarlijkse minimum effectieve temperatuur in de periode 1905-1975 en in de periode 1976-2005 weergegeven. Op basis van de GEV-fit aan de meetreeks 1905-1975 voor de Bilt komen effectieve temperaturen lager dan $-16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ eens per $[19 \dots 168]^1$ jaar één of meer keer per jaar voor. Op basis van de GEV-fit aan de meetreeks 1976-2005 komen effectieve temperaturen lager dan $-16.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ eens per $22 [14 \dots 125]$ jaar één of meer keer per jaar voor. Door de korte reekslengte van de periode 1976-2005 is het 95% betrouwbaarheidsinterval breder dan voor de langere periode 1905-1975. Uit figuur 8 valt af te leiden dat met name de herhalingsstijden van relatief hoge jaarminima van effectieve temperatuur (tot ongeveer $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) korter zijn geworden. Bij herhalingsstijden die horen bij zeer lage effectieve temperaturen (lager dan $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) zijn er geen significante verschillen.

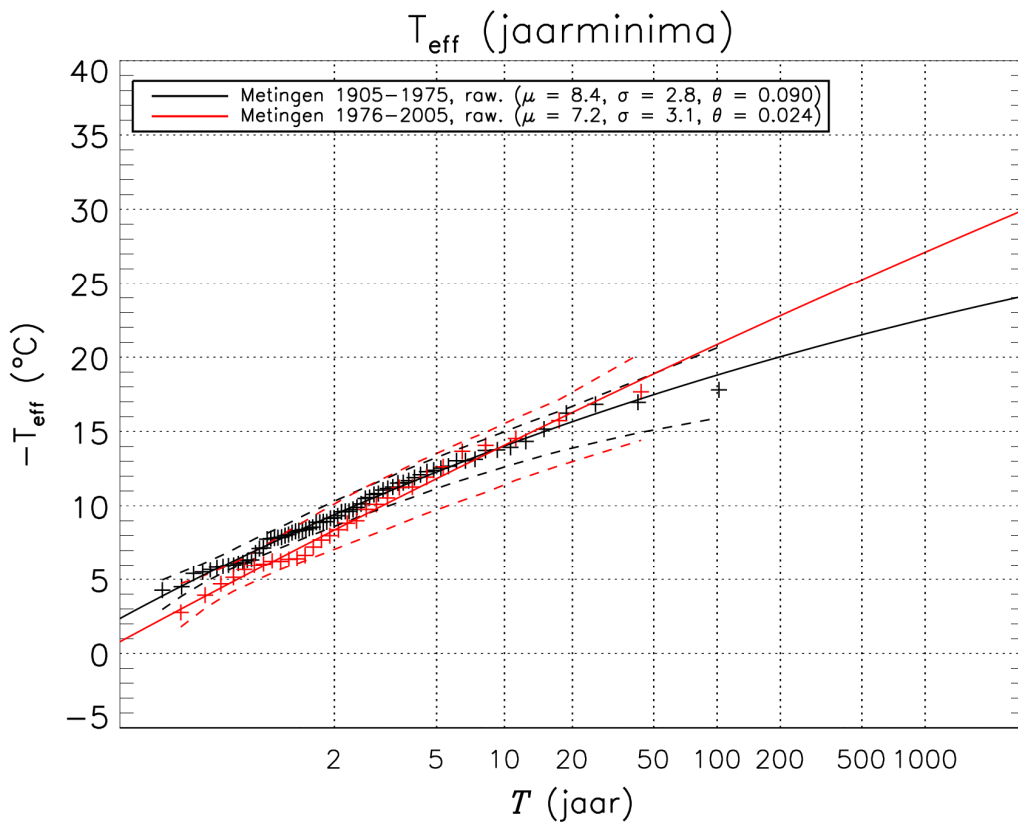
Het effect dat de herhalingsstijden van zeer lage effectieve temperaturen (lager dan $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$) korter lijken te zijn voor de periode 1976-2005 vergeleken met de periode 1905-1975 is te verklaren door het feit dat de kans op lagere effectieve temperaturen toeneemt bij een grotere spreiding in de onderliggende dataset. Die toename in spreiding kan verklaard worden door de aanwezigheid van een trend in de data (zie figuur 4). De trend vergroot de spreiding en leidt daardoor tot een grotere steilheid van de gefitte GEV in de periode 1976-2005 ten opzichte van de periode 1905-1975.

Bij het gebruik van de klimatologische periode 1976-2005 zijn er dus de volgende problemen:

- De periode is relatief kort ten opzichte van de herhalingsstijden die horen bij de beschouwde extremen. De invloed van de natuurlijke variabiliteit is dan slechter af te schatten. Dit leidt tot grote onzekerheden in de schattingen van de lange herhalingsstijden.
- Een onderliggende trend zorgt voor een extra onzekerheid in de schatting van de herhalingsstijden.

Vanwege deze redenen is er gezocht naar methoden om de gehele beschikbare reeks (1905-2007) te gebruiken voor het bepalen van herhalingsstijden van lage effectieve temperaturen.

Ten slotte laat tabel 3 nog de frequentieverdeling van lage effectieve temperaturen op basis van dagelijkse waarden zien. In deze tabel is dus hetzelfde weergegeven als in tabel 2, maar dan voor de periode 1976-2005.



Figuur 8: Gumbel plot van de jaarminima van effectieve temperatuur. De zwarte elementen horen bij de periode 1905-1975, terwijl de rode elementen horen bij de periode 1976-2005. Aan de waargenomen jaarminima van effectieve temperatuur is een GEV verdeling gefit. Met behulp van de bootstrap methode is het 95%-betrouwbaarheidsinterval bepaald voor beide tijdseries (stippellijnen).

¹ Tussen de vierkante haken worden de boven- en ondergrens van het 95%-bootstrapinterval aangegeven.

	Percentage dagen	Herhalingsstijd (jaren)
< -0.5	20	0.027
< -1.5	15	0.037
< -2.5	11	0.050
< -3.5	7.8	0.070
< -4.5	6.0	0.098
< -5.5	4.0	0.14
< -6.5	2.9	0.19
< -7.5	2.1	0.27
< -8.5	1.3	0.41
< -9.5	0.95	0.58
< -10.5	0.66	0.83
< -11.5	0.40	1.4
< -12.5	0.26	2.1
< -13.5	0.18	3.0
< -14.5	0.073	7.5
< -15.5	0.037	15
< -16.5	0.018	30
< -17.5	0.018	30
< -18.5	0	-

Tabel 3: Frequentietabel van het voorkomen van effectieve temperaturen in de periode 1976-2005.

3.3 Verlengen historische referentieperiode

Als referentieperiode voor de KNMI'06 klimaatscenario's is de 30-jarige periode 1976-2005 gebruikt. Omdat we het optreden van extreem lage effectieve temperaturen willen onderzoeken, met een lange herhalingsstijd, is het wenselijk een zo lang mogelijke reeks te gebruiken. Zo wordt de betrouwbaarheid van de analyses vergroot. Vanwege de combinatie met de KNMI'06 klimaatscenario's willen we daarom een reeks gebruiken die zo lang mogelijk is, maar die wel past bij het klimaat in de periode 1976-2005. Om de reeks te verlengen, kunnen we de meetgegevens van voor 1976 gebruiken. Zoals beschreven in het vorige hoofdstuk vereist de aanwezigheid van een trend (zie figuur 4) enige zorgvuldigheid.

Er zijn drie methodes overwogen om gebruik te kunnen maken van de volledige 1904-2007 reeks. Daarbij is de methode steeds toegepast op de temperatuurreeks, die uiteindelijk dus ten grondslag ligt aan de effectieve temperatuur.

1) *Geen bewerking op de originele meetreeks toepassen.* Dit voorkomt discussie over subjectieve keuzes in eventuele bewerkingen. Naar deze dataset zal gerefereerd worden als "raw".

2) *Het gelijk maken van het gemiddelde van de wintertemperatuur.*

Het gemiddelde van de winterhalfjaren in de hele

temperatuurreeks moet gelijk zijn aan het gemiddelde in de periode 1976-2005. Daartoe wordt het gemiddelde van de temperatuurreeks vóór 1976 aangepast aan het gemiddelde van de periode 1976-2005. De periode 1976 en later wordt niet aangepast. Het zal blijken dat deze methode inhoudt dat de daggemiddelde temperatuurwaarden van voor 1976 met 0.85 °C verhoogd worden. Deze reeks zal worden aangeduid met "eqmean".

3) *Het verwijderen van de trend in de periode 1976-2007, aan de hand van de trend in de jaarlijkse minimum effectieve temperatuur in de periode 1976-2005.*

In deze methode wordt de temperatuurreeks waarbij het gemiddelde gelijk is gemaakt (methode 2) als uitgangspunt genomen en wordt daarnaast ook nog de trend in de periode vanaf 1976 verwijderd. Deze methode zal worden aangeduid met "detrend".

We zullen de "detrend"-methode gebruiken op het moment dat blijkt dat de trend merkbare invloed heeft op de resultaten. Het verwijderen van trends levert namelijk discussie op. De oorzaak van een trend kan niet altijd aangeduid worden. Trends veroorzaakt door natuurlijke variaties zijn interessant om mee te nemen in de toekomstscenario's, terwijl het meenemen van een trend veroorzaakt door het broeikaseffect ongewenst is, omdat daar de scenario's juist voor bedoeld zijn. Het is aannemelijk dat het broeikaseffect de trend vanaf ongeveer 1980 in minimum effectieve temperatuur en gemiddelde wintertemperatuur mede heeft veroorzaakt.

Hoe groot de bijdrage van natuurlijke oorzaken aan de trend is, is niet aan te geven. Het is echter ook waarschijnlijk dat het broeikas-effect al voor 1980 een rol is gaan spelen, maar dat het door natuurlijke variabiliteit gecamoufleerd is geweest. Dat maakt de bepaling van het moment vanaf wanneer de trend verwijderd moet worden, subjectief.

3.3.1 Methode 2: Het gelijk maken van het gemiddelde

Bij de "eqmean"-methode is de gemiddelde dagelijkse wintertemperatuur in het winterhalfjaar van voor 1976 gelijk gemaakt aan het gemiddelde van de periode 1976-2005. Het gemiddelde in de periode voor 1976 kwam uit op 4.62 °C (± 0.12 °C). Het gemiddelde in de periode 1976-2005 kwam uit op 5.47 °C (± 0.19 °C). De t-toets geeft aan dat dit verschil statistisch significant is op het 1% significantieniveau.

3.3.2 Methode 3: Het verwijderen van de trend

Voordat een trend verwijderd kan worden, is het belangrijk te onderzoeken of de trend significant is. Dat betekent dat de trend groter is dan op basis van de variantie in het signaal verwacht kan worden. Zie kader voor resultaten. Voor de jaarminima van effectieve temperatuur blijkt er geen significante trend in de periode 1905-1976 op het 10% significantieniveau. De trend in de periode 1976-2005 blijkt ook niet significant op het 10% significantieniveau.

Als we de trend over de periode 1977-2007 zouden bepalen, dan zou de trend wel significant zijn op het 10% significantieniveau (het significantieniveau ligt bij 7%). Ter vergelijking is ook nog gekeken naar de trend in de gemiddelde wintertemperatuur. Ook hier is er in de periode 1905-1976 geen significante trend. De trend in de periode 1976-2005 is wel significant op het 5% significantieniveau. Het verschil in significantie kan verklaard worden uit het feit dat de variatie in gemiddelde wintertemperaturen kleiner is dan de variatie in jaarlijkse minimum effectieve temperatuur. Daarmee ontstaat een trend in gemiddelde wintertemperatuur sneller de variabiliteit tussen jaren dan een trend in jaarlijkse minimum effectieve temperatuur. Opvallend is dat de trend in jaarlijkse minimum effectieve temperatuur groter lijkt dan de trend in de gemiddelde wintertemperatuur. De koudste dagen lijken dus sneller op te warmen dan de gemiddelde temperatuur in de winter. Dit beeld komt ook terug in de klimaatscenario's, waarbij dat effect sterker is in de G+ en W+ scenario's dan in G en W scenario's. Het verschil tussen beide trends is in de bovenstaande analyse echter niet statistisch significant. Aangezien de trend in de effectieve temperatuur niet significant van 0 verschilt, verschilt die trend ook niet significant van de trend van 0.048 °C per jaar in de gemiddelde wintertemperatuur.

Hoe groot is de lineaire trend?

De trend wordt beschreven door:

$$y = ax + b$$

Met:

- y: respectievelijk de effectieve temperatuur (T_{eff}) of de gemiddelde wintertemperatuur (T_{gem}).
- a: de regressiecoëfficiënt (°C per jaar).
- x: de tijd (jaren).
- b: een constante (°C).

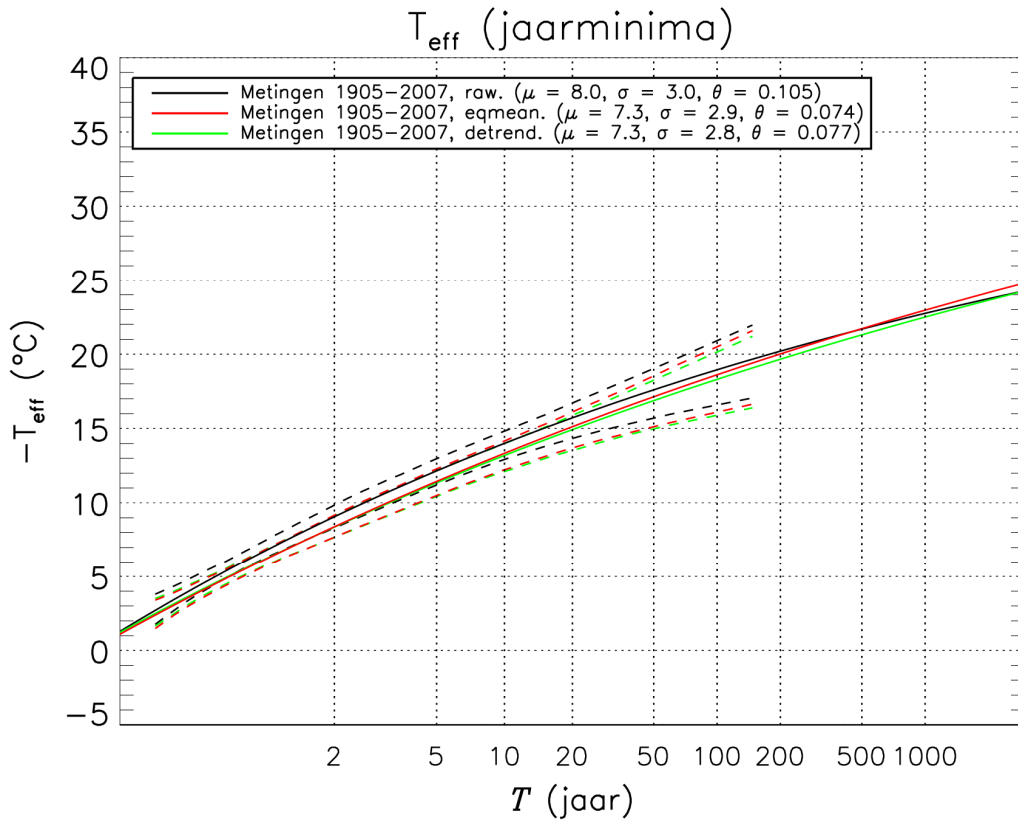
Voor jaarlijkse minimum effectieve temperatuur:

Lineaire trend 1905-1975:	
a = 0.0067	b = -22.73
σ = 0.0182	σ = 35.34
Lineaire trend 1976-2005:	
a = 0.1109	b = -229.7
σ = 0.0771	σ = 153.4

Voor gemiddelde wintertemperatuur:

Lineaire trend 1905-1975 voor gemiddelde wintertemperatuur:	
a = 0.0023	b = -0.33
σ = 0.0057	σ = 11.07
Lineaire trend 1976-2005 voor gemiddelde wintertemperatuur:	
a = 0.0479	b = -89.8
σ = 0.0210	σ = 41.7

σ geeft de onnauwkeurigheid in de schatting van de coëfficiënten aan. Met behulp van de t-toets kan aan de hand van σ bepaald worden of een trend significant van 0 verschilt. Voor het 5% significantieniveau moet bijvoorbeeld gelden dat 0 niet in het interval [a - 2σ, a + 2σ] ligt.



Figuur 9: Gumbel plot van de drie datasets, “raw”, “eqmean” en “detrend”. De doorgetrokken lijnen zijn de GEV fits behorend bij elk van de datasets. De stippellijnen geven de grenzen van het 95%-betrouwbaarheidsinterval aan. In zwart is de onbewerkte dataset (“raw”) weergegeven. In rood is de dataset weergegeven waarbij het gemiddelde van de periode voor 1976 gelijk is gemaakt aan het gemiddelde van de periode 1976-2005 (“eqmean”). De groene lijn geeft de dataset aan waarbij de trend vanaf 1976 is verwijderd, gebaseerd op de trend in de periode 1976-2005 (“detrend”).

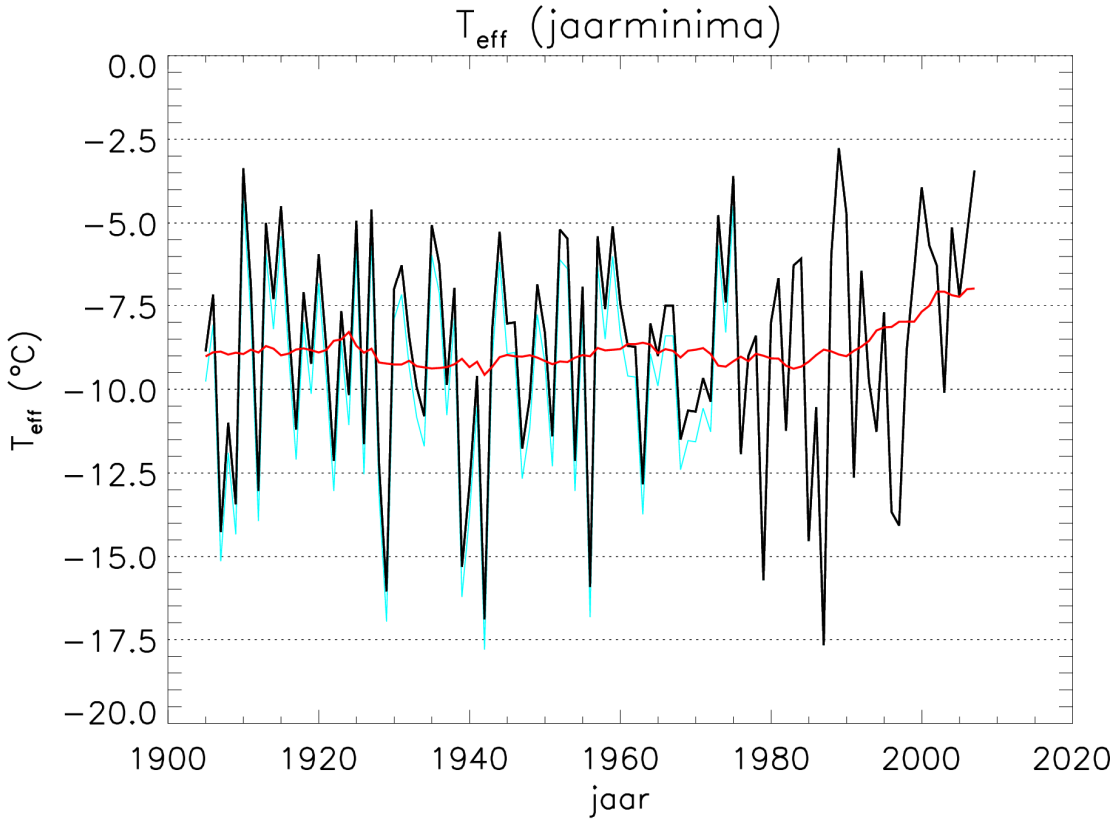
Figuur 9 vergelijkt de drie reeksen “raw”, “eqmean” en “detrend” op de gevolgen voor de bepaling van herhalingstijden. Als we de verschillende meetreeksen onderling vergelijken, is te zien dat de verschillen tussen “eqmean”- en “detrend”-reeks zeer klein zijn. Voor herhalingstijden korter dan 20 jaar is er wel een verschil tussen de “raw”-serie en de andere reeksen. Kijken we naar herhalingstijden langer dan 20 jaar, dan zijn de verschillen tussen de drie reeksen klein in vergelijking met het 95%-betrouwbaarheidsinterval.

De verschillen die er zijn tussen de “raw” enerzijds en “eqmean” en “detrend” anderzijds worden vooral bepaald door verschillen in het gemiddelde. Omdat de aanwezigheid van een trend een zeer kleine rol speelt, is besloten om de “eqmean”-reeks te gebruiken.

3.4 Analyse van de effectieve temperatuur rond 2030

Figuur 10 laat het verloop zien van jaarlijkse minimum effectieve temperaturen op basis van de “eqmean”-temperatuurreeks. Deze temperatuurreeks ligt dus ten grondslag aan de verdere analyse. Merk op dat er nog steeds een trend zit vanaf ongeveer 1980. Dit komt omdat bij de “eqmean”-correctie geen trend verwijderd wordt en bovendien

de data uit de periode vanaf 1976 onveranderd blijven. Verder is te zien dat in de periode voor 1976 de jaarminima van effectieve temperatuur in de “raw”-serie lager liggen dan in de “eqmean”-serie. Dit komt omdat de gemiddelde wintertemperatuur in de periode tot 1976 in de “eqmean”-serie dus aangepast is aan het gemiddelde van de periode 1976-2005.



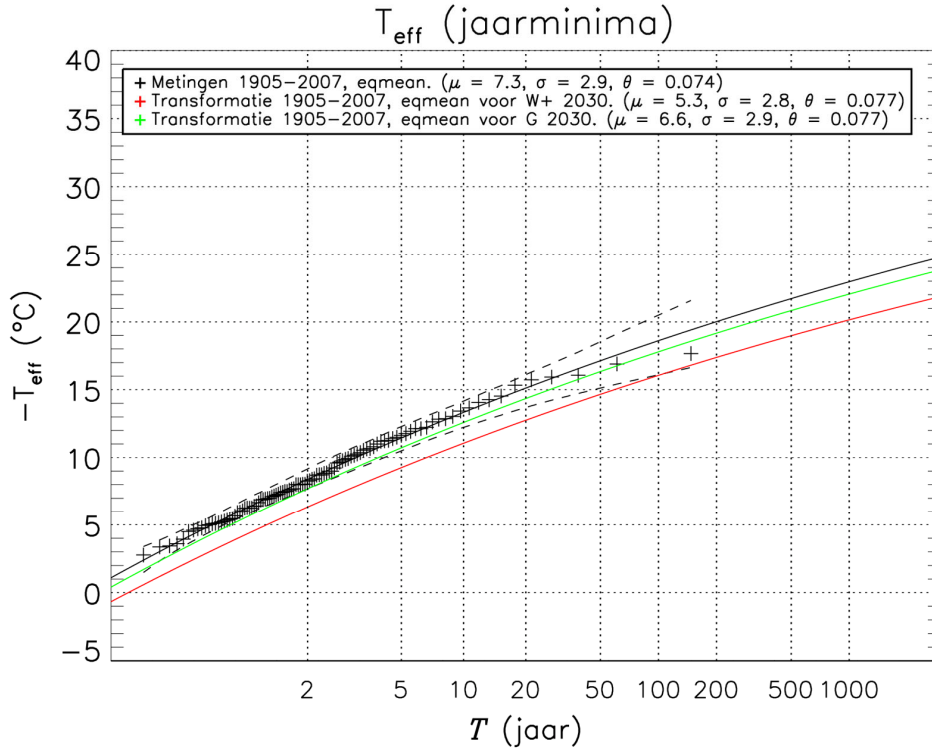
Figuur 10: Jaarlijks laagste effectieve temperatuur (°C) over de volledige meetreeks van de Bilt, gebaseerd op de “eqmean” reeks. In rood is een 30-jaar lopend gemiddelde weergegeven, die met behulp van een autoregressie model (centraal, 1^o orde) is uitgebreid tot het begin en eind van de meetreeks. In blauw is de “raw”-reeks weergegeven. Merk op dat de “eqmean”- en “raw”-reeks in de periode vanaf 1976 aan elkaar gelijk zijn en daarom op elkaar geplott zijn. Vóór 1976 is het verschil tussen de “eqmean”- en “raw”-reeks 0.85 °C.

De “eqmean”-tijdreeks van temperatuur is getransformeerd naar 2030 volgens de transformatie-methode (zie Appendix B en KNMI, transformatiewebsite). De reeks voor wind is niet aangepast, aangezien de klimaatscenario’s geen significante veranderingen in het windklimaat geven vergeleken met de natuurlijke variabiliteit in de windsnelheid. Bovendien is de invloed van die veranderingen op de uiteindelijke effectieve temperatuur klein, zoals nu met een rekenvoorbeeld zal worden aangetoond. De grootste verandering in het windklimaat wordt verwacht in het W+ scenario. De hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar neemt in dat scenario 4% toe voor 2050. Onder de aanname van een lineaire toename betekent dat een verandering van 2.7% voor 2030. Figuur 3 laat zien dat de maximale daggemiddelde

windsnelheid over de gehele meetreeks van de Bilt ongeveer 12 m/s bedraagt. Het effect van de mogelijke verandering van windklimaat op de effectieve temperatuur is dan maximaal ongeveer 0.2 °C. Dit is zeer klein in vergelijking met de betrouwbaarheidsband behorend bij effectieve temperatuur.

Figuur 11 laat in een Gumbelplot de jaarminima van effectieve temperaturen zien op basis van de eqmean-temperatuurreeks (periode 1904-2007) en op basis van de eqmean-temperatuurreeks getransformeerd voor het G en W+ scenario rond 2030. Om de figuur overzichtelijk te houden is ervoor gekozen om alleen deze twee scenario's als respectievelijk minst en meest

opwarmende scenario grafisch weer te geven. De G+ en W scenario's liggen tussen de G en W+ scenario's in. Tabel 4 geeft de herhalingsstijden weer voor $T_{eff} < -9.5^{\circ}C$, $T_{eff} < -14.5^{\circ}C$ en $T_{eff} < -16.5^{\circ}C$ voor alle 4 scenario's voor 2020 en 2030. De herhalingsstijden zijn bepaald door het fitten van GEV-verdelingen aan de jaarminima.



Figuur 11: Gumbelplot voor de effectieve temperatuur voor het huidige klimaat en voor 2030 onder 2 van de 4 KNMI'06 klimaatscenario's. In zwart de "eqmean"-reeks, representatief voor het huidige klimaat (1976-2005). Groen voor het minst opwarmende scenario G rond 2030 en rood voor het meest opwarmende scenario W+ rond 2030.

Grens T_{eff}	< -16.5	< -14.5	< -9.5
1904-2007 (eqmean)	37 [24 ... 133]	16 [11 ... 33]	2.7 [2.2 ... 3.5]
Voor rond 2020			
G, 2020	50 [30 ... 216]	20 [14 ... 49]	3.1 [2.5 ... 4.2]
G+, 2020	57 [34 ... 262]	23 [16 ... 59]	3.4 [2.7 ... 4.6]
W, 2020	64 [37 ... 311]	26 [18 ... 71]	3.8 [2.9 ... 5.2]
W+, 2020	89 [47 ... 517]	34 [22 ... 116]	4.5 [3.5 ... 6.4]
Voor rond 2030			
G, 2030	54 [32 ... 237]	22 [15 ... 55]	3.3 [2.6 ... 4.5]
G+, 2030	66 [38 ... 335]	26 [18 ... 73]	3.7 [2.9 ... 5.2]
W, 2030	78 [43 ... 421]	31 [20 ... 96]	4.2 [3.3 ... 5.9]
W+, 2030	125 [60 ... 879]	46 [28 ... 189]	5.5 [4.1 ... 8.0]

Tabel 4: Herhalingsstijden (jaren) voor drie verschillende drempelwaarden voor het één of meer keer per jaar onderschrijden van een bepaalde effectieve temperatuur. Herhalingsstijden zijn gebaseerd op GEV verdelingen, gefit aan de jaarminima. Tussen de vierkante haakjes is het 95%-bootstrapprobabiliteitsinterval gegeven, gebaseerd op gefitte GEV-verdelingen. Voor de klimaatscenario's is dit betrouwbaarheidsinterval gebaseerd op het betrouwbaarheidsinterval van de historische tijdreeks, waarbij deze vertaald is naar de toekomst door het bootstrappen van de getransformeerde reeksen.

De verschillen tussen de gefitte GEV-verdelingen voor de historische reeks en de G en W+ scenario's voor rond 2030 komen vooral tot uitdrukking in de verandering van de locatieparameter μ . De locatieparameter is sterk gerelateerd aan het gemiddelde, hoewel die niet gelijk is aan het gemiddelde. We zien dat de afname van de locatieparameter ten opzichte van de historische reeks varieert van 0.7 in het G scenario tot 2.0 in het W+ scenario. Deze waarden komen in goede benadering overeen met de veranderingen van de gemiddelde temperatuur op de koudste winterdag voor het G en W+ scenario rond 2030 (zie hoofdstuk 1.3). Dit is te verklaren door het effect dat de gemiddelde dagtemperatuur op de dag waarop het jaarminimum in effectieve temperatuur bereikt wordt, in veel gevallen in de buurt van het koudste 1%-kwantiel ligt. Overigens hoeft het jaarminimum van effectieve temperatuur niet samen te vallen met de koudste winterdag, vanwege de invloed van windsnelheid.

Wat kunnen we zeggen over de onzekerheid van de verwachtingen voor in de toekomst? Allereerst dient men zich er bewust van te zijn dat de veranderingen in temperatuur en neerslag zoals gegeven in de KNMI'06 klimaatscenario's per definitie systematische veranderingen zijn. Het gaat hier namelijk om expliciet opgelegde veranderingen. Dit betekent echter niet automatisch dat de veranderingen in de toekomst ook groter zijn dan op basis van de natuurlijke variabiliteit (jaar-op-jaar variaties) in het verleden mogelijk is. Is de verandering wel groot ten opzichte van de natuurlijke variabiliteit, dan spreken we van significante veranderingen. Met niet significant bedoelen we in dit geval dat ondanks dat de veranderingen volgens de KNMI'06 klimaatscenario's systematisch zijn, deze veranderingen in de praktijk niet of moeilijk merkbaar of detecteerbaar zullen zijn, als gevolg van de (grote) natuurlijke variabiliteit. Om een indruk van de significantie te krijgen, is gebruik gemaakt van het 95%-betrouwbaarheidsinterval behorend bij de historische data. Als de toekomstige herhalingstijd rond 2030 buiten het 95%-betrouwbaarheidsinterval behorend bij de historische data valt, dan is er een kleine kans (< 5%) dat die herhalingstijd rond 2030 niet merkbaar veranderd is. Omgekeerd geldt dat als de toekomstige waarde binnen het 95%-betrouwbaarheidsinterval valt, de kans groot is dat de verandering in de praktijk niet merkbaar is.

Rond 2030 vallen onder het W+ scenario voor herhalingstijden korter dan 100 jaar, de effectieve temperaturen buiten het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de historische referentieperiode en verschillen daarmee significant van het heden. Onder het G scenario rond 2030 vallen de toekomstige waarden voor effectieve temperaturen voor alle herhalingstijden binnen het betrouwbaarheidsinterval en verschillen daardoor niet significant van het heden.

Bij gebruik van tabel 4 is het dus van belang te kijken of de waarden bepaald voor de toekomst buiten het 95% betrouwbaarheidsinterval van de historische data liggen. Als dat het geval is, dan is de kans klein (< 5%) dat door toeval de afname in herhalingstijd rond 2030 niet wordt waargenomen. Merk op dat het 95%-betrouwbaarheidsinterval dat gegeven wordt voor de toekomst de vertaling is van het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de historische data naar de toekomst.

Hiermee wordt bedoeld dat het 95%-betrouwbaarheidsinterval voor de toekomst de onzekerheid van het toekomstscenario aangeeft die puur voortkomt uit de onzekerheid over het huidige klimaat, als gevolg van de huidige natuurlijke variabiliteit.

In tabel 5 is de frequentietabel weergegeven, gebaseerd op het aantal onderschrijdingen van lage effectieve temperaturen op basis van de "eqmean"-temperatuurreeks en de getransformeerde temperatuurreksen. De verschillen die tussen deze methode en de GEV-analyse van de jaarminima ontstaan, heeft onder andere te maken met de clustering. Daarnaast speelt het een rol dat de 3 datapunten met de laagste effectieve temperatuur onder de GEV-fit liggen (zie figuur 11). Dat betekent dat voor de laagste effectieve temperaturen, de schatting op basis van de gefitte GEV verdeling kortere herhalingstijden oplevert dan op basis van de frequentietabel.

	1990 ("eqmean")	G, 2030	G+, 2030	W, 2030	W+,2030
<i>Grens</i>	<i>Herhalingstijd (jaren)</i>	<i>Herhalingstijd (jaren)</i>	<i>Herhalingstijd (jaren)</i>	<i>Herhalingstijd (jaren)</i>	<i>Herhalingstijd (jaren)</i>
< -0.5	0.028	0.034	0.037	0.042	0.049
< -1.5	0.038	0.047	0.051	0.058	0.070
< -2.5	0.053	0.067	0.072	0.082	0.098
< -3.5	0.075	0.093	0.10	0.11	0.13
< -4.5	0.10	0.13	0.14	0.15	0.19
< -5.5	0.14	0.17	0.19	0.22	0.28
< -6.5	0.19	0.25	0.28	0.33	0.43
< -7.5	0.28	0.37	0.43	0.49	0.64
< -8.5	0.42	0.55	0.64	0.72	1.06
< -9.5	0.62	0.83	1.0	1.3	1.9
< -10.5	0.95	1.5	1.8	2.1	3.1
< -11.5	1.7	2.5	2.9	3.4	5.4
< -12.5	2.9	4.1	4.7	6.1	11
< -13.5	4.3	6.4	8.6	13	26
< -14.5	6.9	15	17	34	103
< -15.5	17	34	51	103	-
< -16.5	51	103	-	-	-
< -17.5	103	-	-	-	-
< -18.5	-	-	-	-	-

Tabel 5: Frequentietabel van herhalingstijden (jaren) van overschrijdingen van verschillende effectieve temperaturen op basis van de "eqmean"-temperatuurreeks en de vier KNMI'06 klimaatscenario's voor rond 2030. Merk op dat bij herhalingstijden langer dan 10 jaar, de indeling naar discrete klassen gecombineerd met een beperkt aantal gevallen, leidt tot grote stappen in de overgangen van herhalingstijden tussen de klassen.

4. Graaddagen

4.1 Analyse van de periode 1905-2007

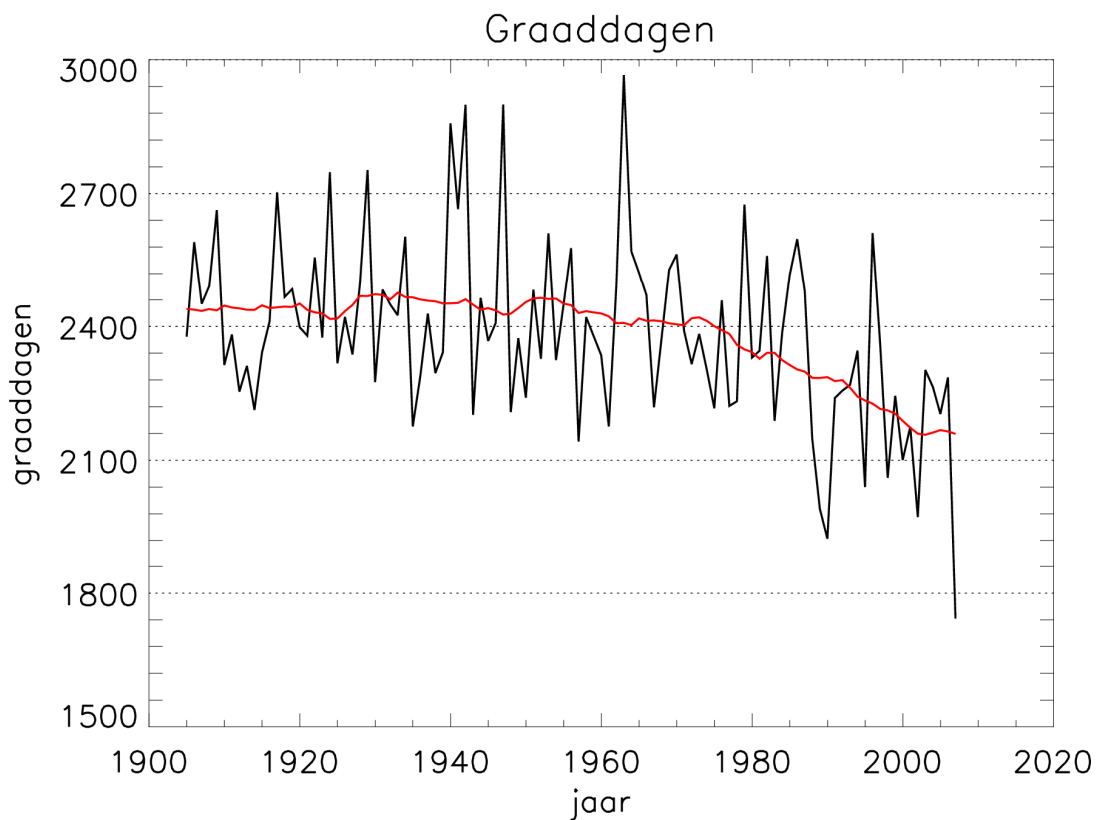
Figuur 12 laat het verloop van het aantal graaddagen per winterhalfjaar over de gehele meetreeks zien. Voor de berekening van graaddagen is de onbewerkte temperatuurreeks gebruikt ("raw"-reeks). Opvallend zijn enkele strenge winters met meer dan 2700 graaddagen in de periode voor 1970. Het grootste aantal graaddagen (2965) werd bereikt in de strenge winter van 1962-1963. Aan de andere kant is de zachte winter 2006-2007 de winter met de minste graaddagen (1743). Deze winter was de zachtste in ruim 300 jaar (KNMI-website; winter 2007). Tevens laat figuur 12 zien dat er een dalende trend zit in het aantal graaddagen. Dit is een gevolg van het opwarmende klimaat. De trend laat zich vrijwel geheel verklaren door de trend in de gemiddelde wintertemperatuur. In de volgende paragraaf zal onderzocht worden of de periode 1976-2005 ook significant anders was dan de periode tot 1975.

4.2 Vergelijking van de referentieperiode 1976-2005 en de periode 1905-1975

Figuur 13 laat de cumulatieve frequentieverdeling zien voor zowel de periode 1905-1975 als voor de periode 1976-2005.

Tabel 6 laat het 50% (mediaan), 10% en 90% kwantiel van beide series zien, inclusief de 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Het betrouwbaarheidsinterval is breder voor de periode 1976-2005 dan voor de periode 1905-2007. Dit hangt samen met een kortere reekslengte, waardoor de onzekerheid in de onderliggende kansverdeling toeneemt.

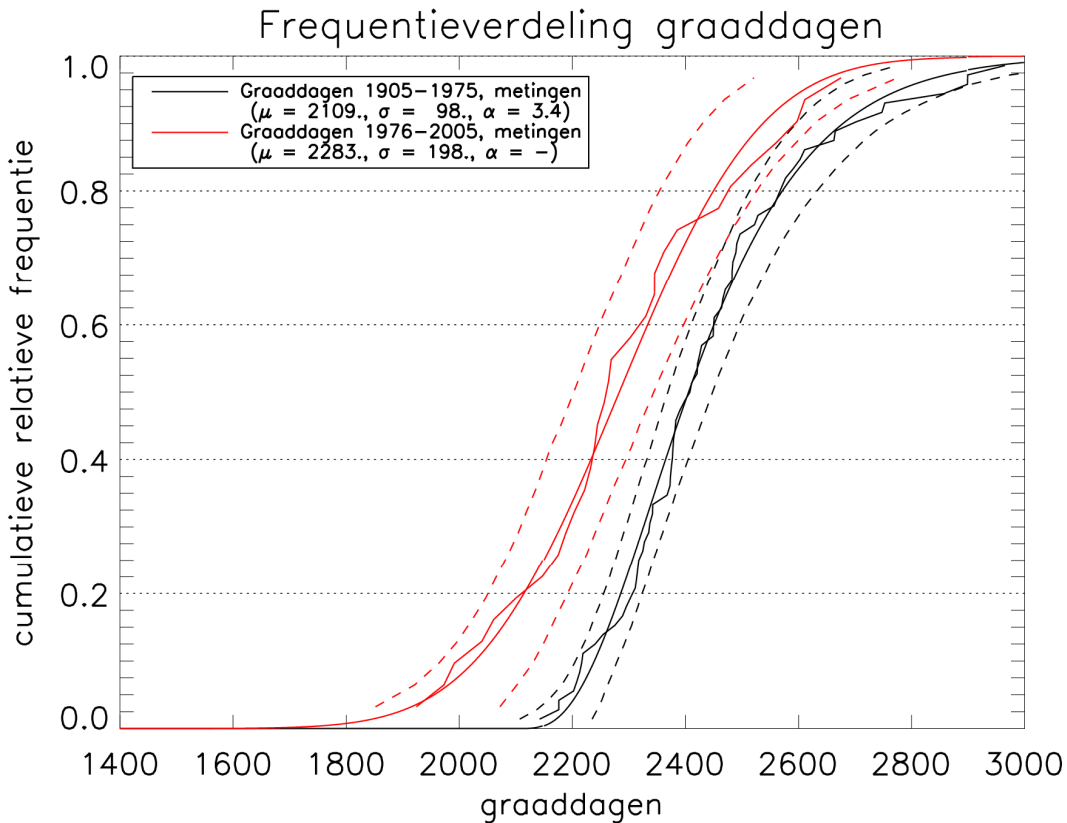
Voor de reeks 1905-1975 is de afstand in graaddagen tussen het 10% kwantiel en de mediaan veel kleiner (166 graaddagen) dan de afstand tussen de mediaan en het 90% kwantiel (265 graaddagen). Dit betekent dat er een zogenaamde scheefheid in de frequentieverdeling zit. Opmerkelijk is dat deze scheefheid in de periode 1976-2005 veel kleiner is. Het verschil tussen de afstand tussen het 10% kwantiel en de mediaan (227 graaddagen) en de afstand tussen de mediaan en het 90% kwantiel (263 graaddagen) is veel kleiner. Dat betekent dat deze laatste periode meer lijkt op een normale verdeling, terwijl de scheve verdeling meer lijkt op een 3-parameter-gamma-verdeling. De verschillen in tabel 6 laat dit ook zien: de afname in het 10% kwantiel is groter dan de verandering in de mediaan en het 90% kwantiel, waardoor de verdeling dus meer is gaan lijken op een normale verdeling.



Figuur 12: Graaddagen per winterhalfjaar in de jaren 1905-2007. In zwart zijn de gemeten graaddagen weergegeven. In rood is een 30-jaar lopend gemiddelde weergegeven, dat met behulp van een autoregressie model (centraal, 1^o orde) is uitgebreid tot het begin en eind van de meetreeks.

In figuur 13 is de periode 1905-1975 gefit aan een 3-parameter-gamma-verdeling, terwijl de periode 1976-2005 gefit is aan een normale verdeling. We zien dat een groot deel van de reeks behorend bij de periode 1976-2005 buiten het betrouwbaarheidsinterval van de reeks 1905-1975 ligt. Ook de betrouwbaarheidsintervallen overlappen elkaar niet voor de zachtste 75% van de winters. Daar waar dat het geval is, kunnen we concluderen dat er significant (merkbaar) wat veranderd is. Aan de kant van de 25% strengste winters

overlappen de betrouwbaarheidsbanden deels. Hier is de significantie van de veranderingen minder duidelijk. Voor het 90% kwantiel blijkt de verandering niet significant op het 1% significantieniveau (zie tabel 6). Uit de vergelijking van beide series wordt wel duidelijk dat de frequentieverdeling is opgeschoven richting mildere winters, waarbij met name de zachte en zeer zachte winters vaker zijn opgetreden. Die verandering in frequentie van zachte en gemiddelde winters is duidelijk significant.



Figuur 13: Cumulatieve frequentie van graaddagen voor de periode 1905-2007 (zwart) en 1976-2005 (rood). De vloeiende doorgetrokken krommes zijn de gefitte 3-parameter-gammaverdelingen, behorend bij de waarnemingen. De stippellijnen geven de boven en ondergrens van het 95%-bootstrapbetrouwbaarheidsinterval aan. Omdat de periode 1976-2005 sterk lijkt op een normale verdeling, is een normale verdeling gefit. De in de legenda gegeven coëfficiënten horen bij deze normale verdeling.

	1905-1975	1976-2005	verschil	significant? (5% niveau)	significant? (1% niveau)
10 %	2241 [2207 ... 2283]	2039 [1963 ... 2123]	-202 ± 47	ja	ja
50 %	2406 [2369 ... 2448]	2276 [2201 ... 2343]	-130 ± 43	ja	ja
90 %	2696 [2613 ... 2778]	2541 [2440 ... 2631]	-155 ± 68	ja	nee

Tabel 6: Het 10%, 50% (mediaan), 90% kwantiel voor aantal graaddagen, voor zowel de periode 1905-1975 als de periode 1976-2005. In de verschil kolom is ook de standaard deviatie van het verschil aangegeven. De significantie is bepaald met behulp van de T-toets.

4.3 Verlengen historische referentieperiode

Bij het analyseren van het aantal graaddagen is onderzocht of er noodzaak was een trend te verwijderen, of het gemiddelde gelijk te maken. Daarbij golden dezelfde overwegingen als bij het analyseren van het optreden van lage effectieve temperaturen: om de statistische onzekerheid te reduceren moet een zo lang mogelijke reeks gebruikt worden, die wel past bij de referentieperiode 1976-2005. Voor een nadere bespreking van de methoden, zie hoofdstuk 3.3.

Voor graaddagen is echter wel de methode om de datareeks te detrenden (methode 3) enigszins aangepast. Omdat de hoeveelheid graaddagen bepaald wordt door de gemiddelde wintertemperatuur is hier gekeken naar de trend in de gemiddelde wintertemperatuur in de periode 1976-2005. Dit is dus in tegenstelling tot de benadering voor effectieve temperatuur, waar juist gekeken is naar de trend in de jaarlijkse minima van effectieve temperatuur. Aan deze ethode zal echter wederom gerefereerd worden als “detrend”.

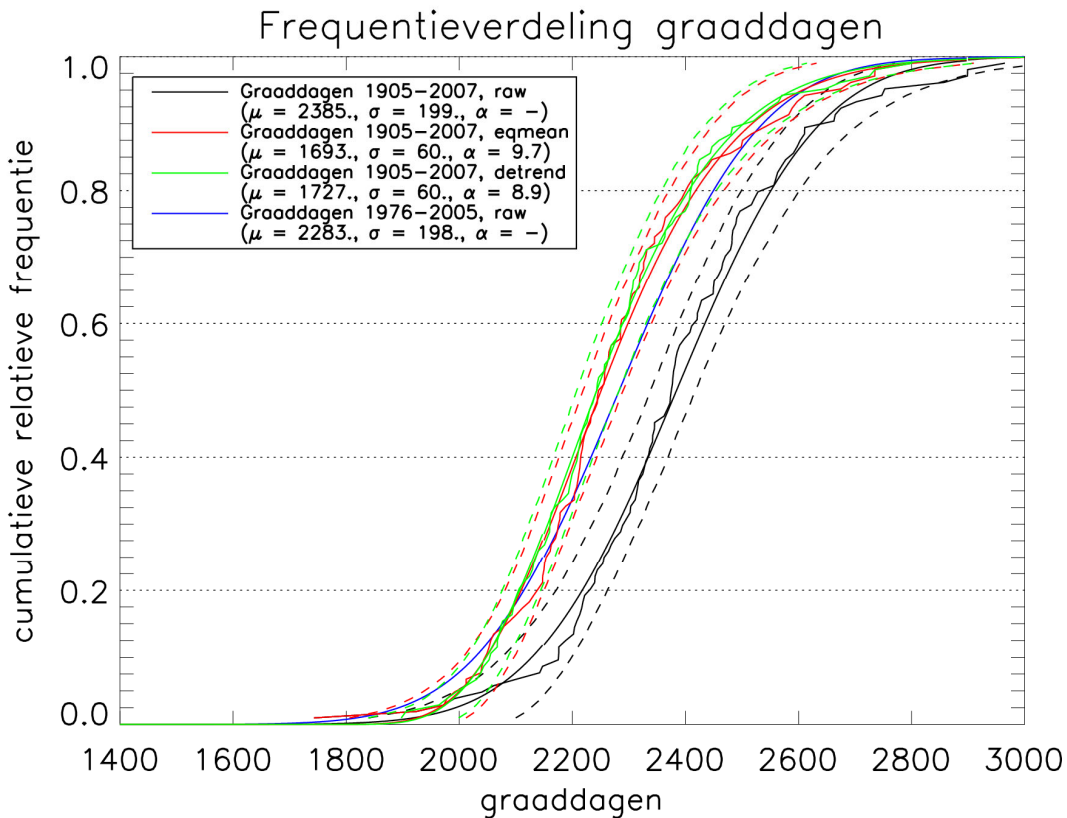
Figuur 14 geeft in een cumulatieve frequentieverdeling weer wat de verschillen zijn tussen de “raw”-, “eqmean”- en “detrend”-reeksen. Er zit zeer weinig verschil tussen de “detrend” en de “eqmean”-reeksen. Er is echter wel een verschil tussen de “raw”-datareeks (zonder enige bewerking) en de andere twee. Dit verschil is vooral te verklaren door het feit dat in de twee bewerkte reeksen het gemiddelde is aangepast. Daarmee wordt de graaddagbijdrage per dag kleiner, wat we terug zien in een flinke verschuiving van de curve. De aanwezigheid van een trend speelt een kleine rol, gezien de slechts zeer kleine verschillen tussen de “eqmean” en

“detrend”-reeksen. Evenals bij de analyse van het voorkomen van effectieve temperaturen is ook voor de analyse van het aantal graaddagen gekozen om met de “eqmean”-reeks verder te gaan.

Tabel 7 laat de mediaan, het 10% en het 90% kwantiel van het aantal graaddagen zien op basis van de “eqmean”-reeks. Ten opzichte van de schattingen van deze kwantielen voor de periode 1976-2005 (zie tabel 6) is het betrouwbaarheidsinterval kleiner geworden, wat betekent dat de schattingen betrouwbaarder zijn geworden.

	1905 -1975
10 %	2050 [2000 ... 2093]
50 %	2252 [2219 ... 2289]
90 %	2519 [2451 ... 2580]

Tabel 7: Het 50% (mediaan), 10% en 90% kwantiel voor aantal graaddagen voor de periode 1905-2007 (“eqmean”).



Figuur 14: Cumulatieve frequentieverdeling van het aantal graaddagen per winterhalfjaar in de drie datasets, “raw”, “eqmean” en “detrend” (zie tekst). De doorgetrokken lijnen zijn de 3 parameter gamma fits behorend bij de datasets. De stippellijnen geven de grenzen van het 95%-betrouwbaarheidsinterval aan, gebaseerd op gefitte kansverdelingen. In zwart is de onbewerkte dataset weergegeven. In rood is de dataset weergegeven waarbij het gemiddelde voor 1976 gelijk is gemaakt aan het gemiddelde van de periode 1976-2005 (“eqmean”). De groene lijn geeft de dataset aan waarbij de trend vanaf 1976 is verwijderd, gebaseerd op de trend van de periode 1976-2005 (“detrend”). Ter vergelijking is in blauw de periode 1976-2005 op basis van de “raw”-temperatuurreeks weergegeven. Omdat de “raw”-reeks (zowel periode 1905-2007 als de periode 1976-2005) sterk op een normale verdeling lijkt, is een normale verdeling gefit. De in de legenda gegeven coëfficiënten horen bij de normale verdeling.

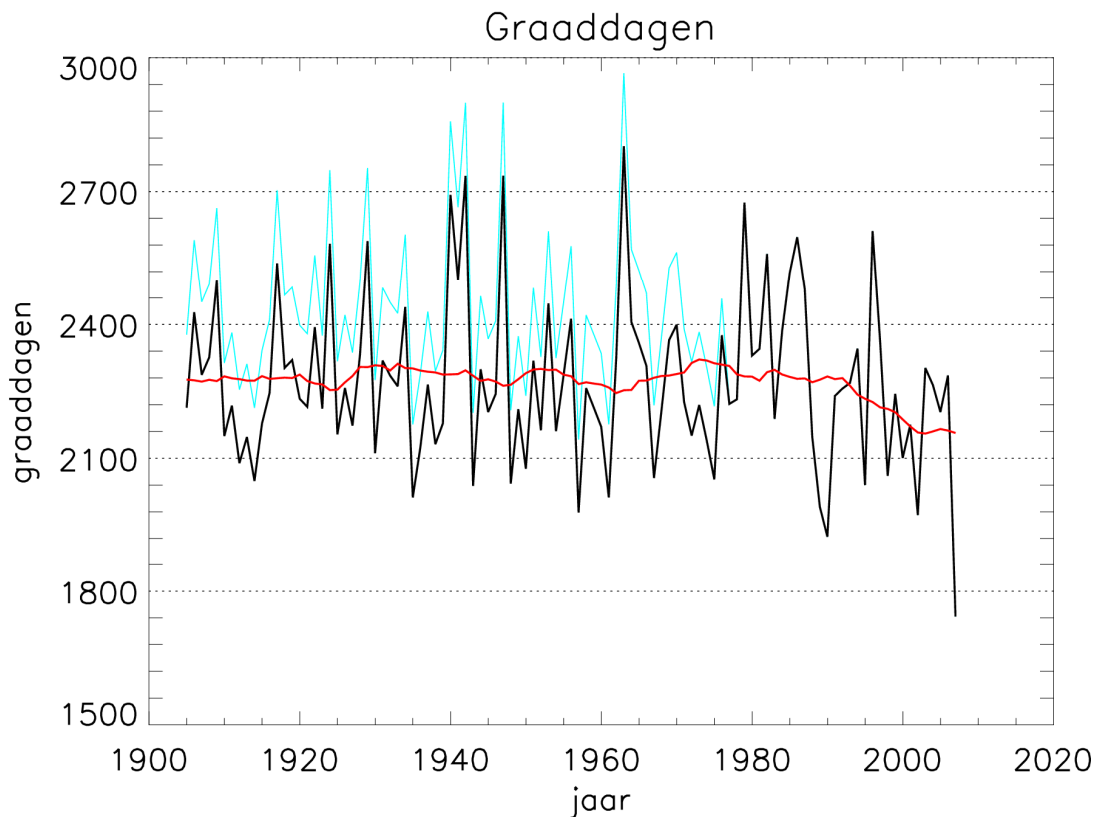
4.4 Analyse van het aantal graaddagen rond 2030

Figuur 15 laat de graaddagen zien na het gelijkmaken van het gemiddelde van de wintergemiddelde temperatuur voor 1976 aan de gemiddelde wintertemperatuur van de periode 1976-2005 (de “eqmean” reeks). Zoals aangegeven in de vorige sectie, is deze reeks gebruikt voor verdere analyse.

Figuur 16 en tabel 8 geeft de frequentieverdeling en de bijbehorende gefitte 3-parameter-gammaverdeling van het aantal graaddagen weer voor zowel de historische referentieperiode als voor de vier KNMI’06 klimaatscenario’s voor rond 2030, gebaseerd op de getransformeerde “eqmean”-temperatuurreeks. De frequentieverdeling voor alle vier de klimaatscenario’s liggen buiten het 95%-bootstrapbetrouwbaarheidsinterval van de historische referentieperiode, zodat we kunnen concluderen dat de frequentieverdelingen voor rond 2030 significant verschillen van de referentieperiode. Van de veranderingen in de meest zachte en meest strenge winters kan de significantie niet aangetoond worden, waardoor het rond 2030 lastig is vast te stellen of voor deze extreme winters (zowel streng als zacht) iets veranderd is. Kijken we naar de vier scenario’s rond 2020 (zie figuur 17, tabel 8), dan zien we hetzelfde beeld van het afnemen van het aantal graaddagen per winter.

De veranderingen in aantal graaddagen zijn in alle scenario’s significant, hoewel het nog moeilijker zal zijn om de afname in meest zachte en meest strenge winters rond 2020 daadwerkelijk vast te stellen, in vergelijking met rond 2030.

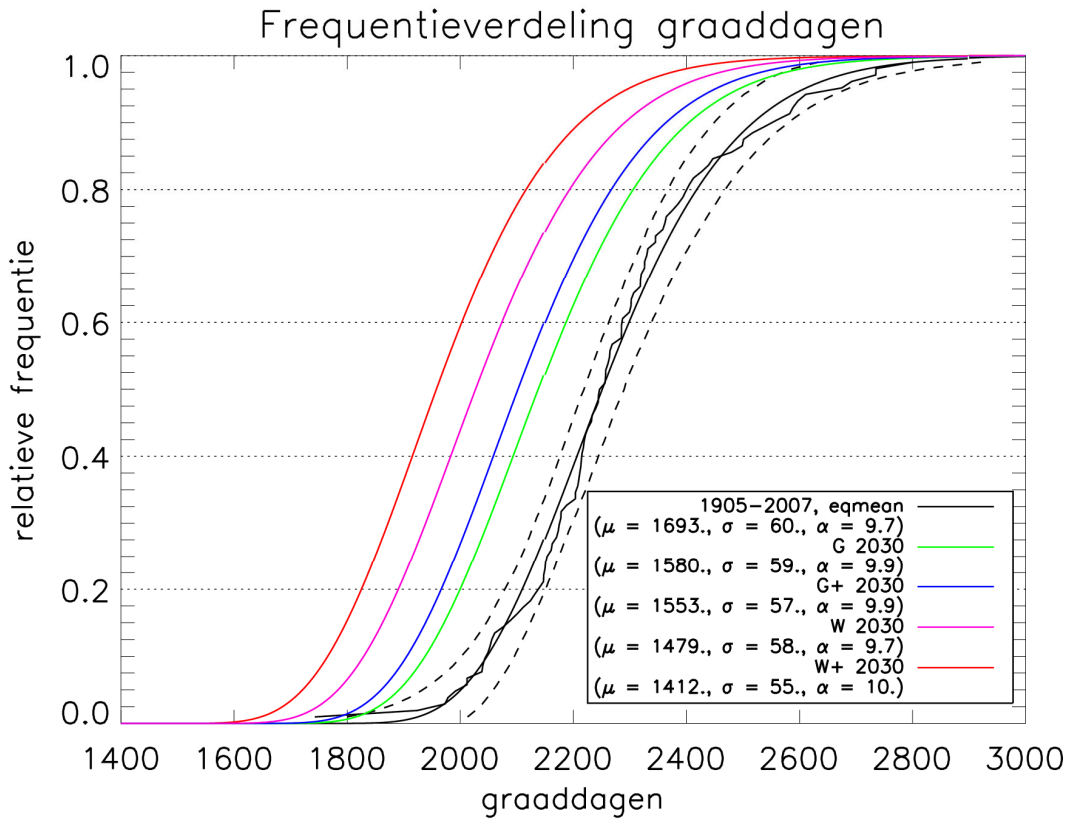
Als we tenslotte de verandering van het aantal graaddagen afzetten tegen de veranderingen in wintertemperatuur (zie hoofdstuk 1.3), dan zien we dat dit in goede benadering overeenkomt. Zoals eerder aangegeven is, draagt vrijwel iedere dag in het winterhalfjaar bij aan de hoeveelheid graaddagen. Dat betekent dat een stijging van de gemiddelde wintertemperatuur met 1.0 °C bij benadering correspondeert met een afname van het aantal graaddagen met 182 graaddagen (er zitten namelijk ongeveer 182 dagen in een winterhalfjaar). Deze benadering zou voor het W+ scenario rond 2030 een afname van 273 graaddagen geven, en voor G rond 2030 109 graaddagen. Dit komt redelijk overeen met veranderingen gegeven in tabel 8. Merk op dat de verschillen tussen deze schattingsmethode en tabel 8 groter zijn in het G+ en W+ scenario, als gevolg van de asymmetrische opwarming in deze “+”-scenario’s.



Figuur 15: Graaddagen per winterhalfjaar in de jaren 1905-2007. In zwart zijn de graaddagen op basis van de “eqmean”-temperatuurreeks weergegeven, waarbij de gemiddelde wintertemperatuur in de periode voor 1976 gelijk is gemaakt aan de gemiddelde wintertemperatuur van de periode 1976-2005. In rood is een 30-jaar lopend gemiddelde weergegeven, dat met behulp van een autoregressie model (centraal, 10^e orde) is uitgebreid tot het begin en eind van de meetreeks. In blauw is de “raw”-reeks weergegeven. Merk op dat in de “raw”- en “eqmean”-temperatuurreeks de periodes vanaf 1976 aan elkaar gelijk zijn en daarom over elkaar vallen.

Figuur 16 en tabel 8 geeft de frequentieverdeling en de bijbehorende gefitte 3-parameter-gammaverdeling van het aantal graaddagen weer voor zowel de historische referentieperiode als voor de vier KNMI'06 klimaatscenario's voor rond 2030, gebaseerd op de getransformeerde "eqmean"-temperatuurreeks. De frequentieverdeling voor alle vier de klimaatscenario's liggen buiten het 95%-bootstrabetrouwbaarheidsinterval van de historische

referentieperiode, zodat we kunnen concluderen dat de frequentieverdelingen voor rond 2030 significant verschillen van de referentieperiode. Van de veranderingen in de meest zachte en meest strenge winters kan de significantie niet aangetoond worden, waardoor het rond 2030 lastig is vast te stellen of voor deze extreme winters (zowel streng als zacht) iets veranderd is.

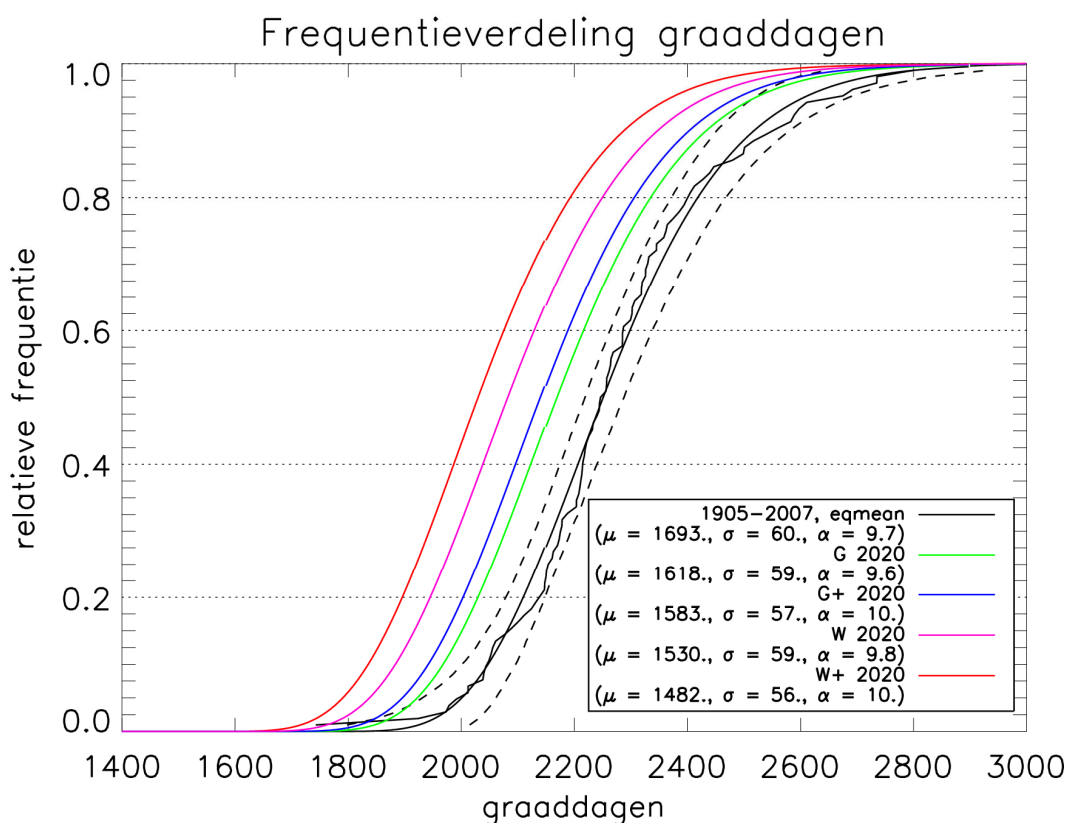


Figuur 16: Cumulatieve frequentieverdeling van het aantal graaddagen per winterhalfjaar voor rond 2030 in de scenario's G (groen), G+ (blauw), W (paars) en W+ (rood), gebaseerd op het fitten aan een 3-parameter-gamma-verdeling. In zwart is de frequentieverdeling van de periode 1905-2007 ("eqmean"-reeks) weergegeven. De onregelmatige curve representeert de onderliggende data, de doorgetrokken lijn de 3-parameter-gamma-verdeling aan de data. De stippellijnen geven de onder- en bovengrens van het 95%-bootstrabetrouwbaarheidsinterval, waarbij aan ieder bootstrap-sample een 3-parameter-gamma-verdeling is gefit.

Kijken we naar de vier scenario's rond 2020 (zie figuur 17, tabel 8), dan zien we hetzelfde beeld van het afnemen van het aantal graaddagen per winter. De veranderingen in aantal graaddagen zijn in alle scenario's significant, hoewel het nog moeilijker zal zijn om de afname in meest zachte en meest strenge winters rond 2020 daadwerkelijk vast te stellen, in vergelijking met rond 2030.

Als we tenslotte de verandering van het aantal graaddagen afzetten tegen de veranderingen in wintertemperatuur (zie hoofdstuk 1.3), dan zien we dat dit in goede benadering overeenkomt. Zoals eerder aangegeven is, draagt vrijwel iedere

dag in het winterhalfjaar bij aan de hoeveelheid graaddagen. Dat betekent dat een stijging van de gemiddelde wintertemperatuur met 1.0 °C bij benadering correspondeert met een afname van het aantal graaddagen met 182 graaddagen (er zitten namelijk ongeveer 182 dagen in een winterhalfjaar). Deze benadering zou voor het W+ scenario rond 2030 een afname van 273 graaddagen geven, en voor G rond 2030 109 graaddagen. Dit komt redelijk overeen met veranderingen gegeven in tabel 8. Merk op dat de verschillen tussen deze schattingsmethode en tabel 8 groter zijn in het G+ en W+ scenario, als gevolg van de asymmetrische opwarming in deze "+"-scenario's.



Figuur 17: Cumulatieve frequentieverdeling van het aantal graaddagen per winterhalfjaar voor rond 2020 in de scenario's G (groen), G+ (blauw), W (paars) en W+ (rood), gebaseerd op het fitten aan een 3-parameter-gamma-verdeling. In zwart is de frequentieverdeling van de periode 1905-2007 ("eqmean"-reeks) weergegeven. De onregelmatige curve representeert de onderliggende data, de doorgetrokken lijn de 3-parameter-gamma-verdeling aan de data. De stippellijnen geven de onder- en bovengrens van het 95%-bootstrapprobabiliteitsinterval, waarbij aan ieder bootstrapsample een 3-parameter-gamma-verdeling is gefit.

	Graaddagen			Veranderingen t.o.v. "eqmean"-reeks		
	10%	50%	90%	10%	50%	90%
1905-2007, eqmean	2050	2252	2519	-	-	-
G, 2020	1970	2170	2434	-80	-82	-85
G+, 2020	1944	2143	2404	-106	-109	-115
W, 2020	1886	2085	2348	-164	-167	-171
W+, 2020	1837	2032	2289	-213	-220	-230
G, 2030	1940	2141	2405	-110	-111	-114
G+, 2030	1908	2105	2365	-142	-147	-154
W, 2030	1831	2030	2292	-219	-222	-227
W+, 2030	1767	1960	2213	-283	-292	-306

Tabel 8: Het aantal graaddagen, voor het 10%, 50% (mediaan) en 90% kwantiel van de frequentieverdeling voor de "eqmean"-reeks en de vier KNMI'o6 klimaatscenario's voor 2020 en 2030. Daarnaast zijn de absolute veranderingen ten opzichte van de "eqmean"-reeks weergegeven.

5. Conclusies en nawoord

5.1 Conclusies

Effectieve temperaturen

1. Is de herhalingstijd van extreem lage jaarminima van effectieve temperatuur veranderd in de periode 1976-2005 ten opzichte van de periode 1905-1975?
Uit de meetreeks 1904-1975 voor de Bilt is afgeleid dat effectieve temperaturen lager dan -16.5 °C eens per 30 [19...168] jaar voorkomen. Voor de periode 1976-2005 komen effectieve temperaturen lager dan -16.5 °C eens per 22 [14 ... 125] jaar voor. Gezien de relatief grote onzekerheid in beide schattingen, kunnen we niet van significante verschillen spreken.
2. Wat is een betrouwbaarder schatting van de herhalingstijd van extreem lage jaarminima van effectieve temperatuur in de referentieperiode 1976-2005?
De beschikbare meetreeks over de periode 1904-2007 is aangepast, zodat deze past bij het klimaat uit de periode 1976-2005. Uit deze aangepaste reeks volgt een herhalingstijd van 37 [24...133] jaar voor een onderschrijding van -16.5 °C. Door het gebruik van de aangepaste reeks is het betrouwbaarheidsinterval kleiner geworden, met name de afstand tussen de centrale schatting en de bovenste grens van het betrouwbaarheidsinterval. De factor tussen de centrale schatting en de bovenste grens van het betrouwbaarheidsinterval is afgenomen van ongeveer 5.6 naar 3.6, waardoor de nauwkeurigheid van de schattingen is vergroot.
3. Hoe verandert de herhalingstijd van extreem lage jaarminima van effectieve temperatuur rond 2030 volgens de vier KNMI '06 klimaatscenario's?
Onder elk van de vier KNMI '06 klimaatscenario's neemt de herhalingstijd van lage effectieve temperaturen toe (de kans op effectieve temperaturen lager dan een gegeven drempelwaarde neemt af). Voor rond het jaar 2030 varieert de herhalingstijd voor effectieve temperaturen lager dan -16.5 °C van 54 [32 ... 237] in het G scenario tot 125 [60 ... 879] in het W+ scenario. Met name voor effectieve temperaturen lager dan -15 °C (herhalingstijd langer dan 20 jaar) is deze toename klein ten opzichte van het betrouwbaarheidsinterval behorend bij de historische periode. Toeval speelt dus een grote rol in vergelijking met de verwachte verandering. Dat betekent dat ondanks de verwachte opwarming in de klimaatscenario's, het moeilijk is de verandering in herhalingstijd daadwerkelijk vast te stellen. Dit effect is het grootst in het G scenario en het minst groot in het W+ scenario.

Graaddagen

4. Is de frequentieverdeling van het aantal graaddagen veranderd in de periode 1976-2005 ten opzichte van de periode 1905-1975?
In de meetreeks 1904-1975 voor de Bilt is de mediaan van het aantal graaddagen per winter 2406. In de periode 1976-2005 is de mediaan van het aantal graaddagen 2276 (afname: 130). Opmerkelijk is dat ook de kansverdeling op zachte en strenge winters is veranderd tussen de periode 1905-1975 en de periode 1976-2005. Zo is de afname in de zachtste 10% van de winters 202 graaddagen, terwijl de afname in de strengste 90% van de winters slechts 155 graaddagen was. Dit betekent dat het optreden van zachte winters in de afgelopen 30 jaar duidelijk frequenter is geworden. De veranderingen in het zachtste 10% kwantiel en de mediaan zijn significant. De verandering in het strengste 90% kwantiel is niet significant.
5. Wat is een betrouwbaarder schatting van het aantal graaddagen in de referentieperiode 1976-2005?
Uit de aangepaste temperatuurreeks (1904-2007) die past bij de periode 1976-2005 is afgeleid dat de mediaan van het aantal graaddagen 2252 [2219 ... 2289] bedraagt. Het 10% en 90% kwantiel liggen bij respectievelijk 2050 [2000 ... 2093] en 2519 [2451 ... 2580] graaddagen. Door het gebruik van de aangepaste reeks is het betrouwbaarheidsinterval kleiner geworden en is dus de nauwkeurigheid van de schattingen vergroot.
6. Hoe verandert de frequentieverdeling van het aantal graaddagen rond 2030 volgens de vier KNMI '06 klimaatscenario's?
In alle vier KNMI '06 klimaatscenario's neemt de mediaan van het aantal graaddagen per winter af ten opzichte van de referentieperiode. De veranderingen zijn groot. Rond 2030 varieert de afname van de mediaan van het aantal graaddagen van 111 graaddagen voor het G scenario tot 292 graaddagen in het W+ scenario. Het zachtste 10% kwantiel neemt met 110 graaddagen af voor het G scenario en met 283 voor het W+ scenario. Het koudste 90% kwantiel neemt af met 114 graaddagen voor het G scenario en met 206 graaddagen voor het W+ scenario. Voor het overgrote deel liggen de veranderingen ook buiten het betrouwbaarheidsinterval van de historische reeks. Alleen voor de extreem zachtste en strengste winters zal het lastig kunnen zijn de afname in aantal graaddagen daadwerkelijk vast te stellen. Rond 2020 zijn de veranderingen logischerwijze kleiner.

5.2 Nawoord

Het onderzoek naar veranderingen in het voorkomen van lage effectieve temperaturen heeft met name betrekking op veranderingen in temperaturen die extremer zijn dan het 10% kwantiel van de daggemiddelde temperatuur. Binnen het klimaatonderzoek is op dit moment weinig bekend over de veranderingen in extremen buiten het 10% en 90% kwantiel van de daggemiddelde temperatuur. Om de veranderingen buiten deze kwantielen te bepalen, gaan we uit van de aanname dat we de verandering in eerste orde kunnen schatten door lineaire extrapolatie van de veranderingen van het 10% en 50% kwantiel en het 90% en 50% kwantiel. Hierdoor kunnen de veranderingen van deze extreme waarden sterk over- of onderschat worden.

Binnen het klimaatonderzoek zijn er mogelijkheden om de in dit rapport gepresenteerde resultaten te verbeteren. Het onderzoek naar het optreden van extremen buiten het 10% en 90% kwantiel kan plaatsvinden met behulp van klimaatmodellen. Tegenwoordig is het steeds gebruikelijker dat klimaatmodellen ook in zogenaamde ensemble-runs worden gedraaid. Dat betekent dat het model een aantal keer gerund wordt met steeds een iets andere begintoestand. Daardoor zal iedere run een andere mogelijke realisatie van de dag-op-dag variatie in het toekomstige klimaat geven. Doordat op deze wijze veel meer realisaties van het toekomstige klimaat uitgerekend worden, kan ook de staart van de verdeling (de extremen) beter onderzocht worden.

Een beperking hierbij is dat het niet tot in detail bekend is in hoeverre een klimaatmodel in staat is om op goede wijze het toekomstige klimaat te simuleren. Daarom is het ook belangrijk te kijken naar de variatie tussen uitkomsten van verschillende klimaatmodellen. Het bestuderen van ensemble runs van een model en het onderling vergelijken van diverse klimaatmodellen wordt al veelvuldig gedaan in het klimaatonderzoek.

Inmiddels wordt ook onderzocht of op fysische gronden te begrijpen valt waarom bepaalde klimaatmodellen bepaalde veranderingen voor in de toekomst laten zien. Zo komt in veel klimaatmodellen een verandering in luchtcirculatiepatronen voor. Er is echter nog vrij weinig bekend over de oorzaak en precieze werking van deze veranderingen.

Op het KNMI wordt daar op dit moment onderzoek naar gedaan. Als begrepen wordt waarom modellen bepaalde veranderingen laten zien, kan ook beter inzicht verkregen worden in de waarschijnlijkheid van het optreden van extremen in de toekomst. Wellicht dat dan ook beter kan worden beschreven hoe het karakter van de winter gaat veranderen. Blijven de hele koude, geblokkeerde stromingssituaties nog even koud, maar treden ze minder vaak op, of worden deze juist ook minder koud? Indien er op dit soort vragen antwoord gegeven kan worden, kan dit de kwaliteit van de planning in sectoren als de gasindustrie voor de toekomst verbeteren.

6. Referenties

Bessembinder, J., Klimaatverandering en planning van capaciteit en volume. KNMI Technical report; TR-83. De Bilt, 2005.

Garratt, J.R., The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge University Press, 1992.

Verkaik, J.W., On Wind and Roughness over Land. Proefschrift Wageningen Universiteit, 2006.

KNMI website, winter 2007: http://www.knmi.nl/kenniscentrum//zachte_winter_2007/

KNMI website, transformatieprogramma: http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/

KNMI website, maandoverzichten: http://www.knmi.nl/klimatologie/maand_en_seizoenoverzichten/index.html

KNMI Handboek Waarnemen; 5. Wind. Versie maart 2001. <http://www.knmi.nl/samenw/hawa/>

Met dank aan:

Jules Beersma (advies en review)

Janette Bessembinder (advies en review)

Theo Brandsma (review en gebruikte meetreeksen)

Adri Buishand (review van de gebruikte statistische methoden)

Geert Groen (advies en review)

Hans Verloop (layout)

Appendices

Appendix A: De KNMI '06 Klimaatscenario's

In 2006 heeft het KNMI nieuwe klimaatscenario's gepubliceerd, waarin de laatste stand van de wetenschap verwerkt is. Klimaatscenario's zijn consistente en plausibele beelden van een mogelijk toekomstig klimaat. Ze geven aan in welke mate temperatuur, neerslag, wind, etc. in Nederland en directe omgeving kunnen veranderen, gegeven een bepaalde mondiale klimaatverandering. Klimaatscenario's zijn geen lange termijn weersverwachtingen: ze doen geen uitspraken over het weer op een bepaalde datum, maar alleen over het gemiddelde weer en de kans op extreem weer in de toekomst.

Mondiale en regionale klimaatscenario's

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) geeft ongeveer elke 5 jaar een overzicht van de beschikbare mondiale klimaatscenario's. Deze zijn gebaseerd op emissiescenario's, dat wil zeggen aannames over de uitstoot van broeikasgassen. Deze emissiescenario's zijn weer gebaseerd op wereldbeelden over hoe de wereldbevolking zich ontwikkeld en over ontwikkelingen op economisch, technologisch, etc gebied. (sociaal-economische en technologische scenario's).

Begin 2007 zijn de rapporten van werkgroepen 1 t/m 3 openbaar gemaakt (1: The physical science basis; 2: Impacts, adaptation and vulnerability; 3: Mitigation of climate change), met nieuwe projecties voor het klimaat in de toekomst.

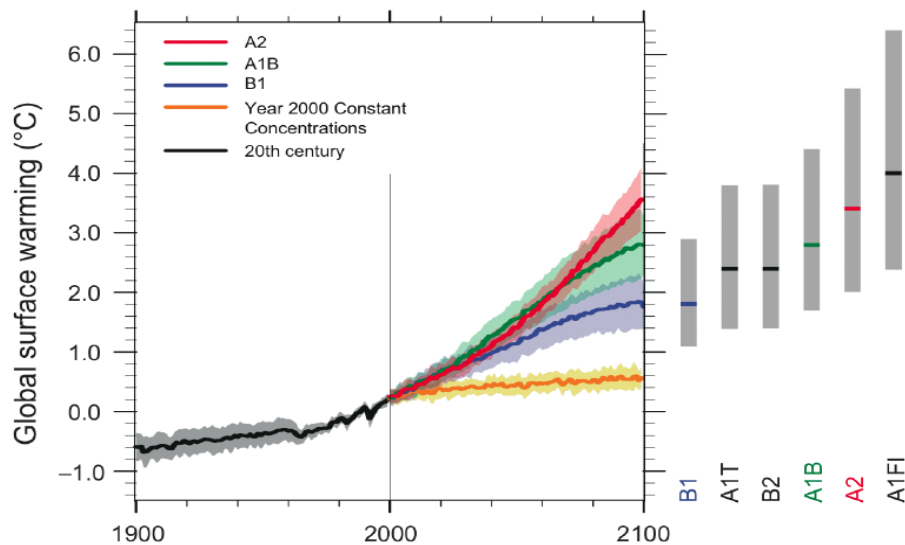
Op 17 november 2007 is het volledige rapport ("Vierde assessment rapport") gepubliceerd.

De mondiale klimaatscenario's van het IPCC geven vooral informatie over de wereldwijde opwarming en zeespiegelstijging, maar ze leveren vaak niet voldoende informatie om de effecten van klimaatverandering in een kleiner gebied te bepalen. Het KNMI heeft daarom regionale klimaatscenario's voor Nederland en omgeving afgeleid.

Geschiedenis KNMI klimaatscenario's

In 1995 zijn de eerste klimaatscenario's in de vorm van representatieve tijdreeksen voor de toekomst gepubliceerd voor gebruik in impactstudies. Deze zijn gemaakt in het kader van het Nationale Onderzoeksprogramma Klimaatverandering (NOP) en ze zijn uitvoerig gebruikt door nationale en regionale waterbeheerders in Nederland.

In 2000 is in het kader van "WaterBeheer 21st Eeuw" (WB21) een meer formele set van klimaatscenario's voor Nederland gemaakt (Kors e.a., 2000; Können, 2001). Aan deze scenario's wordt vaak gerefereerd als de WB21-klimaatscenario's. Na de eerste publicatie in 2000 zijn er op verzoek van gebruikers 2 extra "maatwerk" scenario's gedefinieerd: een "droog" scenario en een scenario met een sterke afname van de Warme Golfstroom. Na het verschijnen van het derde IPCC-rapport in 2001 zijn de WB21-scenario's tegen het licht gehouden, maar het bleek niet nodig ze op dat moment aan te passen. In mei 2006 is een nieuwe generatie algemene KNMI-klimaatscenario's gepubliceerd, de KNMI'06 klimaatscenario's.

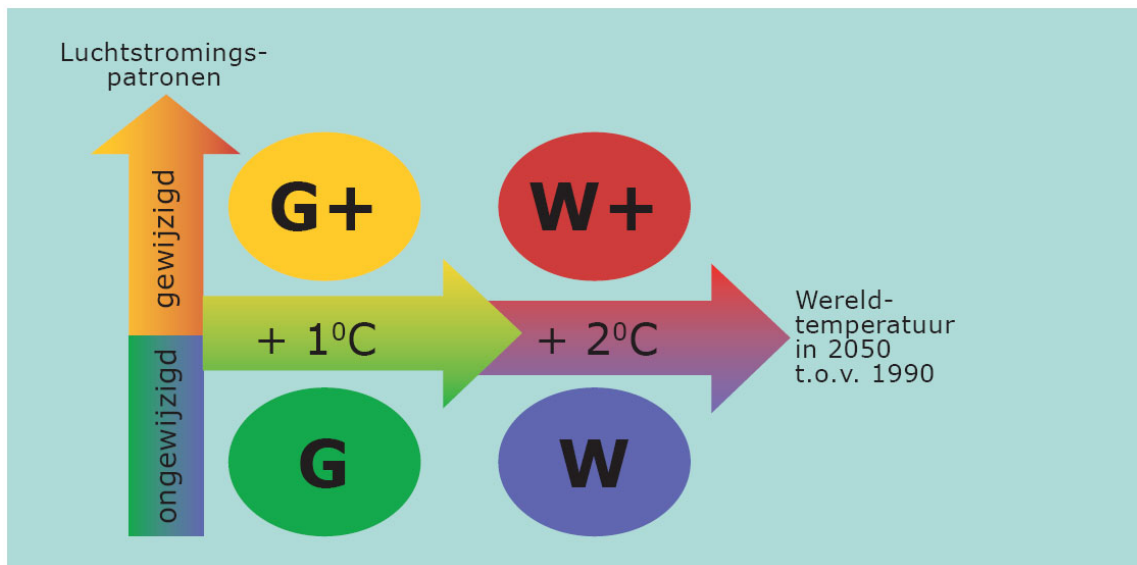


Figuur 18: Klimaatprojecties tot 2100 voor verschillende IPCC emissiescenario's. De doorgetrokken lijnen geven de gemiddelde stijging van de wereldgemiddelde temperatuur t.o.v. 1980-1999 bij verschillende emissiescenario's. De "schaduw" achter deze lijnen geeft +/- 1x de standaardafwijking. De grijze banden rechts geven de waarschijnlijke range per emissiescenario op basis van meerdere mondiale klimaatmodellen. De oranje lijn geeft de verwachte stijging van de temperatuur als de broeikasgasconcentraties vanaf 2000 constant worden gehouden.

De KNMI'06 klimaatscenario's

Hoe het klimaat in Nederland verandert is vooral afhankelijk van de wereldwijde temperatuurstijging en van veranderingen in de stromingspatronen van de lucht in onze omgeving (West Europa) en de daarmee samenhangende veranderingen in de wind. De indeling van de scenario's is daarom op deze twee aspecten gebaseerd (figuur 19).

Voor een uitgebreidere beschrijving van deze klimaatscenario's wordt verwezen naar de brochure "Klimaat in de 21^e eeuw: vier scenario's voor Nederland" (KNMI, 2006a) het bijbehorende wetenschappelijke achtergrondrapport (vd Hurk e.a, 2006) en de website www.knmi.nl/klimaatscenarios/.



Figuur 19: Schematisch overzicht van de vier KNMI'06 klimaatscenario's. Zie onderstaande legenda voor toelichting.

G	Gematigd	1°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 geen verandering in luchtstromingspatronen in West Europa
G+	Gematigd +	1°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 + winters zachter en natter door meer westenwind + zomers warmer en droger door meer oostenwind
W	Warm	2°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 geen verandering in luchtstromingspatronen in West Europa
W+	Warm +	2°C temperatuurstijging op aarde in 2050 ten opzichte van 1990 + winters zachter en natter door meer westenwind + zomers warmer en droger door meer oostenwind

Tabel 9: Legenda bij de KNMI'06 klimaatscenario's

Kenmerken van alle KNMI'o6 klimaatscenario's zijn:

- Opwarming zet door;
- Winters gemiddeld natter;
- Heviger extreme zomerbuien;
- Veranderingen in het windklimaat klein ten opzichte van de natuurlijke grilligheid;
- Zeespiegel blijft stijgen.

Samen geven deze klimaatscenario's het grootste deel van de range voor het mogelijke toekomstige klimaat in Nederland weer, op basis van onze huidige kennis. Het zijn min of meer de hoekpunten waarbinnen we verwachten dat ons toekomstig klimaat zich zal ontwikkelen: op basis van onze huidige kennis verwachten we dat de kans het grootst is dat ons toekomstige klimaat zich zal ontwikkelen binnen deze vier hoekpunten.

		G	G+	W	W+
Wereldwijde temperatuurstijging		+1°C	+1°C	+2°C	+2°C
Verandering in luchtstromingspatronen		nee	ja	nee	ja
Winter ³	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,1°C	+1,8°C	+2,3°C
	koudste winterdag per jaar	+1,0°C	+1,5°C	+2,1°C	+2,9°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+4%	+7%	+7%	+14%
	aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	0%	+1%	0%	+2%
	10-daagse neerslagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+4%	+6%	+8%	+12%
Zomer ³	hoogste daggemiddelde windsnelheid per jaar	0%	+2%	-1%	+4%
	gemiddelde temperatuur	+0,9°C	+1,4°C	+1,7°C	+2,8°C
	warmste zomerdag per jaar	+1,0°C	+1,9°C	+2,1°C	+3,8°C
	gemiddelde neerslaghoeveelheid	+3%	-10%	+6%	-19%
	aantal natte dagen (≥ 0,1 mm)	-2%	-10%	-3%	-19%
	dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+13%	+5%	+27%	+10%
potentiële verdamping	+3%	+8%	+7%	+15%	
Zeespiegel	absolute stijging	15-25 cm	15-25 cm	20-35 cm	20-35 cm

Tabel 10: Klimaatverandering in Nederland rond 2050 ten opzichte van de basisperiode 1990 (1976 tot en met 2005) volgens de vier KNMI'o6 klimaatscenario's.

Referenties

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), 2006. Klimaat in de 21^e eeuw, vier scenario's voor Nederland.

Hurk, B. van den, Klein Tank, A., Lenderink, G., Oldenborgh, G.J., Katsman, C., Brink, H. van den, Keller, F., Bessembinder, J., Burgers, G., Komen, G., Hazeleger, W., Drijfhout, S. en Ulden, A., KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI), 2006.

Können, G.J., Climate Scenario's For Impact Studies In The Netherlands; zie: www.knmi.nl/onderzk/klimscen/scenarios/Scenarios2001_Web.htm, 2001.

Kors, A.G., Claessen, F.A.M., Wessling, J.W. en Können, Scenario's externe krachten voor WB21. WL|Delft Hydraulics; Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RWS, RIZA), 2000.

Appendix B: Transformatie van tijdreeksen

Met het transformeren van een tijdreeks wordt bedoeld dat een historische neerslag- of temperatuurreeks op dagbasis omgezet wordt in een reeks die past bij het toekomstige klimaat onder één van de vier KNMI'06 klimaatscenario's voor een bepaalde tijdshorizon. Bij het transformeren van een tijdreeks wordt de verandering van de gemiddelden en de variabiliteit, zoals voorgeschreven door het gekozen KNMI'06 scenario voor een bepaalde tijdshorizon toegepast op een gegeven historische reeks van temperatuur of neerslag. De getransformeerde tijdreeksen geven informatie over de gemiddelden, variatie tussen dagen, kans op extremen, etc. voor het mogelijke klimaat in de toekomst. De getransformeerde tijdreeksen leveren echter géén voorspelling van het weer in de toekomst op een bepaalde dag of in een bepaald jaar!

De transformatie procedure

De KNMI'06 scenario's geven aan dat de verandering in de gemiddelden vaak anders is dan de verandering in de extreme waarden. De transformatieprocedure houdt hier rekening mee, en zorgt ervoor dat dit tot uiting komt in de getransformeerde tijdreeksen die passen bij een bepaalde tijdshorizon in de toekomst (zie figuur 20).

Voor het transformeren zijn scenariowaarden per kalendermaand gebruikt. De gemiddelde scenariowaarden voor de maanden juni tot en met augustus en voor december tot en met februari komen overeen met de waarden voor de zomer en winter zoals gegeven op de website en in de brochure over de KNMI'06 klimaatscenario's.

Bij de transformatie van temperatuur worden de volgende stappen gevolgd:

Stap 1: Bij het transformeren wordt de standaard historische tijdreeksen van etmaalgemiddelde temperaturen (in °C; van 00-24 Universal Time; ook wel "gemiddelde temperatuur" genoemd) van de Bilt gebruikt. In de eerste stap wordt het gemiddelde (QGEM), het 10% kwantiel (Q10; lage extremen: 10% van de dagen heeft een temperatuur lager dan deze waarde) en het 90% kwantiel (Q90; hoge extremen: 10% van de dagen heeft een temperatuur hoger dan deze waarde) berekend in de historische tijdreeks (aangeduid met 1990) voor elke kalendermaand van het jaar.

Stap 2: Vervolgens wordt bepaald hoeveel deze kwantielen in de toekomst onder het gewenste klimaatscenario en voor de gewenste tijdshorizon zullen veranderen. De veranderingen voor 2050 en 2100 ten opzichte van 1990 zijn voor ieder scenario apart expliciet bepaald bij het opstellen van de KNMI '06 scenario's. Bij een andere tijdshorizon wordt er lineair geïnterpoleerd tussen de waarde tussen respectievelijk 1990 en 2050 of tussen 2050 en 2100.

Voorbeeld:

$$\Delta QGEM_{2030} = (2030-1990) / (2050-1990) \cdot \Delta QGEM_{2050}$$

Vervolgens bepaald het programma de toekomstige etmaaltemperaturen die bij de Q10, QGEM en Q90 horen.

Voorbeeld:

$$QGEM_{2030} = QGEM_{1990} + \Delta QGEM_{2030}$$

Zoals hierboven aangegeven kan de verandering in de mediaan anders zijn dan de verandering in de extremen. Ook de verandering van temperatuur op dagen met lage temperaturen (Q10) kan verschillen van de verandering van temperaturen op dagen met hoge temperaturen (Q90). Dit is het effect van asymmetrische opwarming, waarbij bijvoorbeeld 's winters de koude dagen meer opwarmen dan de warme dagen.

Stap 3: In de laatste stap worden de etmaaltemperaturen van de historische reeks dag voor dag omgezet in mogelijke toekomstige etmaaltemperaturen.

Voorbeeld:

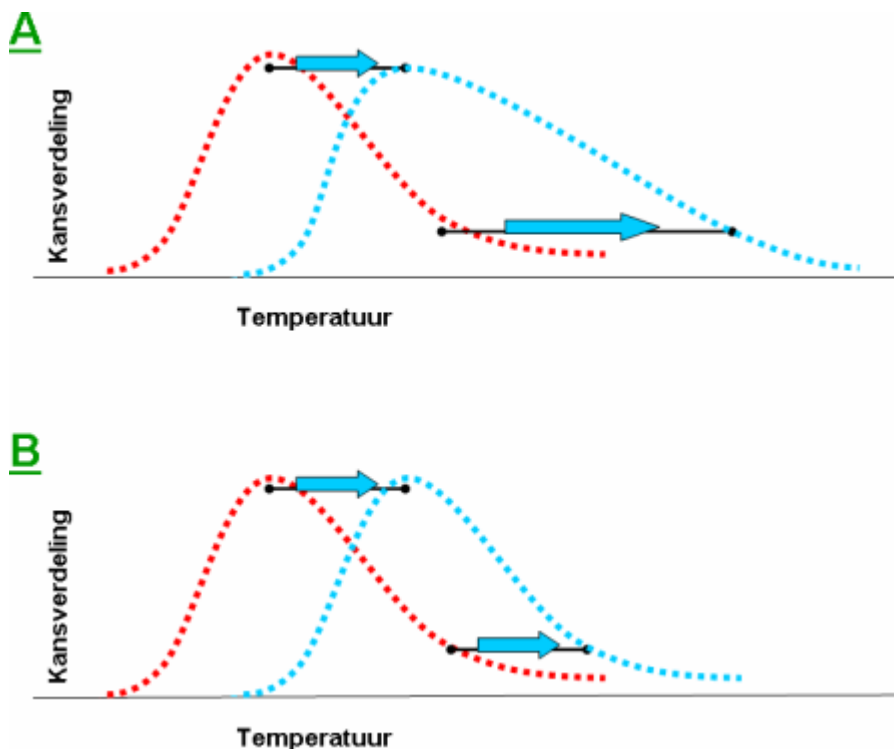
als een etmaaltemperatuur in de historische reeks groter is dan het gemiddelde in de historische reeks, dan:

$$T_{2030} = QGEM_{2030} + a (T_{1990} - QGEM_{1990})$$

$$\text{Waarbij: } a = (Q90_{2030} - QGEM_{2030}) / (Q90_{1990} - Q50_{1990})$$

Beperkingen van het gebruik van getransformeerde reeksen

De volgorde van temperatuurwisselingen tussen dagen, jaar-op-jaar variaties, etc. in de getransformeerde tijdreeksen wordt sterk bepaald door wat er in het verleden is gebeurd: het patroon van temperatuurwisselingen tussen dagen in de getransformeerde reeks is gebaseerd op de historische reeks. Veranderingen in jaar-op-jaar variatie in de toekomst worden in principe niet meegenomen, hoewel de grootte van de temperatuurwisselingen tussen dagen wel kan veranderen. Over al dit soort veranderingen is nog zeer weinig bekend. Tenslotte gebruikt het programma slechts enkele punten uit de kansverdeling om een tijdreeks te transformeren. Voor extremen die buiten deze punten liggen, kan er over- of onderschatting van de temperatuur optreden.



Figuur 20: Schematische voorstelling van de verandering van een temperatuurverdeling door de Transformatie. Bij A verandert het gemiddelde anders dan de extremen, en bij B is de verandering in het gemiddelde gelijk aan de verandering in de extreme waarden.

**Appendix C:
De Gumbel- en GEV-verdeling**

De GEV-verdeling

Extreme-waardeverdelingen worden gebruikt om de kans op zeer extreme (ofwel zeldzame) gebeurtenissen te beschrijven. De Generalized Extreme Value verdeling (GEV) is een extreme-waardeverdeling die veelal gebruikt wordt in combinatie met blokmaxima. In de praktijk zijn deze blokmaxima vaak de grootste waarde van een bepaalde grootheid in een jaar of seizoen. De algemene vergelijking van de GEV-verdeling is:

$$F(y) = e^{-\left[1 - \frac{\theta}{\sigma}(y-\mu)\right]^{-1/\theta}} \quad (5)$$

Met:
 y grootheid die door de verdeling beschreven wordt (in dit geval dus de jaarminima van effectieve temperatuur)
 F(y) de cumulatieve kans dat variabele Y kleiner dan of gelijk aan y is (Pr(Y ≤ y))
 μ de locatieparameter (gerelateerd aan het gemiddelde)
 σ is the schaalparameter (gerelateerd aan de spreiding)
 θ is the vormparameter (gerelateerd aan de scheefheid)

Bij de GEV verdeling wordt ervan uitgegaan dat grote waarden van y extreem zijn. Dit is echter niet zo bij effectieve temperaturen.

Daar zijn juist lage temperaturen extreem. Daarom wordt -y als de effectieve temperatuur gedefinieerd.

De Gumbel-verdeling

De Gumbel verdeling is een speciale vorm van de GEV verdeling, waarbij de vormparameter (θ) 0 is. We gaan naar een limietoplossing van vergelijking 5. De vergelijking van de extreme waarde verdeling wordt dan:

$$F(y) = e^{-e^{-x}} \quad (6)$$

Waarbij x de genormaliseerde Gumbel variabele voorstelt:

$$x = \frac{y - \mu}{\sigma} \quad (7)$$

LET OP: Het kan verwarrend zijn dat er gesproken wordt over een Gumbel plot. Een Gumbel plot is een type plot, waarbij de x-as dubbel-logaritmisch is afgebeeld. Dit heeft tot gevolg dat de Gumbel verdeling in een Gumbel plot een rechte lijn is. Er kan echter ook een GEV verdeling in een Gumbel plot worden weergegeven. Dan is de verdeling echter geen rechte lijn, maar bevat een kromming!

Herhalingstijd

De herhalingstijd is te bepalen met behulp van de cumulatieve kansdichtheidsfunctie $F(y)$. Deze functie geeft de kans aan dat we variabele y (effectieve temperatuur in dit geval) kleiner dan een bepaalde waarde aantreffen. In dit onderzoek zijn we juist geïnteresseerd in de kans dat de effectieve temperatuur groter is dan een bepaalde waarde (we keken immers naar $-T_{\text{eff}}$). Die kans wordt beschreven door $1 - F(y)$. Deze kans is omgekeerd evenredig met de herhalingstijd, zodat we de herhalingstijden die gerelateerd zijn aan de GEV distributie kunnen bepalen volgens:

$$T(y) = \frac{1}{1 - F(y)} \quad (8)$$

Met:

$T(y)$ de herhalingstijd behorend bij de variabele y , in dit geval effectieve temperatuur.

$F(y)$ de verdeling van extreme waarden van variabele y .

Met vergelijking 8 is het eenvoudig uit te rekenen welke herhalingstijd T hoort bij het optreden van een gegeven y . Het uitrekenen van y bij een gegeven herhalingstijd T kan door het omschrijven van vergelijking 8:

Voor GEV:

$$y = \mu + \frac{\sigma}{\theta} \left\{ 1 - \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right]^\theta \right\} \quad (9)$$

Voor Gumbel ($\theta = 0$):

$$y = \mu + \sigma \left\{ 1 - \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] \right\} \quad (10)$$

**Appendix D:
De 3 parameter-gammaverdeling en
de normale verdeling**

De 3 parameter-gammaverdeling

De 3 parameter-gammaverdeling is vergelijkbaar met de normale verdeling. In tegenstelling tot de normale verdeling (met 2 parameters), beschrijft de 3 parameter-gammaverdeling asymmetrische (scheve) verdelingen. Wanneer de scheefheid naar nul gaat, en de verdeling dus symmetrisch wordt, dan gaat de 3 parameter-gammaverdeling over in de normale verdeling. Bij het fitten van een 3 parameter-gammaverdeling tijdens bootstrap-procedures, kwam het voor dat de getrokken verdeling als symmetrisch beschouwd kon worden, zodat een normale verdeling gefit werd.

De 3 parameter-gammaverdeling wordt ook wel Pearson Type III verdeling genoemd.

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\sigma} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^{(\alpha-1)} e^{-\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)} \quad (10)$$

Met:

x is de variabele, in dit geval graaddagen

$f(x)$ is de kansdichtheidsfunctie

μ is de locatieparameter (gerelateerd aan het gemiddelde)

σ is de schaalparameter (gerelateerd aan de spreiding)

α is de vormparameter (gerelateerd aan de scheefheid)

$\Gamma(\alpha)$ is de gamma functie

Voor de cumulatieve 3 parameter-gammaverdeling ($F(x)$); de integraal van vergelijking 10) bestaat geen analytische oplossing. In dit rapport is de cumulatieve distributie functie bepaald door numerieke integratie met behulp van de samengestelde trapeziumregel, met subintervallen ter grootte van 1 graaddag.

De standaard normale verdeling

Zodra de verdeling zijn scheefheid verliest, gaat de vormparameter α naar oneindig. Vergelijking 10 gaat dan over in de normale verdeling:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{x-\mu}{2\sigma^2}\right)} \quad (11)$$

**Appendix E:
De bootstrapmethode**

De bootstrapmethode is een statistische techniek om de onzekerheid in statistische grootheden (zoals gemiddeldes, spreiding, quantielen) op empirische wijze uit de beschikbare data te schatten.

In dit rapport is daar waar vermeld de bootstrapmethode gebruikt om het 95% betrouwbaarheidsinterval van een statistische grootheid van een reeks te bepalen. Dit 95% betrouwbaarheidsinterval geeft aan dat, op basis van de metingen, er een kans van slechts 5% is dat de werkelijke waarde van deze grootheid buiten het geschatte betrouwbaarheidsinterval ligt.

De werkelijke waarde (van het "echte" klimaat) kunnen wij natuurlijk nooit te weten komen. We verkrijgen er alleen informatie over door metingen te verrichten. Die metingen zijn slechts een sample van het werkelijke klimaat. De statistiek van een sample zal altijd in meer of mindere mate afwijken van de "werkelijkheid". In het algemeen is het zo dat hoe meer metingen we hebben (hoe groter het sample), hoe betrouwbaarder de schattingen van statistische grootheden zijn.

In de bootstrap methode worden 1000 alternatieve reeksen (bootstrap samples genaamd) gegenereerd op basis van de originele reeks. Deze nieuwe reeksen zijn bepaald door willekeurige datapunten te "trekken" uit de originele reeks en hebben dezelfde lengte. In een bootstrap sample kan meerdere keren dezelfde datapunten voorkomen, terwijl sommige datapunten helemaal niet voorkomen. Binnen de statistiek wordt deze methode van trekken vaak aangeduid als "trekken met teruglegging". Uit ieder afzonderlijk bootstrap sample kan de gewenste statistische grootheid bepaald worden, zodat men dus 1000 schattingen van die grootheid krijgt. De range waarbinnen 950 van de 1000 schattingen vallen, geeft dan het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de gewenste statistische grootheid.

Voorbeeld:

Voor de bepaling van het betrouwbaarheidsinterval van herhalingstijden van jaarminima van effectieve temperaturen in bijvoorbeeld figuur 5 is 1000 keer een nieuwe reeks gemaakt van de jaarminima van effectieve temperaturen uit de periode 1905-2007. De nieuwe bootstrap-reeksen zijn even lang, en bestaan uit een willekeurige volgorde van jaren. Hierbij kunnen jaren meerdere keren voorkomen. Vervolgens is door iedere nieuwe bootstrap-reeks een GEV verdeling gefit. Vervolgens zijn met behulp van deze GEV verdeling de herhalingstijden geschat, behorend bij ieder specifiek bootstrap sample. Door nu voor iedere herhalingstijd te kijken binnen welke grenzen 95% van de bootstrap samples ligt, is het 95% betrouwbaarheidsinterval bepaald, behorend bij de waargenomen reeks jaarminima van effectieve temperaturen in de periode 1905-2007.

**Appendix F:
Metadata voor station De Bilt (260)**

Positie:	52° 06' N.B. 05° 11' O.L.
Terreinhoogte:	+2,0 meter t.o.v. NAP.
Metingen:	19010101 - heden
Karakteristiek omgeving:	Gelegen in overgangsgebied van Utrechtse heuvelrug naar Kromme Rijngebied; half open landschap: gras- en bouwland afgewisseld door bebouwing en bebossing
Grondsoort:	Zand
Hoogte windmeetmast:	20 meter
Temperatuurmetingen:	gemeten m.b.v. :
19010101 - 19500516	thermograaf in grote pagodehut (op 2,20 meter boven maaiveld)
19500517 - 19610628	thermograaf in Stevensonhut (op 2,20 meter boven maaiveld)
19610629 - 19930625	weerstandsmeting in Stevensonhut (op 1,50 meter boven maaiveld)
19930326 - heden	elektrische sensoren in schotelhut (op 1,50 meter boven maaiveld)
Windmetingen:	Gemeten m.b.v., bijzonderheden en meethoogte:
19040101 - 19150823	Molentje van Robinson op houten toren op hoofdgebouw; windrichting anemograaf "Sass en Co" systeem Steffens. Meethoogte 37,0 m.
19150901 - 19161031	idem; tijdelijke meting op 18,0 m; herleid naar 37,0 m met de factoren: NO 2.02; W 1.81; NNW 1.55 en ZZO 1.26. Meethoogte 18,0 m.
19161101 - 19530216	idem; op betonnen toren op hoofdgebouw; ter vergelijking ook een Dines aanwezig op de toren. Meethoogte 37,5 m.
19530217 - 19601231	idem; op nieuwe toren (de spijker) diverse molentjes. Meethoogte 38,3 m.
19610101 - 19820731	cup anemometer met frequentiemeter en elektrische windvaan; Nieaf recorder. Meethoogte 10,0 m.
19820801 - 19930524	idem; Camille Bauer recorder (er was een back-up mast van 20,0 m hoog). Meethoogte 10,0 m.
19930525 - 19930625	idem; AWS (digitale registratie). Meethoogte 10,0 m.
19930626 - heden	idem; AWS (digitale registratie). Meethoogte 20,0 m.