



Koninklijk Nederlands
Meteorologisch Instituut
Ministerie van Infrastructuur en Milieu

Methode voor het genereren van uurneerslagreeksen in een toekomstig klimaat

J. Bessembinder

De Bilt, 2012 | Technical report; TR-320

**Methode voor het genereren van
uurneerslagreeksen in een toekomstig klimaat**
Rapport in kader van project 'regiospecifieke
klimaatinformatie voor Haaglanden en Regio Rotterdam'
(KvK-project HSHL04/HSRR05)

Versie 1.0

Datum november 2012
Status Definitief

Colofon

Titel	Methode voor het genereren van urneerslagreeksen in een toekomstig klimaat. Rapport in kader van project 'regiospecifieke klimaatinformatie voor Haaglanden en Regio Rotterdam' (KvK-project HSHL04/HSRR05)
Project nummer	HSHL05/HSRR04 (Kennis voor Klimaat/Knowledge for Climate project)
Contact persoon	Janette Bessembinder bessembi@knmi.nl KNMI Climate Services / Klimaatdata en -advies Wilhelminalaan 10 3732 GK De Bilt Postbus 201 3730 AE De Bilt
Auteur	Janette Bessembinder

De auteur wil met name Robert Leander bedanken voor het uitwerken van het uurtransformatieprogramma, Geert Lenderink voor de boven- en ondergrenzen voor de veranderingen van urneerslagextremen en Alexander Bakker, Jules Beersma en Adri Buishand voor hun waardevolle bijdragen en kritische blik op de opzet en inhoud van dit project.

Dit project (HSHL05/HSRR04) is uitgevoerd in het kader van het Nederlandse Nationale onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat (Knowledge for Climate; www.kennisvoorklimaat.nl; www.knowledgeforclimate.org). Dit onderzoeksprogramma is medegefinancierd door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu. Daarnaast is dit project medegefinancierd door de provincie Zuid-Holland, Gemeentewerken Rotterdam en het Hoogheemraadschap van Delfland.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	6
Summary.....	7
1. Achtergrond en onderzoeksvraag.....	9
1.1. Behoeftte aan regiospecifieke klimatinformatie.....	9
1.2. Huidige praktijk.....	9
1.3. Doelstelling.....	10
1.4. Opbouw van het rapport.....	10
2. Wat weten we over veranderingen in uurwaarden van neerslag.....	11
2.1. Huidige klimaat: neerslagextremen voor korte tijdsduren.....	11
2.2. Huidige klimaat: ruimtelijke verschillen in neerslagextremen voor korte tijdsduren.....	13
2.3. Toekomst: verandering in uurneerslagextremen.....	14
2.4. Toekomst: ruimtelijke verschillen in neerslagextremen.....	15
2.5. Mogelijke veranderingen in extreme uurneerslag, op basis van literatuur.....	15
3. Methoden voor transformatie van uurneerslag.....	20
3.1. Consistentie met de dagneerslag-transformatie.....	20
3.2. Transformeren van uurneerslag.....	20
3.3. Hoe werkt de niet-lineaire methode?	22
4. Testen van de methode voor transformeren van uurneerslag.....	24
4.1. Gebruikte data.....	24
4.2. Resultaten en discussie.....	24
5. Conclusies en discussie.....	28
Referenties.....	30
Bijlage 1. Beschikbare gemeten uurneerslagreeksen in de Regio Haaglanden en de Regio Rotterdam.....	32
Bijlage 2. Formele beschrijving van het uurtransformatieprogramma (EN).....	33
Bijlage 3. Indicaties voor mogelijke veranderingen in uurneerslag.....	36

Samenvatting

Het stedelijk en landelijk watersysteem in Zuid-Holland reageert snel op neerslag door het grote percentage verhard oppervlak. Om de gevolgen van hevige neerslag goed te kunnen inschatten heeft men daarom neerslaggegevens per uur nodig. In Zuid-Holland zijn enkele weerstations met neerslagmetingen per uur, maar voor de toekomst zijn deze uurneerslagreeksen niet beschikbaar. Voor de KNMI'06 klimaatscenario's (KNMI, 2009) is er een programma beschikbaar voor het genereren van toekomstneerslagreeksen op dagbasis. Dit programma transformeert historische neerslagreeksen in reeksen voor de toekomst, die passen bij één van de vier KNMI'06 klimaatscenario's, voor een bepaalde tijdshorizon. Tot nu toe werd voor de neerslag per uur op een bepaalde dag meestal dezelfde verandering toegepast als volgt uit de transformatie van de dagwaarden. Onderzoek van Lenderink & van Meijgaard (2008) en Lenderink et al. (2011) laat zien dat boven een bepaalde temperatuur de toename van de neerslagintensiteit per uur sterker is dan die voor dagextremen. De tot nu toe gebruikte methode onderschat daarom mogelijk de toekomstige uurneerslagextremen.

Bovenstaande leidde tot het volgende onderzoeksdoel:

- Het ontwikkelen van een programma dat neerslagtijdreeksen op uurbasis kan genereren passend bij de KNMI'06 klimaatscenario's en de beschikbare wetenschappelijk kennis. Bovendien moeten de gegenereerde tijdreeksen op uurbasis consistent zijn met de neerslagtransformatie op dagbasis.

Om de consistentie met de getransformeerde dagneerslag te bewaren is de volgende methode toegepast:

- Sommeer de uurneerslagwaarden tot dagsommen;
- Transformeer de dagsommen m.b.v. het huidige transformatieprogramma;
- Transformeer vervolgens de uurwaarden zodanig dat voor elke dag de getransformeerde uursommen opgeteld gelijk zijn aan de getransformeerde dagsom.

De bovenstaande methode gebruikt alleen informatie over extreme neerslag (99-percentiel van de natte uren), waarover iets bekend is uit het werk van G. Lenderink. Met het hier uitgewerkte uurtransformatie-programma is het mogelijk de uurneerslag sterker te laten veranderen dan de dagneerslag volgens de opgegeven veranderingen. Hoofdstuk 4 laat een aantal resultaten zien. Alternatieve methoden zijn overwogen, maar het leek het meest wenselijk om een methode te gebruiken die methodisch aansluit op het dagtransformatieprogramma, zoals de hier uitgewerkte methode.

Waarvoor kan het uurtransformatieprogramma gebruikt worden?

- De hier gepresenteerde methode is een experimentele methode, bedoeld voor *gevoeligheidsanalyses* m.b.t. waterbeheer. Er bestaat nog veel onzekerheid over de waarden voor de veranderingen in uurneerslagen. De in de Paragraaf 2.5 en in Bijlage 3 genoemde onder- en bovengrenzen voor veranderingen van extreme uurneerslagen zijn indicatief en hebben geen officiële status;
- In het uurtransformatieprogramma wordt geen rekening gehouden met ruimtelijke verschillen in extreme neerslag. Uit onderzoek is bekend dat er in het huidige klimaat wel ruimtelijke verschillen bestaan in extreme dagneerslag (Buishand et al., 2009), maar veel minder in extreme uurneerslag (Overeem et al., 2009b). Aangezien dit niet expliciet in het uurneerslag-transformatieprogramma is verwerkt, kan dit programma niet op grote schaal ingezet worden. Er is uit klimaatmodellen te weinig coherente informatie beschikbaar om de onder- en bovengrenzen van mogelijke veranderingen in uurneerslag ruimtelijk te differentiëren. Het wordt daarom aangeraden dit programma alleen voor individuele stations te gebruiken of voor enkele dicht bij elkaar gelegen stations (en niet tegelijkertijd voor stations in verschillende delen van Nederland, indien de samenhang tussen die stations van belang is).

Summary

The urban and rural water systems in the province of Zuid-Holland react fast to precipitation due to the high percentage paved surface. To estimate the impacts of heavy rainfall, precipitation data on hourly basis are needed. In Zuid-Holland there are a few weather stations that measure precipitation on an hourly basis, however, hourly precipitation time series for the future are not available. For the KNMI'06 climate scenarios (KNMI, 2009) a tool for generating future time series was developed. This tool transforms historical time series into future time series that are consistent with one of the four KNMI'06 climate scenarios for a specified time horizon. Until now, the hourly precipitation time series for the future were often made by applying the change on daily basis from this transformation tool to all hours with precipitation on that same day. Research from Lenderink & van Meijgaard (2008) and Lenderink et al. (2011) showed that, above a certain temperature, the extreme hourly precipitation can increase much faster with temperature increases than the extreme daily precipitation. This means that the current method may underestimate the hourly precipitation extremes in the future.

The above resulted in the following research objective:

- Develop a tool to generate hourly precipitation time series for the future, consistent with the KNMI'06 climate scenarios, the current scientific knowledge about changes in hourly extreme precipitation and with the future time series on daily basis.

To maintain consistency with the transformed daily precipitation time series, the following approach was followed:

- Add up the hourly precipitation amounts to daily precipitation amounts;
- Transform the daily precipitation time series with the help of the current daily transformation tool;
- Transform the hourly precipitation amounts in such a way that for each day the sum of the transformed hourly precipitation is equal to the transformed daily precipitation.

This method only uses information about changes in extreme hourly precipitation (99-percentile of the wet hours), about which at least something is known from the work of G. Lenderink. With the developed hourly precipitation transformation tool it is possible to change the extreme hourly precipitation more than the average hourly precipitation. The transformed extreme hourly precipitation was in accordance with the imposed changes. Chapter 4 shows some results. Alternative methods were taken into consideration, however the above method, which is in alignment with the method used in the transformation tool for daily precipitation was considered most desirable.

In which situations can the hourly transformation tool be used?

- The presented method is experimental, and meant for *sensitivity analyses* in water management. There is a lot of uncertainty about the possible changes in hourly precipitation. The lower and upper limits for changes in extreme hourly precipitation in Paragraph 2.5 and Annex 3 are indicative and do not have an official status;
- The tool for transforming hourly precipitation does not take into account spatial differences in extreme precipitation. Research showed that there are spatial differences in extreme daily precipitation (Buishand et al., 2009), but far less in extreme hourly precipitation (Overeem et al., 2009b). Considering that this is not explicitly included in the hourly precipitation transformation, this tool can not be used on a large scale within the Netherlands. Too little coherent information is available from climate models to spatially differentiate the lower and upper limits of possible hourly precipitation. We, therefore, advise to use this tool only for individual stations or for a limited number of stations close to each other and not at the same time for several regions in the Netherlands when the coherency between the stations is important.

1. Achtergrond en onderzoeksvraag

1.1. Behoefte aan regiospecifieke klimaatinformatie

De sterk verstedelijkte gebieden Haaglanden en Regio Rotterdam met een hoge economische activiteit zijn hotspots binnen het onderzoeksprogramma Kennis voor Klimaat¹. Ze liggen beide in de lager gelegen westelijke kustregio van Nederland². Veel economische activiteiten worden op een of andere manier beïnvloed door het weer of het klimaat. Om deze economische activiteiten goed te laten functioneren en te behouden, is het van belang dat het gebied zo is ingericht dat de meeste extremen in het huidige klimaat en in het toekomstige klimaat goed kunnen worden opgevangen zonder grote ontwrichtingen te veroorzaken (= klimaatrobuuste inrichting). Dit betekent o.a. dat extreme neerslag, zoals bijv. in augustus 2006 (Groen, 2007), niet voor al te grote problemen mag zorgen.

Binnen de hotspots Haaglanden en Regio Rotterdam speelt wateroverlast (en in mindere mate watertekort) een grote rol (Nieuwkerk et al., 2010; Hoogvliet et al., 2011). Het stedelijk watersysteem reageert snel bij neerslag door het grote aandeel verhard oppervlak. Om de impacts van de verandering in neerslag goed te kunnen bepalen, is regiospecifieke neerslaginformatie (bijv. tijdreeksen en statistische data) met een hoge tijdsresolutie nodig (per uur of voor nog kortere tijdsperiodes). De afgelopen jaren is in enkele projecten van het KNMI meer informatie beschikbaar gekomen over regionale verschillen in het huidige neerslagklimaat (Buishand et al., 2009; Overeem et al. 2009a/b): er bestaan wel ruimtelijke verschillen in dagextremen binnen Nederland, maar voor neerslagextremen op uurbasis zijn ruimtelijke verschillen niet aangetoond. Lenderink & van Meijgaard (2008) en Lenderink et al. (2011) hebben onderzocht hoe de neerslagextremen op dagbasis en op uurbasis toenemen met een toenemende temperatuur: boven een bepaalde temperatuur nemen de extremen op uurbasis sneller toe dan de extremen op dagbasis.

1.2. Huidige praktijk

Het stedelijk watersysteem reageert snel op neerslag. Daarom zijn tijdreeksen op dagbasis te grof: bij een neerslag van 20 mm goed verspreid over een dag reageert het stedelijk watersysteem anders dan wanneer die 20 mm geconcentreerd in 1 of enkele uren valt. Men gebruikt daarom bij voorkeur uurneerslagreeksen³ voor impactanalyses. Voor het heden zijn die wel, tot op zekere hoogte, beschikbaar (Bijlage 1), maar voor de toekomst niet.

Op de KNMI-website is een tool beschikbaar (http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/) voor het genereren van tijdreeksen op dagbasis voor de toekomst. De tool genereert tijdreeksen voor de toekomst die passen bij één van de vier KNMI'06 klimaatscenario's voor een bepaalde tijdshorizon tussen 2020 en 2100, door transformatie van een historische tijdreeks. Indien men geïnteresseerd was in tijdreeksen van uurwaarden, werd tot nu toe voor de uurwaarden op een bepaalde dag meestal dezelfde verandering toegepast als de verandering voor die dag in de transformatie van de dagwaarden (verderop 'proportionele methode' genoemd). De KNMI'06 klimaatscenarios geven geen

¹ Zie <http://kennisvoorklimaat.klimaatonderzoeknederland.nl/>, <http://kennisvoorklimaat.klimaatonderzoeknederland.nl/hotspots/regio-haaglanden> en <http://kennisvoorklimaat.klimaatonderzoeknederland.nl/hotspots/regio-rotterdam>;

² Verderop in het rapport wordt ook gesproken van de kustregio. Het gaat hierbij dan om een strook binnen ongeveer 30 km van de kust;

³ Of zelfs neerslaggegevens per bijv. 5 minuten.

informatie over veranderingen in uurwaarden. Op basis van onderzoek wordt echter verwacht dat uurextremen in de zomer meer kunnen veranderen dan dagextremen (Lenderink et al., 2011). Bij lagere temperaturen, zoals in de winter, werd dit effect niet gevonden. Bij de hierboven beschreven 'proportionele' methode worden uurextremen dus mogelijk onderschat in een deel van het jaar.

1.3. Doelstelling

Bovenstaande leidde tot het volgende onderzoeksdoel:

- Het ontwikkelen van een pilot programma dat neerslagtijdreeksen op uurbasis kan genereren die passen bij de KNMI'06 klimaatscenario's en de op basis van expertkennis mogelijk geachte verandering in uurneerslag. Bovendien moeten de gegenereerde tijdreeksen op uurbasis consistent zijn met de neerslagtransformatie op dagbasis.

Er is op dit moment nog te weinig kennis om, zoals bij het dagtransformatie-programma, eenduidige waarden voor de veranderingen in uurneerslag te geven (Bijlage 3). Het ontwikkelde uurtransformatieprogramma in dit project is met name ook bedoeld om tijdreeksen te genereren waarmee gevoeligheidsanalyses uitgevoerd kunnen worden.

1.4. Opbouw van het rapport

In Hoofdstuk 2 wordt eerst een overzicht gegeven van wat we weten over de veranderingen in uurneerslag. De KNMI'06 klimaatscenario's geven geen informatie over veranderingen van extreme neerslag op uurbasis, maar voor het ontwikkelen van een uurtransformatieprogramma is het wel nodig om te weten wat de mogelijke onder- en bovengrenzen voor veranderingen in uurneerslag zijn. Op basis van wat er bekend is, is een eerste grove schatting van deze onder- en bovengrenzen gemaakt (Hoofdstuk 2 en Bijlage 3). Hoofdstuk 3 bespreekt de aanpak die is gevolgd bij het maken van het uurtransformatieprogramma. Enkele varianten worden beschreven en kwalitatief vergeleken. In Hoofdstuk 4 wordt de beste variant uitgewerkt en worden enkele resultaten van het uurtransformatieprogramma getoond. Hoofdstuk 5, tenslotte, bespreekt de mogelijkheden en beperkingen van het programma.

2. Wat weten we over veranderingen in uurwaarden van neerslag?

2.1. Huidige klimaat: neerslagextremen voor korte tijdsduren

In 2004 is het rapport over 'Statistiek van de extreme neerslag' uitgebracht (Smits et al., 2004), op basis van de uurneerslagreeksen van De Bilt in de periode 1906-2003. Het rapport geeft informatie over neerslag per 4, 8, 12, 24 uur (en per 2, 4, 8 en 9 dagen) voor herhalingstijden variërend van 10x per jaar tot 1x per 1000 jaar.

In 2008 is er een update gemaakt van de neerslagstatistiek voor korte durren door Buishand en Wijngaard. Deze statistiek is gebaseerd op jaarmaxima voor 5, 10, 15, 30, 60 en 120 minuten uit het tijdvak 1906-1990 voor De Bilt. Op basis van deze data wordt informatie gegeven over overschrijdingskansen van neerslaghoeveelheden variërend van 2x per jaar tot 1x per 1000 jaar. Tabel 2.1 toont een aantal van deze neerslaghoeveelheden.

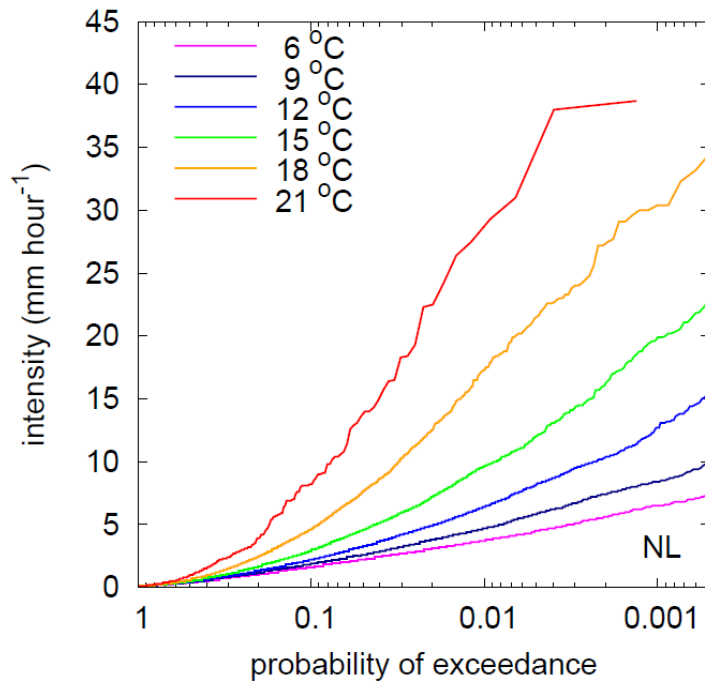
Tabel 2.1. Neerslaghoeveelheden (in mm) die gemiddeld eens in de zoveel jaar in een gegeven tijdsduur worden overschreden (Buishand & Wijngaard, 2008).

Tijdsduur	Herhalingstijd	
	2 jaar	10 jaar
Minuten		
5	7	11
10	10	15
15	11	18
30	14	23
60	18	27
120	21	31

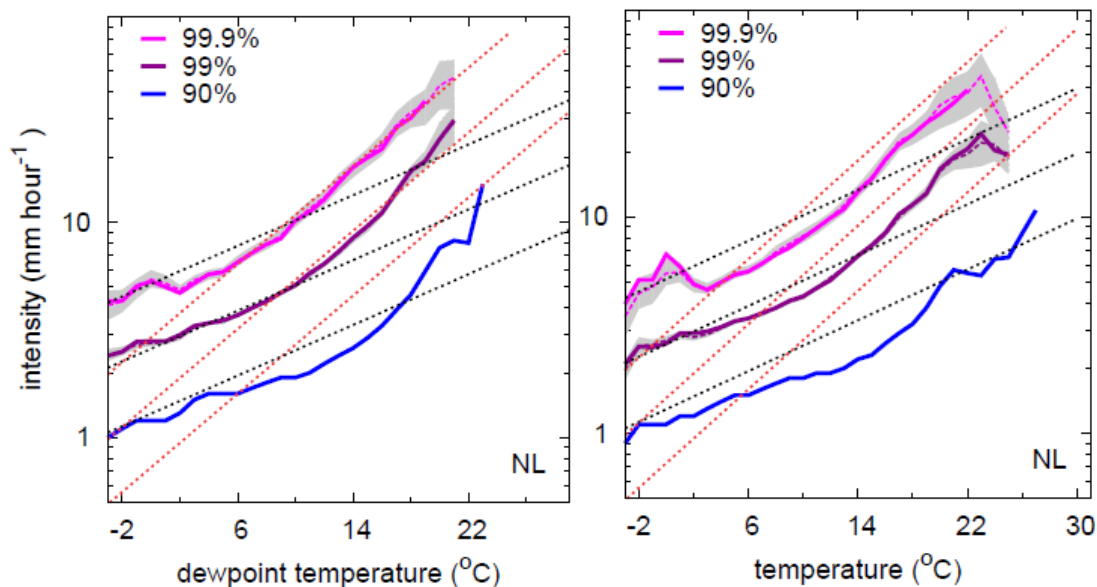
Klein Tank et al. (1995) hebben ook onderzocht hoe de gemiddelde neerslag per uur verandert met de gemiddelde dagtemperatuur, op basis van waarnemingen uit de periode 1906-1990 voor De Bilt. Voor gemiddelde dagtemperaturen tot rond de 15 °C vonden zij een beperkte toename van de gemiddelde neerslag per uur (minder dan de 7% uit de Clausius-Clapeyron formule). Daarboven lijkt de gemiddelde neerslag per uur sneller te stijgen. Op basis van de informatie uit dit artikel is indertijd bij de WB21 klimaatscenario's een toename voor de intensiteit in buien van +10 % per °C gebruikt (zie <http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/vorig/Scenarios2001.pdf>).

Naar aanleiding van de hevige neerslag in augustus 2006 is er op het KNMI onderzoek verricht naar de relatie tussen temperatuur (van het zeewater en de lucht) en extreme neerslag (Lenderink & van Meijgaard, 2008; Lenderink et al., 2009; Romero et al., 2011). Figuur 2.1 laat zien dat de neerslagintensiteit toeneemt met een toenemende dauwpuntstemperatuur⁴ en dat dit geldt voor intensiteiten die vrij vaak voorkomen, maar ook voor zeer extreme situaties. In deze figuur is de dauwpuntstemperatuur gebruikt en niet de gemiddelde dagtemperatuur. De dauwpuntstemperatuur lijkt een betere relatie te vertonen met extreme neerslag, aangezien het optreden van hevige buien afhankelijk is van de hoeveelheid vocht in de lucht. Bij gelijkblijvende relatieve vochtigheid zal een temperatuurstijging van 1 °C resulteren in een stijging van de dauwpuntstemperatuur van ook 1 °C. De toename van de hoeveelheid vocht in de atmosfeer is dan 7%.

⁴ Dauwpuntstemperatuur = die temperatuur waarnaar de lucht moet afkoelen om de lucht 100% verzadigd te laten zijn met vocht (er vanuit gaande dat de hoeveelheid vocht in de lucht niet verandert).



Figuur 2.1. Overschrijdingskans ('probability of exceedance') van neerslagextremen ('intensity' in mm per uur) bij verschillende daggemiddelde dauwpunttemperaturen op 27 stations in Nederland (Lenderink et al., 2011) in de periode 1995-2010 (0.01 is eens in de 100 uur met neerslag binnen een bepaalde temperatuurbijn, 0.001 is eens in de 1000 uur met neerslag binnen een bepaalde temperatuurbijn, etc.).



Figuur 2.2. Verband tussen extreme neerslagintensiteiten (voor het 90, 99 en 99,9 percentiel; y-as) en gemiddelde dauwpunttemperatuur (x-as, links) en dagtemperatuur (x-as, rechts). Gebaseerd op 15 jaar data (1995-2011) van 27 stations in Nederland. De zwarte gestippelde lijn geeft een stijging van 7% per °C aan, de rode gestippelde lijn 14% per °C (Lenderink et al., 2011).

Figuur 2.2 laat ook de relatie tussen temperatuur en neerslagintensiteit per uur zien. Tot een bepaalde temperatuur volgt de relatie de Clausius-Clapeyron functie⁵, waarbij de intensiteit van neerslagextremen met ongeveer 7% per °C temperatuurstijging toeneemt. Lenderink & van Meijgaard (2008) vonden een dergelijke relatie voor dagextremen. Bij hogere temperaturen is de toename van de uurneerslagintensiteit per °C temperatuurstijging echter groter (tot ong. 14%). Deze snellere toename van de

⁵ De Clausius-Clapeyron functie geeft aan hoe snel de hoeveelheid vocht die de lucht kan bevatten stijgt met een stijgende temperatuur.

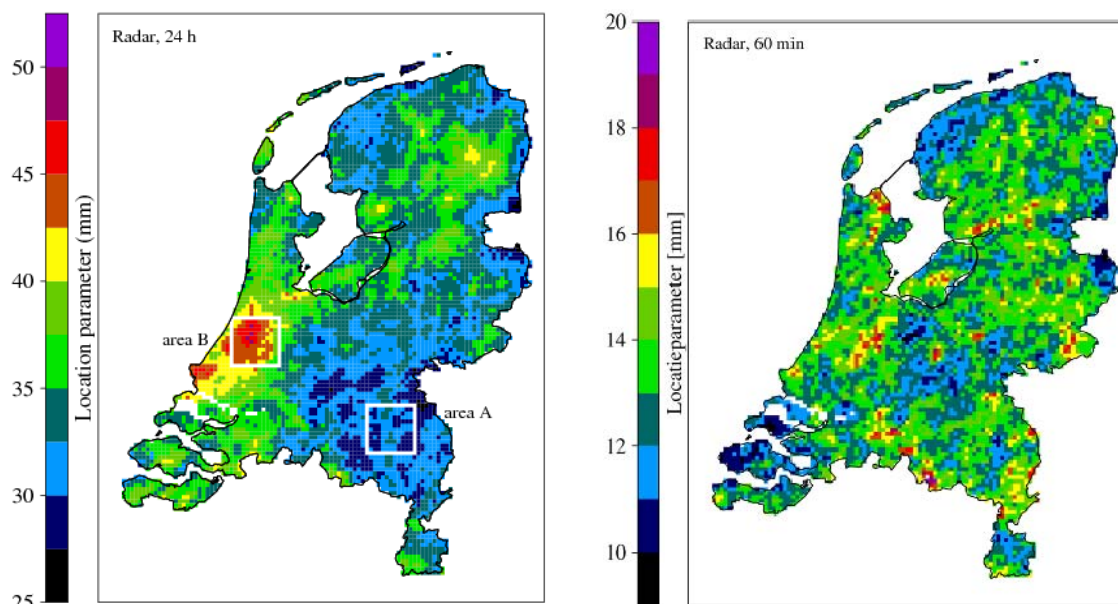
neerslagextremen op uurbasis met de temperatuurstijging is ook gevonden door Romero et al. (2011). Het omslagpunt ligt ongeveer bij een daggemiddelde temperatuur van 10-14 °C (KNMI, 2009) of een gemiddelde dauwpuntstemperatuur van 6-10 °C (Figuur 2.2).

Bovenstaande geldt vooral voor extremere percentielen⁶. Voor de gemiddelde neerslag op een natte dag lijkt dit effect niet duidelijk te bestaan. Voor het 75% percentiel lijkt mogelijk pas bij een aanzienlijk hogere daggemiddelde temperatuur dan 10-14 °C de uurneerslagintensiteit sneller te gaan stijgen dan 7% per °C (Lenderink & van Meijgaard, 2008; Lenderink et al., 2011; Romero et al., 2011).

De verandering in extreme percentielen van de uurneerslag in De Bilt in de zomermaanden in de afgelopen eeuw is vrij goed te verklaren m.b.v. veranderingen in de dauwpuntstemperatuur op de 10% natste dagen (Lenderink et al., 2011).

2.2. Huidige klimaat: ruimtelijke verschillen in neerslagextremen voor korte tijdsduren

Onderzoek van Overeem et al. (2008a) op basis van uurwaarden van 12 stations in Nederland laat zien dat er geen duidelijke verschillen binnen Nederland zijn voor extreme kwantilen van 60-minuten neerslag⁷. Hetzelfde resultaat werd verkregen na analyse van neerslagradardata over de periode 1998-2007 (Overeem et al., 2009b). Figuur 2.3. toont de hoeveelheid neerslag die gemiddeld eens per jaar wordt overschreden in 24 uur (links) en in 60 minuten (rechts). In de 24-uurs neerslag zijn duidelijke ruimtelijke verschillen binnen Nederland waar te nemen, met de hoogste neerslagsommen in Zuid-Holland. Bij de 60-minuut neerslag is alleen een ruzig beeld te zien. Ook voor de eens in de 50 jaar overschrijdingskans voor uurextremen zijn er geen significante verschillen tussen de gemarkeerde gebieden in Figuur 2.3 (zie ook Figuur 2.4).

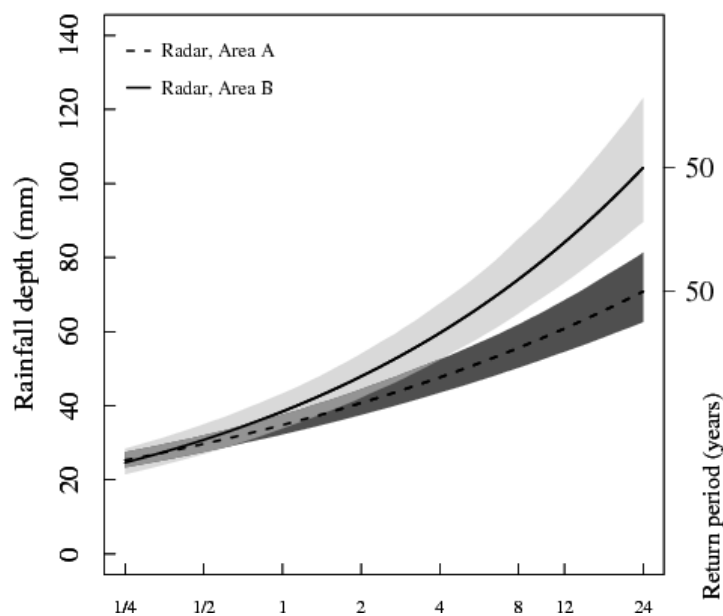


Figuur 2.3. De neerslaghoeveelheid die eens per jaar wordt overschreden voor een periode van 24 uur (links) en voor 60 minuten (rechts) op basis van radardata voor de periode 1998-2007 (Overeem et al., 2009b).

⁶ Het 99-percentiel is die hoeveelheid neerslag waarbij 1 % van de uren/dagen hogere neerslaghoeveelheden heeft. Verderop wordt het 99-percentiel in tabellen aangegeven als Q_{99} en er wordt aangegeven of het om de Q_{99} van uurneerslag of dagneerslag gaat;

⁷ Gezien de temperatuurverschillen binnen Nederland en de gegevens in Paragraaf 2.1 zou men ook ruimtelijke verschillen binnen Nederland verwachten. Deze zijn echter niet duidelijk aanwezig.

Figuur 2.4 geeft de neerslagduurlijnen voor een herhalingsstijd van 50 jaar voor de gebieden A en B in Figuur 2.3. Vanaf een duur van ongeveer 4 uur lijken er significante verschillen tussen de 2 gebieden te gaan optreden. Onderzoek van Buishand et al. (2009) laat ook zien dat er regionale verschillen bestaan in dagextremen binnen Nederland. Met name in Zuid-Holland zijn de neerslagsommen die gemiddeld eens in de 10 jaar worden overschreden hoger dan die in De Bilt.



Figuur 2.4. Neerslaghoeveelheid ('Rainfaill depth', in mm) die gemiddeld eens in de 50 jaar wordt overschreden voor durren van 15 min. tot 24 uur (x-as, in uren) voor de twee regio's aangegeven in Figuur 2.1 (Overeem et al., 2009b).

2.3. Toekomst: verandering van uurneerslagextremen

Lenderink & Van Meijgaard (2010) laten zien dat veranderingen van extreme uurneerslagen met een stijging van de temperatuur tot een bepaalde temperatuur redelijk door het model RACMO en CLM⁸ worden gesimuleerd. Uit andere klimaatmodellen is er voor Nederland en omgeving echter weinig bekend over veranderingen in extreme uurneerslag.

In de KNMI'06 scenario's (KNMI, 2006 en 2009) wordt geen ruimtelijke differentiatie gegeven van klimaatverandering binnen Nederland. Ook wordt er geen informatie gegeven over neerslagextremen op uurbasis, alleen op dagbasis of voor meerdaagse extremen. Door o.a. te kijken naar de relatie tussen extreme neerslag en temperatuur in het huidige klimaat (zoals in Paragraaf 2.1), kan een indruk worden verkregen van de mogelijke veranderingen in de toekomst.

Vanwege de verwachte stijging van de temperatuur volgens de KNMI'06 klimaatscenario's kan de extreme neerslag op dagbasis toenemen, maar waarschijnlijk ook op uurbasis. In de KNMI-brochure uit 2009 (*Aanvullingen op de KNMI'06 klimaatscenario's*) wordt het volgende vermeld:

'de neerslagintensiteit per uur tijdens extreme buien in de zomer zal waarschijnlijk sterker toenemen dan de extremen van de neerslaghoeveelheid per dag. Voor de dagelijkse hoeveelheden geldt dat de totale hoeveelheid waterdamp in de atmosfeer een beperkende factor is' (KNMI, 2009, p. 21).

⁸ Beide modellen aan de rand aangedreven met ERA40 reanalysis data.

In dezelfde brochure staat:

'Voor de zomer is de marge voor neerslagextremen in de KNMI'06 scenario's relatief groot; de G/W scenario's hebben een sterke toename van de extreme dagelijkse hoeveelheden, omdat deze gebaseerd zijn op de bovengrens in een groot aantal verschillende klimaatmodellen. Vanwege de ruime marge in de G/W scenario's zal de toename van de extreme neerslagintensiteit per uur in de toekomst vermoedelijk niet veel hoger zijn dan de toename van de extreme dagelijkse hoeveelheden in de G/W scenario's. De waarden in de G+/W+ scenario's voor toename van de extreme dagelijkse neerslaghoeveelheden geven waarschijnlijk wel een onderschatting van de extreme neerslagintensiteit per uur'.

Voor Nederland is geen onderzoek gedaan naar het aantal uren met neerslag op extreem natte dagen en de verandering hierin. In de brochure uit 2009 (KNMI) over 'Aanvullingen op de KNMI'6 klimaatscenario's' wordt wel het volgende vermeld:

'de neerslagintensiteit per uur tijdens extreme buien in de zomer zal waarschijnlijk sterker toenemen dan de extremen van de neerslaghoeveelheid per dag.' en 'Buien worden intenser terwijl hun duur waarschijnlijk afneemt' (KNMI, 2009, p. 21).

2.4. Toekomst: ruimtelijke verschillen in neerslagextremen

Er zijn aanwijzingen dat de extreme neerslag in de zomer langs de kust sneller verandert dan meer landinwaarts. In de KNMI-brochure uit 2009 staat daarom het volgende voor de kustregio⁹:

'omdat de G/W scenario's zijn gebaseerd op de bovengrens van de gebruikte modelresultaten, bevatten deze scenario's voldoende marge om het effect van de warme Noordzee mee te nemen. Bij gebruik van de G+/W+ scenario's wordt de invloed van het warmer wordende zeewater op de neerslag in de kuststrook waarschijnlijk onderschat. Voor deze scenario's zal de lokale temperatuurstijging van de Noordzee relatief groot zijn. De G+/W+ scenario's gaan uit van modellen die een sterke uitdroging boven het land vertonen, en waarin de buienactiviteit sterk wordt onderdrukt. Voor de kuststrook, met de Noordzee als bron van vocht, is dit niet realistisch. Naast langdurigere periodes met droogte zoals beschreven in de G+/W+ scenario's zal de kuststrook ook rekening moeten houden met kortdurende periodes met extremere neerslag, zoals beschreven in de G/W scenario's'.

2.5. Mogelijke veranderingen in extreme uurneerslag, op basis van literatuur

Op basis van het bovenstaande is een eerste schatting gemaakt van de mogelijke onder- en bovengrenzen voor verandering van het 99-percentiel¹⁰ van de uurneerslag onder de vier KNMI'06 klimaatscenario's. Dit is een grove eerste schatting, omdat we niet zo veel weten van de veranderingen van uurneerslag in de toekomst. Aangezien er niet voldoende informatie uit klimaatmodellen beschikbaar is over veranderingen in uurneerslag, baseren we deze schatting op het onderzoek op basis van waarnemingen.

Op basis van de beschikbare gegevens in dit hoofdstuk zou het het meest logisch zijn om de verandering van de extreme uurneerslag op een dag te laten afhangen van de temperatuur op die dag (of het liefst van de dauwpuntstemperatuur). Het huidige transformatieprogramma op dagbasis voor temperatuur en neerslag transformeert

⁹ De kustregio/kuststrook is ongeveer 30 km van de kust (Lenderink et al., 2009);

¹⁰ Vergelijkbaar met het dagtransformatieprogramma, waarin informatie over veranderingen in het 99-percentiel op maandbasis wordt gebruikt.

historische tijdreeksen voor temperatuur en neerslag nu echter onafhankelijk van elkaar. Uiteraard is er wel consistentie tussen de temperatuur en neerslag op een bepaalde dag in de gebruikte historische reeksen. Zolang de opgelegde klimaatverandering niet al te groot is, zullen de getransformeerde tijdreeksen voor neerslag en temperatuur op elke dag ook een redelijke consistentie laten zien. Op de dagen die in de G+ en W+ scenario's worden drooggemaakt, kunnen de getransformeerde waarden voor temperatuur en neerslag wat minder goed bij elkaar passen. In dit project wordt uitgegaan van onder- en bovengrenzen voor mogelijke veranderingen in extreme uurneerslag die op maandbasis worden aangegeven (zie hieronder en Bijlage 3). Bij de bepaling van deze onder- en bovengrenzen wordt de temperatuurstijging op maandbasis wel meegenomen, waardoor consistentie tussen veranderingen in temperatuur en neerslag mee wordt genomen.

Schattingen van veranderingen in extreme neerslagintensiteiten per uur zijn vrij onzeker. Dit wordt veroorzaakt door 1. onzekerheid over de procentuele verandering van extreme uurneerslag per °C temperatuurstijging, en door 2. onzekerheid over de temperatuurstijging in de toekomst. Hieronder worden deze onzekerheden verder toegelicht:

- *onzekerheid over de procentuele verandering in extreme neerslag per °C temperatuurstijging*: in de maanden waarin de gemiddelde temperatuur 10-14°C¹¹ of meer is (nu en in de toekomst), is de mogelijke verandering van de extreme uurneerslag in de range van 10-14% per °C temperatuurstijging ten opzichte van het huidige klimaat (Lenderink & van Meijgaard, 2010; Lenderink et al., 2011). Deze temperatuurgrens markeert grofweg de overgang van neerslag in grootschalige weersystemen (lagedrukgebieden) naar meer neerslagextremen in kleinschalige buiencomplexen (zie Wolters et al., 2011, Paragraaf 4.3). In het huidige klimaat is dat ongeveer de periode mei tot en met oktober;
- *onzekerheid over de temperatuurstijging*: deze onzekerheid wordt veroorzaakt door drie aspecten:
 - De stijging van de neerslagintensiteit per uur van 10-14% per °C stijging van de gemiddelde temperatuur treedt alleen op onder voorwaarde dat de relatieve vochtigheid niet al te veel verandert. Het laatste impliceert dat de stijging van de dauwpuntstemperatuur ongeveer gelijk is aan de stijging van de luchttemperatuur. In de G en W scenario's verwachten we geen duidelijke veranderingen in de relatieve luchtvochtigheid in de zomer, maar in de G+ en de W+ scenario's kan dat wel het geval zijn (meer oostelijke circulatie met drogere lucht). In deze G+ en W+ scenario's zal de gemiddelde dauwpuntstemperatuur daarom waarschijnlijk minder stijgen dan de gemiddelde luchttemperatuur. Als gevolg daarvan zal de stijging van de extreme uurneerslag minder kunnen zijn dan op basis van de stijging van de gemiddelde luchttemperatuur wordt verwacht¹². Omdat we voor de toekomst geen robuuste schattingen hebben van de verandering in de dauwpuntstemperatuur, moeten we hier gebruik maken van de verandering in de luchttemperatuur;
 - De neerslagextremen zijn afhankelijk van temperatuurextremen op individuele dagen (of delen van dagen). Vanwege de gebruikte methode in het transformatieprogramma kunnen we echter niet de stijging in temperatuur op individuele dagen gebruiken¹³ maar moeten we de verandering in maandgemiddelde temperaturen gebruiken (Bakker & Bessembinder, 2012);

¹¹ De dauwpuntstemperatuur geeft een betere relatie, maar die is niet beschikbaar voor de toekomst. De range van 10-14 °C komt ongeveer overeen met een dauwpuntstemperatuur van 10 °C waarboven de extreme uurneerslag sneller toeneemt dan 7% per °C (zie Figuur 2.2);

¹² In de kustregio blijft de relatieve luchtvochtigheid in de zomer in de G+ en W+ scenario mogelijk dicht bij de huidige relatieve luchtvochtigheid door de nabijheid van de Noordzee. Echter door de tempererende werking van de Noordzee is de temperatuurstijging in de kustregio misschien ook iets gematigder;

¹³ De transformatie van temperatuurreeksen en neerslagreeksen wordt in het huidige transformatieprogramma onafhankelijk uitgevoerd. Het neerslagtransformatieprogramma "weet" daarom niet wat de temperatuur op individuele dagen is. Bij het bepalen van de inputcoëfficiënten (de veranderingen) op maandbasis is wel de samenhang tussen temperatuur en neerslag meegenomen.

- De mogelijke temperatuurstijging in Nederland wordt waarschijnlijk onderschat in de G en W scenario's (t.o.v. de globaal gemiddelde temperatuurstijging; KNMI, 2009), In die scenario's is de stijging van de temperatuur ongeveer gelijk aan de stijging van de wereldgemiddelde temperatuur, terwijl we uit waarnemingen weten dat in de afgelopen decenia de temperatuur ongeveer 2 maal zo snel is gestegen in Nederland (Van Oldenborgh et al., 2009).

Vanwege de bovenstaande redenen is het niet goed mogelijk om een duidelijk onderscheid te maken tussen de boven- en ondergrens behorende bij het G scenario en die behorende bij het G+ scenario. Evenzo is er geen onderscheid mogelijk tussen de boven- en ondergrens het W scenario en die in het W+ scenario. Voor het bepalen van de mogelijke onder- en bovengrenzen voor de veranderingen van de extreme uurneerslag zijn de G en G+ scenario's en de W en W+ scenario's daarom telkens samen genomen.

Gegeven de onzekerheden in de procentuele verandering in extreme uurneerslag per °C en in de maandgemiddelde temperatuurverandering worden de boven- en ondergrenzen van de procentuele verandering in $Q_{99, \text{uur}}$ (per kalendermaand) verkregen door de procentuele veranderingen in extreme uurneerslag per °C te combineren met de maandgemiddelde temperatuurstijgingen zoals weergegeven in Tabel 2.2 (zie ook Annex 3).

Tabel 2.2 Combinaties van de procentuele veranderingen in extreme uurneerslag per °C en de maandgemiddelde temperatuurstijgingen die de boven- en ondergrenzen voor de veranderingen in procentuele extreme neerslag op uurbasis ($Q_{99, \text{uur}}$) bepalen, per klimaatscenario en per periode in het jaar. Zie tekst voor uitleg. "low" en "high" verwijzen naar de termen voor de onder- en bovengrenzen die in Hoofdstuk 4 worden gebruikt.

Klimaat- Scenario's	Periode in het jaar	Ondergrens "low"		Bovengrens "high"	
		Procentuele stijging extreme uurneerslag per °C	Maand- gemiddelde temperatuur stijging in scenario	Procentuele stijging extreme uurneerslag per °C	Maand- gemiddelde temperatuur stijging in scenario
G en G+	Mei- oktober	10%	G	14%	G+
	November -april	7%	G	10%	G+
W en W+	Mei- oktober	10%	W	14%	W+
	November -april	7%	W	10%	W+

Op basis van het onderzoek van Lenderink et al. (2011) verwachten we geen duidelijk snellere stijging van de extreme uurneerslag met de temperatuur ten opzichte van de stijging van de extreme dagneerslag in de winterperiode (november t/m april). In sommige van die maanden kan de gemiddelde dagtemperatuur op individuele dagen nog wel boven de 10°C uitkomen. Om dit mee te nemen wordt geadviseerd de boven- en ondergrenzen op basis van Tabel 2.2 te gebruiken.

In Bijlage 3 is een tabel opgenomen met de boven- en ondergrenzen van mogelijke procentuele veranderingen voor de vier KNMI'06 klimaatscenario's rond 2050 en 2100, gebaseerd op de bovenstaande tabel.

Let bij het gebruik van de gegeven boven- en ondergrenzen op de volgende mogelijke over- en onderschattingen:

- Zomer: de bovengrens voor het G en W scenario lijkt vrij hoog t.o.v. de veranderingen in de extreme dagneerslag¹⁴. Dit komt omdat voor deze bovengrenskant de gemiddelde temperatuurstijging van de G+ en W+ scenario's is gebruikt, die aanzienlijk hoger is dan in de gemiddelde temperatuurstijging in de G en W scenario's in de zomer, maar ook hoger dan de temperatuurstijging op de warmste dag in de zomer in de G en W scenario's (KNMI, 2009). Gebruik van de bovengrens leidt dus mogelijk tot overschatting van de extreme uurneerslag bij de in G en W genoemde temperatuurstijgingen in Nederland. Echter, de temperatuurstijgingen in Nederland in de G en W scenario's zijn aan de lage kant (ongeveer even veel als de wereldgemiddelde temperatuurstijging), terwijl de waarnemingen over de afgelopen decennia een ongeveer 2 maal sterkere temperatuurstijging in West-Europa laten zien t.o.v. de wereldgemiddelde temperatuurstijging;
- Zomer: de bovengrens voor het G+ en W+ scenario lijkt ook vrij hoog t.o.v. de veranderingen in de extreme dagneerslag, omdat de dauwpuntstemperatuur in deze scenario's in de zomer mogelijk minder snel zal stijgen dan de luchttemperatuur (afname van aantal dagen met neerslag in deze scenario's door meer oostelijke luchtcirculatie, het lijkt dan logisch dat de luchtvochtigheid ook wat lager is);
- Zomer: de bovengrens van 14% per °C temperatuurstijging wordt nu voor alle dagen in de periode mei t/m oktober toegepast, terwijl niet alle dagen een gemiddelde temperatuur zullen hebben die hoger ligt dan de grens 10-14 °C (zie Tabel 2.3). Voor dagen met een lagere temperatuur kan de extreme uurneerslag behoorlijk overschat worden. Door de temperatuurstijging zal dit voor de toekomst op steeds minder dagen tot een overschatting leiden;
- Zomer: voor de G+ en W+ scenario's is voor de ondergrens de temperatuurstijging in de G en W scenario's gebruikt. Dit lijkt aan de lage kant, omdat de temperatuurstijging in de G en W scenario's aanzienlijk lager is dan in de G+ en W+ scenario's. Dit kan leiden tot een aanzienlijke onderschatting van de verandering in extreme uurneerslag. Echter, door de afname van het aantal natte dagen (meer oostelijke circulatie), lijkt het logisch dat ook de luchtvochtigheid in de G+ en W+ scenario's in de zomer wat zal afnemen. De stijging van de gemiddelde dauwpuntstemperatuur in deze scenario's is dus waarschijnlijk minder dan die stijging van de gemiddelde luchttemperatuur;
- Winter: de bovengrens van 10% per °C temperatuurstijging wordt nu voor alle dagen in de periode november t/m april toegepast, terwijl de meeste dagen in het huidige klimaat een gemiddelde temperatuur zullen hebben die lager ligt dan de grens 10-14 °C, waarbij een snellere toename van de extreme uurneerslag mag worden verwacht. In de toekomst zal een groter percentage van de dagen in de periode november-april een temperatuur hebben die hoger is dan de grens 10-14 °C (Tabel 2.3). Voor de dagen met een lagere temperatuur kan de extreme uurneerslag behoorlijk overschat worden;
- Winter: als ondergrens wordt 7% per °C in de G en W scenario's gebruikt. Aangezien de temperatuurstijging in de G+ en W+ scenario's sterker is, kan dit leiden tot onderschatting van de toename van de extreme uurneerslag in de winter in de G+ en W+ scenario's.

¹⁴ In het transformatieprogramma voor dagneerslag worden voor de zomermaanden veranderingen van 12-13% voor $Q_{99,dag}$ voor G rond 2050 gebruikt en veranderingen van 24-25% voor $Q_{99,dag}$ voor W rond 2050 (Bakker & Bessembinder, 2012).

Tabel 2.3. Gemiddeld aantal dagen per kalendermaand met gemiddelde temperaturen lager dan 10 °C en 14 °C of hoger voor De Bilt voor het huidige klimaat (1981-2010) en voor de KNMI'06 klimaatscenario's rond 2100.

°C	1981-2010		G 2100		G+ 2100		W 2100		W+ 2100	
	<10	≥14	<10	≥14	<10	≥14	<10	≥14	<10	≥14
Januari	30	0	28	0	28	0	24	1	22	1
Februari	27	0	25	0	25	0	21	1	20	2
Maart	27	0	23	1	21	2	16	5	12	7
April	18	4	14	7	12	8	8	11	3	16
Mei	6	14	2	20	1	23	0	26	0	29
Juni	0	23	0	29	0	29	0	30	0	30
Juli	0	31	0	31	0	31	0	31	0	31
Augustus	0	31	0	31	0	31	0	31	0	31
September	1	21	0	27	0	28	0	30	0	30
Oktober	12	8	7	14	5	17	3	21	1	25
November	24	1	19	3	18	3	13	6	9	10
December	29	0	26	1	26	1	22	2	20	3

3. Methoden voor transformatie van uurneerslag

3.1. Consistentie met de dagneerslag-transformatie

Als eerste stap is bekeken hoe de consistentie met de dagneerslagtransformatie is te behouden. Dit kan op de volgende manier:

- Neem een tijdreeks met uurneerslagwaarden;
- Sommeer de uurneerslagwaarden tot dagsommen;
- Transformeer de dagsommen m.b.v. het huidige transformatieprogramma op dagbasis;
- Transformeer vervolgens de uurwaarden zodanig dat voor elke dag de getransformeerde uursommen opgeteld gelijk zijn aan de getransformeerde dagsom.

Bovenstaande betekent dat we bij het uurtransformatieprogramma net als bij het dagtransformatieprogramma uitgaan van gemeten reeksen van uurneerslag¹⁵.

Opmerkingen bij bovenstaande:

- Bij de transformatie van dagwaarden worden vaak neerslagreeksen op dagbasis gebruikt. Op KNMI-neerslagstations wordt de dagneerslagsom van 8-8 uur UTC gemeten. De hierboven beschreven procedure voor uurwaarden kan alleen gebruikt worden voor stations waarvoor uurneerslagwaarden beschikbaar zijn, de Automatische Weer Stations van het KNMI (AWS; <http://www.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens/>)¹⁶. De gemiddelde jaarneerslag van de AWSen zijn systematisch ong. 5% lager dan die van de KNMI-neerslagstations¹⁷ (gemiddeld over 12 stations; voor individuele jaren kan het verschil groter zijn (Bruin, 2002)). Dit komt door de verschillen in gebruikte meetapparatuur;
- Als voor de nieuwe klimaatscenario's (KNMInext¹⁸) het zelfde type informatie wordt gegeven (veranderingen in natte dag frequentie, gemiddelde neerslag op natte dagen en de $Q_{99,dag}$ op natte dagen) en die informatie wordt verwerkt in het huidige transformatieprogramma op dagbasis, dan kan de bovenstaande methode voor het genereren van tijdreeksen met uurneerslag ook vrij eenvoudig weer worden toegepast voor de KNMInext scenario's;
- Tijdens de transformatie van dagsommen worden er soms ook nieuwe natte dagen toegevoegd (Bakker & Bessembinder, 2012). Als basis voor de verdeling van de neerslag over uren op die nieuwe natte dagen worden de historische dagen genomen, die dienen als basis voor het bepalen van de dagsom.

3.2. Transformeren van uurneerslag

De volgende stap bestaat uit het transformeren van de uurneerslagwaarden. Voor deze transformatie zijn 2 opties kwalitatief onderzocht. In Bijlage 2 wordt aan de hand van een praktisch voorbeeld geïllustreerd hoe beide methoden werken.

¹⁵ Er zijn ook andere methoden voor het genereren van tijdreeksen voor de toekomst. De hier gebruikte methode valt onder de groep 'Delta-methode'. Voor een beschrijving en vergelijking van verschillende methoden zie Bakker & Bessembinder (2011);

¹⁶ Voor deze neerslagstations worden ook dagsommen gegeven, maar deze zijn van 0-24 uur UTC. Er kunnen verschillen ontstaan in de dagsommen door over een net iets andere periode over de dag te sommeren;

¹⁷ Ten behoeve van de neerslagstatistiek van STOWA/KNMI (Smits et al., 2004) is een correctie hiervoor toegepast. Deze statistiek wordt door veel waterschappen gebruikt. De ongecorrigeerde reeks is te downloaden via <http://www.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens/>, de gecorrigeerde reeks is te vinden via <http://www.knmi.nl/klimatologie/onderzoeksgegevens/>;

¹⁸ Werktitel voor de volgende generatie klimaatscenario's voor Nederland. Meer info via: <http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/toekomst/index.php>.

Optie 1: 'Niet-lineaire methode' Deze methode is vergelijkbaar met het huidige transformatieprogramma op dagbasis (Bakker & Bessembinder, 2011). De uurwaarden in de neerslagreeks op uurbasis worden verheven tot een bepaalde macht, zodanig dat de gewenste verandering in een zeker, van tevoren opgegeven (extreem) percentiel wordt verkregen.

- Door middel van een iteratief proces wordt de waarde van de macht 'b' in de machtsfunctie (zie formule B1 verderop in dit hoofdstuk) bepaald voor elke kalendermaand. In het programma wordt de verandering opgegeven van een (extreem) percentiel, bijv. het 99-percentiel. De waarde b wordt bepaald, zodanig dat dit percentiel de gewenste verandering krijgt (of zodanig dat de verandering van dit percentiel zo dicht mogelijk bij deze gewenste verandering komt).
- Voorwaarde blijft dat de som van de getransformeerde uurwaarden gelijk is aan de getransformeerde dagneerslag. De hierboven genoemde machtsfunctie wordt gebruikt om de nieuwe uursommen in de getransformeerde reeks te bepalen (zie het voorbeeld in Bijlage 2).

Optie 2: 'Dagmaximum-methode', een vergelijkbare methode als gebruikt door Romero et al. (2011):

- Hierbij wordt voor de hoogste uurneerslag op een dag in de historische reeks bepaald tot welk percentiel het behoort (bijv. het 65-percentiel of het 90-percentiel van alle uurneerslagen in die kalendermaand);
- Vervolgens wordt op basis van op te geven informatie over de veranderingen in uurneerslag voor enkele percentielen¹⁹ in de betreffende kalendermaand bepaald wat de verandering van die uurneerslag zou moeten zijn d.m.v. interpolatie/extrapolatie (zie het voorbeeld in Bijlage 2). Als de getransformeerde dagsom voor die dag lager is dan de getransformeerde neerslag voor het uur met de hoogste neerslagsom, wordt de neerslagsom voor dat uur beperkt tot de getransformeerde dagsom;
- Met het bovenstaande wordt bepaald wat de neerslag in de toekomstreeks wordt op het uur met de meeste neerslag in de historische reeks. Om de consistentie met de dagneerslagtransformatie te behouden wordt de getransformeerde dagneerslag minus de getransformeerde neerslag voor het uur met de meeste neerslag in de historische reeks, verdeeld over de resterende uren met neerslag in de historische reeks verdeeld. Daarbij wordt de verhouding gebruikt, zoals die in de historische reeks voorkwam²⁰ (zie het voorbeeld in Bijlage 2)

Op basis van de kwalitatieve vergelijking²¹ in Tabel 3.1 lijkt de 'niet-lineaire' methode het beste aangezien:

- Bij deze methode de gebruiker alleen informatie hoeft te geven over veranderingen waarover wetenschappelijk iets bekend is (en waarvoor in dit rapport handreikingen worden gegeven);
- Het realistischer is dat de verhouding tussen alle uurneerslagen kan veranderen;
- Deze optie beter om kan gaan met meerdere neerslagpieken op een dag (twee pieken die bijna even extreem zijn, zullen ook ongeveer even veel veranderen).

De 'niet-lineaire' methode is daarom verder uitgewerkt, en in het volgende hoofdstuk worden daarvan resultaten getoond.

¹⁹ Om te kunnen interpoleren of extrapoleren zijn altijd minimaal 2 waarden nodig. Bij deze methode moet voor elke dag bepaald worden tot welk percentiel de hoogste uurneerslag op een dag behoort;

²⁰ Ook de verhouding tussen de uurneerslag van de andere uren kan uiteraard in de toekomst veranderen. We weten echter relatief weinig over de verandering van uurneerslag, en hier wordt impliciet de aanname gedaan dat voor de impact op het waterbeheer de hoogte van de hoogste piek het belangrijkste is. Veranderingen in de verhoudingen van de andere uren met neerslag worden minder belangrijk geacht;

²¹ Ook het gebruik van een methode die vergelijkbaar is met de Neerslaggenerator is verkend (Beersma & Buishand, 2003). Echter, hierbij worden waarden uit een historische reeks 'gerecombineerd'. Volgens de KNMI'06 scenarios' kan de neerslagintensiteit in de toekomst sterk toenemen en zal ook de temperatuur toenemen. In de waarnemingen die worden gebruikt voor de Neerslaggenerator is er bij de hoogste temperaturen weinig (intensieve) neerslag. Daarom lijkt dit geen bruikbare optie.

Tabel 3.1. Vergelijking van de 2 opties voor het transformeren van de uurneerslagen, zodanig dat de som van de getransformeerde uurneerslagen gelijk is aan de getransformeerde dagneerslag.

Criteria	Methode	
	‘dagmaximum’	‘niet-lineaire’
• Op te geven veranderingen?	Voor min. 2 percentielen	Voor 1 extreem percentiel
• Kan goed omgaan met meerdere neerslagpieken op een dag?	Nee, kijkt alleen naar max. uursom op dag	Ja
• Verandering verhouding uurneerslagen?	Alleen de verhouding tussen de hoogste uursom en de rest verandert	Verhouding tussen alle uursommen kan veranderen
• Kan neerslagduur korter worden?	Ja, als gewenste max. uursom groter is dan dagsom	Uursommen kunnen nul benaderen
• Afkappen verandering extreme uurneerslag door consistentie-eis? ^a	Mogelijk	Mogelijk

^a met consistentie wordt bedoeld: de som van de getransformeerde uurneerslagen op een dag is gelijk aan de getransformeerde dagneerslag van dezelfde dag.

3.3. Hoe werkt de niet-lineaire methode?

Zoals hierboven aangegeven lijkt de ‘niet-lineaire methode’ op de transformatie van dagwaarden. Het belangrijkste verschil is dat bij de transformatie van uurneerslag slechts één parameter wordt gebruikt, terwijl dit er bij de dagtransformatie twee zijn.

De transformatie vindt op de volgende manier plaats (zie ook Bijlage 2):

$$H_{ij}^* = \frac{H_{ij}^b}{\sum_{i=1}^{24} H_{ij}^b} \cdot D_j^* , \quad (\text{B } 1)$$

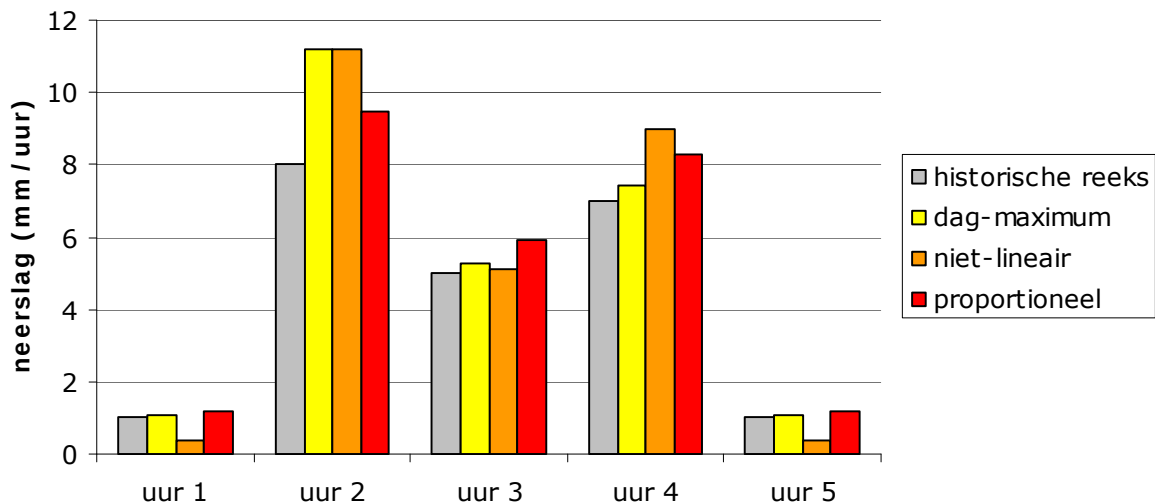
Waarbij ‘*’ aan geeft dat het om een getransformeerde waarde gaat, D_j is de dagsom voor de neerslag voor dag j en H_{ij} de neerslaghoeveelheid voor uur i op dag j . De macht b wordt bepaald door middel van iteratie. ‘ b ’ moet een zodanige waarde hebben dat het 99-percentiel van de getransformeerde natte uren (Q_{99}^*) gelijk is aan de ongetransformeerde Q_{99} vermeerderd met een verandering ΔQ , zoals opgegeven voor een bepaald scenario ($Q_{99}^* = Q_{99} (1 + \Delta Q)$). Om een numerieke oplossing te vinden, maken we gebruik van de volgende formule:

$$| Q_{99}^*(b) - (1 + \Delta_Q) Q_{99} | \leq \alpha_{tol} Q_{99} , \quad (\text{B } 2)$$

Waarbij ΔQ wordt gegeven als de fractie verandering, en waarin de tolerantie α_{tol} (fractie) uitdrukt hoeveel Q_{99}^* maximaal mag afwijken van $Q_{99} (1 + \Delta Q)$. α_{tol} is klein ten opzichte van ΔQ . Met de hier gebruikte tolerantie α_{tol} van 0,00005 is in alle gevallen een oplossing te vinden voor b . Als b bekend is, kan formule B1 toegepast worden op alle dagen en

uren. Het aantal benodigde iteraties is afhankelijk van de opgelegde α_{tol}^{22} . Er is een maximum aantal iteraties opgelegd om de waarde van b te bepalen.

In Figuur 3.1 is voor een fictief voorbeeld een vergelijking gemaakt tussen de eerder genoemde methoden. Daarnaast is ook de methode die tot nu toe vaak wordt gebruikt als vergelijking meegenomen (waarbij de verandering van de getransformeerde dagwaarde op elke uurwaarde van die dag wordt toegepast: proportionele uurtransformatie). Een eenvoudiger voorbeeld is in Bijlage 2 in rekenstappen uitgewerkt. In de figuren is te zien dat de verschillende methoden leiden tot verschillende verdelingen van de dagneerslag over de uren op de dag.



Figuur 3.1. Vergelijking tussen verschillende methoden om historische uurneerslagen te transformeren (zie tekst voor toelichting): fictief voorbeeld van een dag met 5 uur met neerslag en meerdere neerslagpieken (voor de dagneerslag is een verandering van 18 % gebruikt, en voor de verandering van de hoogste uurneerslag 40 %).

²² Bij een α_{tol} van 0.00005 waren ongeveer 20 iteraties nodig om een waarde voor b te vinden die aan de bovenstaande voorwaarden voldeed.

4. Testen van de methode voor transformatie van uurneerslag

In dit hoofdstuk worden enkele tests met het uurtransformatieprogramma met de niet-lineaire methode getoond en besproken. De formele beschrijving van de methode is te vinden in Paragraaf 3.3 en Bijlage 2.

4.1. Gebruikte data

Met behulp van de uurneerslagreeks van Rotterdam (KNMI-station nr. 344) voor de periode 1976-2005 wordt getest hoe het uurtransformatieprogramma werkt. Aangezien we willen weten of het programma ook goed werkt bij extreme veranderingen²³, is de gemeten historische tijdreeks getransformeerd voor:

- Het W scenario: het klimaatscenario met de grootste verandering in extreme dagneerslag in de zomer;
- Het W+ scenario: het klimaatscenario met de grootste verandering in het aantal natte dagen en waarbij de verandering in extreme dagneerslag (veel) lager is dan de mogelijke verandering in extreme uurneerslag (KNMI, 2009);
- Voor rond 2100: de verste tijdshorizon die gebruikt wordt in de KNMI'06 klimaatscenario's, met de grootste veranderingen per scenario;
- Voor de ondergrenzen ('low') en de bovengrenzen ('high') genoemd in Bijlage 3. In Bijlage 3 en Hoofdstuk 2 staat aangegeven waarop deze onder- en bovengrenzen zijn gebaseerd. De bovengrenzen zijn waarschijnlijk te hoog voor de betreffende klimaatscenario's (zie uitleg in Bijlage 3), maar gebruik van zowel de boven- als ondergrenzen in de figuren hieronder laat zien wat het effect is van de uurtransformatie op de gegenereerde tijdreeksen. Zowel de boven- als ondergrenzen zijn telkens gecombineerd met het W en het W+ scenario.

4.2. Resultaten en discussie

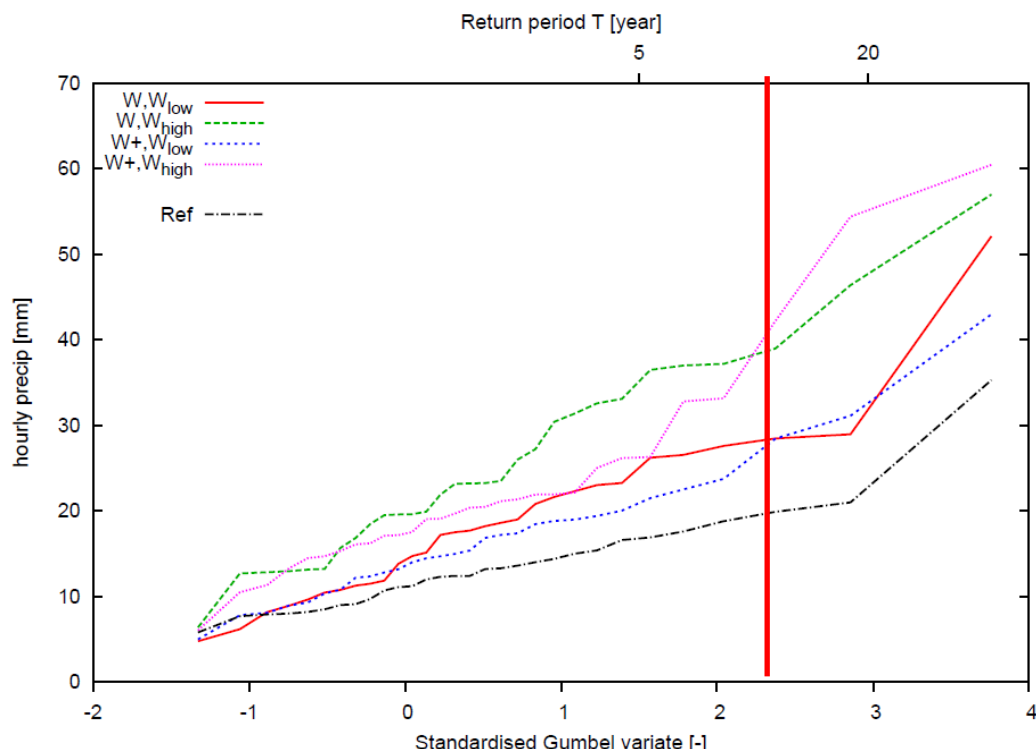
In de onderstaande figuren wordt getoond hoe de getransformeerde extreme uurneerslag bij verschillende herhalingstijden zich verhoudt met de historische uurneerslagreeks ('Ref').

Figuur 4.1 laat de verandering in extreme uurneerslag zien in de zomermaanden voor zowel het W als het W+ scenario rond 2100 t.o.v. de referentieperiode (1976-2005). In de zomermaanden zijn volgens de KNMI'06 scenario's de veranderingen van extreme neerslag het grootst; dit geldt volgens Bijlage 3 ook voor de mogelijke verschillen in de veranderingen tussen extreme dagneerslag en extreme uurneerslag.

De verandering van de extreme uurneerslag in Figuur 4.1 is in scenario W groter dan in W+, zoals ook het geval is bij de extreme dagneerslag. De rode verticale lijn geeft een overschrijdingskans van eens in de 10 jaar aan. De veranderingen in de extreme uurneerslagsommen zijn bij de bovengrens ('high') voor zowel het W als het W+ scenario groter dan bij de extreme dagsommen (niet getoond: in W rond 2100 is de verandering in extreme dagsommen in de zomer 54%, voor W+ is dat 20%), en bij de ondergrens ('low') is dat ook het geval. De opgegeven veranderingen in het 99-percentiel voor de uurneerslag worden inderdaad doorgevoerd. De niet-lineaire uurtransformatie voor de toekomst, zoals hier gebruikt, geeft dus bij gebruik van de bovengrenzen extremere

²³ Het is niet gegarandeerd dat bij nog extremere veranderingen van de extreme uurneerslag t.o.v. de extreme dagneerslag dan hier gebruikt, het uurtransformatieprogramma de gewenste veranderingen kan opleggen.

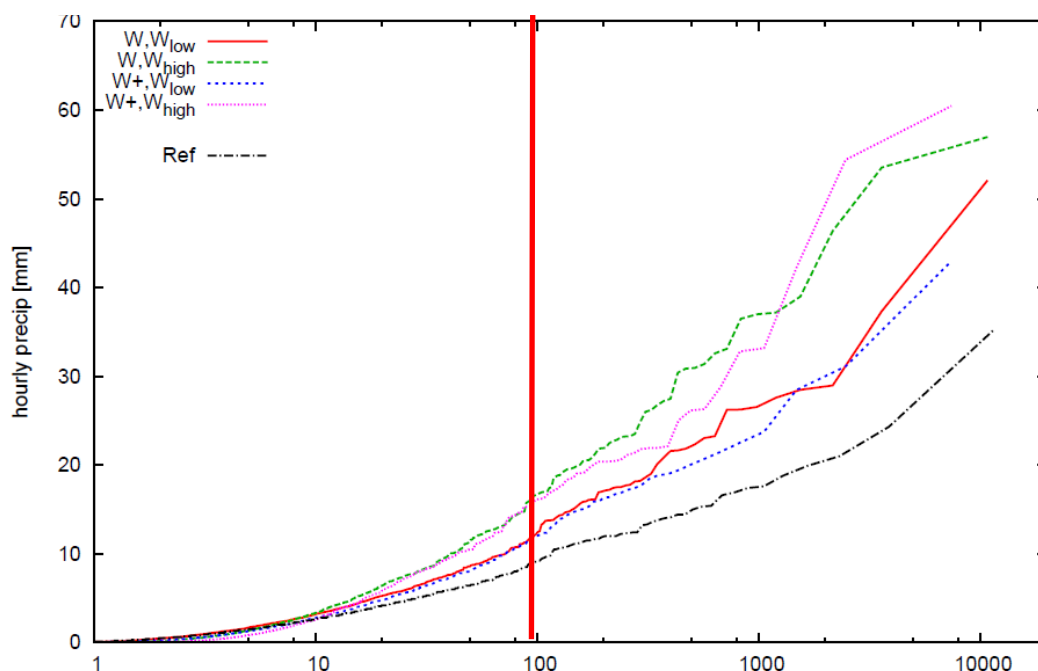
uurneerslag dan bij gebruik van de proportionele uurtransformatie, waarbij elke uur met neerslag op een dag dezelfde verandering krijgt als de dagneerslag na transformatie met het dagtransformatieprogramma.



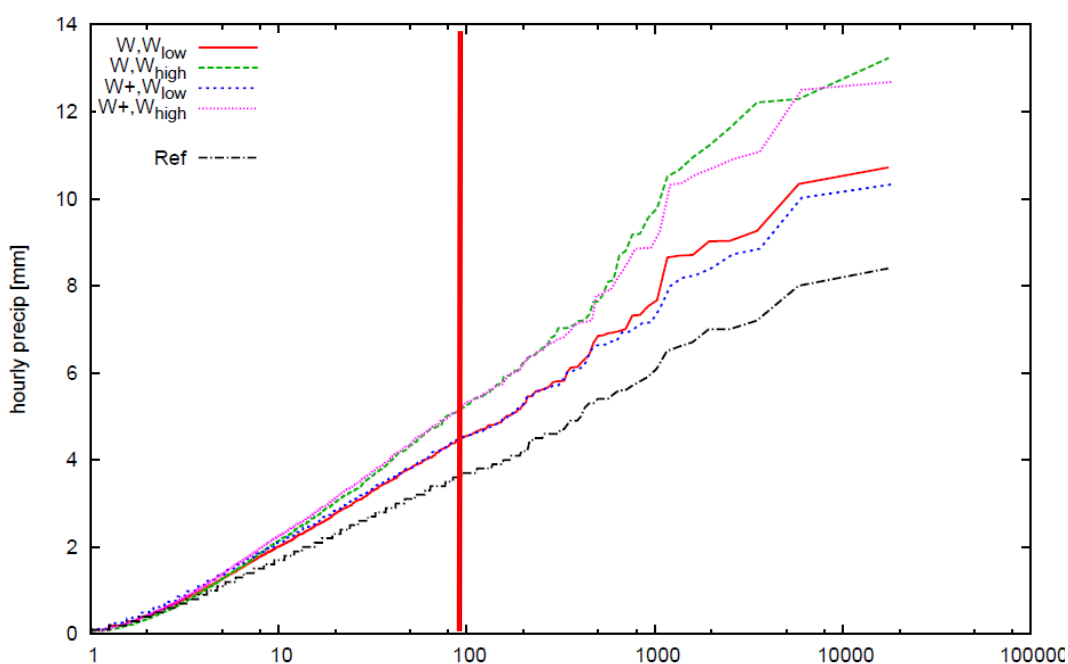
Figuur 4.1. Gumbel-plot van extreme uurneerslag (y-as in mm) in de maanden juni-augustus voor het huidige klimaat (1976-2005; Ref) van Rotterdam en voor het W en W+ scenario rond 2100. Op de horizontale as boven staat de herhalingsperiode ('return period' in jaren) aangegeven. Voor beide scenario's zijn telkens de boven- en ondergrens van de veranderingen van de extreme uurneerslag gebruikt (zie Bijlage 3 en tekst). De rode lijn geeft de waarden aan die gemiddeld eens in de 10 jaar worden overschreden: in het W en W+ scenario verandert de eens in 10 jaar dagneerslag in de zomer rond 2100 met 54% en 20%.

Figuur 4.2. toont de kans dat de neerslag per uur op *natte dagen* hoger is dan een bepaalde hoeveelheid voor het referentieklimaat en voor verschillende scenario's rond 2100. Bij de uurtransformatie zijn bij het W en het W+ scenario dezelfde veranderingen opgegeven voor $Q_{99, \text{uur}}$ (zie Bijlage 3). We verwachten daarom dat de veranderingen in het W en het W+ scenario zoals uitgezet in Figuur 4.2, namelijk op basis van het aantal natte uren, hetzelfde zullen zijn. In Figuur 4.2. is te zien dat de hoeveelheid neerslag per uur die hoort bij een overschrijdingskans van eens in de 100 natte uren in het W+ scenario ongeveer evenveel stijgt als in het W scenario (99-percentiel, overschrijdingskans 0,01; rode verticale lijn), zowel voor de boven- als ondergrens ('high' en 'low'). Bij de extremere overschrijdingskansen wijken de neerslagwaarden voor het W en W+ scenario wat meer af, maar zijn nog steeds redelijk vergelijkbaar. De verschillen voor de extremere overschrijdingskansen kunnen hier worden veroorzaakt door het verschil in het aantal te verwijderen natte dagen (voor W+ scenario rond 2100 38% en voor W slechts 6%). De verwijdering van natte dagen in de dagtransformatie geschiedt op basis van de rangorde van de dagneerslag, en de dagen met de hoogste dagneerslag zijn lang niet altijd de dagen met de hoogste uurneerslag. Hierdoor kan de verdeling van uurneerslagen²⁴ wat verschillen tussen het W en W+ scenario.

²⁴ Tijdens de transformatie worden eerst de natte dagen verwijderd, daarna worden pas de hoeveelheden neerslag per tijdsduur aangepast (zie ook Bakker & Bessembinder, 2012).



Figuur 4.2. Overschrijdingskans (x-as; 100 = eens in de 100 *natte uren*, 1000 = eens in de 1000 *natte uren*) van neerslaghoeveelheden (y-as; in mm per uur) in de maanden juni-augustus voor het huidige klimaat (1976-2005; Ref) van Rotterdam en voor het W en W+ scenario rond 2100. Voor beide scenario's zijn telkens de boven- en ondergrenzen van de veranderingen van de extreme uurneerslag gebruikt (zie Bijlage 3 en tekst). De verticale rode lijn geeft de snijpunten met de waarden voor de neerslag die eens in de 100 natte uren wordt overschreden.



Figuur 4.3. Overschrijdingskans (x-as; 100 = eens in de 100 *natte uren*, 1000 = eens in de 1000 *natte uren*) van neerslagextremen (y-as; in mm per uur) in de maanden december-februari voor het huidige klimaat (1976-2005; Ref) van Rotterdam en voor het W en W+ scenario rond 2100. Voor beide klimaatscenario's zijn telkens de boven- en ondergrenzen van de veranderingen van de extreme uurneerslag gebruikt (zie Bijlage 3 en tekst). De verticale rode lijn geeft de snijpunten met de waarden voor de neerslag die eens in de 100 natte uren wordt overschreden.

Een vergelijkbare figuur is gemaakt voor de wintermaanden december t/m februari (Figuur 4.3). In de wintermaanden is de aanpassing van het aantal regendagen veel kleiner in alle KNMI'06 klimaatscenario's dan in de zomermaanden. Het lijkt er ook op dat

de verschillen voor de extremere overschrijdingskansen tussen W en $W+$ in Figuur 4.3 iets kleiner zijn dan in Figuur 4.2 voor de zomermaanden. Ook in Figuur 4.3 komt de verandering van het 99-percentiel (overschrijdingskans 0,01; rode verticale lijn) overeen met de opgelegde verandering, zowel voor de boven- als ondergrens ('high' en 'low').

5. Conclusies en discussie

Hoe werkt het uurneerslag-transformatieprogramma?

Met het hier uitgewerkte uurtransformatie-programma is het mogelijk de uurneerslag sterker te laten veranderen dan de dagneerslag. Ook bij extreme situaties (bijv. W+ in de zomer rond 2100) lijkt het huidige programma te werken (de opgelegde verandering wordt in de getransformeerde reeks verwerkt) en de consistentie met de dagneerslagtransformatie blijft behouden.

Waarvoor kan dit uurneerslagprogramma wel/niet gebruikt worden?

De hier gepresenteerde methode en de onder- en bovengrenzen voor veranderingen in extreme uursommen zijn experimenteel van aard, en bedoeld voor gevoeligheidsanalyses m.b.t. waterbeheer. Er bestaat nog veel onzekerheid over de waarden voor de veranderingen in uursommen. De genoemde onder- en bovengrenzen voor veranderingen van extreme uursommen hebben daarom niet dezelfde status als de getallen in de KNMI'06 klimaatscenario's.

Bij de onder- en bovengrenzen voor veranderingen van de extreme uurneerslag in Hoofdstuk 2 en Bijlage 3 wordt geen rekening gehouden met ruimtelijke verschillen in veranderingen in uurneerslag. Uit onderzoek is bekend dat er in het huidige klimaat wel significante ruimtelijke verschillen bestaan in extreme dagneerslag (Buishand et al., 2009), maar voor extreme uurneerslag veel minder (Overeem et al., 2009b), en dat in de kustregio de extreme neerslag anders kan veranderen dan in de rest van Nederland (KNMI, 2009). Aangezien dit niet expliciet in het uurneerslag-transformatieprogramma is verwerkt, kan dit programma niet met dezelfde onder- en bovengrenzen op grote schaal ingezet worden, maar alleen voor kleine gebieden of voor individuele stations. Er is te weinig informatie beschikbaar om de onder- en bovengrenzen van mogelijke veranderingen in uurneerslag ruimtelijk te differentiëren. Het wordt daarom aangeraden dit programma alleen voor individuele stations te gebruiken of voor enkele dicht bij elkaar gelegen stations (en ook niet voor stations in verschillende delen van Nederland indien de samenhang tussen die stations van belang is).

De methode voor het transformeren van tijdreeksen van uurneerslag naar de toekomst is ontwikkeld om de extreme neerslag beter weer te geven. Dit betekent dat de reeksen (ook die met dagwaarden) wellicht minder geschikt zijn voor de analyse van droogte en zoetwatervoorziening. Zie verder ook de mogelijkheden en beperkingen van het dagtransformatieprogramma (Bakker & Bessembinder, 2012).

Verder onderzoek

Naast de hierboven aangegeven aspecten is verder onderzoek interessant naar o.a. de volgende aspecten:

- In het huidige uurtransformatieprogramma is de duur van de neerslag op een dag niet expliciet meegenomen. Indirect wordt deze waarschijnlijk wel enigszins aangepast, omdat uren met weinig neerslag nog minder neerslag kunnen krijgen, tot praktisch 0 mm. Er is echter weinig bekend over veranderingen in neerslagduur in de toekomst, hoewel wel verwacht wordt dat deze zou kunnen afnemen;
- Het uurtransformatieprogramma verandert in essentie niets aan de sequentie en de timing van de neerslag op een dag, alleen de verandering van intensiteit van de uurneerslagen kan onderling verschillen. Er is geen onderzoek bekend naar verandering van de timing van neerslag op een dag;
- De verdeling van de uursommen in de getransformeerde tijdreeksen over verschillende klassen²⁵ is niet expliciet onderzocht. De Figuren 4.1 tot en met 4.3 laten op het oog geen onrealistische verdelingen zien. De gebruikte methode geeft

²⁵ Bedoeld wordt hier of het aantal uren met weinig neerslag, gemiddelde neerslag, etc. ook goed wordt weergegeven door het uurneerslagtransformatieprogramma.

daarom mogelijk een realistische verdeling over neerslagklassen. Dit moet echter nog wel verder onderzocht worden;

- Bij de onder- en bovengrenzen voor mogelijke veranderingen van uurneerslagsommen is nu geen onderscheid gemaakt tussen regio's in Nederland. Wel weten we dat in de kustregio de extreme neerslag mogelijk anders kan veranderen dan in het binnenland, en dat de extreme dagneerslag wel regionale verschillen vertoont, maar de extreme uurneerslag veel minder. Onderzocht zou moeten worden hoe deze informatie in een volgende versie van het uurtransformatieprogramma verwerkt zou kunnen worden;
- Zoals in Hoofdstuk 2 aangegeven hangt de verandering van extreme uurneerslag af van de (dauwpunts)temperatuur. Deze temperatuur is nu indirect meegenomen, door voor de maanden mei t/m oktober, waarin de gemiddelde temperatuur meestal boven de 10-14 °C is, een hogere verandering toe te passen voor de extreme uurneerslag. Er zou een conditioneel transformatieprogramma ontwikkeld kunnen worden, waarbij de verandering van uurneerslag afhangt van de temperatuur op die dag. Er zou dan wellicht ook gekeken moeten worden of de dagneerslagtransformatie ook aangepast moet worden, omdat deze nu onafhankelijk van de temperatuurstijging op de dag plaatsvindt;
- Ook met andere methoden zijn uurneerslagtijdreeksen te maken voor de toekomst (bijv. met een neerslaggenerator, zie Hoofdstuk 3). Waarschijnlijk kan met die methoden de consistentie in neerslaghoeveelheid op elke dag met de huidige dagtransformatie niet bewaard blijven (wel over een wat langere periode zoals maanden). Of dit een bezwaar is hangt af van het uiteindelijke gebruik. Als tegelijkertijd ook een andere methode voor het genereren van tijdreeksen op dagbasis wordt gebruikt, kan men bij gebruik van een andere methode voor uurtransformatie mogelijk wel de consistentie tussen uurneerslagen en dagsommen op elke dag waarborgen.

Referenties

- Bakker., A. & J. Bessembinder, 2012. Time series transformation tool: description of the program to generate time series for the future for the KNMI'06 climate scenarios. KNMI, WR (concept).
- Beersma, J.J. & T.A. Buishand, 2003. Multi-site simulation of daily precipitation and temperature conditional on the atmospheric circulation. *Climate Research*, 25, 121-133.
- Bruin, A.T.H., 2002. Verandering van neerslagkarakteristieken in Nederland gedurende de periode 1901-2001. KNMI, TR-246.
- Buishand, T.A., R. Jilderda & J.B. Wijngaard, 2009. Regionale verschillen in extreme neerslag. KNMI-publicatie: WR-2009-01, 3/3/2009, pp. 47.
- Buishand, T.A. & J.B. Wijngaard, 2008. Statistiek van extreme neerslag voor het stedelijk waterbeheer. H2O, 2008, 41, 8, 28-30.
- Groen, G., 2007. Extreme zomerneerslag 2006 en klimaatscenario's (t.b.v. DG Water). KNMI publicatie 215.
- Hoogvliet et al., 2011. Brede, gebiedsspecifieke verkenning van effecten van klimaatverandering, in samenhang met toekomstscenario's en trendmatige ontwikkelingen. Managementsamenvatting. KvK rapportnummer: KvK 030B/2010.
- Klein Tank, A.M.G., T.A. Buishand, J.J. Beersma & G.P. Können, 1995. Climate change scenarios for impact studies in the Netherlands. In: S. Zwerver, R.S.A.R. van Rompaey, M.T.J. Kok & M.M. Berk. 1995. Climate change research: evaluation and policy implications. Elsevier, p. 391-396.
- KNMI, 2006. Klimaat in de 21^e eeuw, vier scenario's voor Nederland. Brochure.
- KNMI, 2009. Aanvullingen op de KNMI'06 klimaatscenario's voor Nederland. Brochure KNMI.
- Lenderink, G. & E. van Meijgaard, 2010. Linking increases in hourly precipitation extremes to atmospheric temperature and moisture changes. *Environmental Research Letters*, 2, 5, 025208, [doi:10.1088/1748-9326/5/2/025208](https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/2/025208).
- Lenderink, G. & E. van Meijgaard, 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience* 1, 8, pp. 511-514, [doi:10.1038/ngeo262](https://doi.org/10.1038/ngeo262).
- Lenderink, G., E. van Meijgaard & F. Selten, 2009. Intense coastal rainfall in the Netherlands in response to high sea surface temperatures: analysis of the event of August 2006 from the perspective of a changing climate. *Clim. Dyn.*, 32, 19-33, [doi:10.1007/s00382-008-0366-x](https://doi.org/10.1007/s00382-008-0366-x).
- Lenderink, G., H. Y. Mok, T. C. Lee & G. J. van Oldenborgh, 2011. Scaling and trends of hourly precipitation extremes in two different climate zones – Hong Kong and the Netherlands. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 4701-4719.
- Nieuwkerk, E. van, R. Trouwborst, S.J. Junier, E. Mostert, M.M. Rutten, J. Nederlof, M. Maarleveld, J. Geerse, 2010. Klimaatverandering en het Rotterdamse stedelijk watersysteem: Verkennende studie en agenda voor vervolg. KvK rapportnummer KvK 020/2010.
- Overeem, A., 2009. Climatology of extreme rainfall from rain gauges and weather radar. Proefschrift: Wageningen University, 2009, Wageningen, 144p.
- Overeem, A., I. Holleman en T.A. Buishand, 2009a. Derivation of a 10-year radar-based climatology of rainfall. *J. Appl. Meteor.*, 48, 7, 1448-1463, [doi:10.1175/2009JAMC1954.1](https://doi.org/10.1175/2009JAMC1954.1).
- Overeem, A., T.A. Buishand en I. Holleman, 2009b. Extreme rainfall analysis and estimation of depth-duration-frequency curves using weather radar. *Water Resour. Res.*, 2009, 45, W10424, [doi:10.1029/2009WR007869](https://doi.org/10.1029/2009WR007869)
- Overeem, A., T.A. Buishand en I. Holleman, 2008a. Rainfall depth-duration-frequency curves and their uncertainties. *J. Hydrol.*, 348, 1, 124-134, [doi:10.1016/j.jhydrol.2007.09.044](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.044).

- Romero, Y.L., J. Bessembinder, N.C. van de Giesen, F.H.M. van de Ven, 2011. A Relation between Extreme Daily Precipitation and Extreme Short Term Precipitation. Climatic change, on line published 14 December 2010.
- Smits, I., J.B. Wijngaard, R. Versteeg & M. Kok, 2004. Statistiek van extreme neerslag in Nederland. Rapport nr. 26. STOWA.
- Van Oldenborgh, G.J., S.S. Drijfhout, A. van Ulden, R. Haarsma, A. Sterl, C. Severijns, W. Hazeleger & H. Dijkstra, 2008. Western Europe is warming much faster than expected. *Climate of the Past*, 2009, **5**, 1, 1-12, [doi:10.5194/cp-5-1-2009](https://doi.org/10.5194/cp-5-1-2009).
- Wolters, D., C. Homan, & J. Bessembinder, 2001. Ruimtelijke klimatologische verschillen binnen Nederland – met speciale aandacht voor de regio's Haaglanden en Rotterdam. KNMI Technisch rapport TR-323. De Bilt.

Links

- Website dagtransformatie programma (versie 1.2 juni 2012):
http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly;
- KNMI website over klimaatscenario's: <http://www.knmi.nl/climatescenarios> (EN);
<http://www.knmi.nl/klimaatscenarios> (NL);
- KNMI website historische data:
uurgegevens <http://www.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens/>;
daggegevens <http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/download.html>,
<http://www.knmi.nl/klimatologie/monv/reeksen/>;
- KNMI website onderzoeksgegevens:
<http://www.knmi.nl/klimatologie/onderzoeksgegevens/index.html>

Bijlage 1. Beschikbare gemeten uurneerslagreeksen in de Regio Haaglanden en de Regio Rotterdam

In Tabel A1.1 wordt een overzicht gegeven van de beschikbare stations met uurneerslagdata in de Regio Haaglanden en de Regio Rotterdam. Onder de tabel staat ook aangegeven waar de betreffende tijdreeksen zijn te downloaden via internet.

Tabel A1.1. KNMI-stations*: etmaalgegevens van neerslag (0-24 uur UTC) en urengegevens van neerslag.

Plaats	Code	Gegevens vanaf
Hoek van Holland	330	Aug. 1995
Rotterdam	344	Jan. 1974
Valkenburg	210	Mei 1972

* zie voor ligging stations en de datareeksen <http://www.knmi.nl/klimatologie/daggegevens/download.html> en <http://www.knmi.nl/klimatologie/urengegevens/>.

Bijlage 2. Formele beschrijving van het uurtransformatieprogramma (EN)

Transformation of hourly precipitation series

Any algorithm intended to apply a given scenario for hourly amounts ought to respect the scenario for daily amounts (which is independent of the former), when applied to the 24-hour totals (0-24 UTC). This requirement naturally leads to the following stepwise approach:

1. Aggregation of hourly amounts into daily amounts
2. Transformation of the daily amounts using a scenario for daily precipitation.
3. Transformation of the hourly amounts, *while preserving the daily totals* according to a scenario for hourly precipitation

The first two steps are self-explanatory. In the implementation of the third step, several choices need to be made. Option 2, the non-linear disaggregation (chapter 3), has been implemented and tested and is described below. Only the essence of the timeseries transformation is discussed here. Modifying the algorithms to deal with months/seasons separately (which is desirable in a practical setting) is straightforward and is not elaborated below.

Nonlinear adjustment of all hours

This method resembles the nonlinear ('power-law') transformation already used for the transformation of the daily amounts, but now on an hourly resolution. The major difference is that the transformation of hourly amounts has only one parameter (hence one degree of freedom), whereas the transformation of daily amounts has two.

The transformation has the form

$$H_{ij}^* = \frac{H_{ij}^b}{\sum_{i=1}^{24} H_{ij}^b} \cdot D_j^* , \quad (\text{B } 1)$$

where '*' signifies a transformed value, D_j is daily total for day j and H_{ij} the hourly amount for the i^{th} hour of day j . The exponent b is determined by iteration such that the 99th percentile of the non-zero transformed hourly amounts Q_{99}^* equals that of the untransformed hourly amounts Q_{99} , increased by ΔQ (fraction) following the desired scenario (see Annex 3). Now a value of b is sought that satisfies

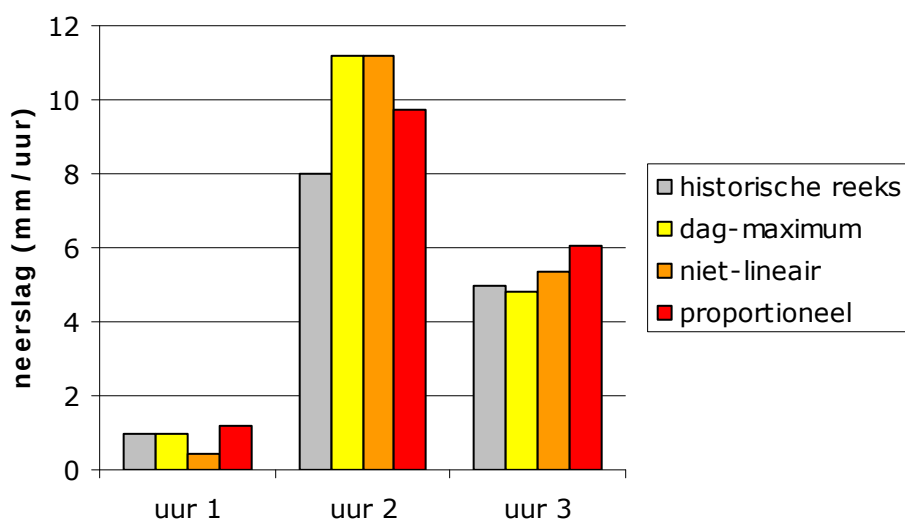
$$| Q_{99}^*(b) - (1 + \Delta_Q) Q_{99} | \leq \alpha_{\text{tol}} Q_{99} , \quad (\text{B } 2)$$

where the tolerance is expressed as a fraction α_{tol} of the untransformed percentile Q_{99} . Bisection or regula falsi are used to solve Eqn. B2, with $b_1 = 0.75$ and $b_2 = 1.5$ as initial interval (regula falsi converges slightly faster; Q_{99} is a reasonably smooth function of b). Once b is known, Eqn.B1 can be applied to all days and hours.

Voorbeeld van hoe de methode werkt

In de onderstaande tabel een fictief en schematisch voorbeeld van hoe de bovenstaande methode ('niet-lineair') werkt.

	uur 1	uur 2	uur 3	Dagsom
Neerslaghoeveelheid in historische reeks	1 mm	8 mm	5 mm	14 mm
• Verhouding tussen uurneerslagen in Historische reeks	0,07	0,57	0,36	
• Getransformeerde dagsom (met dagtransformatieprogramma)				17 mm
• % verandering dagsom				21,43
• Gewenste en verwachte verandering van de hoogste uurneerslag is hoger dan de verandering van de dagneerslag (in %)		40		
• Bepalen van waarde b (de historische uurneerslagen worden tot de macht b verheven, zodanig dat een bepaald percentiel de gewenste verandering krijgt, hier de hoogste uurneerslag op deze fictieve dag)		1,565		
• Tussenstap bepalen verhouding: de historische uurneerslag verheven tot de iteratief bepaalde macht b	1,00	25,90	12,41	39,32
• Getransformeerde uursommen: dagsom te hoog in vorige stap, daarom worden uurneerslagen in de vorige stap vermenigvuldigd met 17/39,32 (de getransformeerde dagneerslag gedeeld door de som van de getransformeerde uurneerslagen uit de vorige stap)	0,43 mm	11,20 mm	5,37 mm	17 mm
• Nieuwe verhouding uurneerslagen in de getransformeerde uurneerslagreeks	0,03	0,66	0,32	



Figuur B1. Vergelijking tussen verschillende methoden om historische uurneerslagen te transformeren (zie tekst voor toelichting): fictief voorbeeld van een dag met 3 uur met neerslag en 1 neerslagpiek (voor de dagneerslag is een verandering van 21 % gebruikt, en voor de verandering van de hoogste uurneerslag 40 %).

Ter vergelijking hieronder voor dezelfde historische situatie een voorbeeld hoe optie 1 ('dag-maximum') uit Hoofdstuk 3 werkt.

	uur 1	uur 2	uur 3	Dagsom
Neerslaghoeveelheid in historische reeks	1 mm	8 mm	5 mm	14 mm
• Verhouding tussen uurneerslagen in Historische reeks	0,07	0,57	0,36	
• Getransformeerde dagsom (met dagtransformatieprogramma)				17 mm
• % verandering dagsom				21,43
• Gewenste en verwachte verandering van de hoogste uurneerslag is hoger dan de verandering van de dagneerslag (in %) ²⁶		40		
• Bepalen getransformeerde neerslag op uur met de hoogste neerslag		11,2 mm		
• Restant van getransformeerde dagneerslag verdelen over de overige uren in dezelfde verhouding als in de historische reeks	0,97 mm	11,2 mm	4,83 mm	17 mm
• Nieuwe verhouding uurneerslagen in de getransformeerde uurneerslagreeks	0,06	0,66	0,28	

Ter vergelijking hieronder ook voor dezelfde historische situatie een voorbeeld hoe de methode werkt die tot nu toe vaak gebruikt wordt, namelijk de verandering in dagwaarde voor elke uurwaarde toepassen (proportionele methode).

	uur 1	uur 2	uur 3	Dagsom
Neerslaghoeveelheid in historische reeks	1 mm	8 mm	5 mm	14 mm
• Verhouding tussen uurneerslagen in Historische reeks	0,07	0,57	0,36	
• Getransformeerde dagsom (met dagtransformatieprogramma)				17 mm
• % verandering dagsom				21,43
• Toepassen verandering op dagbasis op alle uurneerslagen	1,21 mm	9,71 mm	6,07 mm	17
• Verhouding uurneerslagen in de getransformeerde uurneerslagreeks	0,07	0,57	0,36	

²⁶ In deze methode moet de verandering voor het uur met de meeste neerslag bepaald worden m.b.v. interpolatie/extrapolatie uit verwachte verandering voor bijv. het 50- en 99 percentiel. Daarvoor moet ook bepaald worden tot welk percentiel het uur met de meeste neerslag op die dag behoort.

Bijlage 3. Indicaties voor mogelijke veranderingen in uurneerslag

Het uurtransformatieprogramma zoals beschreven in dit rapport is een experimentele versie. We weten immers nog niet zo veel van de mogelijke veranderingen in extreme en minder extreme uurneerslag in de toekomst. Het programma werkt daarom ook niet met voorgeschreven veranderingen van de uurneerslagen: deze kunnen door de gebruiker gevarieerd worden. Om te voorkomen dat gebruikers gaan werken met onrealistisch grote veranderingen van extreme uursommen, wordt hieronder en in Paragraaf 2.5 een indicatie gegeven van wat op basis van onze huidige kennis een realistische boven- en ondergrenzen zijn voor de veranderingen van extreme uurneerslag.

Toelichting op percentielen

Het 99-percentiel voor de uurneerslag ($Q_{99, \text{uur}}$) tijdens natte uren en het 99-percentiel van dagneerslag op natte dagen kunnen niet zondermeer vergeleken worden. Een dag met een extreme hoeveelheid neerslag heeft niet automatisch een uur waarin een extreme hoeveelheid neerslag viel. Bovendien is de herhalingstijd behorend bij het 99-percentiel van uurneerslag veel kleiner dan de herhalingstijd die hoort bij het 99-percentiel van dagneerslag:

- Dagbasis: In Nederland regent het ongeveer de helft van het aantal dagen. Dit betekent dat de neerslaghoeveelheid die bij het 99-percentiel op dagbasis hoort voor een bepaalde kalendermaand ongeveer eens in de 6-7 jaar in die kalendermaand wordt overschreden (gemiddeld 30 dagen per kalendermaand, waarvan ongeveer 15 met regen: $100/15=6,67$);
- Uurbasis: In Nederland regent het ongeveer 11-12% van de uren (in de zomer gemiddeld minder ong. 25-30%). Dit betekent dat de neerslaghoeveelheid die bij het 99-percentiel op uurbasis hoort voor een bepaalde kalendermaand ongeveer eens in de 1,2 jaar in die kalendermaand wordt overschreden (gemiddeld $30 \cdot 24 = 720$ uur per kalendermaand, waarvan ongeveer 11-12% met regen (De Bilt 1981-2010), ofwel ongeveer 79-86 regenuren per maand: 1,16-1,26). Het 99,9-percentiel in een bepaalde kalendermaand heeft dan een herhalingstijd van ongeveer eens in de 12-13 jaar in die kalendermaand²⁷.

Handreikingen m.b.t. te gebruiken veranderingen in extreme uurneerslag, op basis van literatuur

In Paragraaf 2.5 in Tabel 2.2. staan de waarden voor de procentuele verandering van de extreme uurneerslag per °C temperatuurstijging en de te gebruiken veranderingen in maandgemiddelde temperatuur om de onder- en bovengrenzen in % voor de toekomst te bepalen.

In Tabel A3.1 worden de onder- en bovengrenzen voor $Q_{99, \text{uur}}$ per kalendermaand en per KNMI'06 scenario aangegeven, gebaseerd op deze handreikingen. In Paragraaf 2.5 staat een uitgebreide beschrijving van de mogelijke over- en onderschattingen die bij de verschillende scenario's gemaakt kunnen worden als de onderstaande boven- en ondergrenzen worden gebruikt.

²⁷ In de zomer regent het minder uren. Bij 25% minder neerslag uren is de herhalingstijd die hoort bij het 99 percentiel voor de uurneerslag: $30 \cdot 24 = 720$ of $31 \cdot 24 = 744$ uur per kalendermaand, waarvan ongeveer 8,25-9% met regen, ofwel ongeveer 59-67 regenuren per maand. Dit resulteert in een herhalingstijd van 1,49-1,68 jaar. In Figuren 4.1 en 4.2 worden resultaten voor de maanden juni-augustus gepresenteerd. De herhalingstijd die dan hoort bij een situatie die eens in de 100 natte uren wordt overschreden heeft dan een herhalingstijd van ongeveer 0,5 jaar (1,6/3) een situatie die eens in de 1000 natte uren wordt overschreden heeft dan een herhalingstijd van 5-5,6 jaar.

Tabel A3.1. Mogelijke onder- en bovengrenzen* voor veranderingen in de $Q_{99, \text{uur}}$ (in %) per kalendermaand voor de 4 KNMI'06 klimaatscenario's voor rond 2050 en rond 2100 t.o.v. het klimaat rond 1990 (voor methode schatten onder- en bovengrenzen en beperkingen: zie tekst hierboven en Par. 2.5).

	2050		2100	
	G/G+	W/W+	G/G+	W/W+
Januari	6-11	13-23	13-22	25-46
Februari	6-11	13-23	13-22	25-46
Maart	6-11	13-24	13-22	25-48
April	6-12	13-25	13-24	25-50
Mei	9-18	17-36	18-36	34-73
Juni	9-18	17-38	18-36	34-76
Juli	9-20	17-39	18-39	34-78
Augustus	9-20	17-41	18-39	34-81
September	9-20	17-39	18-39	34-78
Oktober	9-18	18-36	18-36	36-73
November	6-12	13-24	13-24	25-48
December	6-11	13-23	13-22	25-46

* Voor de gebruikte veranderingen in maandgemiddelde temperatuur zie KNMI (2009) en Tabel A3.2.

Tabel A3.2. Gemiddelde temperatuurstijging per kalendermaand (in °C) voor de KNMI'06 klimaatscenario's voor rond 2050* t.o.v. de referentieperiode 1975-2010, gebruikt voor het bepalen van de onder- en bovengrenzen in Tabel A3.1.

	2050			
	G	G+	W	W+
Januari	0,9	1,1	1,8	2,3
Februari	0,9	1,1	1,8	2,3
Maart	0,9	1,1	1,8	2,4
April	0,9	1,2	1,8	2,5
Mei	0,9	1,3	1,7	2,6
Juni	0,9	1,3	1,7	2,7
Juli	0,9	1,4	1,7	2,8
Augustus	0,9	1,4	1,7	2,9
September	0,9	1,4	1,7	2,8
Oktober	0,9	1,3	1,8	2,6
November	0,9	1,2	1,8	2,4
December	0,9	1,1	1,8	2,3

* Voor 2100 zijn de waarden voor 2050 vermenigvuldigd met 2.

Bovenstaande is in grote lijnen in overeenstemming met wat ook in de brochure over de 'Aanvullingen op de KNMI'06 scenario's' uit 2009 (KNMI, 2009) staat: '.... wordt geadviseerd om in heel Nederland voor de extreme neerslagintensiteiten per uur uit te gaan van de G/W scenario's'. De bovengrens van de hier gegeven schattingen is echter wel iets hoger dan de schatting van neerslag extemen in de G/W scenario's, omdat voor de bovengrenzen de stijging in maandgemiddelde temperatuur uit de G+ en W+ scenario's wordt gebruikt.

Veranderingen in het 99-percentiel van uursommen voor de tijdshorizonten 2020, 2030, 2040, 2060, 2070, 2080, 2090 kunnen verkregen worden door lineaire interpolatie van de maandwaarden tussen 1990 en 2050 en tussen 2050 en 2100.

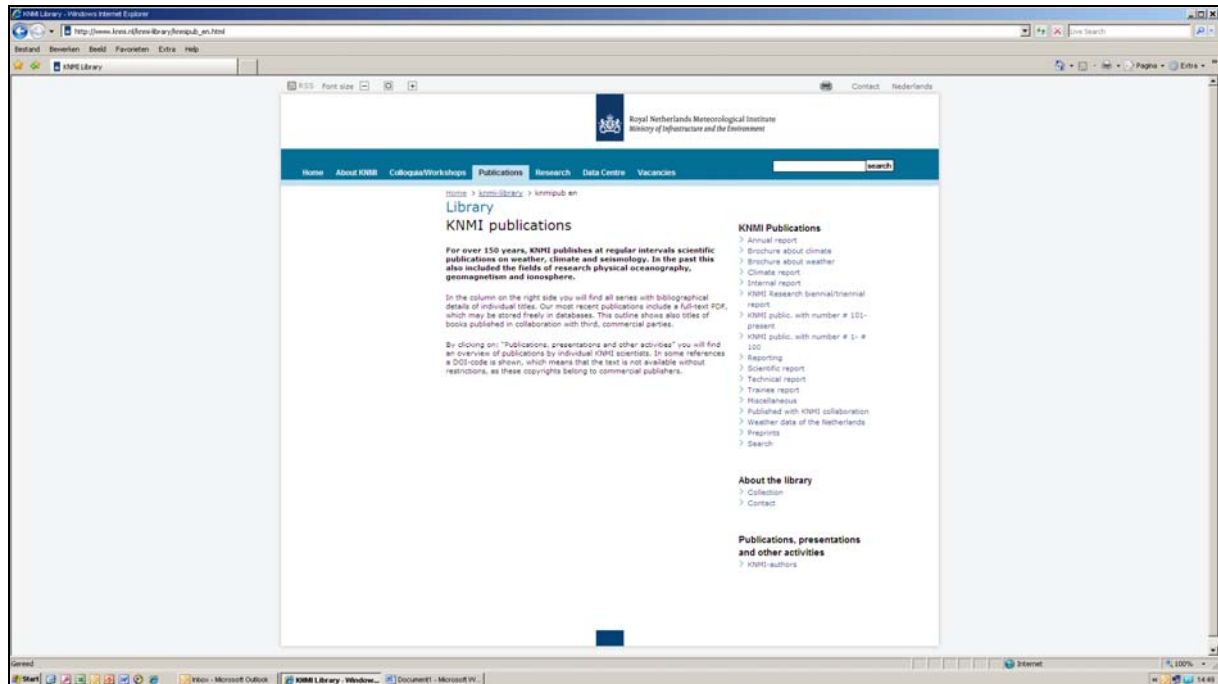
Waar moet men rekening houden met een 'kusteffect' in de extreme neerslag?

In de brochure 'Aanvullingen op de KNMI'06 klimaatscenario's' (KNMI, 2009) staat het volgende voor de kustregio: 'omdat de G/W scenario's zijn gebaseerd op de bovengrens van de gebruikte modelresultaten, bevatten deze scenario's voldoende marge om het effect van de warme Noordzee mee te nemen. Bij gebruik van de G+/W+ scenario's wordt de invloed van het warmer wordende zeewater op de neerslag in de kuststrook waarschijnlijk onderschat. Voor deze scenario's zal de lokale temperatuurstijging van de

Noordzee relatief groot zijn. De G+/W+ scenario's gaan uit van modellen die een sterke uitdroging boven het land vertonen, en waarin de buienactiviteit sterk wordt onderdrukt. Voor de kuststrook, met de Noordzee als bron van vocht, is dit niet realistisch. Naast langdurigere periodes met droogte zoals beschreven in de G+/W+ scenario's zal de kuststrook ook rekening moeten houden met kortdurende periodes met extremere neerslag, zoals beschreven in de G/W scenario's'.

A complete list of all KNMI-publications (1854 – present) can be found on our website

www.knmi.nl/knmi-library/knmipub_en.html



The most recent reports are available as a PDF on this site.

