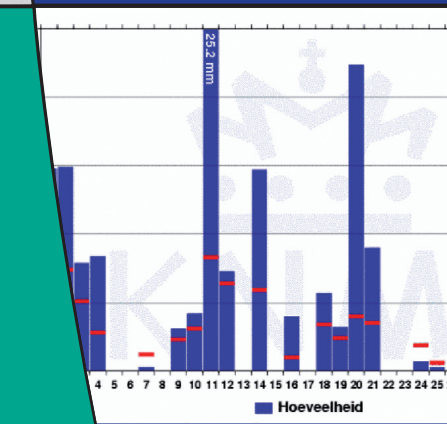
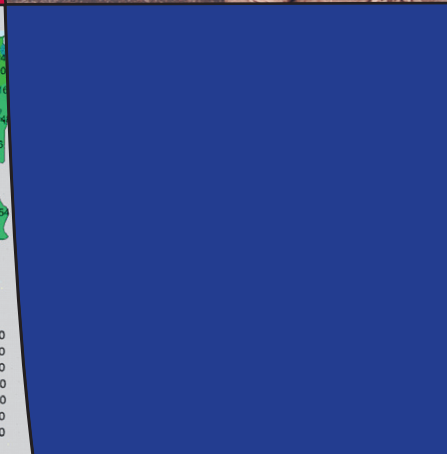
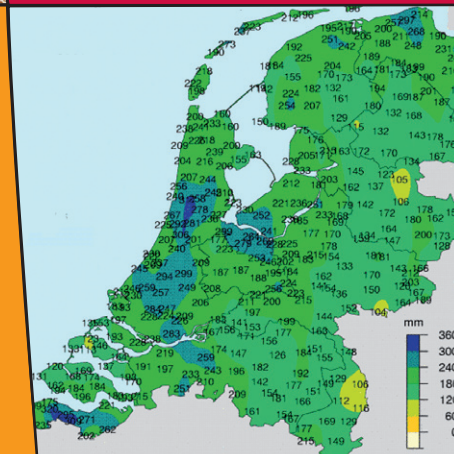
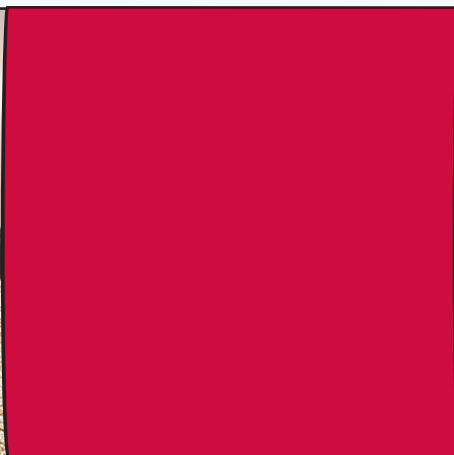




Extreme zomerneerslag 2006 en klimaatscenario's

Geert Groen

Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut



KNMI publicatie 215

De Bilt, 2007

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

UDC : 551.577.2 (492)

ISSN:

ISBN:



Indeling

	Samenvatting <i>vii</i>		Referenties 14
1.	Inleiding 1		Bijlage A. De buien van 2 en 3 augustus 2006 15
2.	Beschrijving van de zomermaanden juni, juli en augustus 2006 2		Bijlage B. Modellsimulaties met verschillende zeewatertemperaturen 18
3.	Extreme neerslag in het huidige klimaat 4		Bijlage C. De KNMI'06 klimaatscenario's 19
4.	Neerslagextremen in de toekomst 8		Bijlage D. Korte beschrijving van het transformatieprogramma 21
5.	Hoe normaal wordt de neerslag van augustus 2006 in de toekomst? 12		
6.	Discussie 13		

Medewerking

Het rapport is tot stand gekomen in samenwerking met Jules Beersma, Janette Bessembinder en Adri Buishand en met medewerking van (in alfabetische volgorde) Luit-Jan Dijkhuis, Arnout Feijt, Robert Leander, Geert Lenderink, Henk van Oel, Aart Overeem, Rob Sluijter, Hans Verloop en Janet Wijngaard.

Samenvatting

Zware buien hebben in augustus 2006 voor lokale wateroverlast gezorgd. Voor het Directoraat Generaal Water van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat was dit de aanleiding het KNMI nader onderzoek te laten verrichten naar de mogelijke verandering van neerslagextremen in de 21e eeuw.

Voor dit onderzoek zijn drie doelstellingen geformuleerd:

- Hoe groot zijn de neerslagextremen voor verschillende tijdsduren in het huidige klimaat;
- Hoe veranderen deze extremen in de toekomst onder de vier KNMI'06 scenario's;
- Hoe exceptioneel zijn de neerslagsommen in augustus 2006 onder de huidige klimatologische condities en in de toekomstscenario's.

In dit onderzoek is de verandering van de neerslagextremen onder de KNMI'06 klimaatscenario's bepaald met behulp van transformatie van neerslagreeksen.

Van 13 stations zijn de reeksen met dagsommen van de neerslag uit de periode rond 1990 (1976-2005) samengevoegd en vervolgens getransformeerd naar reeksen rond 2050 en 2100. Na samenvoeging van de afzonderlijke reeksen zijn de veranderingen in neerslaghoeveelheid bij een gegeven overschrijdingsfrequentie bepaald uit de reeksen rond 1990, 2050 en 2100. Deze veranderingen zijn vervolgens toegepast op de neerslagextremen voor het huidige klimaat voor neerslagduren van 60 minuten tot 24 uur.

Opgemerkt moet worden dat gedetailleerde kennis van de veranderingen van neerslagextremen met een tijdschaal korter dan een etmaal nog grotendeels ontbreekt en er een aanname moet worden gedaan. In dit rapport wordt aangenomen dat extreme neerslag met een kortere duur (1 tot 12 uur) relatief even veel verandert als de extreme dagsommen.

Daarnaast wordt voor "zeldzame" neerslagextremen een maximale toename gehanteerd, overeenkomend met de veranderingen in de KNMI'06 klimaatscenario's voor een dagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden.

De veranderingen van de neerslagextremen zijn doorgerekend voor alle vier scenario's, er is geen "voorkeurs-scenario" en het wordt afgeraden te "middelen" tussen de vermelde neerslaghoeveelheden voor verschillende scenario's.

In de navolgende tabel worden de resultaten van bovenstaande berekening gepresenteerd. De kleinste toename van de neerslaghoeveelheid bij een gegeven neerslagduur treedt op in het G+ scenario en de grootste toename in het W scenario.

De extreem natte augustus 2006 volgde op een record warme en zonnige julimaand waarin de temperatuur van het Noordzeewater tot 4 °C boven het langjarig gemiddelde opliep. Er zijn aanwijzingen dat de buienvorming en neerslagintensiteit in deze maand mede het gevolg waren van het warme zeewater.

Bij de zware buien van 2 en 3 augustus 2006 werd een uursom van 36 mm in Schoondijke (Zeeuws Vlaanderen) afgeleid uit neerslagmetingen en radardata. In het huidige klimaat is de overschrijdingsfrequentie van 36 mm in 60 minuten eens in de 37 jaar, in het toekomstige klimaat kan dat rond 2100 mogelijk eens in de 6 tot eens in de 20 jaar (W, resp. G+ scenario) worden.

In Zeeuw Vlaanderen werd een etmaalhoeveelheid afgetapt van ruim 90 mm. Een dergelijke neerslagsom heeft in het huidige klimaat een overschrijdingsfrequentie van eens in de 160 jaar, uit dit onderzoek blijkt die rond 2100 tussen eens per 20 en eens per 150 jaar te liggen (W, resp. G+ scenario).

Het extreme weer in augustus 2006 speelde zich af op een tijd- en ruimteschaal die vele malen kleiner is dan die van de klimaatmodellen waarop de scenario's zijn gebaseerd. De invloed van warm zeewater op buienvorming is moeilijk te kwantificeren. Een eerste resultaat van onderzoek met een fijnmaziger klimaatmodel naar deze invloed laat zien dat per graad temperatuurstijging van het zeewater de neerslaghoeveelheid met 15% kan stijgen (Lenderink et al., 2007b)

Voor een meer onderbouwde uitspraak over veranderingen van neerslaghoeveelheden in patronen en voor verschillende neerslagduren is meer modelonderzoek nodig en dienen historische gegevens verder in detail onderzocht te worden.

Overzicht van de terugkeerniveaus van neerslaghoeveelheden (mm) in het huidige klimaat en in het toekomstige klimaat rond 2050 en 2100 voor alle scenario's en voor diverse neerslagduren en overschrijdingsfrequenties.

60 min	nu	2050				2100			
		G	G+	W	W+	G	G+	W	W+
10x per jaar	5	5	5	6	5	6	5	6	5
5x per jaar	7	8	7	8	7	8	7	9	8
1x per jaar	14	15	14	17	15	17	15	19	16
1x per 2 jaar	18	20	19	22	19	22	19	25	20
1x per 5 jaar	23	26	24	28	25	28	25	34	27
1x per 10 jaar	27	31	28	34	30	34	30	42	33
120 min									
10x per jaar	7	7	7	8	7	8	7	8	7
5x per jaar	10	11	10	11	10	11	10	13	11
1x per jaar	17	19	18	20	18	20	18	23	19
1x per 2 jaar	21	23	22	25	22	25	22	29	24
1x per 5 jaar	26	29	27	32	28	32	28	38	30
1x per 10 jaar	31	35	33	39	34	39	34	48	38
4 uur									
10x per jaar	9	9	9	10	9	10	9	11	9
5x per jaar	12	13	12	14	12	14	12	15	13
1x per jaar	21	23	22	25	22	25	22	29	24
1x per 2 jaar	25	28	26	30	27	30	27	35	28
1x per 5 jaar	31	35	32	38	34	38	34	45	36
1x per 10 jaar	36	41	38	46	40	46	40	56	44
8 uur									
10x per jaar	12	13	12	13	12	13	12	14	12
5x per jaar	15	16	15	17	16	17	16	19	16
1x per jaar	24	26	25	28	25	28	25	33	27
1x per 2 jaar	29	32	30	35	31	35	31	41	33
1x per 5 jaar	36	40	38	44	39	44	39	53	42
1x per 10 jaar	41	47	43	52	45	52	45	63	50
12 uur									
10x per jaar	13	14	13	14	13	14	13	16	13
5x per jaar	17	18	17	19	18	19	18	22	18
1x per jaar	27	30	28	32	29	32	29	37	30
1x per 2 jaar	32	35	33	39	35	39	35	45	36
1x per 5 jaar	40	45	42	49	43	49	43	58	47
1x per 10 jaar	46	52	49	59	51	59	51	71	56
24 uur									
10x per jaar	15	16	15	16	15	16	15	18	15
5x per jaar	21	22	21	24	22	24	22	27	23
1x per jaar	33	36	34	39	35	39	35	45	37
1x per 2 jaar	39	43	41	47	42	47	42	55	44
1x per 5 jaar	47	52	49	58	51	58	51	69	55
1x per 10 jaar	54	61	57	69	60	69	60	84	66

Tabel 6: Overzicht van de terugkeerniveaus van neerslaghoeveelheden (mm) in het huidige en in het toekomstige klimaat rond 2050 en 2100 voor diverse neerslagduren en overschrijdingsfrequenties onder de vier KNMI'06 klimaatscenario's.

1. Inleiding

Zware buien hebben in augustus 2006 voor lokale wateroverlast gezorgd. Voor het Directoraat Generaal Water van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat was dit de aanleiding het KNMI nader onderzoek te laten verrichten naar de mogelijke verandering van neerslagextremen in de 21e eeuw.

Voor dit onderzoek zijn drie doelstellingen geformuleerd:

- Hoe groot zijn de neerslagextremen voor verschillende tijdsduren in het huidige klimaat;
- Hoe veranderen deze extremen in de toekomst onder de vier KNMI'06 scenario's, die naar huidige inzichten het grootste deel van de mogelijke veranderingen omvatten, in 2050 en 2100;
- Hoe exceptioneel zijn de neerslagsommen in augustus 2006 onder de huidige klimatologische condities en toekomstscenario's.

Neerslagextremen worden niet alleen geordend door de neerslaghoeveelheid maar ook door de tijdsduur waarin de neerslag is gevallen. De extremiteit van een gebeurtenis wordt meestal aangegeven door een (overschrijdings)kans: "ééns per tien jaar wordt voor een neerslagduur van 24 uur een neerslaghoeveelheid van 54 mm overschreden".

Uit analyse van neerslaggegevens blijkt het zwaartepunt van extreme neerslaggebeurtenissen met kortere duren in juli en augustus te liggen; de periode van de zomerse buien.

In de toekomst wordt door de stijgende temperatuur en mogelijk ook de verandering van de luchtstroming een toename van de neerslagextremen verwacht. De verwachte klimaatveranderingen voor Nederland zijn door het KNMI weergegeven in de KNMI-06 klimaatscenario's (v.d. Hurk et al., 2006; Lenderink et al., 2007).

De KNMI'06 klimaatscenario's zijn geconstrueerd in twee stappen. In de eerste stap zijn uit globale en regionale klimaatmodellen de veranderingen van de volgende grootheden bepaald: gemiddelde neerslag, gemiddelde neerslag verandering op een natte dag, het aantal natte dagen, en het neerslagextrem dat eens per 100 natte dagen optreedt (Lenderink et al., 2007). In de tweede stap zijn met behulp regionale klimaatmodellen de veranderingen van de dagsom die gemiddeld eens in de 10 jaar wordt overschreden bepaald (v.d. Hurk et al., 2007).

Met dit rapport wordt de informatie over de veranderingen in extreme neerslag uitgebreid. Hierbij wordt, net zoals bij de constructie van de KNMI'06 klimaatscenario's, gebruik gemaakt van een transformatieprogramma voor bestaande neerslagreeksen. Neerslagreeksen met dagsommen van 13 stations uit de periode 1976-2005 worden voor de vier verschillende scenario's getransformeerd naar reeksen voor twee perioden, één rond 2050 en één rond 2100.

De relatieve veranderingen voor diverse overschrijdingsfrequenties van dagsommen worden hieruit

bepaald en toegepast op neerslagextremen voor het huidige klimaat. De neerslagextremen voor het huidige klimaat zijn bepaald door Buishand en Wijngaard (2007) en Buishand et al. (1991) voor neerslagduren van 60 en 120 minuten en Smits et al. (2004) voor neerslagduren van 4, 8, 12 en 24 uur met overschrijdingsfrequenties van 10 x per jaar tot eens per 100 jaar.

Leeswijzer:

- In paragraaf 2 wordt de zomer van 2006 beschreven, met name de extreme neerslag in de maand augustus.
- In paragraaf 3 worden de neerslagextremen voor verschillende tijdsduren in het huidige klimaat beschreven.
- In paragraaf 4 worden de relatieve veranderingen in de extreme neerslaghoeveelheden rond 2050 en 2100 bepaald op basis van de KNMI'06 klimaatscenario's.
- In paragraaf 5 wordt de vraag, hoe extreem de neerslag van augustus 2006 rond 2100 zou kunnen zijn, beantwoord.
- In paragraaf 6 volgt een discussie.

Tot slot volgen bijlagen A t/m D:

- Nadere beschrijving van de buien van begin augustus 2006.
- Een modelsimulatie van de extreme neerslag in augustus 2006.
- Beschrijving van de KNMI'06 klimaatscenario's.
- Beschrijving van het transformatieprogramma voor neerslagreeksen.

2. Beschrijving van de zomermaanden juni, juli en augustus 2006

Zelden heeft een zomer zulke verschillende gezichten laten zien als in 2006. Juni en juli waren zeer zonnig, zeer droog en warm. Augustus echter was koel, zeer somber en record nat.

Zon en temperatuur: zeer zonnig met een zeldzaam grote temperatuuromslag

Zowel juni als juli 2006 waren zeer zonnig. In Valkenburg (ZH) scheen de zon in juli zelfs 340 uur tegen ongeveer 200 uur normaal. Zoveel uren zon per maand was in ons land nog nooit gemeten. In tegenstelling daarmee was augustus uitgesproken somber met in Maastricht slechts 106 uur zon.

Uiteindelijk leverde het vooral aan zee een zonnige zomer (juni, juli en augustus) op met gemiddeld over het land 704 uur zon tegen 591 uur normaal.

Augustus was in De Bilt met 16,4 °C bijna een graad te koud, terwijl juli met 22,3 °C ongeveer 5 °C warmer was dan het langjarig gemiddelde. Juli 2006 was daarmee veruit de warmste maand ooit sinds de metingen in 1706 begonnen.

Ook juni was met 16,7 °C 1,5 °C warmer dan normaal, zodat het zomergemiddelde ondanks de koele augustus zeer hoog was.

De hoge temperaturen in juni en juli waren onder andere het gevolg van de overheersende oostelijke stroming waarmee droge en warme continentale lucht werd aangevoerd. De hoge luchttemperaturen hadden tot gevolg dat eind juli het zeewater nabij de Nederlandse kust 2 tot 4 graden warmer was dan normaal.

Neerslag: grote omslag begin augustus

Juni en juli 2006 waren zeer droog met respectievelijk 28 en 25 mm, tegen een langjarig gemiddelde van respectievelijk 71 en 70 mm. Kenmerkend voor augustus 2006 was de dominante noordwestelijke aanvoer van onstabiele lucht met buien na twee warme en droge zomermaanden.

Een extra stimulans voor het ontstaan van intensieve neerslag werd begin augustus gevormd door de verschillen in de stroming boven zee en land.

De sterkere noordelijke wind over de Noordzee en de zwakkere westelijke wind boven land leidden tot sterker stijgende luchtbewegingen die de buiengroei stimuleren. In bijlagen A en B wordt hier verder op ingegaan.

Met gemiddeld over het land 184 mm neerslag tegen normaal 62 mm was augustus 2006 de natste oogstmaand in 100 jaar (figuur 1). Het oude record stond op naam van augustus 1969 met 152 mm.

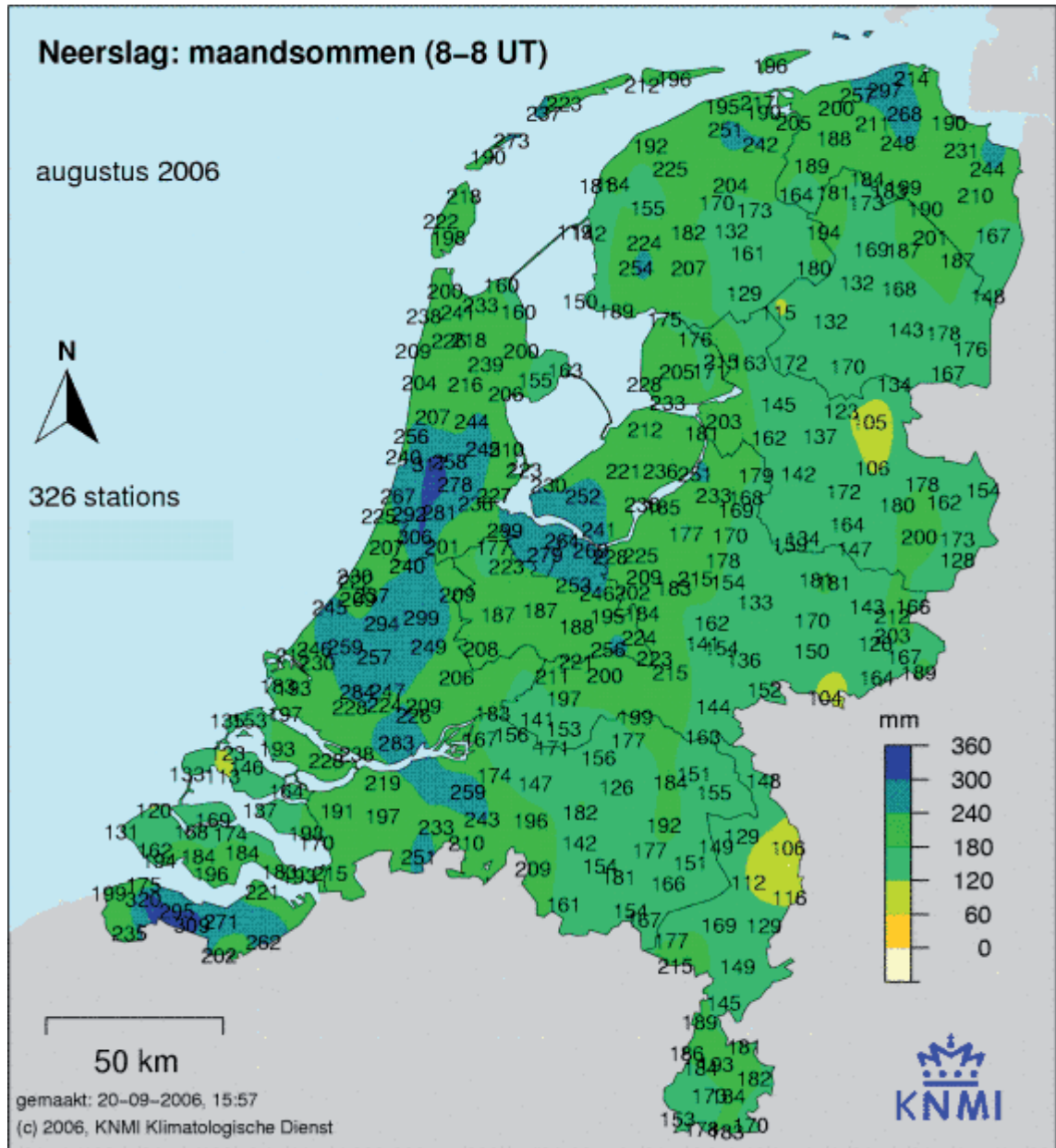
Normaal = het langjarig gemiddelde over het tijdvak 1971-2000

In KNMI-neerslagstation Schoondijke (Zeeuws Vlaanderen) viel op 2 augustus in één uur 36 mm en in 24 uur ruim 90 mm. Er werd daar in de hele maand augustus 320 mm afgetapt, nagenoeg gelijk aan de 325 mm die in augustus 2004 te Maasland werd gemeten. Dat was de hoogste maandsom die ooit op een KNMI-neerslagstation werd afgetapt.

In totaal viel in augustus 2006 op 11 dagen op één van de KNMI-stations 50 mm of meer. In de drie zomermaanden juni, juli en augustus samen viel die hoeveelheid op 13 dagen; sinds 1951 was dit aantal dagen nooit zo hoog geweest. Gemiddeld treedt dit 6 dagen per zomer op.

Uitgebreide maand- en seizoenoverzichten zijn te vinden op de KNMI-website: <http://www.knmi.nl/klimatologie>.

In bijlage A wordt een kenmerkende situatie van begin augustus 2006 met extreme neerslag, veroorzaakt door zware buien, beschreven.



Figuur 1: Maandsom neerslag augustus 2006, de maximale maandsom is 320 mm in Zeeuws-Vlaanderen (MONV, 2006)

3. Extreme neerslag in het huidige klimaat

Een neerslagextreem wordt hier uitgedrukt als de neerslaghoeveelheid (in mm) die in een bepaalde tijdsduur met een gegeven kans wordt overschreden (bijvoorbeeld: "ééns per tien jaar wordt voor een neerslagduur van 24 uur een neerslaghoeveelheid van 54 mm overschreden"). De overschrijdingsfrequentie van een gegeven neerslaghoeveelheid wordt aangeduid als het terugkeerniveau.

Tabel 1 geeft een samenvatting van de terugkeerniveaus (mm) voor verschillende neerslagduren en verschillende overschrijdingsfrequenties.

De terugkeerniveaus voor neerslagduren van 60 minuten en 120 minuten zijn gebaseerd op onderzoek naar neerslagextremen voor korte duren uit neerslagmeetgegevens van het station De Bilt uit de periode 1906-1990 (Buishand en Wijngaard, 2007) of (aangegeven met *) van de stations Eelde, De Bilt en Beek (L) uit de periode 1955-1979 (Buishand et al., 1991).

Als basis voor de analyses voor de neerslagduren van 4 tot 24 uur zijn in dit onderzoek de neerslaggegevens van station De Bilt uit de periode 1906-2003 overgenomen (Smits et al., 2004).

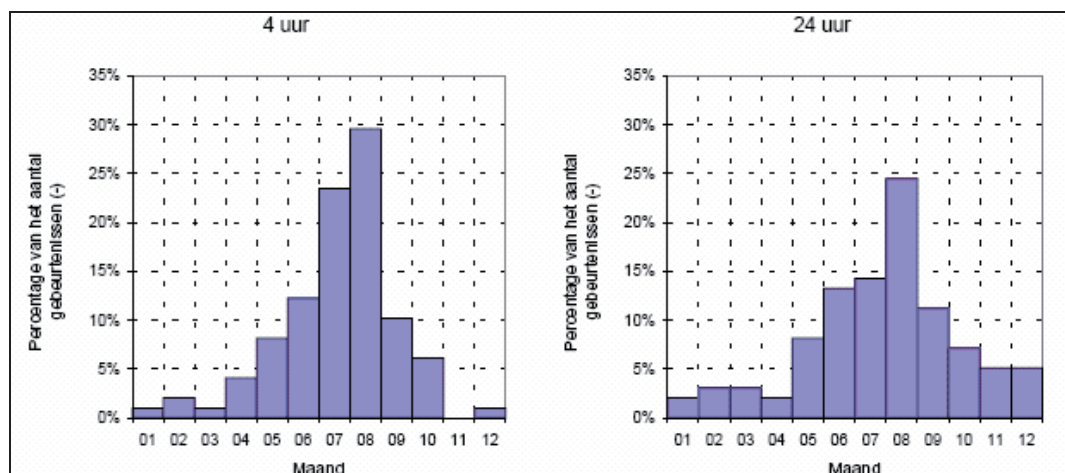
Seizoensvariatie

In het rapport "Statistiek van extreme neerslag in Nederland" (Smits et al., 2004) is de frequentieverdeling per maand voor jaarmaxima van de neerslagduren van 4 uur en 24 uur bepaald. Uit de frequentieverdeling volgt dat voor beide duren de jaamaxima het meeste voorkomen in de zomermaanden (figuur 2).

De verklaring hiervoor is dat de meest intensieve neerslag valt uit kortdurende zware buien, die voor een belangrijk deel worden gevormd door stijgende warme lucht in de zomermaanden (en dan meestal in de middag of avond). Op basis van het rapport van Smits et al. (2004) en praktijkervaring wordt aangenomen dat dit ook geldt voor neerslagmaxima voor duren korter dan 4 uur.

Huidig klimaat	60 min	120 min	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur
10x per jaar	5*	7*	9	12	13	15
5x per jaar	7*	10*	12	15	17	21
1x per jaar	14	17	21	24	27	33
1x per 2 jaar	18	21	25	29	32	39
1x per 5 jaar	23	26	31	36	40	47
1x per 10 jaar	27	31	36	41	46	54
1x per 25 jaar	33	37	43	49	54	63
1x per 50 jaar	38	42	49	56	61	71
1x per 100 jaar	43	48	55	62	68	79

Tabel 1: Terugkeerniveaus (jaartabel, mm) in het huidige klimaat voor verschillende overschrijdingsfrequenties voor neerslagduren van 60 en 120 minuten en van 4, 8, 12 en 24 uur.
Bron: samengesteld uit Buishand en Wijngaard (2007), Buishand et al. (1990) en Smits et al. (2004).



Figuur 2: Frequentieverdeling per maand van de jaarmaxima van neerslaghoeveelheden voor een duur van 4 en 24 uur (Smits et al., 2004)

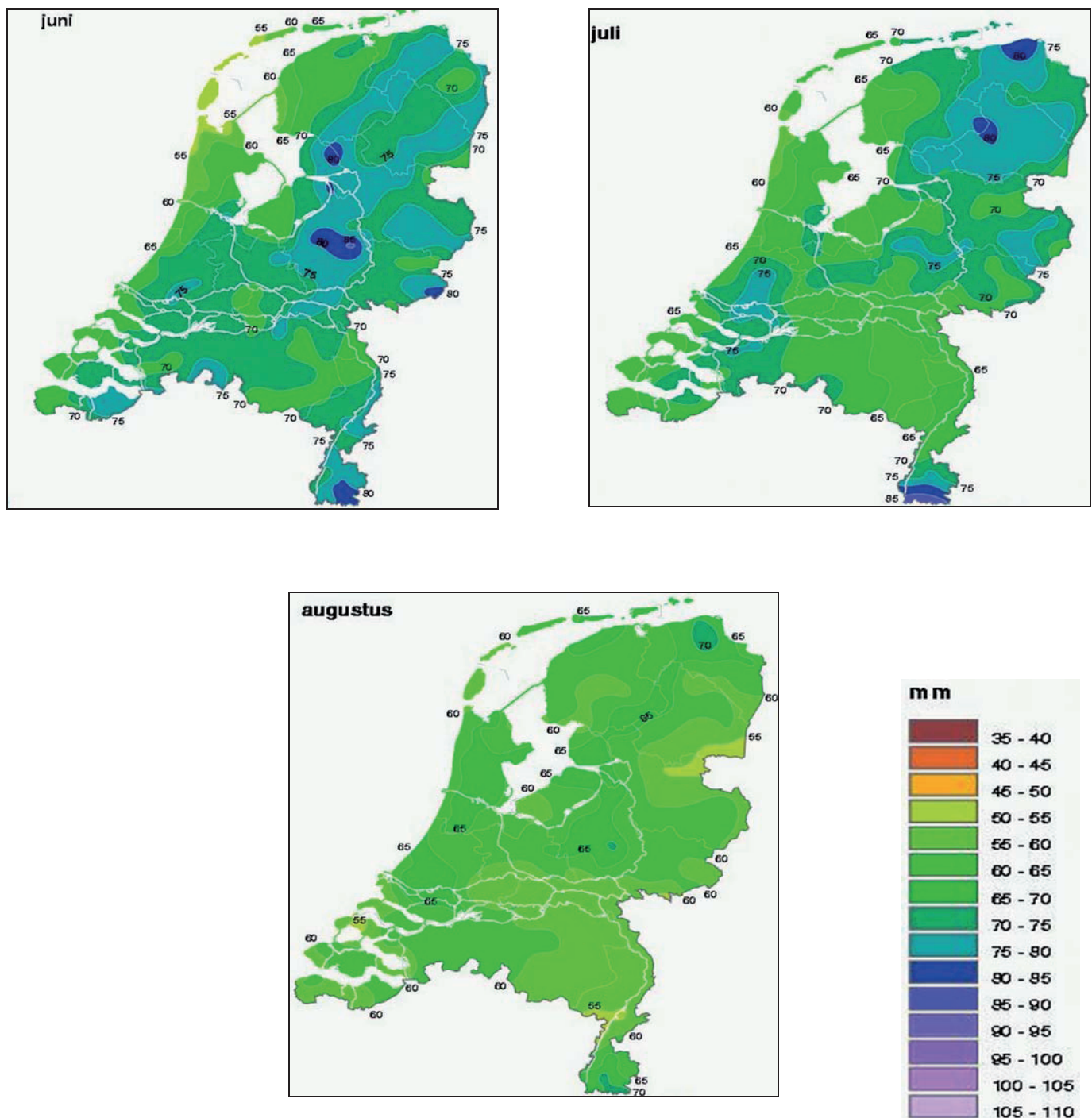
Ruimtelijke variatie

De maandgemiddelde neerslag van de periode 1971-2000 voor de zomermaanden juni t/m augustus geeft een beeld waarbij in het begin van de zomer de meeste neerslag landinwaarts viel en dat naarmate de zomer vorderde er weinig landelijke variatie was (figuur 3-5) (Heijboer en Nellestijn, 2002).

In de herfst valt de meeste neerslag gemiddeld per maand in de kuststrook. Deze patronen ontstaan doordat in de zomer de buien vooral

gevormd worden door opstijgende warme lucht en deze op warme dagen veelal meer landinwaarts ontstaan. In de herfst koelt het land gemiddeld af en is het zeewater aanvankelijk nog warm, waardoor bij aanvoer van koude bovenlucht boven zee en aan de kust buien worden gevormd.

De beschouwde klimatologie op basis van maandsommen geeft dus geen aanwijzing voor een hogere concentratie van neerslagmaxima in de zomer in de kustgebieden.

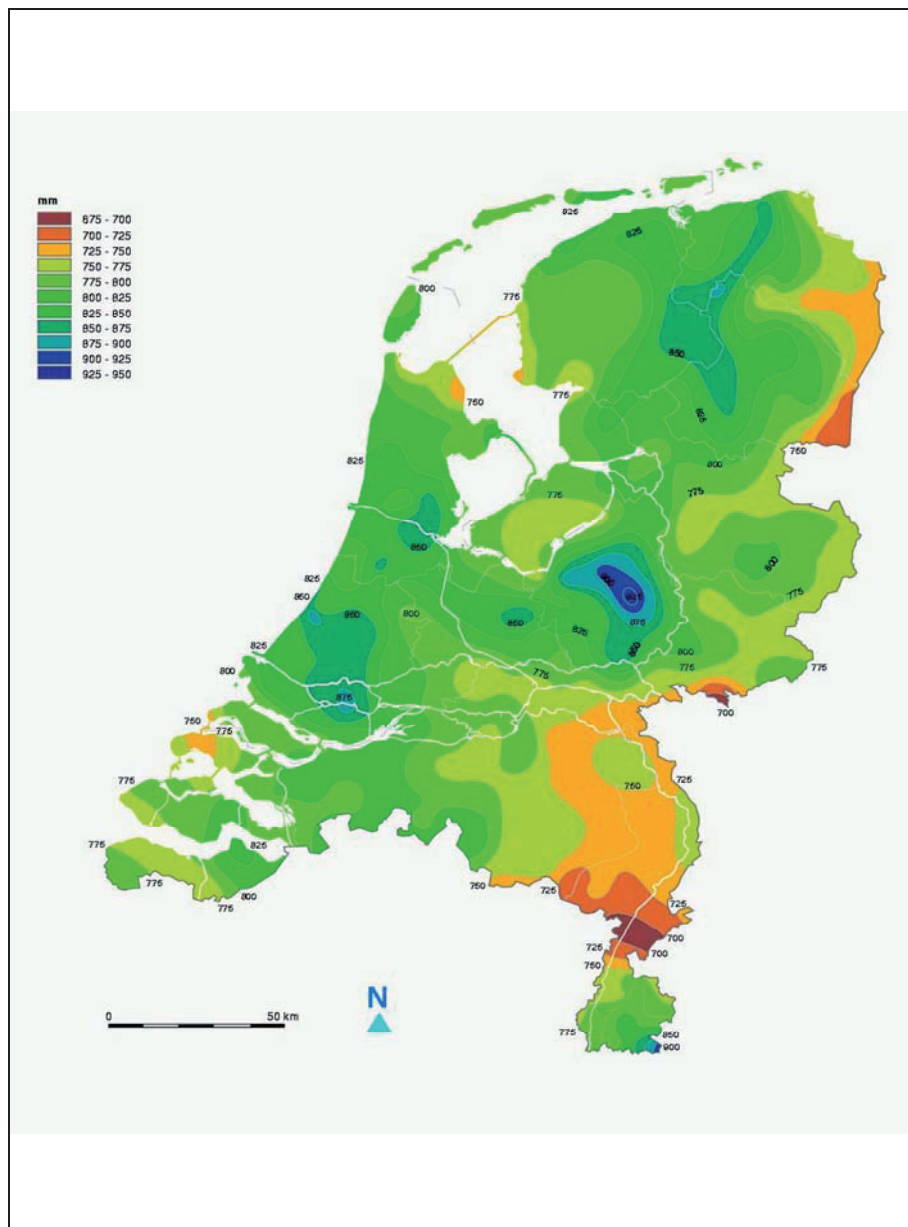


Figuur 3-5: Gemiddelde neerslagsom (mm) 1971-2000 voor de maanden juni t/m augustus (Heijboer en Nellestijn, 2002)

Smits et al. (2004) concluderen over de ruimtelijke variaties: “Samengevat kan gezegd worden dat station De Bilt een redelijk beeld geeft van de extreme neerslagstatistiek in Nederland. Er zijn echter afwijkingen tot ongeveer 12% ten opzichte van De Bilt in de extremen mogelijk. Voor duren van 24 uur en langer zou een schaling van de statistiek van De Bilt op basis van de gemiddelde jaarsom (figuur 6) toegepast kunnen worden om een eerste indicatie te krijgen van de statistiek voor overige locaties. Om uiteindelijk tot een betrouwbare schatting van de statistiek voor overige locaties te komen wordt aanbevolen om een analyse van een groter aantal

stations in onderlinge samenhang uit te voeren”.

Voor neerslagduren korter dan 24 uur is het gegevensbestand voor deze duren veel beperkter dan voor de dagwaarden en zijn binnen Nederland plaatselijke verschillen vooralsnog niet aantoonbaar (Overeem et al., 2007). Diermanse et al. (2005) geven wel aan dat de regionale verschillen tussen Delfland en De Bilt voor de extreme neerslaggebeurtenissen verhoudingsgewijs groter zijn dan voor de jaarneerslag. Nader onderzoek naar plaatselijke verschillen vindt plaats in het project “Van Neerslag tot Schade”, waarvan de resultaten in de tweede helft van 2008 worden verwacht.



Figuur 6: Gemiddelde jaarlijkse neerslagsom 1971 – 2000 (Heijboer en Nellestijn, 2002)

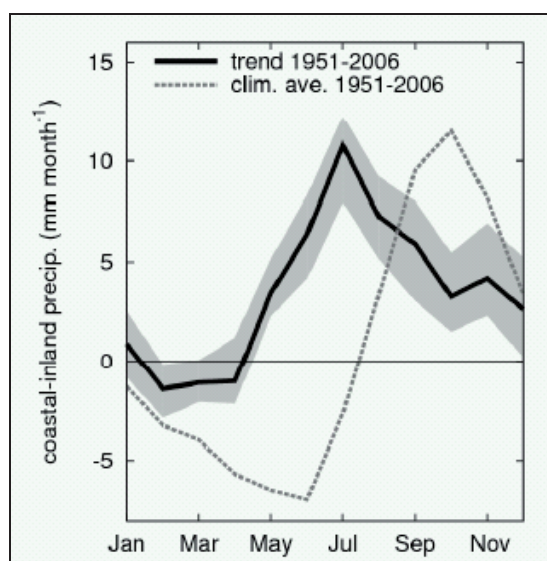
Recent onderzoek naar trends in ruimtelijke variatie

Er bestaat momenteel onvoldoende duidelijkheid of er in de afgelopen decennia sprake was van een verschuiving van ruimtelijke neerslagpatronen. Naar aanleiding van de extreme neerslagsommen in augustus 2006 hebben Lenderink et al. (2007b) onderzoek verricht naar de relatie tussen de stijgende temperatuur van het zeewater en een verschuiving van neerslagpatronen tussen kust en binnenland.

In dat onderzoek zijn de 325 KNMI-neerslagstations onderverdeeld in twee gebieden, een kustzone met een breedte van 30 km en de rest van het land. Deze verdeling geeft ruwweg een gelijk aantal stations per regio. Uit de dagelijks gemiddelde neerslag is voor deze twee regio's een maandklimatologie van het verschil en de trend van de twee regio's bepaald (figuur 7). Het resultaat van deze analyse geeft

aan dat, in overeenstemming met de klimatologie 1971-2000, in de nazomer en herfst de meeste neerslag in de kustregio valt. Daarbij geeft dit onderzoek ook aan dat in de zomer de kustregio ongeveer 10 mm per maand meer neerslag heeft in de periode 1951-2006. In het onderzoek wordt het verband gelegd met geleidelijk warmer worden zeewater. Onder gunstige luchtstromingscondities neemt de gemiddelde dagsom 11-15% toe per graad temperatuurstijging.

Neerslagmaandsommen uit modelsimulaties (op basis van de synoptische analyse van augustus 2006) met twee verschillende zeewatertemperaturen, het klimatologische gemiddelde en het actuele (2 tot 4 °C) warmere zeewater, worden weergegeven in bijlage B.



Figuur 7: Neerslagverschil tussen de kustzone en het binnenland als functie van de maand. Klimatologie op basis van dagsommen van 325 neerslagstations over het tijdvak 1951-2006 (gestippeld). Trend (verandering in mm/maand per 55 jaar, getrokken lijn met 25-75% onzekerheidsmarge) (Lenderink et al., 2007b).

4. Neerslagextremen in de toekomst

De KNMI'06 klimaatscenario's doen uitspraken over de veranderingen van de gemiddelde dagneerslag en De KNMI'06 klimaatscenario's doen uitspraken over de veranderingen van de gemiddelde dagneerslag en over de veranderingen van een dagsom met een overschrijdingsfrequentie van eens in de tien jaar. Dit is echter onvoldoende om uitspraken te doen over extreme zomerneerslag en neerslagintensiteit, waarbij uursommen en een scala van overschrijdingsfrequenties van belang zijn. Voor de berekening van deze gegevens kunnen we gebruik maken van dezelfde technieken als in het kader van de KNMI'06 scenario's zijn ontwikkeld.

Als hulpmiddel is bij de KNMI'06 scenario's een transformatieprogramma ontwikkeld, waarmee historische tijdreeksen kunnen worden omgezet in mogelijke tijdreeksen voor de toekomst op een wijze die consistent is met de KNMI'06 klimaatscenario's. Een introductie van de KNMI'06 klimaatscenario's vindt u in bijlage C. Het transformatieprogramma wordt in bijlage D kort beschreven en is op de website van het KNMI gepubliceerd.

Methodiek voor de bepaling van de relatieve veranderingen

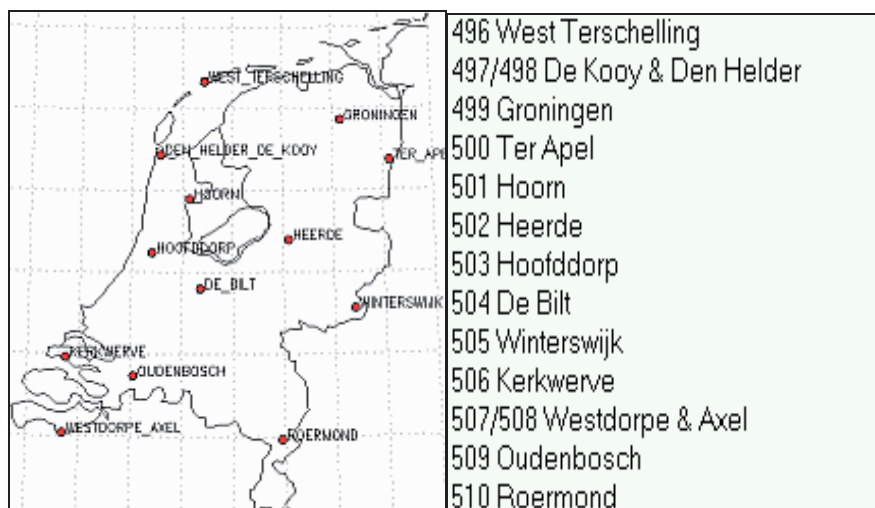
Op basis van historische neerslagreeksen van de dagsommen (van 8 tot 8 uur UTC) van 13 Nederlandse stations (figuur 8) uit de periode rond 1990 (1976-2005) zijn door transformatie

reeksen gemaakt voor de vier klimaatscenario's voor de periode rond 2050 en rond 2100.

Voor het huidige klimaat, per scenario en met een 30-jarig tijdvak worden de 13 afzonderlijke stationsreeksen samengevoegd tot een reeks van 390 jaar met dagsommen van de neerslag. Door het samenvoegen wordt een voor dit onderzoek landelijk representatieve set verkregen.

De dagsommen worden geordend en vervolgens is voor een aantal overschrijdingsfrequenties de bijbehorende neerslaghoeveelheid bepaald (bijvoorbeeld voor een overschrijdingfrequentie van eens in de 5 jaar wordt de neerslaghoeveelheid genomen waarboven in de 390 jaar nog 78 dagsommen liggen).

Uit de verschillen van deze neerslaghoeveelheden tussen de historische reeks en één van de toekomstige reeksen volgen de relatieve veranderingen (veranderingsfactoren) per scenario en tijdvak.



Figuur 8: De 13 stations waarvan de neerslagreeksen 1976-2005 zijn getransformeerd volgens de KNMI'06 scenario'.

Met de transformatiemethode wordt, consistent met de KNMI'06 klimaatscenario's, aan neerslagextremen met een overschrijdingsfrequentie van eens per 10 jaar of lager een maximale toename van 54% toegekend. Dit percentage hoort bij het W scenario in 2100 t.o.v. 1990 en komt overeen met 13,2% per graad mondiale temperatuuroptuename (Lenderink et al., 2007).

Voor zeldzamere gebeurtenissen uit tabel 1 wordt vooralsnog verondersteld dat zij evenveel veranderen als bij de overschrijdingsfrequentie van eens per 10 jaar.

De aanname dat extreme neerslag voor verschillende kortere neerslagduren in gelijke mate zal veranderen, is een eerste benadering en nog niet te onderbouwen met modelsimulaties. Er zijn momenteel ook onvoldoende onderzoeksresultaten van neerslaggegevens voor korte neerslagduren.

De veranderingsfactoren, die afgeleid zijn uit transformatie van de dagsommen, worden hier dus toegepast op de extreme neerslag voor alle neerslagduren van 60 minuten tot 24 uur.

Relatieve veranderingen van neerslaghoeveelheden voor duren van 60 minuten tot 24 uur.

De relatieve veranderingen voor 2050 en 2100 voor de vier scenario's G, G+, W en W+ worden weergegeven in tabel 2 en tabel 3. Deze zijn verkregen met de beschreven methodiek en kunnen worden toegepast voor de berekening van de terugkeerniveaus voor verschillende neerslagduren en overschrijdingsfrequenties.

Er is een recht evenredig verband tussen de veranderingsfactoren voor W2100 en voor G2100 en W2050, resp. G2050 (de relatieve verandering bedraagt de helft, resp. een kwart van W2100). Deze redenering gaat ook op voor de scenario's met gewijzigde stroming, de "+" scenario's. De oorzaak hiervan ligt in de lineariteit in de onderliggende KNMI'06 klimaatscenario's en het transformatieprogramma houdt hier rekening mee.

Rond 2050	G 2050	G + 2050	W 2050	W + 2050
10 x per jaar	1,05	1,01	1,10	1,01
5 x per jaar	1,07	1,02	1,14	1,04
1 x per jaar	1,09	1,03	1,19	1,06
1 x per 2 jaar	1,10	1,04	1,21	1,08
1 x per 5 jaar	1,12	1,04	1,23	1,09
1 x per 10 jaar	1,13	1,05	1,27	1,10

Tabel 2: Relatieve veranderingen voor verschillende klimaatscenario's en overschrijdingsfrequenties voor de periode rond 2050 t.o.v. 1990

Rond 2100	G 2100	G + 2100	W 2100	W + 2100
10 x per jaar	1,10	1,01	1,20	1,03
5 x per jaar	1,14	1,04	1,28	1,07
1 x per jaar	1,19	1,06	1,37	1,12
1 x per 2 jaar	1,21	1,08	1,41	1,16
1 x per 5 jaar	1,23	1,09	1,46	1,17
1 x per 10 jaar	1,27	1,10	1,54	1,20

Tabel 3: Relatieve veranderingen voor verschillende klimaatscenario's en overschrijdingsfrequenties voor de periode rond 2100 t.o.v. 1990

In de tabellen 4 en 5 worden voor neerslagduren van 60 minuten tot 24 uur de laagste (scenario G+) en hoogste (scenario W) neerslaghoeveelheid voor de perioden rond 2050 en 2100 voor diverse overschrijdingsfrequenties weergegeven.

Deze tabellen zijn een samenvatting van tabel 6. Ze zijn verkregen door toepassing van de relatieve veranderingen uit tabel 2 en 3 op de terugkeerniveaus uit tabel 1.

Rond 2050	60 min	120 min	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur
10x per jaar	5-6	7-8	9-10	12-13	13-14	15-16
5x per jaar	7-8	10-11	12-14	15-17	17-19	21-24
1x per jaar	14-17	18-20	22-25	25-28	28-32	34-39
1x per 2 jaar	19-22	22-25	26-30	30-35	33-39	41-47
1x per 5 jaar	24-28	27-32	32-38	38-44	42-49	49-58
1x per 10 jaar	28-34	33-39	38-46	43-52	49-59	57-69

Tabel 4: Terugkeerniveaus van neerslaghoeveelheden (mm) voor neerslagduren van 60 minuten tot 24 uur voor 2050 met het interval tussen de laagste en hoogste hoeveelheid volgens de vier scenario's G, G+, W en W+

Rond 2100	60 min	120 min	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur
10x per jaar	5-6	7-9	9-11	12-14	13-16	15-18
5x per jaar	7-9	10-13	12-15	16-19	18-22	22-27
1x per jaar	15-19	18-23	22-29	25-33	29-37	35-45
1x per 2 jaar	19-25	22-29	27-35	31-41	35-45	42-55
1x per 5 jaar	25-34	28-38	34-45	39-53	43-58	51-69
1x per 10 jaar	30-42	34-48	40-56	45-63	51-71	60-84

Tabel 5: Terugkeerniveaus (mm) van neerslaghoeveelheden voor neerslagduren van 120 minuten tot 24 uur voor 2100 met het interval tussen de laagste en hoogste hoeveelheid volgens de vier scenario's G, G+, W en W+

In tabel 6 wordt voor alle scenario's een overzicht gegeven van de terugkeerniveaus (mm) van neerslaghoeveelheden in het huidige klimaat en in het toekomstig klimaat rond 2050 en 2100 voor diverse neerslagduren en overschrijdingsfrequenties.

60 min		nu	2050	2050	2050	2050	2100	2100	2100	2100
			G	G+	W	W+	G	G+	W	W+
10x per	jaar	5	5	5	6	5	6	5	6	5
5x per	jaar	7	8	7	8	7	8	7	9	8
1x per	jaar	14	15	14	17	15	17	15	19	16
1x per	2 jaar	18	20	19	22	19	22	19	25	20
1x per	5 jaar	23	26	24	28	25	28	25	34	27
1x per	10 jaar	27	31	28	34	30	34	30	42	33
120 min										
10x per	jaar	7	7	7	8	7	8	7	8	7
5x per	jaar	10	11	10	11	10	11	10	13	11
1x per	jaar	17	19	18	20	18	20	18	23	19
1x per	2 jaar	21	23	22	25	22	25	22	29	24
1x per	5 jaar	26	29	27	32	28	32	28	38	30
1x per	10 jaar	31	35	33	39	34	39	34	48	38
4 uur										
10x per	jaar	9	9	9	10	9	10	9	11	9
5x per	jaar	12	13	12	14	12	14	12	15	13
1x per	jaar	21	23	22	25	22	25	22	29	24
1x per	2 jaar	25	28	26	30	27	30	27	35	28
1x per	5 jaar	31	35	32	38	34	38	34	45	36
1x per	10 jaar	36	41	38	46	40	46	40	56	44
8 uur										
10x per	jaar	12	13	12	13	12	13	12	14	12
5x per	jaar	15	16	15	17	16	17	16	19	16
1x per	jaar	24	26	25	28	25	28	25	33	27
1x per	2 jaar	29	32	30	35	31	35	31	41	33
1x per	5 jaar	36	40	38	44	39	44	39	53	42
1x per	10 jaar	41	47	43	52	45	52	45	63	50
12 uur										
10x per	jaar	13	14	13	14	13	14	13	16	13
5x per	jaar	17	18	17	19	18	19	18	22	18
1x per	jaar	27	30	28	32	29	32	29	37	30
1x per	2 jaar	32	35	33	39	35	39	35	45	36
1x per	5 jaar	40	45	42	49	43	49	43	58	47
1x per	10 jaar	46	52	49	59	51	59	51	71	56
24 uur										
10x per	jaar	15	16	15	16	15	16	15	18	15
5x per	jaar	21	22	21	24	22	24	22	27	23
1x per	jaar	33	36	34	39	35	39	35	45	37
1x per	2 jaar	39	43	41	47	42	47	42	55	44
1x per	5 jaar	47	52	49	58	51	58	51	69	55
1x per	10 jaar	54	61	57	69	60	69	60	84	66

Tabel 6: Overzicht van de terugkeerniveaus (mm) van neerslaghoeveelheden in het huidige en in het toekomstig klimaat rond 2050 en 2100 voor diverse neerslagduren en overschrijdingsfrequenties onder de vier KNMI'06 klimaatscenario's.

5. Hoe normaal worden de extreme etmaalsom en -uursom van augustus 2006?

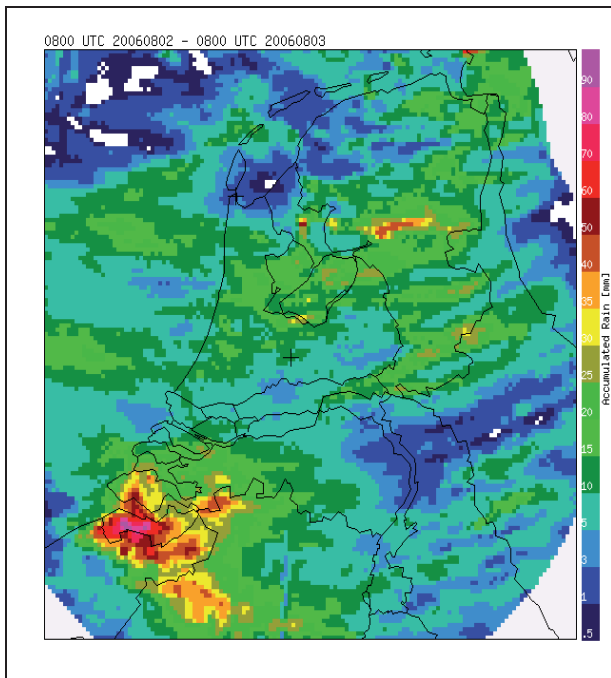
Extreme etmaalsom en -uursom van augustus 2006

In augustus 2006 viel in één etmaal in Schoondijke (Zeeuws Vlaanderen) 93 mm (figuur 9). Zoveel neerslag wordt in het huidige klimaat in een tijdvak van 24 uur ongeveer één per 160 jaar overschreden*. Geschat wordt dat de overschrijdingsfrequentie van een dergelijke dagsom rond 2100 tussen eens per 20 jaar (W) (tabel 7, kolom dagsom) en ongeveer eens per 150 jaar (G+) ligt.

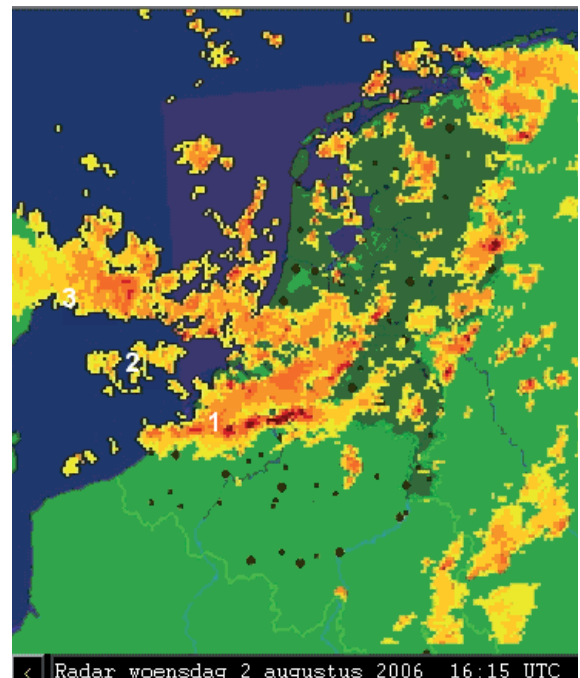
Bij de zware buien van 2 en 3 augustus 2006 werd uit de metingen met de neerslagradar (figuur 10) en

nabijgelegen regenmeetstations, een *extreme uursom* van 36 mm afgeleid voor Schoondijke in Zeeuws Vlaanderen. In het huidige klimaat wordt deze neerslaghoeveelheid in 60 minuten gemiddeld eens in de 37 jaar overschreden.

Voor het toekomstige klimaat rond 2100 wordt geschat dat een neerslaghoeveelheid van 36 mm in 60 minuten in het W scenario ongeveer eens in de 6 jaar en in het G+ scenario eens in de 20 jaar wordt overschreden (tabel 7, kolom uursom) **.



Figuur 9: Radar neerslagsom van 2 op 3 aug. 2006 (van 8 tot 8 uur UTC)



Figuur 10: Neerslagradarbeeld 2 augustus 2006 om 16:15 UTC

	Uursom (mm)			Dagsom (mm)		
	nu	G+2100	W2100	nu	G+2100	W2100
1x per 5 jaar	23	26	35	47	52	72
1x per 10 jaar	27	30	42	54	60	83
1x per 20 jaar	32	36	49	60	67	92
1x per 25 jaar	33	37	51	63	70	97
1x per 50 jaar	38	42	59	71	79	109
1x per 100 jaar	43	48	66	79	88	122

Tabel 8: Terugkeerniveaus (mm) van neerslaghoeveelheden met een overschrijdingsfrequentie van eens in de 5 tot eens in de 100 jaar voor duren van 1 uur en 24 uur in het huidige klimaat (uit tabel 1) en voor 2100 in het G+ en W scenario.

* Uit onderzoek met reeksen van dagsommen van de neerslag van meerdere stations, in totaal 514 neerslagjaren, opgebouwd uit reeksen van minimaal 29 jaar van 12 neerslagstations (Overeem et al., 2007). ** Hierin zijn de aannames uit paragraaf 4 over de verandering van zeldzame neerslaggebeurtenissen en gelijkwaardige verandering voor verschillende neerslagduren toegepast.

6. Discussie

Basis voor de uitspraken in dit onderzoek is de “state of the art” kennis van het klimaatsysteem en de effecten van het versterkte broeikaseffect. Onzekerheden in de emissies en over sommige processen in het klimaatsysteem leiden tot klimaatscenario's. Ieder scenario vormt een consistent beeld van een mogelijke toekomst en neerslagontwikkeling. In dit rapport wordt de extreme neerslag in tabel 4 en tabel 5 uitgedrukt in een interval voor de vier scenario's. Het wordt afgeraden te “middelen”, er is geen “voorkeurs-scenario” of een “gemiddeld scenario”.

Het extreme weer in augustus 2006 speelt zich af op een tijd- en ruimteschaal die kleiner is dan die van de klimaatmodellen waarop de scenario's zijn gebaseerd. Deze klimaatmodellen hadden een ruimtelijk oplossend vermogen (resolutie) van 50 km. De nieuwste generatie klimaatmodellen zoals het KNMI-model RACMO2 heeft een resolutie van 6 km. De benodigde rekenkracht om op 6 km resolutie te kunnen rekenen is te groot voor langdurige klimaatintegraties die nodig zijn voor het maken van klimaatscenario's. Het gebruik hiervan beperkt zich momenteel tot kortdurende case studies zoals de impact van warmer zeewater op neerslag in augustus 2006 (bijlage B).

In paragraaf 4 wordt vermeld: *Voor zeldzamere gebeurtenissen wordt voor een eerste indicatie vooralsnog verondersteld dat zij evenveel veranderen als de voornoemde overschrijdingsfrequentie van eens in 10 jaar.* Verder wordt aangenomen *dat extreme neerslag voor verschillende kortere neerslagduren in gelijke mate zal veranderen.* Vooralsnog zijn deze aannames nog voldoende onderbouwd: in de zwaarste buien zou bijvoorbeeld vrijkomende condensatiewarmte voor versterking van de buiendynamica zorgen. De mate van dit effect is nog niet vastgesteld. Ook is meer onderzoek noodzakelijk voor verdere detaillering van regionale verschillen van extreme neerslag voor verschillende (korte) duren (project “Van Neerslag tot Schade”).

Enkele eerder verschenen publicaties geven enige indicatie over de verandering van neerslagextremen in een opwarmend klimaat:

- o Uit onderzoek naar de relatie tussen waarnemingen van dagelijkse neerslag en temperatuur voor De Bilt is gebleken dat op dagen met een maximum temperatuur boven 21 graden voor iedere graad temperatuurtoename de dagneerslag uit buien toeneemt met 8 tot 13% (Klein Tank en Können, 1995).
- o Trenberth et al. (2003) stellen dat de neerslagintensiteit bij zware buien in ongeveer dezelfde mate zal toenemen als de hoeveelheid waterdamp in een warmer wordende atmosfeer (7% per graad Kelvin) of mogelijk iets meer.

- o Er zijn aanwijzingen dat voor de verandering van de extreme neerslag met een neerslagduur van een uur een begrenzing geldt die overeenkomt met ongeveer 15% per graad aanwarming. (Lenderink, manuscript in ontwikkeling).

De KNMI'06 klimaatscenario's hebben een redelijke marge om met het versterkende effect van warm zeewater op neerslagextremen rekening te houden. De grootste toename is in het W scenario 13,2% meer zomerneerslag per graad globale aanwarming voor de dagsom met een overschrijdingsfrequentie van eens in 10 jaar. *De neerslaghoeveelheden voor 2050 en 2100 in dit rapport kunnen als eerste schatting worden gebruikt tot meer onderzoeksgegevens bekend zijn.*

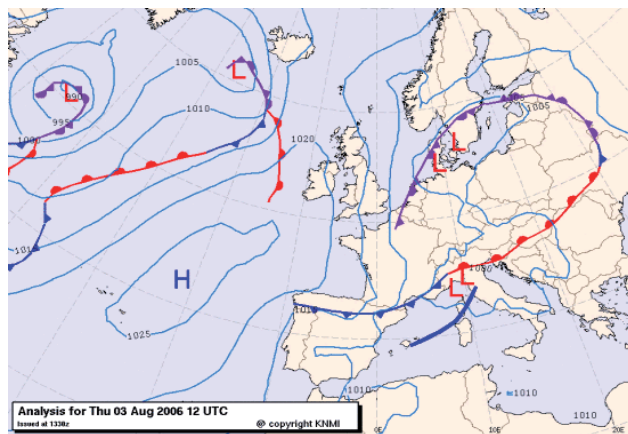
Referenties

- Buishand, T.A., Wijngaard, J., 2007.
Statistiek van extreme neerslag voor korte duren.
Technisch rapport in voorbereiding,
KNMI, De Bilt.
- Buishand, T.A., van Acker, J.B.M., van Luijtelaar,
H., 1991
Analyse van kwartiersommen van de neerslag.
H2O, jaargang 24, nummer 11, 294-299, Rijswijk.
- Diermanse, F., Ogink, H., van Dansik, J., Gloudemans,
E., 2005.
Neerslagstatistiek, extreem gevoelig?
H2O, jaargang 38, nummer 17, 25-27, Rijswijk.
- Heijboer, D., Nellestijn, J., 2002.
Klimaatatlas van Nederland 1971-2000.
Elmar, Rijswijk.
- v.d. Hurk, B., et al, 2006.
KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the
Netherlands.
Wetenschappelijk rapport WR2006-1, KNMI, De Bilt.
- Klein Tank, A.M.G. and Können, G.P., 1995.
The dependence of precipitation on temperature.
Annales Geophysicae, European Geophysical Society,
Supplement II to Volume 13, C515.
- Lenderink, G., van Meijgaard, E., Selten, F., 2007b.
Intense coastal rainfall in the Netherlands in response to
high sea water temperatures: analysis of the event of
August 2006 from the perspective of a changing
climate. Submitted to Clim.Dyn.
- Lenderink, G., van Ulden, A., van den Hurk B., and
Keller, F. E., 2007.
A study on combining global and regional climate model
results for generating climate scenarios of temperature
and precipitation for the Netherlands.
Clim. Dyn., 29, 157-176, DOI: 10.1007/s00382-007-
0227-z.
- MONV.
Maandoverzicht van neerslag en verdamping in
Nederland. KNMI, jaargang 75, nr 8.
- Overeem, A., Buishand, T.A., Holleman, I., 2007.
Rainfall depth-duration-frequency curves and their
uncertainties.
Journal of Hydrology (ingediend).
- Smits, I., Wijngaard, J., Versteeg, R., Kok, M., 2004.
Statistiek van extreme neerslag in Nederland.
Rapport 2004-26, STOWA, Utrecht.
- Trenberth, K.E., et al., 2003.
The changing character of precipitation.
Bulletin American Meteorological Society, volume 84,
issue 9, 1205-1217.
- Internet: <http://www.knmi.nl/klimatologie/>
<http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/>

Bijlage A: De buien van 2 en 3 augustus 2006

Als voorbeeld van de kenmerkende weersituatie in augustus 2006 zien we op de weerkaart van 3 augustus een lagedrukgebied nabij Denemarken en een hogedrukgebied ten zuidwesten van Ierland (figuur 11). Tussen beide systemen wordt een noordwestelijke aanvoer van koude, onstabiele lucht gehandhaafd. Hierin ontstaan buien, die in hun ontwikkeling sterk worden gestimuleerd door het ongewoon warme zeewater (2,3 °C langs de Nederlandse kust).

Het verschil in windsnelheid en windrichting tussen zee en land vormt ook een extra stimulans voor de buien. Op de scheiding van de sterkere noordenwind boven zee en de zwakkere westenwind boven land stroomt lucht nabij het aardoppervlak samen (convergentie).

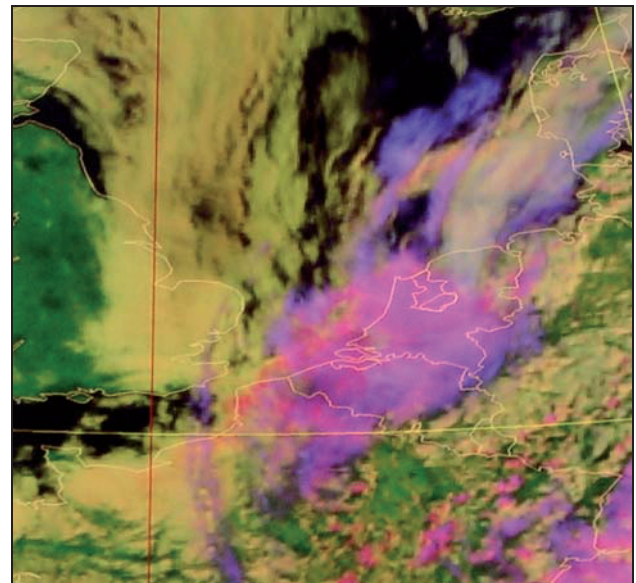


Figuur 11: Weerkaart van 3 augustus 2006 om 12 UTC
(bron: KNMI)

Daardoor ontstaat een sterk stijgende luchtbeweging waardoor buiengroei extra wordt gestimuleerd.

Op de satellietopname van Meteosat 8 op 3 augustus om 12 UTC (=14 uur MEZT) zijn enkele buien boven Zeeland zichtbaar (figuur 12). De paarse kleur laat koude wolketoppen van intensiverende buienclusters zien, die in Zeeland voor extreme neerslaghoeveelheden zorgden.

De grote neerslaghoeveelheden zijn al met al het gevolg van diverse factoren: de grote mate van onstabiele, gestimuleerd door het warme kustwater en het luchtstromingsverschil tussen zee en land.



Figuur 12: Satellietfoto MSG-8 van 3 augustus 2006 om 12 UTC
(bron: KNMI)

De mate van onstabiliteit van de atmosfeer kan goed worden afgeleid uit het verticale profiel van temperatuur en vochtigheid (gemeten met een radiosonde).

Als voorbeeld is in **figuur 13** het profiel weergegeven van 2 augustus om 12 UTC (14 uur lokale tijd), kort voordat een etmaal met intensieve buien nabij de kust aanbrak.

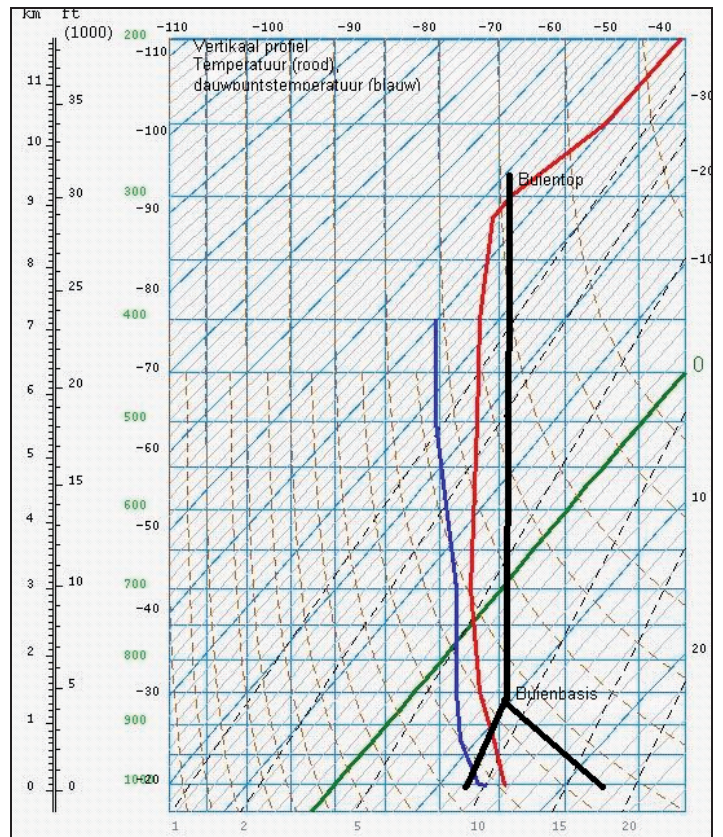
Boven het warme kustwater, dat begin augustus een oppervlaktetemperatuur had van 23 °C, kunnen met een dergelijk verticaal profiel van temperatuur (rood) en dauwpuntstemperatuur (blauw), gemakkelijk flinke buien ontstaan. Het temperatuurprofiel van een bui wordt in zwart weergegeven.

De belangrijkste lijnen op het diagrampapier zijn:

- Horizontaal: luchtdruk- of hoogtelijnen,
- Verticaal: de mate van temperatuurverandering van opstijgende lucht in bewolking,
- Diagonaal: de temperatuur (aan de rechterkant en bovenaan staan de bijbehorende waarden in °C).

Op vrijwel iedere hoogte (horizontaal in het diagram) is de temperatuur in de stijgende luchtbel (zwart) ruim 3 graden hoger dan de temperatuur erbuiten (rood), waardoor de buienwolk verticaal kan blijven groeien.

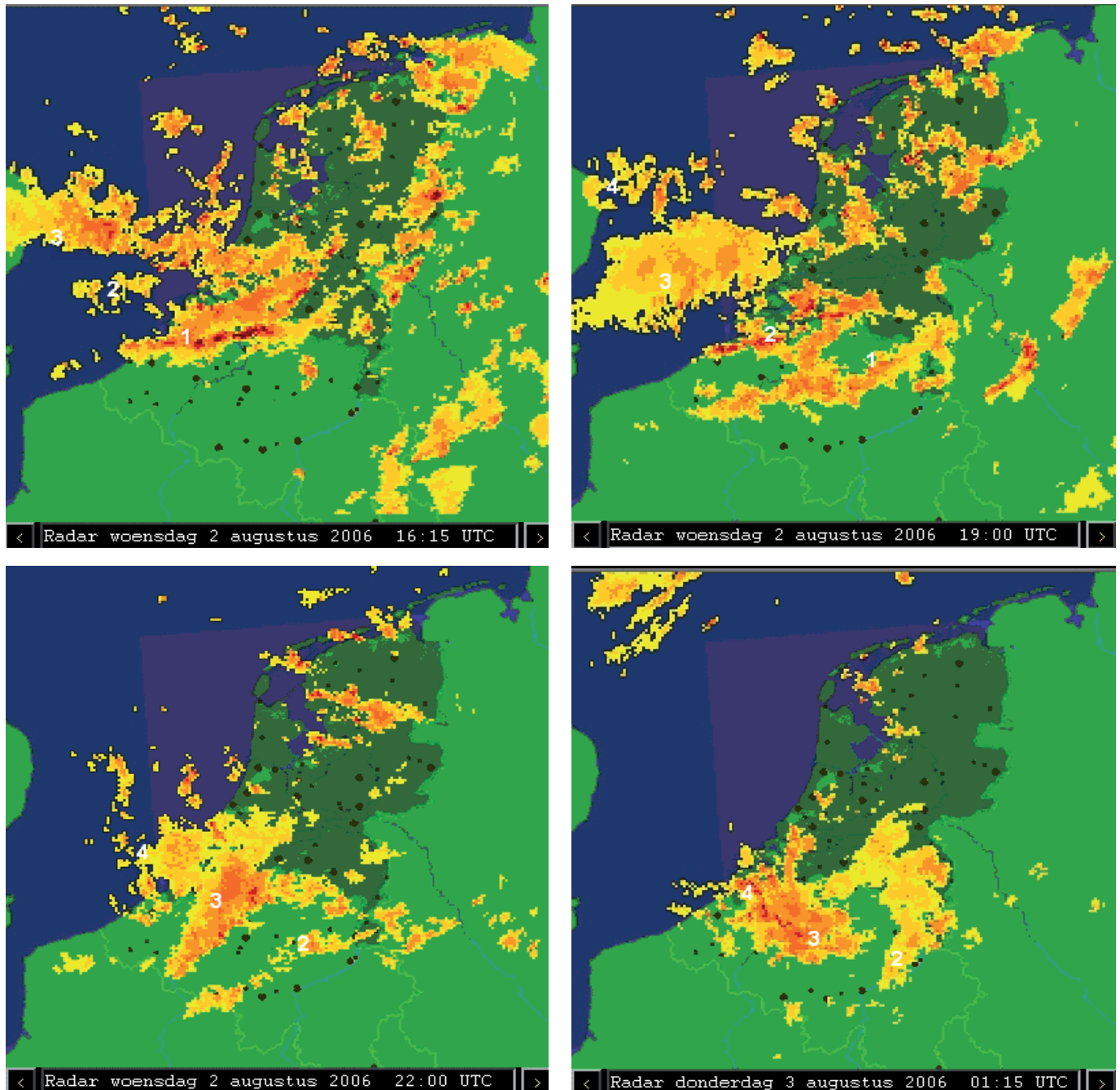
De toppen van de buien bereiken een hoogte van ongeveer 9 tot 10 km met een toptemperatuur van min 48 °C. Op die hoogte wordt de temperatuur in de bui gelijk of lager dan de omgeving en wordt de verticale groei afgeremd.



Figuur 13: Radiosonde 2 augustus 2006 12 UTC

In zware buien werden in augustus 2006 op de luchthaven Schiphol gedurende enkele minuten intensiteiten waargenomen van meer dan 100 mm per uur, het zicht liep in wolkbreuken soms terug tot 200 meter met neerslaghoeveelheden van meer dan 25 mm per uur. De buienradar liet voor de avond van 2 augustus 2006 een reeks zware buien zien die in een noordwestelijke stroming

over het zuidwesten van ons land trokken. De radarbeelden lieten zien dat de buien soms in lijnen op de kuststrook intensiveerden om enkele tientallen kilometers landinwaarts in activiteit afnemend verder zuidoostwaarts te trekken (figuur 14). De nummers in figuur 14 geven enkele complexen weer.



Figuur 14: Neerslagbeelden (buienradar) op 2 en 3 augustus 2006 om 16.15, 19.00, 22.00 en 01.15 UTC, de witte cijfers geven de verplaatsing van enkele cellen gedurende de periode weer.

Bijlage B: Modelsimulaties met verschillende zeewatertemperaturen

Eind juli 2006 was het kustwater aanmerkelijk warmer geworden dan normaal. Recent is op het KNMI onderzoek gedaan naar de invloed van warm zeewater op buiengroei en intensieve neerslag (Lenderink et al., 2007b).

Met behulp van het KNMI-klimaatmodel RACMO2 (horizontale resolutie 6 km x 6 km) is voor iedere dag van augustus 2006 een modelrun tot 36 uur vooruit gedaan op basis van de uitgangssituatie van 12 UTC. De neerslagsom voor de volgende dag is over alle dagen van de maand gesommeerd. Daarbij zijn zowel runs met de gemeten zeewatertemperatuur als de langjarig gemiddelde watertemperatuur gedaan om de invloed van het extra warme water te kunnen beoordelen.

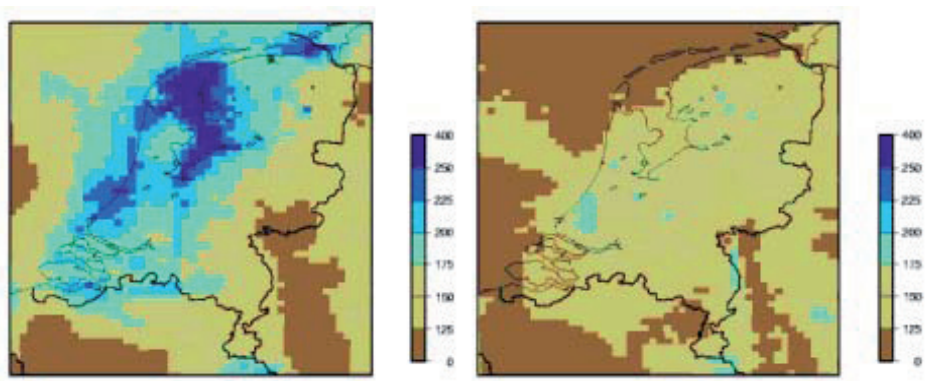
In **figuur 15** worden de met RACMO2 berekende neerslagsommaten voor augustus 2006 weergegeven.

In de rechterfiguur is met de langjarig gemiddelde zeewatertemperatuur gewerkt (ongeveer 4 °C lager aan de kust en 2 °C verder op zee); er wordt weinig neerslag berekend.

In de linkerfiguur is de invloed van de werkelijk opgetreden watertemperatuur (bijna 23 °C aan de kust) op de buiengroei zichtbaar en wordt veel neerslag berekend. De hoeveelheid komt goed overeen met de opgetreden maandsom, de locatie van het maximum is, in vergelijking met de opgetreden neerslagmaandsom (**figuur 1**), niet goed gesimuleerd.

Hoewel de gesimuleerde neerslagverdeling niet helemaal overeenkomt, geeft deze modelsimulatie wel duidelijk aan dat het warmere zeewater langs de Nederlandse kust een belangrijke factor was voor de buienvorming en de extreme neerslag in augustus 2006.

Ook wordt in dit onderzoek aangegeven dat er aanwijzingen zijn dat in de periode 1951-2006 de kustgebieden gemiddeld relatief natter zijn geworden ten opzichte van de gebieden landinwaarts. De afhankelijkheid van de neerslagtoename met een trend van warmer zeewater (in de zomer ongeveer 1,5 graad in de afgelopen 50 jaar) lijkt groot, maar wordt sterk bepaald door de luchtstroming (Lenderink et al., 2007b).



Figuur 15: Gesimuleerde neerslagsom (mm) van augustus 2006 uit RACMO2 met gemeten (links) en langjarig gemiddelde zeewatertemperatuur (rechts).

Bijlage C: De KNMI'06 klimaatscenario's

In de KNMI'06 klimaatscenario's, gepubliceerd op 30 mei 2006, is aangegeven hoe het klimaat voor Nederland kan veranderen door het versterkte broeikaseffect (v.d. Hurk et al., 2006; Lenderink et al., 2007).

De indeling van de KNMI'06 scenario's is gebaseerd op de twee belangrijkste factoren voor klimaatverandering in Nederland, namelijk de stijging van de mondiale temperatuur en mogelijke veranderingen in de luchtstromingspatronen (figuur 16).

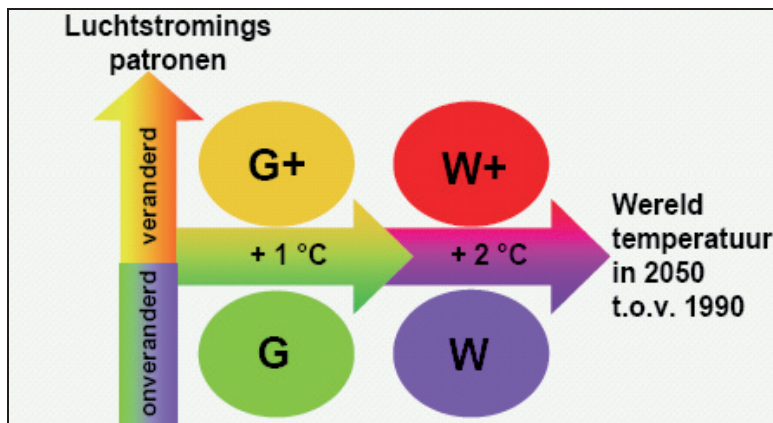
De KNMI'06 scenario's kunnen worden gezien als de hoekpunten waar binnen ons toekomstige klimaat zich waarschijnlijk zal ontwikkelen. Ze omvatten het grootste deel

van wat voor de toekomst mogelijk wordt geacht.

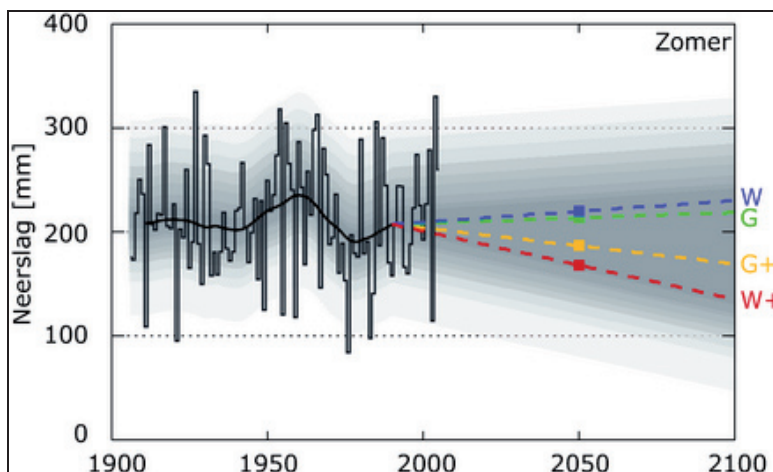
Voor mondiale temperatuurstijging ten opzichte van 1990: +1 of +2 °C in 2050 en +2 of +4 °C in 2100. Voor luchtstromingspatronen geven de analyses aan dat deze min of meer gelijk kunnen blijven, dan wel bij verandering in de winter meer westelijk en in de zomer meer oostelijk worden.

Gevolgen voor zomerneerslag:

Uit analyses voor de KNMI'06 scenario's blijkt dat de gemiddelde zomerneerslag zowel licht kan toenemen (G: +3% in 2050 en W: +6% in 2050) als aanzienlijk kan afnemen (G+: -10% in 2050 en W+: -19% in 2050) (figuur 17).



Figuur 16: Schematische indeling van de KNMI'06 klimaatscenario's



Figuur 17: Neerslag in Nederland (gemiddelde van 13 stations) tussen 1906 en 2005 en de vier klimaatscenario's voor 2050 t.o.v. het basisjaar 1990. De dikke zwarte lijn volgt het voortschrijdende 30-jaar gemiddelde in de waarnemingen, de grijze band illustreert de jaar-op-jaar variatie, afgeleid uit de waarnemingen.

In **figuur 18** worden de veranderingen voor drie neerslagvariabelen in de KNMI'06 klimaatscenario's weergegeven, nl. de gemiddelde hoeveelheid neerslag (mm), het aantal dagen met minstens 0,1 mm. (zgn. "natte dagen") en de dagsom die eens in de 10 jaar wordt overschreden.

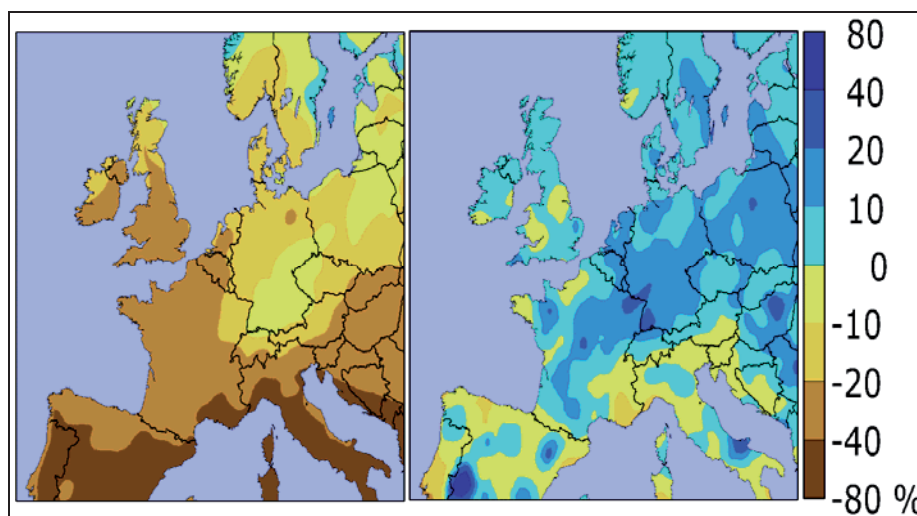
In de vier KNMI'06 klimaatscenario's zijn de basisgegevens rond 1990 gebaseerd op het klimaat van 1976 tot en met 2005, "zomer" staat gelijk aan de maanden juni, juli en augustus.

Het W scenario wordt gekenmerkt door de sterkste toename van de gemiddelde zomerneerslag.

In het W+ scenario, waarin de luchtstroming in de zomer meer continentaal (minder westelijk) wordt, treden twee ogenschijnlijk tegenstrijdige effecten op: de gemiddelde neerslag neemt af (door meer droge dagen), maar op dagen met hevige neerslag neemt de intensiteit toe (**figuur 19**). Deze toename van extreme neerslag is een robuust signaal, in alle scenario's is sprake van een toename van extreme neerslag.

	G	G+	W	W+
gemiddelde neerslaghoeveelheid	+6%	-19%	+12%	-38%
aantal natte dagen ($\geq 0,1$ mm)	-3%	-19%	-6%	-38%
dagsom van de neerslag die eens in de 10 jaar wordt overschreden	+27%	+10%	+54%	+20%

Figuur 18: Gevolgen voor neerslag in de zomer rond 2100 ten opzichte van het basisjaar 1990 volgens de KNMI'06 klimaatscenario's.



Figuur 19: Typische ruimtelijke patronen in de neerslagveranderingen in het W+-scenario voor 2050 ten opzichte van 1990 uit het regionale KNMI-klimaatmodel RACMO2. Links de verandering in de gemiddelde neerslag, rechts de verandering bij hevige buien (dagsom die ééns in de 10 jaar wordt overschreden). De gemiddelde neerslag neemt bijna overal af, terwijl de neerslaghoeveelheid uit hevige buien toeneemt.

Bijlage D: Korte beschrijving van het transformatieprogramma

Het transformeren van een historische neerslagreeks op dagbasis naar een toekomstige reeks onder één van de vier KNMI'06 klimaatscenario's geeft voor een gekozen periode informatie over de mogelijke veranderingen van de gemiddelden, variatie tussen dagen en de verandering van extremen.

Hoe werkt het programma?

Het programma berekent uit de historische tijdreeks voor elke maand van het jaar eerst het aantal dagen met neerslag (NDF).

Daarna worden voor de natte dagen de gemiddelde neerslag (Ngem) en het 99% kwantiel bepaald. (Q99; 1 % van de natte dagen heeft meer neerslag dan deze waarde)

Vervolgens worden de procentuele veranderingen in Ngem, Q99 en NDF voor de toekomst onder het gewenste klimaatscenario en voor de gewenste tijdshorizon. De veranderingen in Ngem zijn meestal niet gelijk aan de veranderingen van Q99, het programma houdt hier expliciet rekening mee.

In de laatste stap worden de dagwaarden in de historische reeks zodanig aangepast dat de procentuele veranderingen in Ngem, Q99 en NDF gelijk zijn aan de opgelegde procentuele veranderingen.

Op basis van de analyses voor de KNMI'06 scenario's is het niet mogelijk aan te geven hoe bijvoorbeeld dagneerslagsommen die eens in de 100 jaar voorkomen zullen veranderen in de toekomst. Om te grote overschattingen van extreme neerslag te voorkomen is de maximale verandering in dagneerslag gelijkgesteld aan de verandering voor Q99.

Het transformatieprogramma voor neerslag- en temperatuurreksen en een bijbehorend achtergronddocument zijn te vinden op:

http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/index.shtml
en

http://climexp.knmi.nl/Scenarios_monthly/transtoelichting.shtml