

Opdrachtgever: STOWA

Statistiek van extreme neerslag in Nederland

Auteurs: A. Smits
J.B. Wijngaard
R.P. Versteeg
M. Kok



Inhoud

Voorwoord	1
Samenvatting	3
1 Inleiding	18
1.1 Aanleiding	18
1.2 Probleemanalyse	19
1.3 Afbakening	22
1.4 Produkt	22
1.5 Indeling van het rapport	23
2 Neerslaggegevens	24
2.1 Herkomst	24
2.2 Kalibratie naar handregenmeter	24
2.3 Selectie van onafhankelijke neerslagextremen	25
2.3.1 Jaarmaxima	25
2.3.2 Peak-over-threshold waarden	26
2.4 Waarnemingen	27
2.4.1 De Bilt - jaar	27
2.4.2 De Bilt - seizoenen	28
2.4.3 Overige lokaties	29
3 Klimaatvariabiliteit en klimaatverandering	32
3.1 Twintigste eeuw	32
3.2 Klimaatscenario's	34
4 Jaarstatistiek van De Bilt: 4, 8, 12 en 24 uur	36
4.1 Jaarmaxima	36
4.1.1 Bayesiaanse analyse	36
4.1.2 Analyse kansverdelingen	39
4.2 Peak-over-threshold waarden	41
4.2.1 Bayesiaanse analyse	41
4.2.2 Analyse kansverdelingen	44
4.2.3 Hoge overschrijdingsfrequenties	51
5 Jaarstatistiek van De Bilt: 2, 4 en 8 dagen	53
5.1 Jaarmaxima	53
5.1.1 Bayesiaanse analyse	53
5.1.2 Analyse kansverdelingen	54
5.2 Peak-over-threshold waarden	55
5.2.1 Bayesiaanse analyse	55
5.2.2 Analyse kansverdelingen	57
5.2.3 Hoge overschrijdingsfrequenties	61
6 Overkoepelende jaarstatistiek van De Bilt	63
6.1 Data	63

6.2	Kansverdeling.....	64
6.3	Consistentie tussen duren.....	66
7	Seizoens- en maandstatistiek van De Bilt.....	74
7.1	Afleiding van de statistiek.....	74
7.2	Consistentie met de jaarstatistiek	78
8	Representativiteit van de statistiek voor Nederland	83
8.1	Afleiding statistiek.....	83
8.2	Ruimtelijke variatie	85
9	Neerslagpatronen	88
9.1	Neerslaggebeurtenissen	89
9.1.1	Diversiteit.....	89
9.1.2	Kenmerken	90
9.1.3	Analyse	92
9.2	Analyse en constructie neerslagpatronen	95
9.3	Discussie	107
10	Aanbevelingen.....	108
	Referenties.....	109

Voorwoord

Voor u ligt het rapport “Statistiek van extreme neerslag in Nederland”, uitgevoerd door het KNMI en HKV LIJN IN WATER in de periode november 2003 – augustus 2004. Het onderzoek is uitgevoerd in opdracht van de STOWA en is begeleid door de volgende begeleidingscommissie:

ir. Michelle Talsma (STOWA)
ir. Job van Dansik (Hoogheemraadschap van Delfland)
ir. Chris Griffioen (Waterschap Groot Salland)
ing. Jan Strijker (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)
ir. Thomas de Meij (Waterschap Velt en Vecht)

Bij het totstandkomen van deze rapportage is veelvuldig gebruik gemaakt van de constructieve commentaren van de begeleidingscommissie waarmee regelmatig overlegd is gevoerd.

Verder gaat speciale dank uit naar dr. ir. Jan Stijnen (HKV LIJN IN WATER) en dr. Adri Buishand (KNMI) voor hun waardevolle bijdrage aan inhoudelijke discussies.

De Bilt, oktober 2004

drs. Ilya Smits (KNMI)
drs. Janet Wijngaard (KNMI)
ir. Rudolf Versteeg (HKV LIJN IN WATER)
dr. ir. Matthijs Kok (HKV LIJN IN WATER)

Samenvatting

A. Inleiding

De extreme neerslaggebeurtenissen in het najaar van 1998 hebben duidelijk gemaakt dat het regionale watersysteem kwetsbaar is voor hevige regenval. De totale financiële schade bedroeg destijds circa € 0.5 miljard. De wateroverlast die in die periode ontstond is voor de waterbeheerders in Nederland aanleiding geweest een discussie op gang te brengen over de eisen die aan de waterhuishouding moeten worden gesteld. Centrale vraag in die discussie is in welke mate het regionale waterhuishoudkundige systeem in ons land bescherming biedt tegen wateroverlast door extreme neerslag. In het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) staan de prestaties van het watersysteem daarom centraal. Dit is als volgt geformuleerd:

“Partijen komen overeen de voorstellen voor landelijke uniforme normen, die zijn opgesteld voor wateroverlast als gevolg van buiten de oevers tredend regionaal oppervlaktewater, als werknormen te gebruiken. Het waterschap stelt een programma van maatregelen op (in het kader van het waterbeheersplan) dat uitgaat van de werknorm zoals verwoord in onderstaande tabel. Totdat de definitieve besluitvorming over de normering heeft plaatsgevonden vormen de werknormen het vertrekpunt bij het voorbereiden van waterhuishoudkundige en ruimtelijke maatregelen gericht op het op orde brengen van de regionale watersystemen, alsmede bij de toepassing van de watertoets.

<i>Normklasse gerelateerd aan grondgebruikstype</i>	<i>Maaiveldhoogte- criterium¹ (%)</i>	<i>Werknorm (1/jaar)</i>
<i>Grasland</i>	<i>5%</i>	<i>1/10 jaar</i>
<i>Akkerbouw</i>	<i>1%</i>	<i>1/25 jaar</i>
<i>Hoogwaardige land- en tuinbouw</i>	<i>1%</i>	<i>1/50 jaar</i>
<i>Glastuinbouw</i>	<i>1%</i>	<i>1/50 jaar</i>
<i>Bebouwd gebied</i>	<i>0%</i>	<i>1/100 jaar</i>

¹ Het maaiveldhoogtecriterium bepaalt het referentievlak ten opzichte waarvan het basis werkcriterium wordt uitgedrukt, in procenten van het landgebruik in het watersysteem.

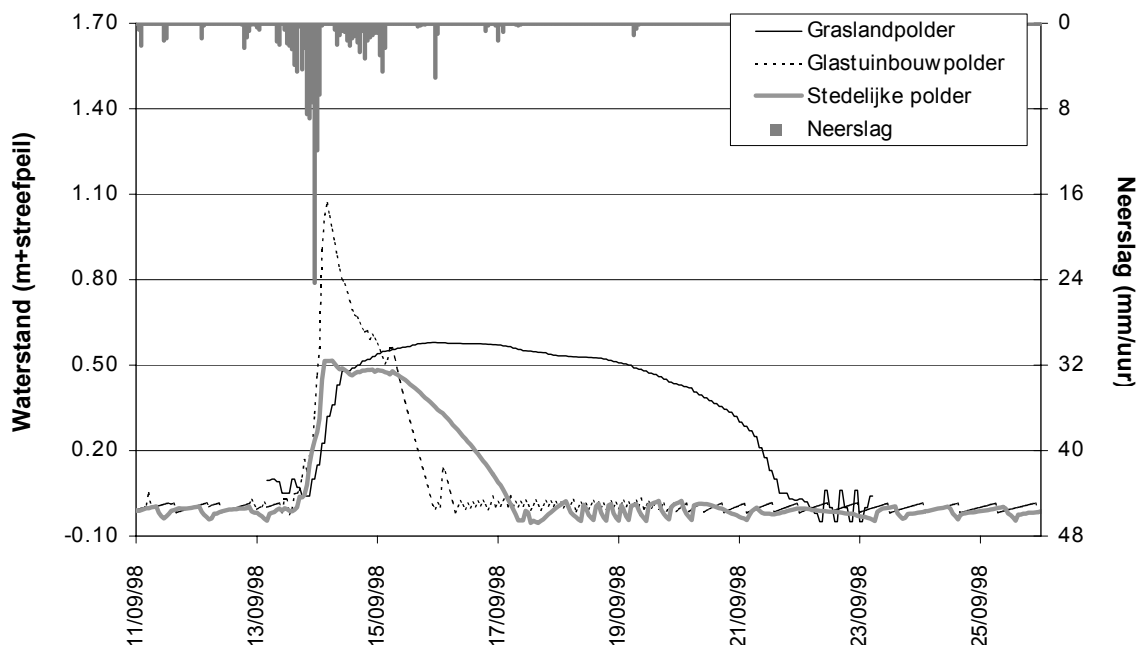
Deze normen zijn uitgedrukt in de kans dat het peil van het oppervlaktewater het niveau van het maaiveld overschrijdt ('kans op inundatie vanuit oppervlaktewater'). Daarbij worden voor verschillende bestemmingen van de grond uiteenlopende normen gehanteerd (variërend van eens per honderd jaar voor bebouwd gebied tot eens per tien jaar voor weidegebied)."

Voor het toetsen van watersystemen kan de waterbeheerder kiezen uit meerdere methoden. Binnen het kader van het NBW wordt de methode van toetsen overgelaten aan de verantwoordelijkheid van het waterschap. In de praktijk worden veelal de volgende drie methoden gebruikt: de zogenaamde 'ontwerpbuimethode' (waarbij één bui als maatgevende neerslaggebeurtenis voor de toetsing gekozen wordt), de zogenaamde 'tijdreeksmethode' (waarbij veelal op uurbasis een lange tijdreeks met een neerslag-afvoer model doorgerekend wordt, impliciet rekening houdend met andere factoren die wateroverlast bepalen, en waarbij extrapolatie 'achteraf' plaatsvindt op waterstanden) en de zogenaamde 'stochastenmethode' (waarbij relatief kortdurende gebeurtenissen met een neerslag-afvoer model doorgerekend worden, expliciet rekening houdend met andere factoren die wateroverlast bepalen, en waarbij extrapolatie 'vooraf' plaatsvindt op de belasting van het watersysteem, bijvoorbeeld de neerslaghoeveelheden). Omdat

er meerdere methoden bestaan, is de gegevensbehoefte van neerslag voor de toetsing niet eenduidig. Wel kan per methode de gegevensbehoefte voor neerslag bepaald worden. Op basis van de drie verschillende methoden kan worden aangegeven dat er enerzijds behoefte is aan historische tijdreeksen van neerslag (op uurbasis) en anderzijds aan informatie over de frequentie van extreme neerslaggebeurtenissen om de prestaties van het watersysteem te kunnen inschatten. De neerslagstatistiek die dit laatste omvat is nodig omdat neerslag één van de belangrijkste factoren is voor het ontstaan van wateroverlast. Naast het gebruik van neerslagstatistiek voor het ontwerpen en toetsen van watersystemen is de statistiek ook van belang voor het verzekeren van waterschade en de voorlichting over de frequentie van extreme neerslaggebeurtenissen.

B. Waterhuishoudkundige systemen en gegevensbehoefte

Om statistiek af te leiden die bruikbaar is in het waterbeheer is het allereerst van belang te weten voor welke watersystemen deze informatie nodig is. Binnen een waterhuishoudkundig systeem richten we ons met name op de relatief kleinschalige regionale watersystemen in Nederland ('deelstroomgebieden', zoals een polder-boezem systeem). Binnen een dergelijk systeem komen vaak verschillende typen grondgebruik voor, zoals bebouwd (stedelijk) gebied, glastuinbouw, akkerbouw en grasland. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen langzaam en snel reagerende systemen. Onder snel reagerende systemen worden bijvoorbeeld glastuinbouwgebieden en stedelijke gebieden verstaan, langzaam reagerend zijn bijvoorbeeld graslandgebieden, gebieden met akkerbouw liggen hier veelal tussen. Voor de snel reagerende systemen is een korte periode van enkele uren tot enkele dagen met veel neerslag vaak belangrijk (hoge intensiteit), terwijl voor de traag reagerende systemen vaak een gebeurtenis gespreid over meerdere dagen belangrijk is (lage intensiteit). Ter illustratie zijn in Figuur 1 drie reeksen van gemeten waterstanden opgenomen van een polder met als overwegend grondgebruik glastuinbouw, een polder met overwegend grasland en een hoofdzakelijk stedelijke polder, alle tijdens dezelfde extreme neerslaggebeurtenis van september 1998.



Figuur 1: Tijdreeksen van waterstanden (m) ten opzichte van streefpeil in drie verschillende watersystemen met bijbehorende neerslaghoeveelheden (mm per uur).

In de figuur is te zien dat de duur van een overschrijding van streefpeil in de graslandpolder veel langer is dan de duur van de overschrijding in de glastuinbouwpolder of de stedelijke polder. Daarentegen is de maximale overschrijding lager ten opzichte van de glastuinbouwpolder. Voor snel reagerende systemen zoals een glastuinbouwgebied heeft een neerslagduur van een aantal uren een belangrijke invloed, terwijl voor de graslandgebieden juist langere neerslagperioden (in de orde van dagen) maatgevend kunnen zijn. Omdat veel watersystemen uit een combinatie van snel en traag reagerende systemen bestaan en omdat bovendien veel waterhuishoudkundige systemen (en de modellen van dergelijke watersystemen) complex zijn is de bepaling van één vaste maatgevende duur voor alle watersystemen niet mogelijk. We leiden daarom neerslagstatistiek af voor verschillende duren, van minimaal 4 uur tot maximaal 9 dagen. De statistiek wordt bepaald voor verschillende overschrijdingsfrequenties, van gemiddeld 10x per jaar tot gemiddeld 1x per 1000 jaar. De relatief hoge frequenties zijn onder andere van belang voor ontwerpbeslissingen en vaak voorkomende gebeurtenissen, terwijl de relatief lage frequenties onder andere van belang zijn voor het toetsen van het watersysteem aan de NBW-normen.

Bij de berekening van waterstanden met behulp van neerslag-afvoer modellen is niet alleen de duur van de neerslaggebeurtenis met bijbehorend volume van belang, maar ook de manier waarop de neerslag over de tijd is verdeeld. Een neerslaggebeurtenis die uniform verdeeld over een dag valt zorgt in een watersysteem veelal voor minder wateroverlast dan een gebeurtenis waarin een duidelijke piek gedurende deze dag voorkomt. De verdeling van de neerslag binnen een neerslaggebeurtenis, gegeven een neerslagvolume, wordt in dit onderzoek het neerslagpatroon genoemd. Daarnaast is behoefte aan informatie over de regionale variabiliteit van extreme neerslag (in welke mate is De Bilt representatief voor Nederland), over de relatie tussen 'puntstatistiek' (statistiek afgeleid uit gegevens van één neerslagstation) en 'gebiedsstatistiek' (statistiek geldig voor een geheel gebied) en over eventuele verschillen in de statistiek tussen de seizoenen. Ook is van belang te weten hoe een mogelijk veranderend klimaat de statistiek beïnvloedt.

C. Nieuwe neerslagstatistiek

De tot nu toe beschikbare neerslagstatistiek is gebaseerd op de neerslaggegevens die sinds jaar en dag door het KNMI worden verzameld en op onderzoek waarmee op basis van deze gegevens uitspraken gedaan kunnen worden over de kans op extreem veel neerslag. Deze statistiek dateert uit 1980 en is gebaseerd op neerslagreeksen uit het tijdvak 1906-1977. Op basis hiervan is door het KNMI een tabel opgesteld waarin de neerslaghoeveelheden vermeld staan die gemiddeld 10x per jaar tot 1x per 100 jaar worden overschreden voor gebeurtenissen met duren van 5 minuten tot 10 dagen. Uit de tabel kan bijvoorbeeld worden afgelezen dat een hoeveelheid van 50 mm in 12 uur tijd gemiddeld eens per 20 jaar wordt overschreden.

Inmiddels zijn ook gegevens over het tijdvak 1978-2003 beschikbaar. Daar in de extreme neerslaghoeveelheden geen grote trends zijn gevonden (zie ook Paragraaf I) is in verband met de statistische betrouwbaarheid de gehele beschikbare reeks over het tijdvak 1906-2003 gebruikt bij de totstandkoming van de nieuwe neerslagstatistiek. Tevens is onderzocht welke statistische methode de voorkeur geniet.

In deze samenvatting worden de resultaten van het onderzoek gepresenteerd. De nadruk ligt op neerslagstatistiek van uurreeksen afgeleid uit De Bilt voor neerslaggebeurtenissen met duren van minimaal 4 uur tot maximaal 9 dagen. Er wordt aandacht besteed aan de neerslaghoeveelheden die met een frequentie van gemiddeld 10x per jaar tot eens per 1000 jaar optreden. In dit onderzoek wordt geen aandacht besteed aan de korte termijn weersvoorspelling.

Statistiek van extreme neerslag heeft altijd betrekking op een bepaalde periode waarin de neerslag mogelijk kan vallen. Deze periode kan een kalenderjaar zijn (dan spreken we over 'jaarstatistiek') maar ook een deel van het jaar (bijvoorbeeld de zomer of het groeiseizoen). In het onderzoek is statistiek afgeleid voor hele kalenderjaren en voor drie deelperioden korter dan een jaar (het groeiseizoen – maart tot en met oktober, de periode buiten het groeiseizoen – november tot en met februari, en de oogstperiode – september en oktober).

Naast De Bilt zijn ook neerslagreeksen van andere stations onderzocht om de representativiteit van De Bilt voor geheel Nederland te onderzoeken. Daarnaast is onderzoek gedaan naar neerslagpatronen en is onderzocht of er trends aanwezig zijn in de historische tijdreeksen van neerslagmetingen, evenals de uitwerking van klimaatscenario's op de af te leiden statistiek.

D. Data en methode

De extreme neerslagstatistiek is gebaseerd op gemeten neerslaggegevens over het tijdvak 1906-2003. Op deze gegevens zijn door het KNMI correcties aangebracht die nodig zijn omdat er systematische afwijkingen geïntroduceerd zijn door verschillende manieren van meten gedurende de meetperiode. In het onderzoek is voor het afleiden van de statistiek gebruik gemaakt van uurwaarden van De Bilt. Voor het vergelijken van deze statistiek met die van andere stations zijn dagwaarden gebruikt.

Voor een verantwoorde statistische analyse van neerslagextremen moet worden gekeken naar onafhankelijke gebeurtenissen. Hieronder worden gebeurtenissen verstaan waarvan de tijd die tussen twee opeenvolgende gebeurtenissen zit dusdanig lang is dat deze gebeurtenissen fysisch gezien niet direct met elkaar in verband staan. In deze studie worden twee verschillende soorten van onafhankelijke neerslagextremen geanalyseerd: jaarmaxima en peak-over-threshold (POT) waarden:

- *Jaarmaxima* zijn gebaseerd op kalenderjaren of seizoenen. Binnen elk jaar of seizoen wordt gezocht naar het maximum voor de betreffende neerslagduur.
- *POT-waarden* worden geselecteerd uit de oorspronkelijke tijdreeks door te kijken naar onafhankelijke overschrijdingen van een gekozen drempelwaarde.

In dit rapport zijn voor zowel jaarmaxima als POT-waarden 4-, 8-, 12- en 24-uurs neerslaghoeveelheden geanalyseerd, evenals 2-, 4- en 8-daagse neerslaghoeveelheden. Voor de afleiding van de uiteindelijke statistiek is ook gebruik gemaakt van tussenliggende duren en bij de presentatie van de resultaten zijn tevens 9-daagse neerslaghoeveelheden opgenomen. In Tabel 1 zijn de 10 hoogste jaarmaxima te De Bilt weergegeven over het tijdvak 1906-2003 voor duren van 4 uur, 24 uur, 4 dagen en 8 dagen. De tien hoogste POT-waarden komen voor de duren korter dan 4 dagen overeen met de tien hoogste jaarmaxima. Bij duren van 4 en 8 dagen treden echter verschillen op tussen de jaarmaxima en POT-waarden.

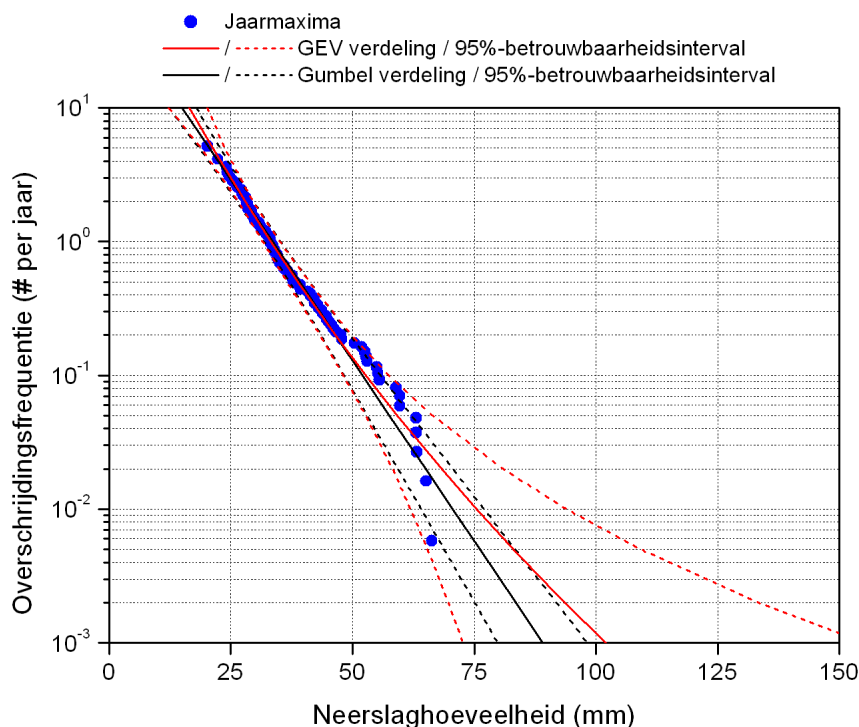
Rang	Datum (dd-mm-jjjj)	Neerslag 4 uur (mm)	Datum (dd-mm-jjjj)	Neerslag 24 uur (mm)	Datum (dd-mm-jjjj)	Neerslag 4 dagen (mm)	Datum (dd-mm-jjjj)	Neerslag 8 dagen (mm)
1	06-06-1961	50.8	03-07-1952	66.3	12-10-1960	111.3	08-06-1998	130.3
2	03-07-1952	48.7	01-08-1917	65.1	01-08-1917	94.6	25-08-1912	128.3
3	19-07-1966	47.5	12-10-1960	63.2	05-03-1998	90.3	19-07-1987	122.2
4	13-06-1953	46.5	08-02-1946	63.1	25-08-1912	85.2	01-12-1961	116.6
5	02-08-1948	43.4	19-07-1966	63.1	20-10-1986	84.8	10-10-1960	115.2
6	06-06-1998	42.7	02-08-1948	59.7	19-07-1966	84.5	20-08-1969	111.7
7	06-06-1943	38.0	01-08-1994	59.7	26-11-1983	81.2	05-02-1946	109.0
8	05-08-1947	37.4	11-07-1942	59.0	08-02-1946	79.3	14-09-1957	105.9
9	07-05-1931	37.3	06-06-1998	55.6	22-08-1969	79.0	11-03-1981	105.0
10	27-06-1930	36.4	07-05-1931	55.2	10-03-1981	79.0	22-10-1986	104.7

Tabel 1: De 10 hoogste jaarmaxima van neerslaghoeveelheden in De Bilt bij een duur van 4 en 24 uur en 4 en 8 dagen over het tijdvak 1906-2003.

Uit dit onderzoek volgt dat jaarmaxima het meest geschikt zijn om neerslaghoeveelheden met lage overschrijdingsfrequenties te beschrijven (van eens per jaar tot eens per 1000 jaar) en POT-waarden met een drempelwaarde die gemiddeld 10x per jaar wordt overschreden om neerslaghoeveelheden met hoge overschrijdingsfrequenties te beschrijven (van 10x per jaar tot 2x per jaar).

Om een goede schatting van de extreme neerslaghoeveelheden te krijgen voor lage overschrijdingsfrequenties is het type kansverdeling dat gebruikt wordt om de jaarmaxima te modelleren van groot belang. Vooral voor de zeer lage frequenties, variërend van 1x per 100 jaar tot 1x per 1000 jaar, kan de keuze hierin tot grote verschillen leiden, zoals duidelijk te zien is in Figuur 2.

Verschillende kansverdelingen zijn onderzocht, waarbij het type kansverdeling voor alle onderzochte duren gelijk gehouden is. In dit onderzoek is gebleken dat zowel de Gumbel verdeling als de zogenaamde gegeneraliseerde extreme waarde (GEV) verdeling goed passend is voor de reeks van het neerslagstation te De Bilt. De Gumbel verdeling is een speciaal geval van de GEV verdeling; De Gumbel verdeling heeft twee parameters, terwijl de GEV verdeling een extra parameter heeft, de zogenaamde vormparameter. Mede op basis van andere stations is aangetoond dat de vormparameter van de GEV verdeling een toegevoegde waarde heeft. Daarom is gekozen de GEV verdeling toe te passen binnen deze studie. Een andere parameter van de GEV verdeling (de schaalparameter) is hierbij dusdanig gemodelleerd dat gegarandeerd is dat de neerslaghoeveelheden groter zijn bij toenemende duren.



Figuur 2: Neerslaghoeveelheden (mm) voor 24-uurs volgens de GEV verdeling en de Gumbel verdeling van De Bilt inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Tevens zijn de jaarmaxima van De Bilt voor het tijdvak 1906-2003 weergegeven.

Ook bij de POT-waarden voor hoge overschrijdingsfrequenties is gekeken naar verschillende kansverdelingen, waarbij tevens de consistentie tussen de verschillende duren onder de loop is genomen. Hieruit is gebleken dat de conditionele Weibull verdeling (CWD) beter voldoet dan de gegeneraliseerde Pareto verdeling (GPD) en de exponentiële verdeling.

E. Jaarstatistiek

De in de vorige paragraaf beschreven methode is toegepast op de neerslagreeks van De Bilt. De resultaten hiervan voor het gehele jaar zijn samengevat in Tabel 2.

Als de nieuwe waarden van Tabel 2 vergeleken worden met de waarden volgens de oude statistiek, dan valt met name op dat voor de lage overschrijdingsfrequenties de neerslaghoeveelheden bij duren korter dan 5 dagen hoger zijn geworden en bij langere duren lager (tot maximaal 10%). De verschillen worden deels veroorzaakt doordat bij de nieuwe statistiek meer data gebruikt zijn, maar vooral doordat aan de oude statistiek een andere verdeling ten grondslag ligt dan aan de nieuwe statistiek. Ter illustratie: de neerslaghoeveelheid behorende bij een duur van 12 uur en een overschrijdingsfrequentie van 1x per 100 jaar neemt toe van 62 mm naar 68 mm, bij een duur van 2 dagen van 85 mm naar 92 mm, en bij een duur van 10 dagen is een afname te zien van 154 mm naar 143 mm (niet in Tabel 2 weergegeven). In het licht van de bijbehorende statistische onzekerheden zijn de verschillen tussen de nieuwe en oude statistiek niet spectaculair te noemen.

Jaar	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	9	12	13	15	19	-	-	-
5x per jaar	12	15	17	21	26	33	43	45
2x per jaar	16	20	23	28	35	45	61	64
1x per jaar	21	24	27	33	41	52	71	75
1x per 2 jaar	25	29	32	39	48	60	81	86
1x per 5 jaar	31	36	40	47	58	71	94	99
1x per 10 jaar	36	41	46	54	65	80	103	109
1x per 20 jaar	41	47	52	61	73	89	113	118
1x per 25 jaar	43	49	54	63	75	91	115	121
1x per 50 jaar	49	56	61	71	84	100	124	130
1x per 100 jaar	55	62	68	79	92	109	133	138
1x per 200 jaar	61	69	75	87	101	118	141	146
1x per 500 jaar	71	79	86	98	113	130	152	156
1x per 1000 jaar	78	88	95	108	123	140	159	163

Tabel 2: *Neerslaghoeveelheden (mm) gebaseerd op de neerslagreeks 1906-2003 voor het gehele jaar, voor duren van 4 uren tot 9 dagen voor frequenties van gemiddeld 10 keer per jaar tot gemiddeld 1 keer per 1000 jaar.*

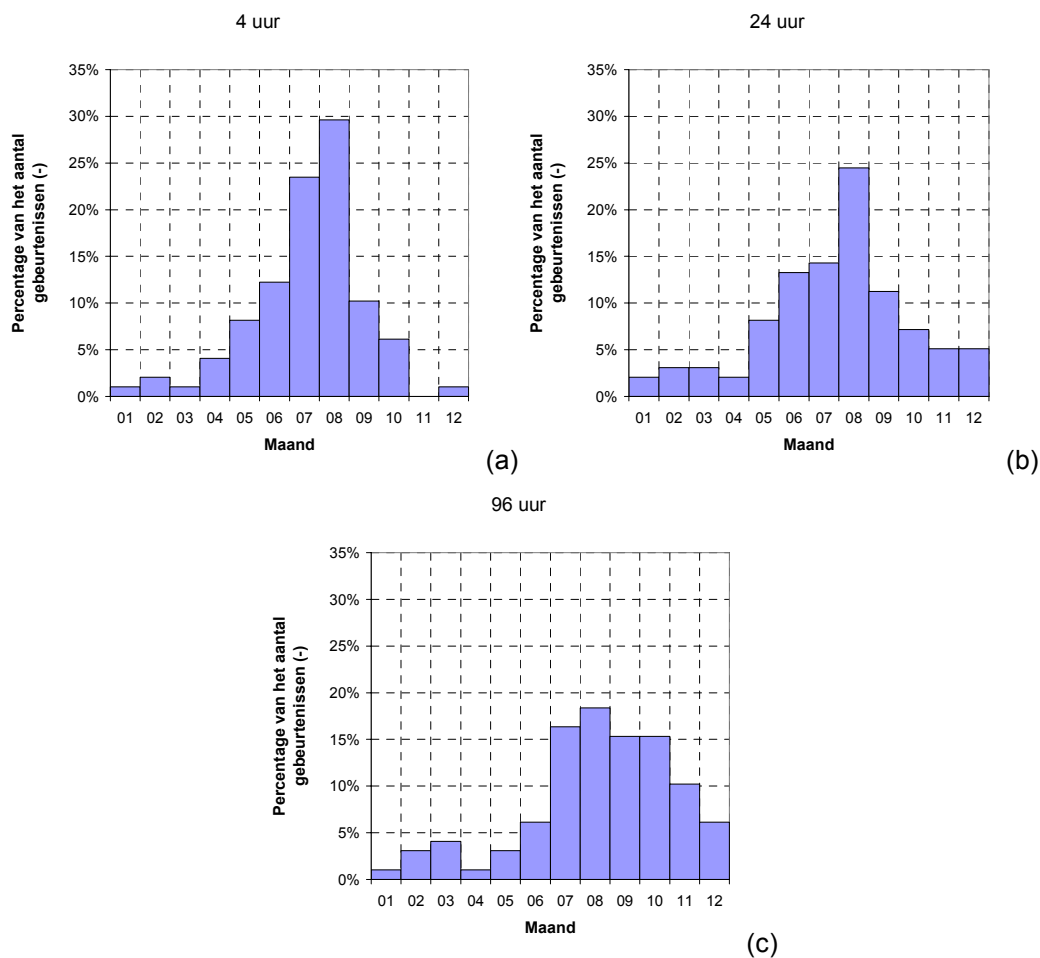
F. Seizoens- en maandstatistiek

Naast statistiek voor het gehele (kalender)jaar wordt ook statistiek voor 3 kortere perioden dan een jaar afgeleid:

1. Maart tot en met oktober (gemiddeld genomen het groeiseizoen),
2. November tot en met februari (de periode buiten het groeiseizoen),
3. September en oktober (gemiddeld genomen de oogstperiode).

In Figuur 3 is voor duren van 4 uur, 24 uur en 4 dagen weergegeven in welke maand de jaarmaxima zijn geregistreerd (de eerste maand is januari). Het blijkt dat bij de kortere duren het zwaartepunt van de jaarmaxima in juli en augustus ligt, de periode van de zomerse buien. Bij langere duren komen maxima meer verspreid voor, vooral over de periode juli tot en met oktober. Extreme neerslaggebeurtenissen treden minder op in de maanden december tot en met april. Dit geeft aan dat de statistiek voor de verschillende perioden van elkaar zal afwijken.

Bij het afleiden van de seizoensstatistiek is gebruik gemaakt van dezelfde methode die ook gebruikt is bij het afleiden van de jaarstatistiek. De resultaten voor de 3 verschillende perioden zijn weergegeven in Tabel 3, Tabel 4 en Tabel 5.



Figuur 3: Percentage van het aantal jaarmaxima per maand voor een duur van 4 uur (a), 24 uur (b) en 4 dagen (c).

Maart-Oktober	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	8	10	11	13	15	-	-	-
5x per jaar	11	14	15	18	23	28	-	-
2x per jaar	16	20	21	26	33	41	55	58
1x per jaar	20	24	26	32	40	51	67	71
1x per 2 jaar	25	29	32	38	47	59	77	82
1x per 5 jaar	31	35	39	46	56	70	90	96
1x per 10 jaar	36	41	45	52	63	78	100	106
1x per 20 jaar	41	47	51	59	71	87	110	115
1x per 25 jaar	43	49	53	62	74	89	113	118
1x per 50 jaar	49	55	59	69	82	98	122	127
1x per 100 jaar	55	61	67	77	90	107	130	136
1x per 200 jaar	61	68	74	85	99	116	139	144
1x per 500 jaar	70	78	84	96	111	128	150	155
1x per 1000 jaar	78	87	93	105	120	138	158	162

Tabel 3: Neerslaghoeveelheden (mm) voor verschillende overschrijdingsfrequenties en duren, geldend voor het groeizeen (maart-oktober).

November-Februari	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	5	6	6	-	-	-	-	-
5x per jaar	7	9	10	12	-	-	-	-
2x per jaar	9	13	14	18	23	30	-	-
1x per jaar	11	15	17	22	28	38	54	58
1x per 2 jaar	13	17	20	26	33	45	64	68
1x per 5 jaar	15	21	24	31	41	55	75	80
1x per 10 jaar	17	24	28	36	47	62	84	88
1x per 20 jaar	20	27	31	41	53	70	92	97
1x per 25 jaar	20	28	33	42	55	72	94	99
1x per 50 jaar	23	31	36	47	61	80	102	107
1x per 100 jaar	25	35	41	53	68	87	110	114
1x per 200 jaar	28	38	45	58	75	95	117	121
1x per 500 jaar	32	43	51	66	85	106	127	130
1x per 1000 jaar	35	48	56	73	92	114	134	137

Tabel 4: *Neerslaghoeveelheden (mm) voor verschillende overschrijdingsfrequenties en duren, geldend voor de periode buiten het groeiseizoen (november-februari).*

September-Oktober	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	-	-	-	-	-	-	-	-
5x per jaar	6	-	-	-	-	-	-	-
2x per jaar	10	12	13	15	18	21	-	-
1x per jaar	12	15	17	21	27	36	48	51
1x per 2 jaar	15	19	21	27	35	46	61	65
1x per 5 jaar	19	25	28	35	46	60	78	82
1x per 10 jaar	23	29	33	42	54	70	91	95
1x per 20 jaar	27	34	39	49	63	81	102	107
1x per 25 jaar	28	36	41	52	66	85	106	111
1x per 50 jaar	32	41	47	60	76	96	118	122
1x per 100 jaar	37	47	53	68	85	107	129	133
1x per 200 jaar	41	53	60	76	96	118	139	143
1x per 500 jaar	48	61	70	88	110	133	153	156
1x per 1000 jaar	53	68	78	98	121	145	163	165

Tabel 5: *Neerslaghoeveelheden (mm) voor verschillende overschrijdingsfrequenties en duren, geldend voor de oogstperiode (september-oktober).*

Als de seizoenstabellen (Tabel 3, Tabel 4 en Tabel 5) worden vergeleken met de jaartabel (Tabel 2) kan geconstateerd worden dat de statistiek voor het groeiseizoen weinig afwijkt van de jaarstatistiek. De neerslaghoeveelheden voor de periode buiten het groeiseizoen zijn daarentegen een stuk lager. De neerslaghoeveelheden voor de oogstperiode zijn over het algemeen wat lager dan die voor het groeiseizoen en die voor het gehele jaar, met uitzondering van de langere duren in combinatie met lage overschrijdingsfrequenties waar de niveaus ongeveer even hoog zijn.

Uit de tabel voor de maanden september-oktober (Tabel 5) is verder te zien dat voor een duur van 9 dagen en een overschrijdingsfrequentie van 1x per 1000 jaar een waarde van 165 mm wordt gegeven, terwijl de jaartabel slechts 163 mm geeft. Dit is met elkaar in tegenspraak en deze inconsistentie wordt veroorzaakt doordat de afleiding van de seizoensstatistiek onafhankelijk plaatsvindt van de afleiding van de jaarstatistiek. De bovenstaande seizoenstabellen zijn voor de meeste toepassingen wel de beste schattingen en daarbij vallen de geconstateerde inconsistenties ruim binnen de betrouwbaarheidsbanden. Voor toepassingen waarbij consistentie is vereist tussen het jaar en kortere deelperioden is in dit rapport een methode uitgewerkt met bijbehorende resultaten.

G. Representativiteit van de statistiek voor Nederland

Er kan niet zonder meer worden aangenomen dat de afgeleide statistiek representatief is voor heel Nederland. Hoewel Nederland maar een klein land is, bestaan er grote verschillen in land-/zeeligging, grondsoorten, landgebruik, en in mindere mate in orografie. Al deze factoren kunnen van invloed zijn op het lokale neerslagklimaat binnen Nederland. Door naast De Bilt ook andere stations te analyseren kan een inschatting gegeven worden van de mate waarin dergelijke factoren de statistiek beïnvloeden. De analysemethode zoals die is toegepast op station De Bilt is daarom ook toegepast op de dagsommen van 11 lokaties in Nederland (inclusief De Bilt; Figuur 4). De resultaten hiervan zijn in Tabel 6 weergegeven voor een aantal duren en overschrijdingsfrequenties.



Figuur 4: Gebruikte KNMI-neerslagstations.

Uit Tabel 6 valt op te maken dat er verschillen in de statistiek tussen stations onderling bestaan; het verschil tussen de hoogste en laagste waarden van de neerslaghoeveelheden bedraagt ongeveer 20%. Met behulp van een statistische toets is onderzocht of dit verschil voor een overschrijdingsfrequentie van gemiddeld eens per 10 jaar en per 1000 jaar statistisch significant is. Bij een overschrijdingsfrequentie van eens per 10 jaar is dit wel het geval, voor de lagere overschrijdingsfrequentie van eens per 1000 jaar kan dit niet aangetoond worden. Station De Bilt geeft een indicatie van het gemiddelde beeld over Nederland, waarbij de verschillen ten opzichte

van de overige stations die hier beschouwd worden maximaal 12% zijn. In een uitgebreide regionale studie kan dit verder uitgewerkt en onderbouwd worden. Om rekening te houden met de aanwezige ruimtelijke verschillen binnen Nederland kan, voor duren van 24 uur en langer, voorlopig volstaan worden met een schaling. Dit wordt gedaan door de resultaten voor De Bilt te vermenigvuldigen met de ratio van de gemiddelde jaarsom van de gewenste lokatie en die van De Bilt.

Station	T = 10 jaar			T = 1000 jaar		
	2 dagen	4 dagen	8 dagen	2 dagen	4 dagen	8 dagen
De Bilt	61	78	104	116	137	162
West Terschelling	62	77	102	120	134	158
Groningen	59	74	98	110	128	149
Ter Apel	59	71	93	114	124	143
Hoorn	58	79	103	106	139	160
Heerde	65	81	110	127	148	180
Hoofddorp	64	83	109	122	148	167
Winterswijk	60	75	100	117	132	155
Kerkwerpe	61	79	100	114	137	150
Oudenbosch	61	81	105	117	146	164
Roermond	55	69	92	109	124	150

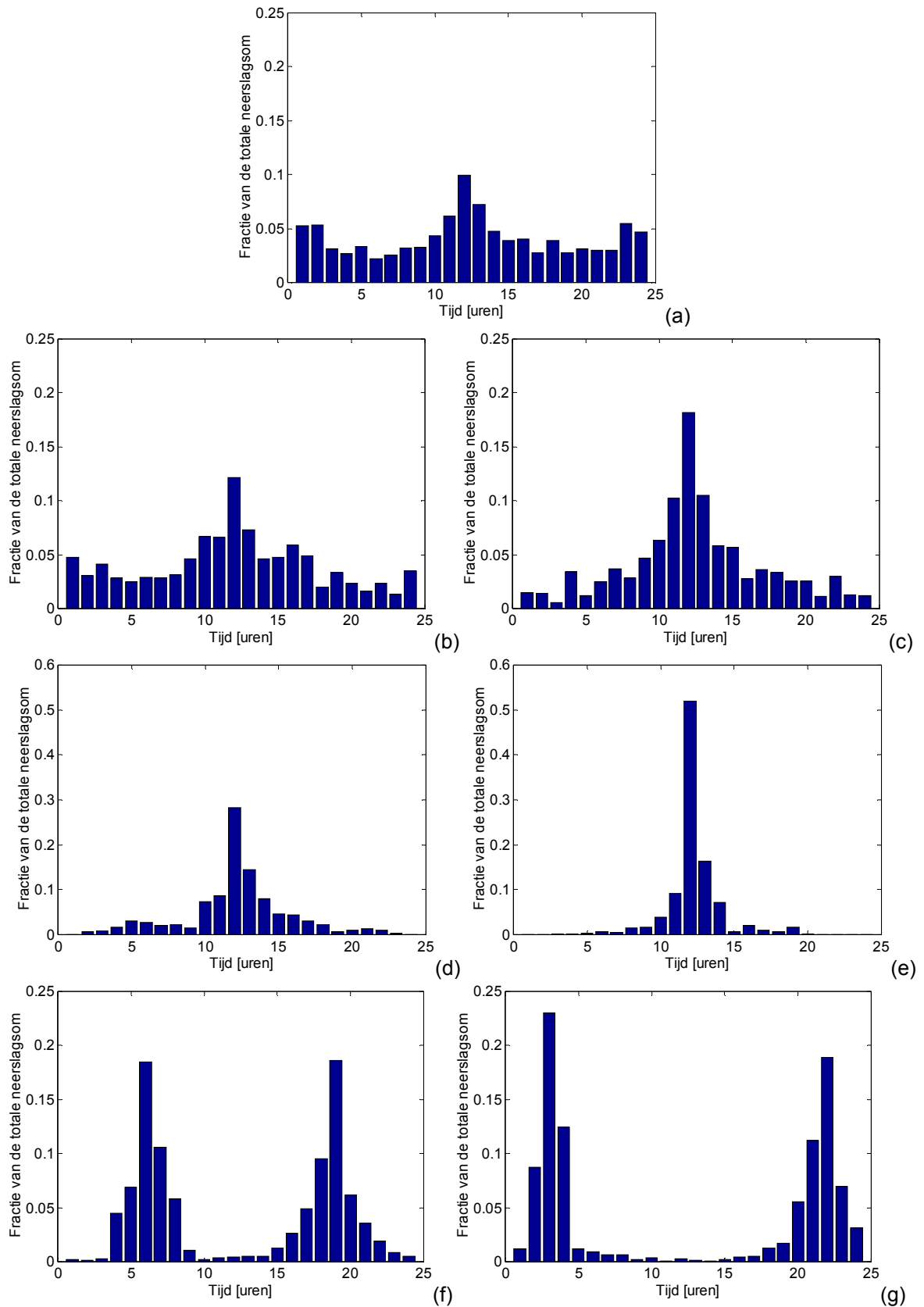
Tabel 6: *Neerslaghoeveelheden (mm) bij een overschrijdingsfrequentie van gemiddeld eens per 10 jaar ($T = 10$ jaar) en van gemiddeld eens per 1000 jaar ($T = 1000$ jaar) voor een aantal stations en voor duren van 2, 4 en 8 dagen.*

H. Neerslagpatronen

Niet alleen de duur en het volume van de neerslaggebeurtenis bepalen de mate van wateroverlast, ook de manier waarop de neerslag over de tijd is verdeeld speelt hierbij een rol. Dit aspect van een neerslaggebeurtenis is uitgewerkt in de vorm van neerslagpatronen. De neerslagpatronen kunnen worden gebruikt bij de bepaling van wateroverlast op een probabilistische wijze ('stochastenmethode') of op basis van ontwerpbuien ('ontwerpbuimethode'). Bij de probabilistische methode worden alle neerslagpatronen met bijbehorende kansen van voorkomen gebruikt voor de bepaling van de mate van wateroverlast. Bij een methode op basis van ontwerpbuien dient uit de neerslagpatronen een maatgevend patroon te worden gekozen waarmee het watersysteem wordt doorgerekend. De neerslagpatronen zijn bepaald op basis van de neerslaggegevens gemeten in De Bilt over het tijdvak 1906 tot en met 2003. De historische patronen zijn onderzocht door de cumulatieve verdelingen te bepalen van de 1000 meest extreme neerslaggebeurtenissen met een duur van 24 uur, 2 dagen, 4 dagen en 8 dagen. Daaruit blijkt bijvoorbeeld dat (voor de 100 meest extreme gebeurtenissen) gemiddeld 21% van de neerslag binnen één uur valt bij gebeurtenissen met een duur van 24 uur.

In het onderzoek wordt geconcludeerd dat neerslagpatronen niet afhankelijk zijn van de totale neerslaghoeveelheid, dat patronen voor langere neerslaggebeurtenissen gemiddeld een meer uniform karakter kennen dan korte neerslaggebeurtenissen en dat in het groeiseizoen (maart tot en met oktober) meer neerslag valt in korte aaneengesloten perioden dan in de overige maanden. De historisch opgetreden neerslagpatronen zijn onderverdeeld in gebeurtenissen met geen pieken (uniform), één piek en twee pieken. Er is een methode ontwikkeld waarmee 7 patronen voor elke

duur gegenereerd zijn, met elk een vrijwel even grote kans van voorkomen. Ter illustratie zijn in Figuur 5 patronen gepresenteerd voor een neerslaggebeurtenis met een duur van 24 uur. De resultaten van dit onderzoek aangaande de patronen zijn in numerieke vorm voor de duren van 1, 2, 4 en 8 dagen te vinden op de website van de STOWA (www.stowa.nl). Hierbij moet in ogenschouw worden genomen dat de invloed van een aantal uitgangspunten bij de gebruikte methode in dit onderzoek niet kwantitatief is uitgewerkt en verder onderzocht dient te worden.



Figuur 5: Karakteristieke neerslagpatronen voor neerslaggebeurtenissen met een duur van 24 uur. Een uniform patroon zonder piek (a), vier 1-pieks patronen (b-e) en 2-pieks patronen met een korte tussenduur (f) en een lange tussenduur (g).

I. Klimaatscenario's

In het licht van een mogelijk veranderend klimaat is onderzocht in hoeverre trends aanwezig zijn in de neerslagreeksen van De Bilt. Hierin zijn geen grote trends in de extreme neerslaghoeveelheden zichtbaar, terwijl wel een duidelijke trend aanwezig is in de jaarhoeveelheden van de neerslag. Deze constatering betekent echter niet dat er geen toekomstige veranderingen in het extreme neerslagklimaat zullen voorkomen. In dit kader vindt onderzoek plaats en daaruit is een aantal klimaatscenario's uitgewerkt (Tabel 7).

	Lage schatting nat	Centrale schatting nat	Hoge schatting nat	Hoge schatting droog
Temperatuur	+1°C	+2°C	+4-6°C	+4-6°C
24-uurs neerslaghoeveelheid, NL (jaar)				
Procentuele verandering	+ 3 %	+ 6 %	+ 12 %	- 10 %
Herhalingstijd 1 jaar (34 mm)	0.9 jaar	0.8 jaar	0.65 jaar	1.6 jaar
Herhalingstijd 10 jaar (53 mm)	8 jaar	7 jaar	5 jaar	17 jaar
Herhalingstijd 100 jaar (73 mm)	78 jaar	62 jaar	40 jaar	200 jaar
10-daagse neerslaghoeveelheid, NL (winter)				
Procentuele verandering	+ 10 %	+ 20 %	+ 40 %	- 10 %
Herhalingstijd 1 jaar (62 mm)	0.7 jaar	0.5 jaar	0.3 jaar	1.5 jaar
Herhalingstijd 10 jaar (98 mm)	6 jaar	5 jaar	2 jaar	17 jaar
Herhalingstijd 100 jaar (136 mm)	47 jaar	25 jaar	9 jaar	200 jaar

Tabel 7: Invloed klimaatscenario's voor Nederland op herhalingstijden in 2100 (uit Konnen, 2001). Hierbij is voor berekening van de herhalingstijden uitgegaan van de tot nu toe gebruikelijke waarden. (Buishand en Velds, 1980; Buihand, 1983a en Buihand et al., 1991).

Uit Tabel 7 blijkt dat de verschillende scenario's behoorlijk uiteenlopen en vooral voor de meer extreme gebeurtenissen heeft dit grote verschillen in overschrijdingsfrequentie tot gevolg. De statistiek die opgenomen is in dit rapport is de basis om de scenario's te kunnen doorrekenen en hiermee de invloed op de overschrijdingsfrequenties in te schatten.

Aanbevelingen

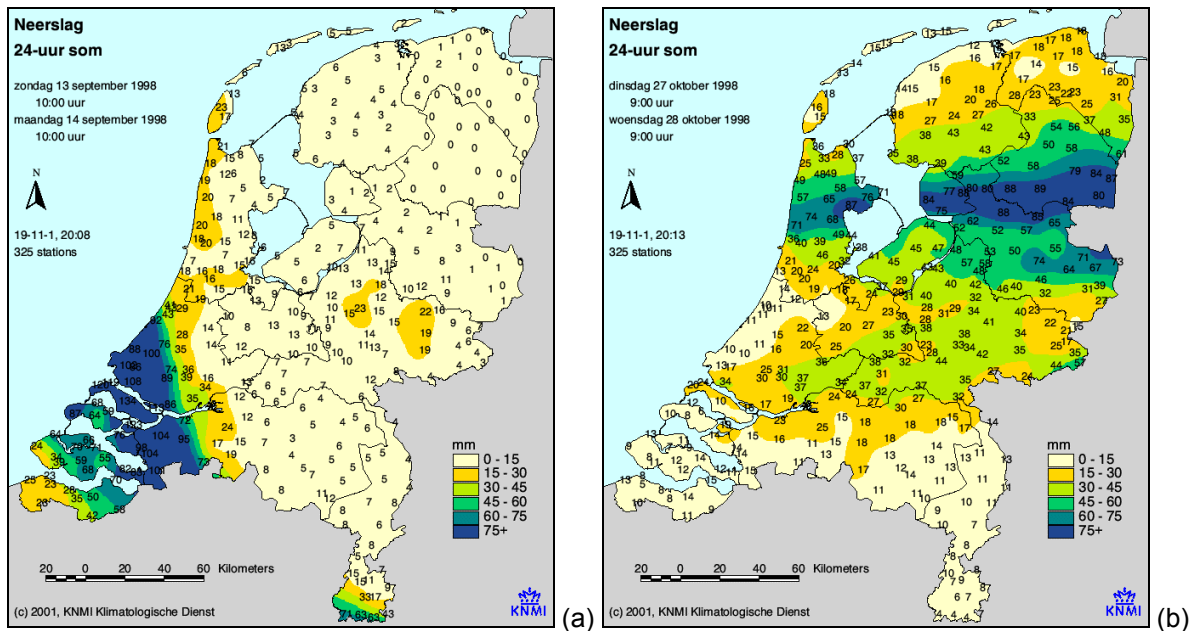
- De in dit onderzoek afgeleide frequentietabellen wordt aanbevolen om als standaard te hanteren in het waterbeheer.
- De in deze studie afgeleide statistiek is tot stand gekomen door de generaliseerde extreme waarden verdeling toe te passen op jaarmaxima. Vooral de vormparameter van deze verdeling heeft veel invloed op de uiteindelijke resultaten en is hier bepaald door gebruik te maken van literatuur. Deze literatuur is afkomstig uit 1983 en daardoor wordt er geen gebruik gemaakt van data van de afgelopen 25 jaar. Een analyse van stationsreeksen met daarin tevens de recente data leidt tot een betrouwbaardere afleiding van de vormparameter.
- In verband met eventuele klimaatsveranderingen zijn klimaatscenario's bepaald, ook wat betreft neerslag. Om voldoende rekening te houden met de klimaatsveranderingen is het gewenst om de scenario's eerst door te rekenen op de stationsreeksen. Vervolgens kan de in deze studie gepresenteerde statistische methode toegepast worden om overschrijdingsfrequenties af te leiden.

- In deze studie is een analyse uitgevoerd om te onderzoeken in hoeverre de afgeleide statistiek representatief is voor Nederland. Om een beter beeld te krijgen van de verschillen die ruimtelijk gezien aanwezig zijn en van de factoren die hiervoor verantwoordelijk zijn is een uitgebreide regionale analyse noodzakelijk.
- Voor het genereren van neerslagpatronen wordt aanbevolen om de gevoeligheid van een aantal uitgangspunten bij de gebruikte methode (zoals de selectie van 1-, 2-, 3- (etc.) uren neerslagsommen, menging, symmetrie) nader uit te werken. Dit kan door patronen in te voeren in neerslag-afvoer modellen, en na te gaan welke invloed de patronen hebben op de waterstanden.
- De resultaten uit deze studie voor overschrijdingsfrequenties van eens per 100 jaar of nog lagere overschrijdingsfrequenties hebben relatief brede betrouwbaarheidsintervallen. Om de onzekerheid in de resultaten te verkleinen zou gebruik gemaakt kunnen worden van zogenaamde 'resampling' of 'pooling' technieken.
- In deze studie ligt de nadruk vooral op niet-verstedelijkt gebied en daarmee op neerslaggebeurtenissen met relatief lange duren (vanaf 4 uur). Voor verstedelijkt gebied is statistiek voor relatief korte duren van groter belang. Uitbreiding (volgens de gehanteerde statistische methode) naar deze duren (korter dan 4 uur) is daarom gewenst. Ook statistiek voor duren langer dan 9 dagen kan van belang zijn voor toepassingen waarbij grondwaterstanden een rol spelen.
- De normeringsmethodiek wordt toegepast op regionale watersystemen. Als relatief grote watersystemen worden bekeken kan de ruimtelijke spreiding van een bui tijdens een neerslaggebeurtenis van grote invloed zijn op de resulterende waterstanden. De afgeleide statistiek in deze studie geldt echter voor neerslag op een bepaalde plaats en zegt niets over de uitgestrektheid van het neerslaggebied. Uitbreiding van de 'puntstatistiek' naar 'gebiedsstatistiek' is daarom wenselijk.
- Om de kans op overschrijding van de waterstand (op een bepaalde lokatie) in te schatten is het van belang de kans op extreme gebeurtenissen te kennen. Deze gebeurtenissen worden echter ook bepaald door de beginvoorwaarde van de resterende berging in het systeem en de mogelijkheid tot lozing. Met behulp van conditionele statistiek kan hiermee rekening gehouden worden.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De extreme neerslaggebeurtenissen van september en oktober 1998 (zie Figuur 1-1) hebben duidelijk gemaakt dat het regionale watersysteem kwetsbaar is voor overvloedige regenval. De totale financiële schade bedroeg destijds circa € 0.5 miljard.



Figuur 1-1: Neerslaggebeurtenissen in het najaar van 1998 (24-uur som): 13 september 1998 (a) en 27 oktober 1998 (b).

De wateroverlast die in die periode ontstond is voor de waterbeheerders in Nederland aanleiding geweest de discussie op gang te brengen over de eisen die aan de waterhuishouding moeten worden gesteld. Centrale vraag in de discussie is in welke mate het regionale waterhuishoudkundige systeem in ons land bescherming biedt tegen wateroverlast door extreme neerslag (Kok et al., 2000; STOWA, 2001).

Door het stellen van normen voor de regionale watersystemen zijn de beheerders in staat om een duidelijk beeld van de te bieden bescherming te geven. Normen voor de waterhuishouding geven de gewenste prestaties van watersystemen en geven weer tot in welke mate mag worden verwacht dat een watersysteem extreme neerslag kan verwerken, zonder dat er zich problemen van wateroverlast voordoen. In het Nationaal Bestuursakkoord Water (NBW) zijn werknormen vastgesteld zoals weergegeven in Tabel 1-1.

Normklasse gerelateerd aan grondgebruikstype	Maaiveldhoogte- criterium ¹ (%)	Werknorm (1/jaar)
Grasland	5%	1/10 jaar
Akkerbouw	1%	1/25 jaar
Hoogwaardige land- en tuinbouw	1%	1/50 jaar
Glastuinbouw	1%	1/50 jaar
Bebouwd gebied	0%	1/100 jaar

Tabel 1-1: *Werknormen. ¹ Het maaiveldhoogtecriterium bepaalt het referentievlak ten opzichte waarvan het basis werk criterium wordt uitgedrukt, in procenten van het landgebruik in het watersysteem.*

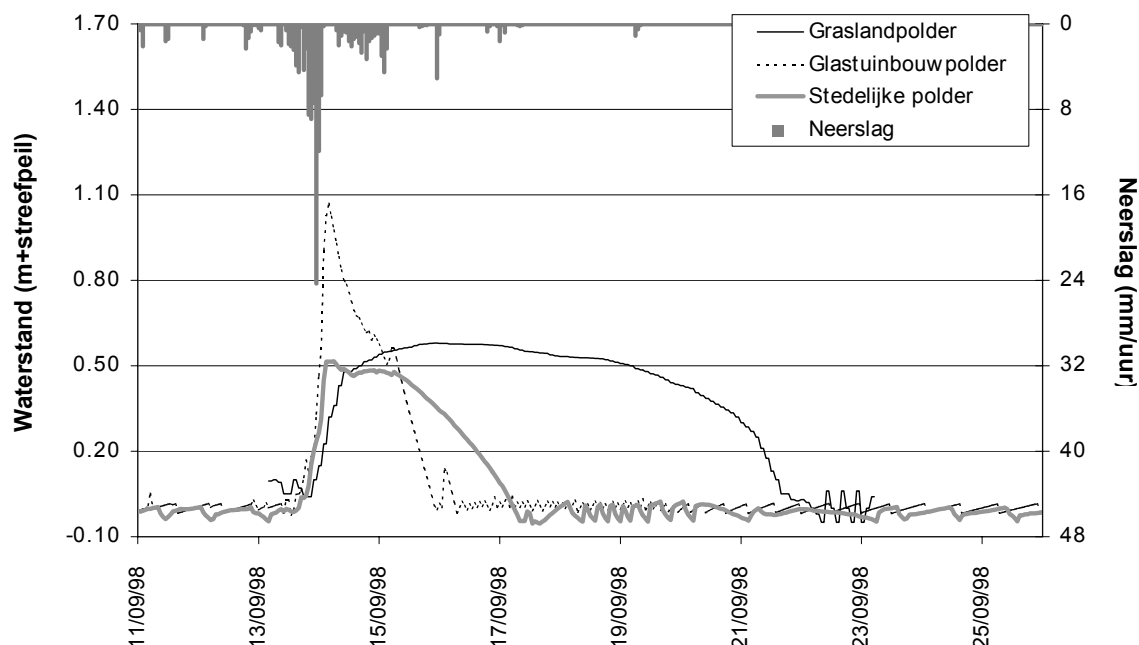
Om dergelijke normen te kunnen toepassen is een gedegen neerslagstatistiek onmisbaar. Deze neerslagstatistiek kan door de waterbeheerder worden gebruikt voor het ontwerpen en toetsen van regionale watersystemen. De momenteel in gebruik zijnde neerslagstatistiek is grotendeels gebaseerd op een publicatie uit 1980, waarbij gegevens van De Bilt uit het tijdvak 1906-1977 geanalyseerd zijn. De vraag kan gesteld worden of de nieuwe neerslaggegevens in het tijdvak 1978-2003 en verbeterde analysemethoden leiden tot een aangepaste neerslagstatistiek. Ook bestaat de vraag in hoeverre de statistiek van De Bilt representatief is voor geheel Nederland. In opdracht van de STOWA hebben HKV [LIJN IN WATER](#) en het KNMI een definitiestudie uitgevoerd naar de neerslagstatistiek die voor het waterbeheer van belang is. In deze definitiestudie zijn de wensen en mogelijkheden voor het afleiden van een nieuwe neerslagstatistiek geformuleerd (Kok et al., 2002). Door beperkingen in het beschikbare budget wordt in dit onderzoek een deel van de wensen uitgevoerd. De nadruk ligt op de neerslagstatistiek van De Bilt (met zowel kortere als langere neerslagduren dan 24 uur). Ook wordt onderzocht in hoeverre de statistiek van De Bilt representatief is voor andere lokaties in Nederland. In het onderzoek zal kort aandacht besteed worden aan mogelijke trends in de (historische) neerslaggegevens door klimaatveranderingen en worden mogelijke klimaatscenario's besproken.

1.2 Probleemanalyse

Binnen een waterhuishoudkundig systeem komen vaak verschillende typen grondgebruik voor, zoals bebouwd (stedelijk) gebied, glastuinbouw, akkerbouw en grasland. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen langzaam en snel reagerende systemen. Onder snel reagerende systemen worden bijvoorbeeld glastuinbouwgebied en stedelijk gebied verstaan, terwijl graslandgebied een voorbeeld is van een langzaam reagerend systeem. Akkerbouwgebied ligt hier meestal tussen. Voor de snel reagerende systemen blijkt een korte periode van enkele uren tot enkele dagen met veel neerslag vaak belangrijk te zijn (hoge intensiteit), terwijl voor de traag reagerende systemen veelal een gebeurtenis gespreid over meerdere dagen belangrijk is (lage intensiteit). In [Figuur 1-2](#) zijn voor een drietal polders reeksen van waterstanden opgenomen: een polder met als overwegend grondgebruik glastuinbouw, een polder met overwegend grasland en een hoofdzakelijk stedelijke polder, alle drie tijdens dezelfde extreme neerslaggebeurtenis van september 1998.

In de figuur is te zien dat de duur van een overschrijding van streefpeil in de graslandpolder veel langer is dan de duur van de overschrijding in de glastuinbouwpolder of de stedelijke polder. Daarentegen is de maximale overschrijding ten opzichte van de glastuinbouwpolder lager. Voor snel reagerende systemen zoals een glastuinbouwgebied heeft een neerslagduur van meerdere dagen een beperkte waarde, terwijl voor een graslandgebied juist langere neerslagperioden maatgevend kunnen zijn. Omdat veel watersystemen uit een combinatie van snel en traag reagerende systemen bestaan en omdat bovendien veel waterhuishoudkundige systemen (en de modellen van dergelijke watersystemen) complex zijn is de bepaling van één vaste maatgevende

duur voor alle watersystemen niet mogelijk. We leiden daarom neerslagstatistiek af voor verschillende duren, van minimaal 4 uur tot maximaal 9 dagen. De statistiek wordt bepaald voor verschillende overschrijdingsfrequenties, van gemiddeld 10x per jaar tot gemiddeld 1x per 1000 jaar. De relatief hoge frequenties zijn onder andere van belang voor ontwerpbeslissingen en vaak voorkomende gebeurtenissen, terwijl de relatief lage frequenties onder andere van belang zijn voor het toetsen van het watersysteem aan de NBW-normen.



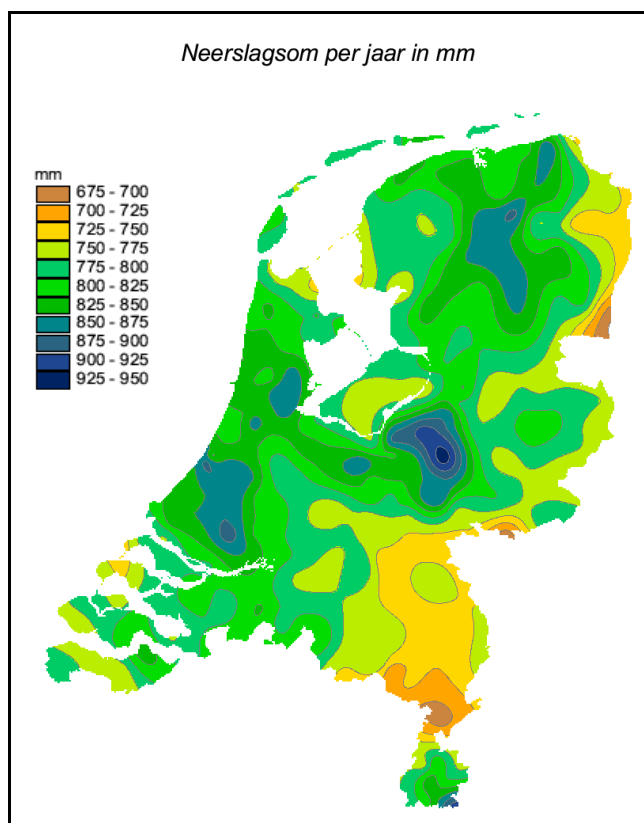
Figuur 1-2: Tijdreeksen van waterstanden (m) ten opzichte van streefpeil in drie verschillende watersystemen met bijbehorende neerslaghoeveelheden (mm per uur).

Bij de berekening van waterstanden met behulp van neerslag-afvoer modellen is niet alleen de duur van de neerslaggebeurtenis met bijbehorend volume van belang, maar ook de manier waarop de neerslag over de tijd is verdeeld. Een neerslaggebeurtenis die uniform verdeeld over een dag valt zorgt in een watersysteem veelal voor minder wateroverlast dan een gebeurtenis waarin een duidelijke piek gedurende deze dag voorkomt. De verdeling van de neerslag binnen een neerslaggebeurtenis, gegeven een neerslagvolume, wordt in het vervolg van dit onderzoek het neerslagpatroon genoemd.

In de huidige praktijk wordt voor de extreme neerslagstatistiek Tabel 1-2 gehanteerd, zoals deze door het KNMI is opgesteld. In deze tabel staan de neerslaghoeveelheden die gemiddeld 10x per jaar tot 1x per 100 jaar worden overschreden voor gebeurtenissen met duren van 5 minuten tot 10 dagen. Uit de tabel blijkt bijvoorbeeld dat een hoeveelheid van 50 mm in 12 uur tijd gemiddeld eens per 20 jaar wordt overschreden. De tabel is gebaseerd op statistisch onderzoek dat voornamelijk in de jaren 70 is verricht en gepubliceerd in Buishand en Velds (1980) en Buishand (1983a), aangevuld met onderzoek dat eind tachtiger jaren is verricht aan de zogenaamde kwartiersomreeksen (Buishand et al., 1991). De tabel is afgeleid uit neerslaggegevens van De Bilt, waarvan jaarmaxima en partiële duurreksen (peak-over-threshold reeksen) zijn geanalyseerd.

	Minuten				Uren				Dagen			
	5	15	30	60	2	6	12	24	2	4	7	10
10x per jaar	-	3	4	5	7	11	13	16	20	-	-	-
5x per jaar	-	4	6	7	10	14	17	21	28	-	-	-
2x per jaar	4	7	8	10	13	18	22	28	35	42	54	65
1x per jaar	6	9	12	14	17	23	27	34	41	51	64	77
1x per 2 jaar	7	12	15	18	22	28	33	40	48	59	74	89
1x per 5 jaar	9	15	19	23	27	34	39	48	56	70	87	104
1x per 10 jaar	10	18	23	27	31	39	45	53	63	79	97	116
1x per 20 jaar	12	21	26	30	35	44	50	59	69	87	106	127
1x per 50 jaar	14	24	30	36	41	50	57	67	78	98	119	143
1x per 100 jaar	15	27	34	39	45	55	62	73	85	106	129	154

Tabel 1-2: Neerslaghoeveelheden (mm) uit de reeks (1906-1977) voor het gehele jaar in De Bilt, voor durren van 5 minuten tot 10 dagen voor herhalingsstijden van 10 keer per jaar tot 1 keer per 100 jaar. Bron: Buishand en Velds (1980), Buishand (1983a) en Buishand et al. (1991).



Figuur 1-3: Gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid neerslag (1971-2000).

De resultaten voor durren van 24 uur of langer worden in de huidige praktijk gebruikt voor plaatsen met een gemiddelde neerslagsom per jaar tussen 750 en 900 mm. In Figuur 1-3, waarin de gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid neerslag is weergegeven, is te zien dat dit het grootste deel van het land betreft. Voor andere plaatsen kan, volgens de huidige praktijk, de tabel worden toegepast nadat een kleine correctie (maximaal 10%) is uitgevoerd op basis van de verschillen in de gemiddelde jaarsom.

De kwaliteit van de neerslagstatistiek is sterk afhankelijk van de lengte van deze reeksen; in het algemeen neemt de betrouwbaarheid van de statistiek toe met toenemende reekslengte. De huidige beschikbare statistiek maakt geen gebruik van de gegevens van de afgelopen 26 jaar. In dit onderzoek wordt dan ook, naast het evalueren van diverse analysemethoden, de vraag beantwoord of het benutten van deze extra gegevens tot een significant andere statistiek leidt.

1.3 Afbakening

In dit onderzoek wordt aandacht besteed aan neerslagstatistiek die van belang is voor het ontwerpen en toetsen van regionale watersystemen in Nederland. Er wordt met name aandacht besteed aan extreme natte situaties, en er wordt geen aandacht besteed aan de droogteproblematiek. Het onderzoek richt zich op het afleiden van statistiek voor De Bilt voor neerslaggebeurtenissen van 4 uur tot maximaal 9 dagen. De meeste aandacht gaat uit naar zogenaamde 'jaarstatistiek', maar er is ook aandacht voor statistiek van seizoenen, waaronder het 'groeiseizoen' (in deze studie gedefinieerd als de periode maart-oktober). Tevens wordt aandacht besteed aan de variabiliteit van neerslag binnen een gebeurtenis met behulp van patronen. De overschrijdingsfrequenties worden afgeleid voor 10x per jaar tot 1x per 1000 jaar (zie ook Paragraaf 1.4). Daarnaast wordt aangegeven in welke mate de statistiek voor De Bilt representatief is voor Nederland. Voor het afleiden van de statistiek in De Bilt wordt gebruik gemaakt van tijdreeksen met uurhoeveelheden. Uit deze reeks zijn de neerslaghoeveelheden voor langere duran afgeleid. Omdat de nadruk in deze studie ligt op niet-verstedelijkt gebied worden kortere duran niet beschouwd. Hiervoor zou ook gebruik moeten worden gemaakt van gegevens met een kortere tijdschaal dan de uurhoeveelheden (bijvoorbeeld kwartierhoeveelheden of 5-minuuthoeveelheden). Voor de analyse van de overige lokaties is gebruik gemaakt van daghoeveelheden. Uitgangspunt bij het afleiden van de neerslagstatistiek is het zoveel mogelijk gebruiken van hetzelfde type kansverdeling voor de verschillende duran. Reden voor dit uitgangspunt is dat het op deze manier eenvoudiger is om statistiek te verkrijgen die 'consistent' is. Hiermee wordt bedoeld dat de neerslaghoeveelheden toenemen naarmate de duur van de gebeurtenis langer wordt of naarmate de gebeurtenis extremer wordt.

1.4 Produkt

In dit onderzoek is allereerst verkend of er een trend aanwezig is in extreme neerslaggegevens van de afgelopen 100 jaar vanwege klimaatontwikkelingen. Op basis hiervan en met behulp van nieuwe inzichten en gegevens wordt Tabel 1-2 aangepast. Echter, resultaten met duran korter dan 4 uur worden in dit onderzoek niet gepresenteerd. Tabel 1-3 zal worden gevuld met de nieuwe neerslaghoeveelheden die ook wel 'terugkeerniveaus' worden genoemd. Onder terugkeerniveau wordt verstaan de neerslaghoeveelheid bij een bepaalde overschrijdingsfrequentie en bij een bepaalde duur van de neerslaggebeurtenis.

Zowel jaarstatistiek als seizoensstatistiek wordt afgeleid. Bij de seizoensstatistiek is gekozen voor een onderverdeling in het groeiseizoen (de maanden maart-oktober) en de periode buiten het groeiseizoen (november-februari). Daarnaast is statistiek afgeleid voor de twee-maandelijkse oogstperiode september-oktober. Om een indicatie te krijgen van de representativiteit van de statistiek voor De Bilt is in dit onderzoek een verkenning uitgevoerd naar de statistiek van andere lokaties dan De Bilt. Gekozen is voor een 10-tal lokaties verspreid over geheel Nederland. Tot slot worden karakteristieke neerslagpatronen op uurbasis afgeleid voor neerslaggebeurtenissen van 1, 2, 4 en 8 dagen.

	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar						-	-	-
5x per jaar								
2x per jaar								
1x per jaar								
1x per 2 jaar								
1x per 5 jaar								
1x per 10 jaar								
1x per 20 jaar								
1x per 25 jaar								
1x per 50 jaar								
1x per 100 jaar								
1x per 200 jaar								
1x per 500 jaar								
1x per 1000 jaar								

Tabel 1-3: Neerslaghoeveelheden (mm) voor verschillende overschrijdingsfrequenties en voor verschillende uren van de neerslaggebeurtenis.

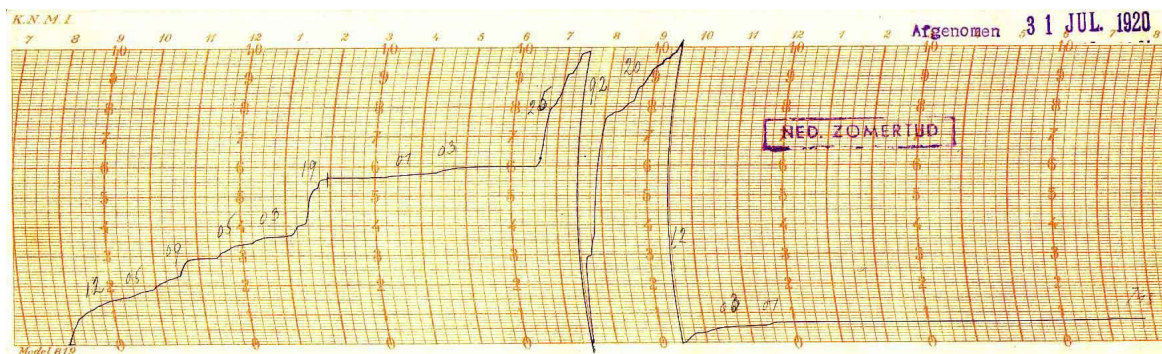
1.5 Indeling van het rapport

In Hoofdstuk 2 wordt een overzicht gegeven van de herkomst van de neerslaggegevens die zijn gebruikt. Ook wordt aangegeven hoe de extreme neerslaggegevens uit de tijdreeks zijn geselecteerd voor twee verschillende soorten van analyses die in dit onderzoek worden toegepast: de 'jaarmaxima'-methode (gebaseerd op kalenderjaren of seizoenen, en waar het maximum gekozen wordt in het kalenderjaar of seizoen) en de 'peak-over-threshold'-methode (onafhankelijke overschrijdingen van een vaste drempelwaarde tijdens de gehele neerslagreeks). In Hoofdstuk 3 wordt beschreven hoe de in deze studie afgeleide neerslagstatistiek moet worden gezien in het licht van een mogelijk veranderend klimaat. In dit hoofdstuk wordt ook besproken in hoeverre trends aanwezig zijn in de neerslagreeks 1906-2003. In Hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op de methode voor het afleiden van jaarstatistiek van 4-, 8-, 12- en 24-uurs neerslaghoeveelheden van De Bilt en worden uitkomsten van de analyses gepresenteerd. Hoofdstuk 5 behandelt op eenzelfde manier als de methode in Hoofdstuk 4 de jaarstatistiek van 2-, 4- en 8-daagse neerslaghoeveelheden. In Hoofdstuk 6 wordt vervolgens de uiteindelijke jaarstatistiek afgeleid voor alle uren en wordt de tabel gepresenteerd met de nieuwe jaarstatistiek. De methode die in dit hoofdstuk is beschreven is tevens de basis voor de afleiding van de (groei)seizoensstatistiek (Hoofdstuk 7). De methode wordt ook gebruikt in Hoofdstuk 8 om de representativiteit van de statistiek voor Nederland te onderzoeken. Omdat voor het waterbeheer ook van belang is hoe de neerslag valt binnen een neerslaggebeurtenis, gaat Hoofdstuk 9 in op patronen van de neerslag in de tijd.

2 Neerslaggegevens

2.1 Herkomst

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van neerslaggegevens van het meteorologisch station De Bilt over het tijdvak 1906-2003. Voor het tijdvak 1906 tot 1 maart 1993 zijn de waarden afkomstig van een pluviograaf. Waarden vanaf 1 maart 1993 zijn afkomstig van de elektrische regenmeter. De pluviograaf is een zelfregistrerende regenmeter waarbij met een pen de hoeveelheid neerslag op een strook wordt geregistreerd die om een ronddraaiende trommel is gespannen. De neerslag wordt opgevangen in een verzamelbak die na elke 10 mm automatisch door een hevelsysteem wordt geleegd. Een voorbeeld van een neerslagstrook is weergegeven in Figuur 2-1. De figuur laat een dag zien in 1920 waarop op een groot deel van de dag neerslag is gevallen, te zien aan de stijgende lijn op vooral het eerste deel van de figuur. Zichtbaar zijn getallen die achteraf op de strook zijn geregistreerd en overeenkomen met de neerslaghoeveelheden van het afgelopen uurvak. Ook is te zien aan de (enigszins gekromde) verticale lijnen dat op deze dag de verzamelbak twee keer geleegd is. Bij de elektrische regenmeter wordt met behulp van een vlotter in een meetvat de hoeveelheid neerslag die is gevallen gemeten. Elke 12 seconden wordt het vat geleegd en de hoeveelheid neerslag wordt bepaald aan de hand van de stand van de vlotter, welke verbonden is met een potentiometer. Voor meer details over de regenmeters zie Benschop (2000). Uit de continue registraties van zowel de elektrische regenmeter als de pluviograaf zijn uurwaarden afgeleid die de basis vormen van de analyses van dit onderzoek. Tot en met 1950 vindt aflezing plaats op elk heel uurvak volgens de toenmalige Nederlandse Tijd (NT), vanaf 1951 op elk heel uurvak volgens Universal Time (UT). Tussen NT en UT bestaat een verschil van 20 minuten.



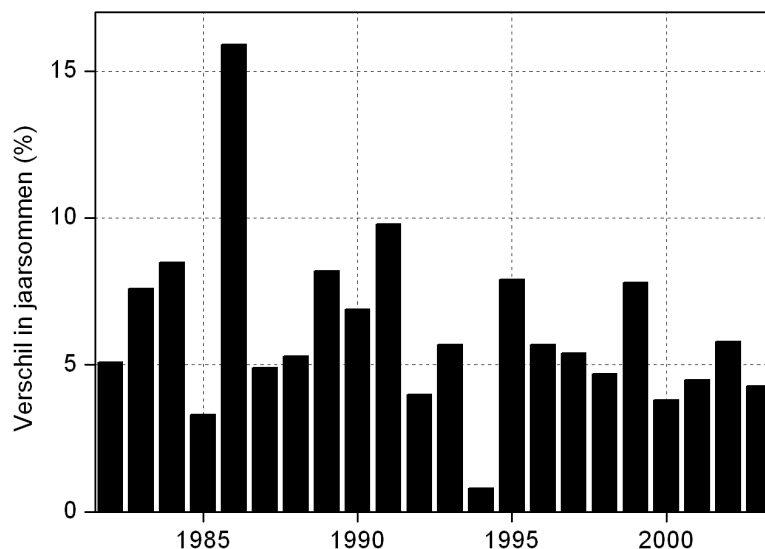
Figuur 2-1: Registratiestrook van een pluviograaf afgenomen op 31 juli 1920.

In dit onderzoek wordt tevens gebruik gemaakt van neerslaggegevens van een tiental andere lokaties dan station De Bilt (zie Paragraaf 2.4.3). Dit betreft dagelijkse aftappingen van handregenmeters die plaatsvinden om 8 uur UT. Voor een objectief vergelijk met de overige lokaties en voor kalibratiedoeleinden (zie Paragraaf 2.2) worden ook de aftappingen van de handregenmeter van De Bilt gebruikt.

2.2 Kalibratie naar handregenmeter

Bekend is dat standaard handregenmeters die eenmaal per dag worden geleegd nauwkeuriger neerslaghoeveelheden registreren dan de pluviograaf en de elektrische regenmeter. Dit komt onder meer door verdampingsfouten als gevolg van het verwarmingselement in de pluviograaf en

de elektrische regenmeter en de minder gunstige aërodynamische vorm van deze twee regenmeters ten opzichte van de standaard handregenmeter (Buishand en Velds, 1980). Gemiddeld gezien zijn daardoor de met de pluviograaf en elektrische regenmeter gemeten hoeveelheden structureel lager dan de hoeveelheden afgetapt met behulp van de handregenmeter (Colenbrander en Stol, 1970; Bruin, 2002). Het effect van het verschil in aërodynamica is het grootst bij hoge windsnelheden. Voor station De Bilt zijn de verschillen in jaarsommen tussen de pluviograaf en de gewone handregenmeter vanaf 1982 weergegeven in Figuur 2-2. Duidelijk is te zien dat 1986 het jaar is met het grootste relatieve verschil. Dit is tevens het jaar in dit tijdvak met gemiddeld de hoogste windsnelheid en verklaart voor een belangrijk deel het grote verschil tussen de pluviograaf en de handregenmeter in dat jaar.



Figuur 2-2: Verschillen in jaarneerslag tussen de handregenmeter en de pluviograaf van De Bilt vanaf 1982.

De uursommen van de pluviograaf en de elektrische regenmeter zijn zo gecorrigeerd dat de etmaalhoeveelheden hiervan volledig overeenkomen met de dagaftappingen van de handregenmeter volgens de methode Buishand (1988).

2.3 Selectie van onafhankelijke neerslagextremen

Voor een verantwoorde statistische analyse van neerslagextremen moet worden gekeken naar onafhankelijke gebeurtenissen. Hiermee worden gebeurtenissen bedoeld waarvan de tijd die tussen twee opeenvolgende gebeurtenissen zit dusdanig lang is dat deze gebeurtenissen fysisch gezien niet direct met elkaar in verband staan. In deze studie worden twee verschillende soorten van onafhankelijke neerslagextremen geanalyseerd: jaarmaxima en peak-over-threshold waarden (POT-waarden).

2.3.1 Jaarmaxima

Jaarmaxima zijn gebaseerd op kalenderjaren of seizoenen. Binnen elk jaar of seizoen wordt gezocht naar het maximum voor de betreffende neerslagduur. In dit rapport zijn de jaarmaxima van 4-, 8-, 12- en 24-uurs neerslaghoeveelheden geanalyseerd, evenals de 2-, 4- en 8-daagse neerslaghoeveelheden (respectievelijk 48-, 96- en 192-uursommen).

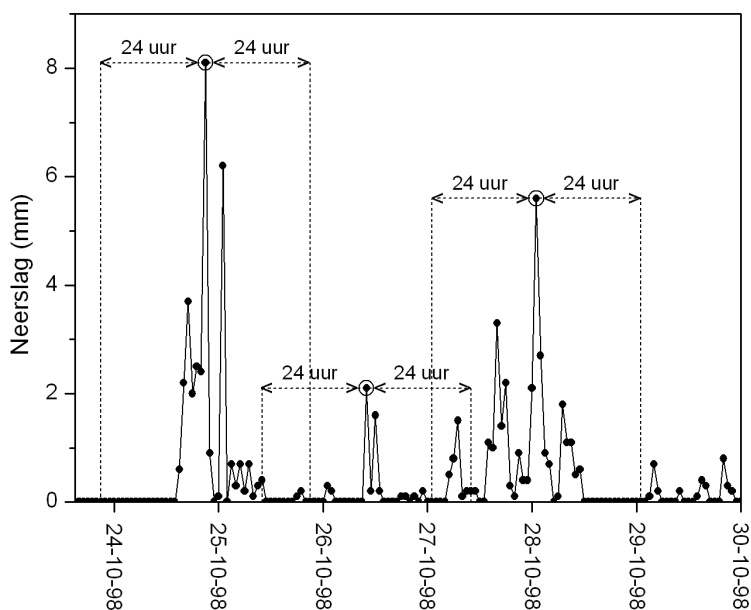
2.3.2 Peak-over-threshold waarden

POT-waarden worden geselecteerd uit de oorspronkelijke tijdreeks door te kijken naar overschrijdingen van een vaste drempel. Daarbij wordt een filter toegepast om onafhankelijkheid tussen neerslaggebeurtenissen te garanderen. In dit rapport zijn alleen de neerslaggebeurtenissen met tenminste 24 uur tussen de gebeurtenissen geselecteerd.

De eerste stap in de procedure is de selectie van onafhankelijke gebeurtenissen. Vervolgens wordt de drempel opgelegd. Deze volgorde zorgt ervoor dat de selectie van onafhankelijke gebeurtenissen niet wordt beïnvloed door de drempelhoogte. Een soortgelijke procedure is toegepast door het Waterloopkundig Laboratorium en het European-American Center for Policy Analysis/Rand (1993) voor de analyse van piekafvoeren. Hierbij zijn de afvoeren van de Rijn met 15 dagen onafhankelijkheid en de Maas met 8 dagen als onafhankelijkheid gefilterd.

Evenals bij de selectie van jaarmaxima wordt de selectieprocedure voor POT-waarden niet alleen toegepast op het hele jaar maar ook op bepaalde seizoenen/maanden van het jaar.

Een voorbeeld van de selectieprocedure is weergegeven in Figuur 2-3, waar voor een zesdaagse tijdvak drie neerslaggebeurtenissen (met de duur van 1 uur) worden geselecteerd uit de reeks van uurlijkse neerslaghoeveelheden van De Bilt.



Figuur 2-3: Selectieprocedure voor gebeurtenissen in het tijdvak 24-30 oktober 1998. In dit tijdvak worden drie gebeurtenissen geselecteerd met tenminste 24 uur verschil tussen de gebeurtenissen. Het betreffen uursommen van De Bilt.

Een belangrijk voordeel van de POT-waarden ten opzichte van jaarmaxima is dat met de POT-waarden doorgaans meer neerslaggebeurtenissen per jaar worden geselecteerd (afhankelijk van de hoogte van de drempel). Door de grotere hoeveelheid data die wordt meegenomen levert dit in principe betrouwbaardere resultaten op. Er zijn echter ook nadelen verbonden aan het gebruik van POT-waarden. Zo moet er een drempel worden gekozen en moet er een keuze gemaakt worden over de tijd tussen gebeurtenissen om ze onafhankelijk te maken. Dergelijke keuzes hebben invloed op de kansverdelingen en de uiteindelijke overschrijdingsfrequenties. Bij de jaarmaxima speelt het probleem van de onafhankelijkheid van gebeurtenissen niet waardoor de afleiding van de overschrijdingsfrequenties in dat opzicht eenduidiger wordt.

2.4 Waarnemingen

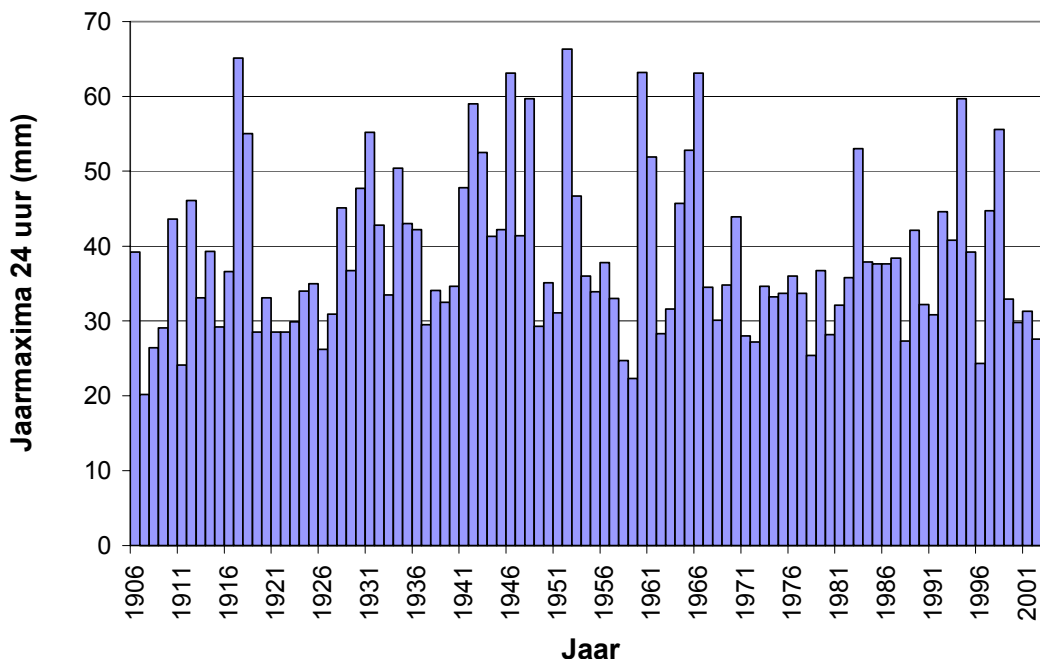
2.4.1 De Bilt - jaar

In Tabel 2-1 zijn de 10 hoogste jaarmaxima te De Bilt weergegeven over het tijdvak 1906-2003 voor durren van 4 uur, 24 uur, 4 dagen en 8 dagen. De tien hoogste POT-waarden komen voor de durren korter dan 4 dagen overeen met de tien hoogste jaarmaxima. Bij de durren 4 dagen en 8 dagen treden echter verschillen op tussen de jaarmaxima en POT-waarden. Ten opzichte van de jaarmaxima zijn bij de POT-waarden voor een duur van 8 dagen twee afwijkende neerslaggebeurtenissen geselecteerd, namelijk gebeurtenissen in maart en oktober 1998 met respectievelijk een neerslaghoeveelheid van 109.3 mm en 129.0 mm (respectievelijk de 3^{de} en 2^{de} hoogste 8-daagse neerslagsom van 1998). De neerslaggebeurtenis van oktober 1998 komt ook voor in de hoogste tien POT-waarden voor een duur van 4 dagen met een neerslaghoeveelheid van 81.4 mm.

Rang	Datum (dd-mm-jjjj)	Neerslag 4 uur (mm)	Datum (dd-mm-jjjj)	Neerslag 24 uur (mm)	Datum (dd-mm-jjjj)	Neerslag 4 dagen (mm)	Datum (dd-mm-jjjj)	Neerslag 8 dagen (mm)
1	06-06-1961	50.8	03-07-1952	66.3	12-10-1960	111.3	08-06-1998	130.3
2	03-07-1952	48.7	01-08-1917	65.1	01-08-1917	94.6	25-08-1912	128.3
3	19-07-1966	47.5	12-10-1960	63.2	05-03-1998	90.3	19-07-1987	122.2
4	13-06-1953	46.5	08-02-1946	63.1	25-08-1912	85.2	01-12-1961	116.6
5	02-08-1948	43.4	19-07-1966	63.1	20-10-1986	84.8	10-10-1960	115.2
6	06-06-1998	42.7	02-08-1948	59.7	19-07-1966	84.5	20-08-1969	111.7
7	06-06-1943	38.0	01-08-1994	59.7	26-11-1983	81.2	05-02-1946	109.0
8	05-08-1947	37.4	11-07-1942	59.0	08-02-1946	79.3	14-09-1957	105.9
9	07-05-1931	37.3	06-06-1998	55.6	22-08-1969	79.0	11-03-1981	105.0
10	27-06-1930	36.4	07-05-1931	55.2	10-03-1981	79.0	22-10-1986	104.7

Tabel 2-1: De 10 hoogste jaarmaxima van neerslaghoeveelheden in De Bilt bij een duur van 4 en 24 uur en 4 en 8 dagen over het tijdvak 1906-2003.

In Figuur 2-4 zijn de jaarmaxima van neerslaghoeveelheden van De Bilt uitgezet met een duur van 24 uur. In de figuur is de sterke variabiliteit in jaarmaxima te zien. De hoogste hoeveelheid is 66.3 mm, terwijl er ook jaren zijn met een maximale neerslag in 24 uur van rond de 25 mm.



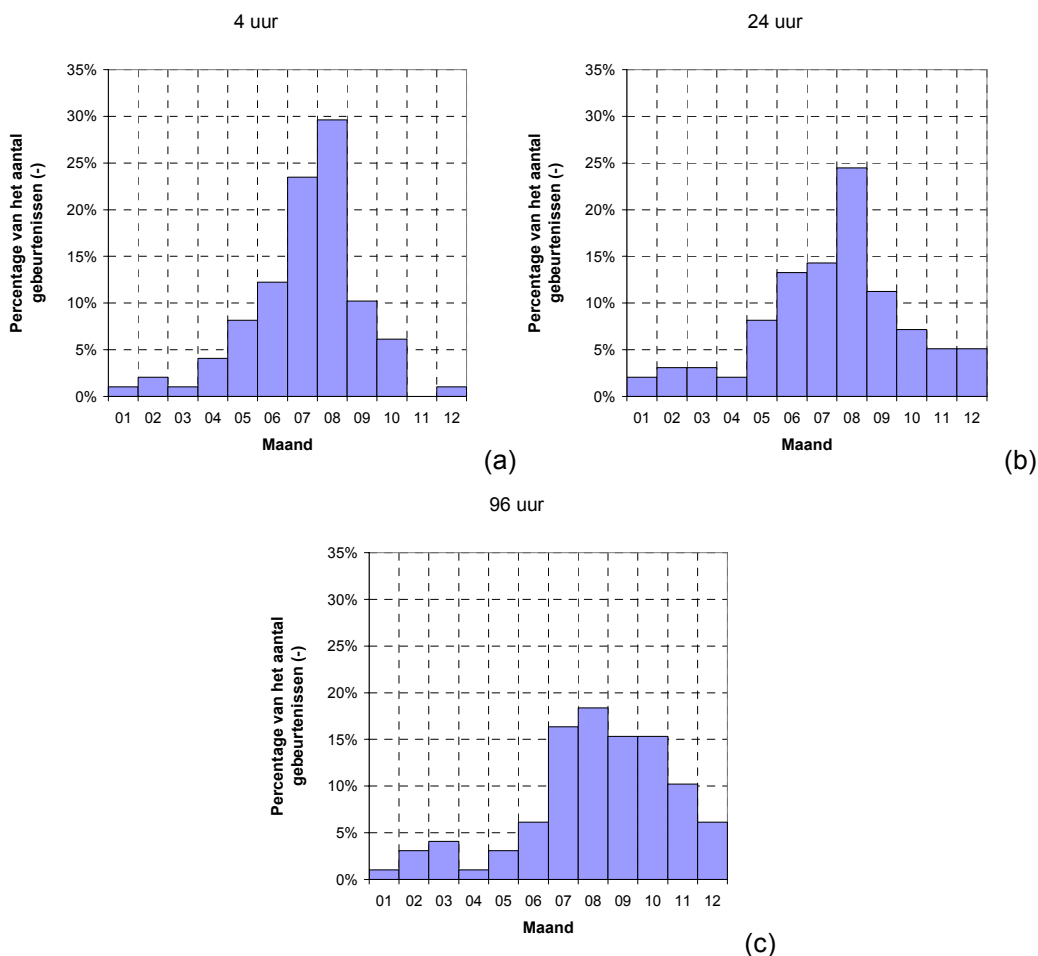
Figuur 2-4: Neerslaghoeveelheden van de jaarmaxima in De Bilt voor een duur van 24 uur over het tijdvak 1906-2003.

2.4.2 De Bilt - seizoenen

In deze studie wordt naast jaarstatistiek ook seizoensstatistiek voor 3 perioden afgeleid:

1. Maart tot en met oktober (gemiddeld genomen het groeiseizoen),
2. November tot en met februari (buiten het groeiseizoen),
3. September en oktober (gemiddeld genomen de oogstperiode).

In Figuur 2-5 is voor de durren van 4 uur, 24 uur en 4 dagen weergegeven in welke maand de jaarmaxima zijn geregistreerd (de eerste maand is overigens januari). Het blijkt dat bij de kortere durren het zwaartepunt van de jaarmaxima in juli en augustus ligt, de periode van de zomerse buien. Bij langere durren komen maxima meer verspreid voor, vooral over de periode juli tot en met oktober. Extreme neerslaggebeurtenissen treden nauwelijks op in de maanden december tot en met april. Verwacht wordt derhalve dat de statistiek voor de te beschouwen perioden van elkaar zal afwijken. Dit beeld verandert niet als in plaats van naar jaarmaxima naar POT-waarden wordt gekeken.



Figuur 2-5: Percentage van het aantal jaarmaxima per maand voor een duur van 4 uur (a), 24 uur (b) en 4 dagen (c) in De Bilt.

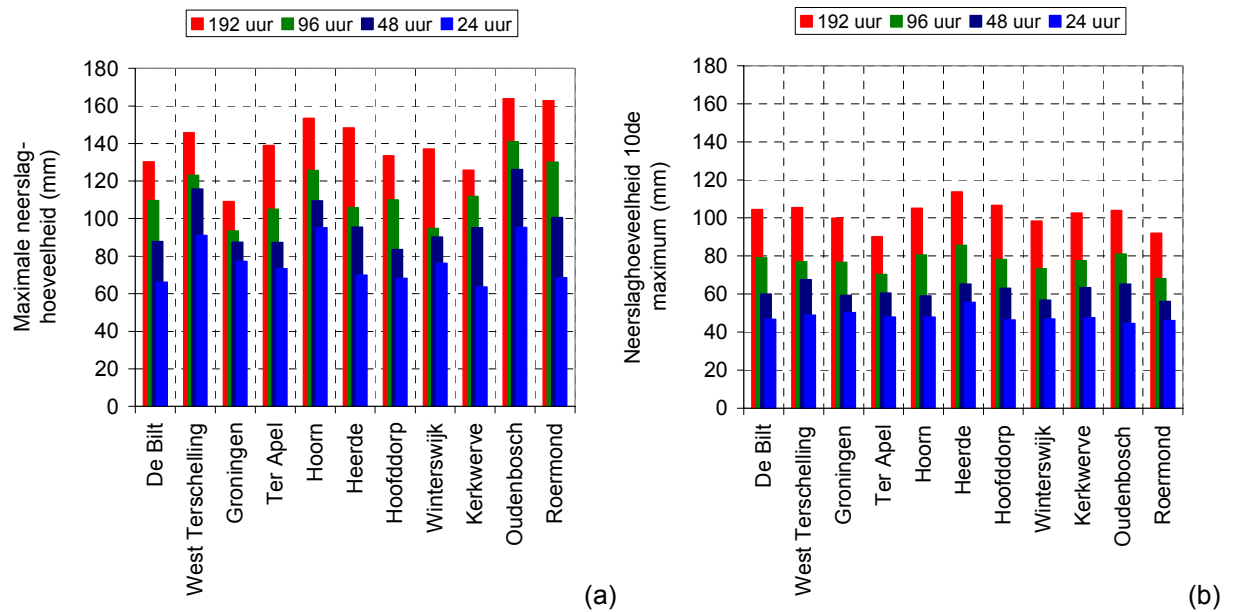
2.4.3 Overige lokaties

Naast statistiek voor station De Bilt wordt statistiek afgeleid voor een 10-tal andere KNMI-stations. Deze stations zijn vermeld in Figuur 2-6 en zijn gekozen op basis van spreidings- en kwaliteitseisen en de beschikbaarheid van gegevens. Evenals bij de afleiding van de statistiek voor De Bilt wordt gebruik gemaakt van neerslaggegevens over het tijdvak 1906-2003. Omdat van de betreffende stations geen urengegevens beschikbaar zijn (alleen voor De Bilt is een reeks met uurwaarden beschikbaar) is de statistische analyse gebaseerd op dagwaarden van de waarnemingen. Om station De Bilt te kunnen vergelijken met de overige stations is voor De Bilt de analyse nogmaals uitgevoerd gebaseerd op dagwaarden.



Figuur 2-6: KNMI-neerslagstations waarvoor een statistische analyse wordt uitgevoerd over het tijdvak 1906-2003.

In Figuur 2-7 zijn de op de stations waargenomen jaarmaxima voor duren van 1, 2, 4 en 8 dagen afgebeeld. In Figuur 2-7a is de variabiliteit van de maximaal waargenomen neerslaghoeveelheid op de stations duidelijk te zien. Voor een duur van 8 dagen varieert deze tussen 109 mm in Groningen en 164 mm in Oudenbosch. Omdat de maximale hoeveelheid een toevallige waarneming is kan daaruit echter niet worden geconcludeerd dat in Oudenbosch systematisch hogere extreme neerslag valt dan in Groningen. In Figuur 2-7b is daarom ter illustratie de 10^{de} grootste maximale neerslaghoeveelheid afgebeeld (bij 98 jaar waarnemingen overeenkomend met een herhalingsjijd van ongeveer 10 jaar). De verschillen tussen de neerslaghoeveelheden op de stations is bij deze waarnemingen al veel geringer. Wel blijkt dat bij duren langer dan één dag een grotere variatie in neerslaghoeveelheden tussen de stations wordt gevonden dan bij de korte duren.

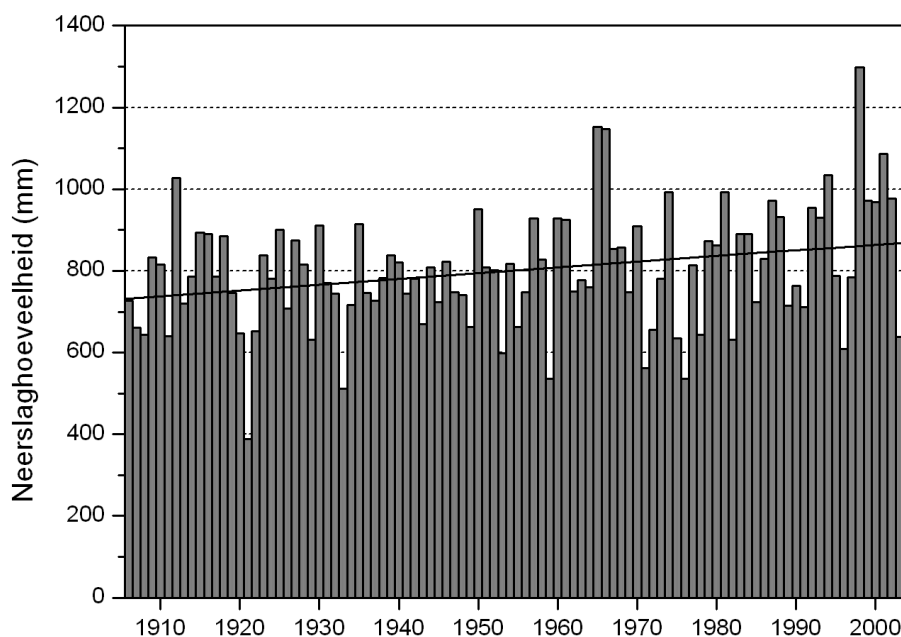


Figuur 2-7: Neerslaghoeveelheden van de jaarmaxima van de te beschouwen neerslagstations met een duur van 1, 2, 4 en 8 dagen voor de maximaal waargenomen hoeveelheid (a) en de 10de grootste maximaal waargenomen hoeveelheid (b).

3 Klimaatvariabiliteit en klimaatverandering

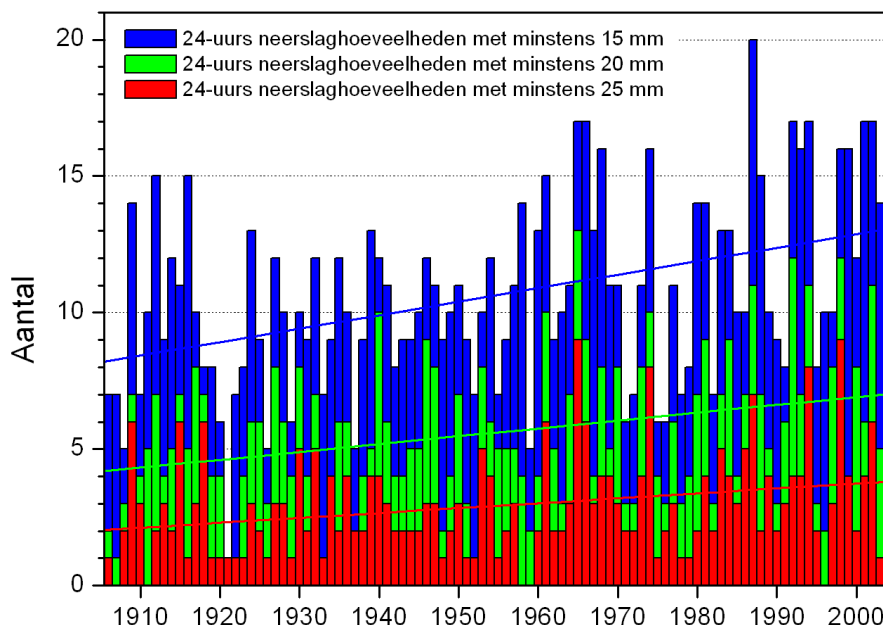
3.1 Twintigste eeuw

Neerslag heeft van nature een grillig karakter. Dit betekent dat er grote variaties kunnen optreden in ruimte en tijd. De jaarlijkse neerslaghoeveelheden voor De Bilt in Figuur 3-1 laten zien dat het verschil tussen de hoogste en laagste jaarsom ruim een factor 3 is. Hoewel de variabiliteit versluierend werkt op trends, is in de figuur een opgaande trend te zien. Deze trend is ook zichtbaar in de landelijk gemiddelde jaarlijkse neerslaghoeveelheid; de toename blijkt vooral afkomstig van het winterhalfjaar (Klein Tank en Sluijter, 2003). De trend in de reeks van De Bilt van 20% per eeuw is consistent met de bevindingen van het Intergovernmental Panel on Climate Change van de Verenigde Naties (IPCC, 2001) voor de 20^{ste} eeuw voor noordwest Europa.



Figuur 3-1: Jaarlijkse hoeveelheid neerslag voor De Bilt in het tijdvak 1906-2003. De zwarte lijn geeft de trend weer.

Trends in extreme gebeurtenissen hoeven echter niet in de pas te lopen met die in het gemiddelde. In de ECA (European Climate Assessment) studie is bijvoorbeeld gevonden dat de toename in de gemiddelde neerslag hoeveelheid niet voor alle Europese stations gepaard gaat met een evenredige toename in de extremen (Klein Tank et al., 2002). Ook trends in verschillende extreme gebeurtenissen hoeven niet hetzelfde beeld te geven. Om dit te illustreren is in Figuur 3-2 voor De Bilt het aantal dagen weergegeven per jaar met minimaal 15, 20 en 25 mm neerslag. In het voorkomen van deze gebeurtenissen zijn opgaande trends zichtbaar. Deze trends blijken significant te zijn wat het sterkst geldt voor de minst extreme gebeurtenissen, in dit geval het aantal dagen per jaar met 15 mm.



Figuur 3-2: Dagen met minstens 15, 20 en 25 mm (respectievelijk ± 11 , 6 en 3 keer per jaar) neerslag voor De Bilt in het tijdvak 1906-2003.

Tabel 3-1 laat het verschil in de overschrijdingsfrequenties voor De Bilt voor twee tijdvakken zien: 1906-1954 en 1955-2003. Opvallend is dat bij hogere overschrijdingsfrequenties er een duidelijke procentuele toename te zien is in het tweede tijdvak, terwijl voor de lagere overschrijdingsfrequenties deze toename kleiner wordt. We zien dus dat bij de iets vaker voorkomende extremen deze toename groter is dan bij de meer uitzonderlijke extremen. Dit is in lijn met de trends in Figuur 3-2.

Overschrijdingsfrequentie	Tijdvak		Verschil (%)
	1906-1954	1955-2003	
20x per jaar	9.6	10.7	11.5
10x per jaar	14.4	16.4	13.9
5x per jaar	19.8	21.6	9.1
2x per jaar	27.1	28.0	3.3
1x per jaar	32.8	33.2	1.2

Tabel 3-1: 24-uurs neerslaghoeveelheden (mm) voor de tijdvakken 1906-1954 en 1955-2003 voor verschillende overschrijdingsfrequenties. Deze zijn empirisch bepaald uit de waarnemingen van De Bilt. De laatste kolom geeft het relatieve verschil weer tussen de twee tijdvakken.

Alhoewel er verschillen gevonden zijn tussen de tijdvakken zijn deze klein genoeg om bij klimatologische studies verwaarloosd te worden. In het vervolg van dit rapport blijkt dat de gevonden verschillen in de deeltijdvakken vallen binnen de onzekerheid. Omdat die onzekerheid sterk afneemt, en de statistische betrouwbaarheid toeneemt, bij toenemende reekslengte gebruiken wij in deze studie alle gegevens voor het tijdvak 1906-2003 van De Bilt bij de bepaling van de overschrijdingsfrequenties.

3.2 Klimaatscenario's

Op het KNMI worden klimaatscenario's gemaakt voor impact studies in Nederland. De invloed van klimaatveranderingen op diverse aspecten van de neerslag in Nederland is voor het eerst uitvoerig uitgewerkt in een rapport ten behoeve van de Vierde Nota Waterhuishouding (Können et al., 1997). Naar aanleiding van de bevindingen in het 3^e Assessment Rapport van het IPCC (IPCC TAR) zijn die scenario's van het KNMI bijgesteld (Können, 2001). Voor neerslaggebeurtenissen met een herhalingstijd van 1, 10 en 100 jaar in het huidige klimaat geeft Tabel 3-2 de aangepaste herhalingstijd voor 4 klimaatscenario's. De daarin genoemde schattingen voor extreme neerslag in 2100 ten opzichte van 2000 voor de zogeheten drie "natte" scenario's zijn tot stand gekomen onder de aanname van ongewijzigde luchtcirculatiepatronen. Die aanname houdt in dat het Nederlandse weer gekenmerkt blijft door een grote natuurlijke variabiliteit en de frequentie van de verschillende weertypen niet verandert. Empirische relaties tussen de temperatuur en de neerslag liggen ten grondslag aan deze klimaatscenario's en leiden tot een toename van de gemiddelde neerslag. Daarnaast neemt in deze (natte) klimaatscenario's de gemiddelde neerslag in de winter sterker toe dan in de zomer (respectievelijk 6% en 1% per graad). Bij een vierde (droog) scenario dat door Können is opgesteld, is het verband tussen neerslag en temperatuur ontkoppeld. Dit scenario voorziet een zelfde temperatuurstijging als de hoge schatting, in combinatie met een afname van de gemiddelde neerslag met 10%. Een mogelijk mechanisme hiervoor is een structurele noordwaartse verschuiving van het subtropisch gebied van hoge luchtdruk in de richting van Centraal Europa.

Uit recente simulaties met (regionale) klimaatmodellen blijkt dat in een groot aantal van die modellen er, met name in de zomer, sprake is van uitdroging als gevolg van een sterke hydrologische terugkoppeling. Simpel gezegd neemt in dat soort modellen de neerslag af, waardoor de bodem uitdroogt wat tot een reductie van de hydrologische cyclus en dus de neerslag leidt. Geïnspireerd op dergelijke klimaatmodellen is ten behoeve van de droogtestudie Nederland door het KNMI een alternatief droog scenario (niet in Tabel 3-2) ontwikkeld (Beersma et al., 2004). In dit alternatief scenario neemt de zomerneerslag met ongeveer 20% af bij een temperatuur toename van gemiddeld 3°C in de zomer. In de winter toont dit scenario grote overeenkomsten met de centrale schatting.

	Lage schatting nat	Centrale schatting nat	Hoge schatting nat	Hoge schatting droog
Temperatuur	+1°C	+2°C	+4-6°C	+4-6°C
24-uurs neerslaghoeveelheid, NL (jaar)				
Procentuele verandering	+ 3 %	+ 6 %	+ 12 %	- 10 %
Herhalingstijd 1 jaar (34 mm)	0.9 jaar	0.8 jaar	0.65 jaar	1.6 jaar
Herhalingstijd 10 jaar (53 mm)	8 jaar	7 jaar	5 jaar	17 jaar
Herhalingstijd 100 jaar (73 mm)	78 jaar	62 jaar	40 jaar	200 jaar
10-daagse neerslaghoeveelheid, NL (winter)				
Procentuele verandering	+ 10 %	+ 20 %	+ 40 %	- 10 %
Herhalingstijd 1 jaar (62 mm)	0.7 jaar	0.5 jaar	0.3 jaar	1.5 jaar
Herhalingstijd 10 jaar (98 mm)	6 jaar	5 jaar	2 jaar	17 jaar
Herhalingstijd 100 jaar (136 mm)	47 jaar	25 jaar	9 jaar	200 jaar

Tabel 3-2: Invloed klimaatscenario's voor Nederland op herhalingstijden in 2100 (uit Können, 2001). Hierbij is voor berekening van de herhalingstijden uitgegaan van de tot nu toe in de praktijk gebruikte waarden (Tabel 1-2).

De bandbreedte van deze klimaatscenario's is hoog, en mede het gevolg van de onzekerheid in de groei van de wereldbevolking en de energieconsumptie per hoofd van de bevolking. Uit bovenstaande voorbeeld (Tabel 3-2) blijkt dan ook dat verschillende scenario's tot aanzienlijke wijzigingen in herhaaltijden/overschrijdingsfrequenties leiden. Om de grootte daarvan in te kunnen schatten en tot zo goed mogelijke kwantitatieve uitspraken te komen, is een goed uitgangspunt noodzakelijk. Hiervoor wordt in dit rapport de basis gelegd door de extremen statistiek in het huidige klimaat, inclusief de bijbehorende onzekerheden af te leiden. Vervolgens kan als deze 'nieuwe' statistiek gereed is doorgerekend worden welke invloed de verschillende scenario's dan hebben op de overschrijdingsfrequenties.

4 Jaarstatistiek van De Bilt: 4, 8, 12 en 24 uur

In dit hoofdstuk wordt de 4-, 8-, 12- en 24-uurs statistiek voor De Bilt besproken. In Paragraaf 4.1 wordt de statistiek op basis van jaarmaxima behandeld, in Paragraaf 4.2 op basis van POT-waarden. In beide paragrafen wordt eerst middels een Bayesiaanse analyse een eerste beschouwing gegeven van een aantal kansverdelingen. Op basis hiervan wordt een selectie van kansverdelingen vervolgens verder uitgewerkt om te bepalen welke kansverdeling het meeste geschikt is om de 4-, 8-, 12- en 24-uurs neerslaghoeveelheden te beschrijven. Bij de analyse van POT-waarden wordt tevens onderscheid gemaakt tussen lage en hoge overschrijdingsfrequenties.

4.1 Jaarmaxima

4.1.1 Bayesiaanse analyse

Er is vanuit de literatuur een groot aantal kansverdelingen bekend die kunnen worden gebruikt om extreme waarden te beschrijven. Om de geschiktheid van verdelingen te toetsen kunnen met behulp van een Bayesiaanse analyse gewichten worden toegekend aan de kansverdelingen. Deze gewichten geven een eerste indicatie in hoeverre een bepaalde kansverdeling geschikt is om de data te beschrijven. De gewichten tellen samen op tot één en het gewicht dat wordt toegekend aan een bepaalde verdeling geeft ten opzichte van de overige kansverdelingen een relatieve kwalificatie. Een korte toelichting bij de Bayesiaanse benadering is gegeven in Box A en voor details van deze methodiek zie Van Noortwijk et al. (2002).

Een belangrijk onderdeel in deze studie is het vaststellen van de kansverdeling van de neerslaghoeveelheid (uitgaande van een bepaalde duur). De keuze van het type kansverdeling en de parameters van de kansverdeling bepalen voor een groot deel de uitkomst van de analyse. Er zijn vanuit de statistiek meerdere principes beschikbaar waarmee men tot een keuze van de kansverdeling kan komen. Twee van deze methoden zijn de klassieke methode en de Bayesiaanse methode. In deze studie worden beide methoden gebruikt.

In de klassieke methode worden, gegeven het verdelingstype, de waarden van de parameters geschat, die vervolgens deterministisch worden verdisconteerd in de analyse. Met behulp van de parameterschattingen kan tevens een betrouwbaarheidsinterval worden afgeleid dat als indicatie kan dienen voor de onzekerheid in de schatting van de neerslaghoeveelheid.

In de Bayesiaanse methode worden daarentegen de parameters van de kansverdeling stochastisch verondersteld. Hierbij dragen alle parameterwaarden, met een bepaalde kans van optreden, bij aan de schatting van de neerslaghoeveelheid. Geeft men vervolgens elke kansverdeling hetzelfde gewicht dan wordt verondersteld dat elk van de gefitte kansverdelingen een zelfde kans heeft dat zij de data goed beschrijven. In de praktijk blijkt echter dat de ene kansverdeling meestal beter passend is dan een andere. Met behulp van de Bayesiaanse methode kan mede op basis van de kansverdeling van de parameterwaarden ook een schatting worden verkregen van het gewicht van de verschillende kansverdelingen. In deze studie wordt de bepaling van deze gewichten toegepast.

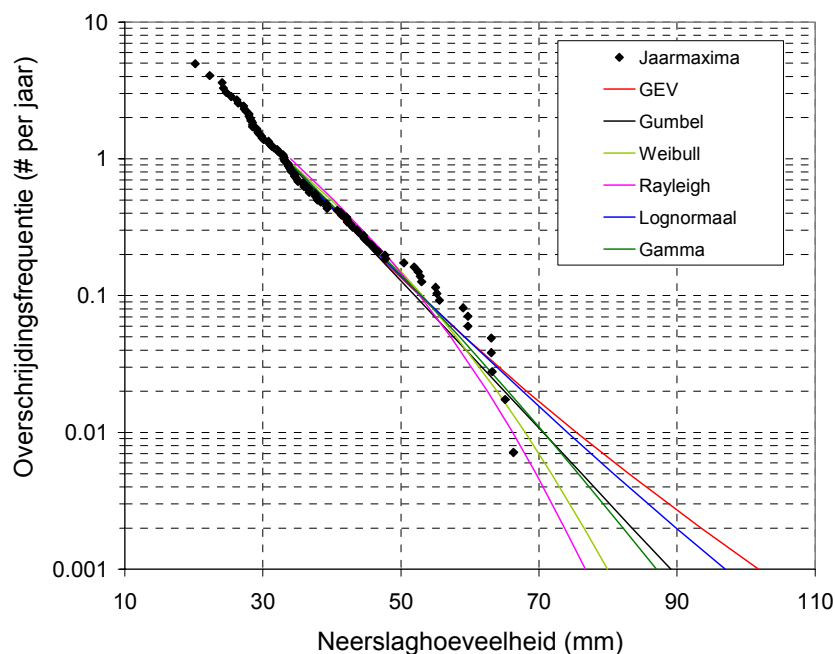
Box A Toelichting Bayesiaanse analyse.

In deze studie zijn met de Bayesiaanse analyse zes verdelingen getoetst die in potentie jaarmaxima van neerslaghoeveelheden zouden kunnen beschrijven. Het betreft de volgende verdelingen met tussen haakjes het aantal parameters van de desbetreffende verdeling:

- Gegeneraliseerde extreme waarde (GEV) verdeling (3),
- Gumbel verdeling (2),
- Weibull verdeling (2),
- Rayleigh verdeling (1),
- Lognormale verdeling (2),
- Gamma verdeling (2).

Hierbij moet opgemerkt worden dat twee van deze verdelingen speciale gevallen zijn van de andere genoemde verdelingen. Zo is de Gumbel verdeling een speciaal geval van de GEV verdeling en is de Rayleigh verdeling een speciaal geval van de Weibull verdeling. In beide gevallen is de vormparameter op een vaste waarde gezet en is er daardoor een vrijheidsgraad minder. Door de extra vormparameter (en dus vrijheidsgraad) worden de jaarmaxima middels respectievelijk de GEV en Weibull verdeling minstens zo goed gemodelleerd als wanneer respectievelijk de Gumbel en Rayleigh verdeling gebruikt worden. Dit betekent echter niet zonder meer dat het ook beter is om de GEV en Weibull verdeling te gebruiken in plaats van de Gumbel en Rayleigh verdeling, gezien de extra onzekerheid die hiermee gegenereerd wordt. De Bayesiaanse analyse houdt rekening met het aantal vrijheidsgraden en berekent derhalve niet per definitie een groter gewicht voor de GEV verdeling ten opzichte van de Gumbel verdeling en voor de Weibull verdeling ten opzichte van de Rayleigh verdeling.

De parameters van de verdelingen worden geschat met behulp van de methode van de grootste aannemelijkheid (Engels: maximum likelihood estimation (MLE), zie bijvoorbeeld Edwards, 1972). De zes geschatte verdelingen zijn voor de neerslaghoeveelheden met een duur van 24 uur weergegeven in Figuur 4-1. In deze figuur zijn tevens de jaarmaxima te De Bilt voor het tijdvak 1906-2003 weergegeven met behulp van zogenaamde plotposities (zie Box B).



Figuur 4-1: Verdelingen voor de jaarmaxima van 24-uurs neerslaghoeveelheden in De Bilt.

Om jaarmaxima grafisch weer te kunnen geven op waarschijnlijkheidspapier wordt gebruik gemaakt van plotposities. In deze studie wordt gebruik gemaakt van de plotposities van Benard en Bos-Levenbach (1953):

$$F_i = \frac{i - 0.3}{N + 0.4}, \quad (4.1)$$

waarbij F_i staat voor de plotpositie van het jaarmaximum x_i als een kanswaarde, i voor het rangnummer van de jaarmaxima (gesorteerd van hoog naar laag: het hoogste jaarmaximum heeft dan rangnummer 1) en N voor het aantal jaren.

De plotposities van jaarmaxima kunnen ook uitgedrukt worden als frequentiewaarden (aantal per jaar) middels de benaderingsrelatie van Langbein (1949). Hierdoor wordt F_i getransformeerd tot $F_{i,jaar}$:

$$F_{i,jaar} = -\ln(1 - F_i). \quad (4.2)$$

Box B Bepaling plotposities van jaarmaxima.

De uitkomsten van de Bayesiaanse analyse zijn weergegeven in Tabel 4-1. Uit de tabel blijkt dat de Gumbel verdeling voor de verschillende duren redelijk tot goed voldoet gezien de toegekende gewichten. De gamma verdeling zou weliswaar voor duren van 4 en 12 uur volgens de Bayesiaanse analyse een goed alternatief kunnen zijn, maar dit geldt minder voor een duur van 8 uur en niet of nauwelijks voor een duur van 24 uur. Omdat over het geheel genomen de Gumbel verdeling de grootste gewichten krijgt zal deze verdeling en de meer algemene vorm hiervan, de GEV verdeling, nader worden beschouwd in Paragraaf 4.1.2.

Verdeling	Duur			
	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur
GEV	0.08	0.12	0.14	0.21
Gumbel	0.17	0.41	0.32	0.57
Weibull	0.20	0.12	0.09	0.02
Rayleigh	0.04	0.08	0.02	0.02
Lognormaal	0.07	0.08	0.10	0.10
Gamma	0.45	0.19	0.33	0.08

Tabel 4-1: Geschiktheid van kansverdelingen voor jaarmaxima van 4, 8-, 12-, en 24-uurs neerslaghoeveelheden te De Bilt, uitgedrukt in Bayes gewichten. Voor iedere duur is het grootste gewicht vet gedrukt.

Ook de klassieke extreme waarden theorie geeft aanleiding tot een nadere beschouwing van de GEV verdeling. Volgens deze theorie kunnen maxima van steekproeven met grootte n met slechts drie kansverdelingen beschreven worden, alle asymptotisch van aard. Deze drie kansverdelingen zijn gecombineerd in één kansverdeling die bekend staat als de GEV verdeling (Von Mises, 1936; Jenkinson, 1955), waarvan ook de Gumbel verdeling deel uitmaakt. Voorwaarde hierbij is wel dat n groot genoeg moet zijn en dat de maxima deel uit moeten maken van lange reeksen met onafhankelijke waarden die allen uit dezelfde verdeling afkomstig zijn.

4.1.2 Analyse kansverdelingen

Bij het modelleren van de jaarmaxima staat centraal of gekozen moet worden voor de GEV verdeling of voor de bijzondere vorm van de GEV verdeling: de Gumbel verdeling (zie voor de karakteristieken van deze verdelingen Box C). Voor een weloverwogen keuze moeten de volgende vragen worden meegenomen:

- 1) Kan aannemelijk gemaakt worden dat de jaarmaxima afkomstig zijn uit een populatie die beschreven kan worden met de GEV verdeling of de Gumbel verdeling? Met andere woorden: passen de jaarmaxima goed bij deze verdelingen?
- 2) Is een beschrijving met behulp van de extra vormparameter in de GEV verdeling significant beter dan een beschrijving zonder deze parameter? En hiermee samenhangend: is extrapolatie verantwoord naar overschrijdingsfrequenties van 1x per 1000 jaar?

De cumulatieve verdelingsfunctie van de GEV verdeling (F_{GEV}) is als volgt gedefinieerd:

$$F_{GEV}(y) = \exp \left[-(1 - \theta y)^{\frac{1}{\theta}} \right], \quad \text{als } \theta < 0 \text{ of } \theta > 0 \quad (4.3)$$

$$F_{GEV}(y) = \exp[-\exp(-y)], \quad \text{als } \theta < 0 \text{ of } \theta > 0 \quad (4.4)$$

waarbij θ staat voor de vormparameter en y , bekend als de Gumbel reduced variate, is gegeven door

$$y = \frac{x - \lambda}{\beta}, \quad (4.5)$$

waarbij x staat voor de neerslaghoeveelheid (in mm), β voor de schaalparameter (in mm) en λ voor de lokatieparameter (in mm).

De waarde van de vormparameter θ geeft aan van welke van de drie kansverdelingen van de GEV verdeling sprake is. De GEV verdeling met $\theta = 0$ staat bekend als the Gumbel verdeling. De GEV verdeling met een negatieve waarde voor θ staat bekend als de Frechet verdeling. De GEV verdeling met een positieve waarde voor θ staat bekend als de Reverse Weibull verdeling.

De Gumbel verdeling en de Frechet verdeling zijn allebei onbegrensd aan de bovenkant van de verdeling, maar de Frechet verdeling heeft een dikkere staart (aan de bovenkant van de verdeling) dan de Gumbel verdeling en is begrensd aan de onderkant van de verdeling ($u > \lambda + \beta / \theta$). De Reverse Weibull verdeling is begrensd aan de bovenkant van de verdeling ($u < \lambda + \beta / \theta$).

Box C Karakteristieken van de GEV verdeling.

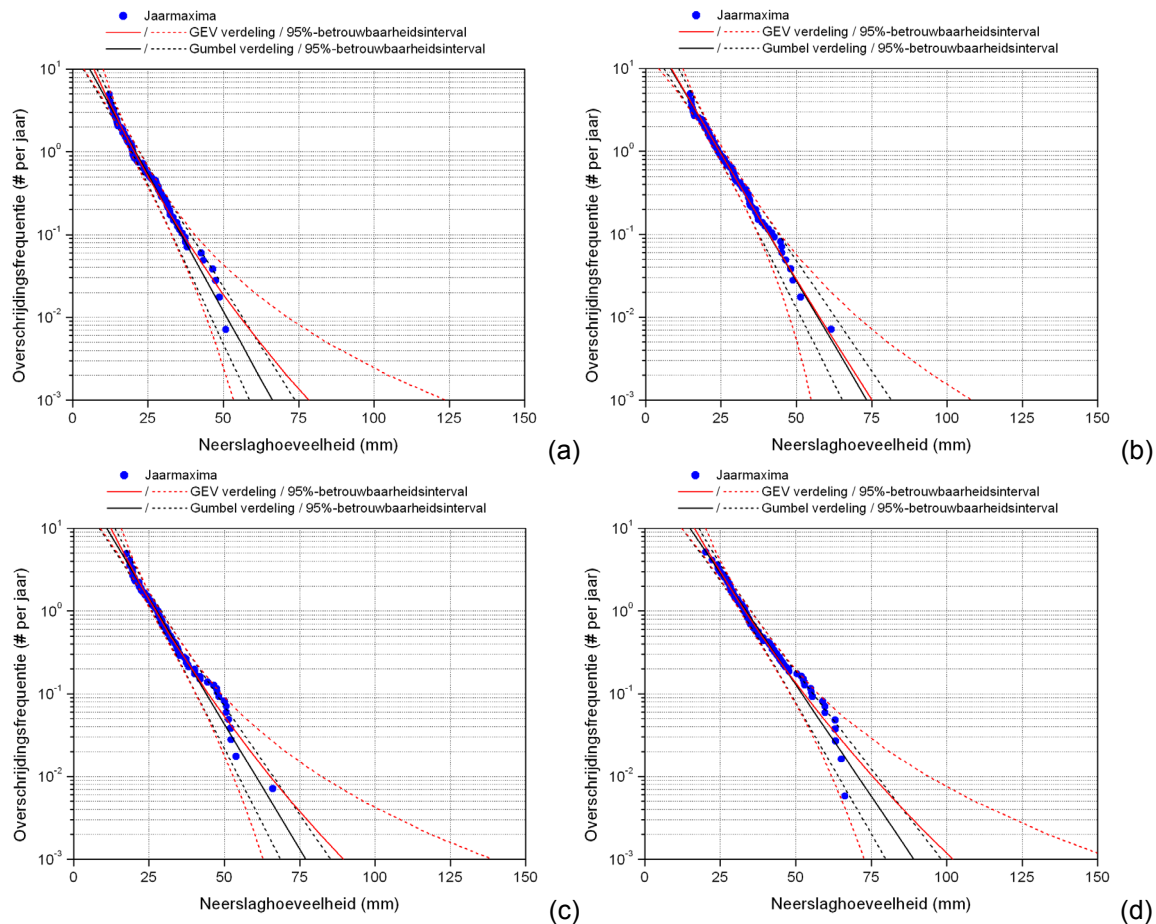
Allereerst wordt met een drietal aanpassingstoetsen (Engels: Goodness-of-fit tests) getoetst of de GEV verdeling en de Gumbel verdeling geschikt zijn om de jaarmaxima te beschrijven. Deze toetsen betreffen de Anderson-Darling (AD) toets, de Kolmogorov-Smirnov (KS) toets en de Cramér-von Mises (CM) toets (zie bijvoorbeeld Kotz en Nadarajah, 2000). De toetsen zijn uitgevoerd door gebruik te maken van de Monte-Carlo methodiek waarmee P -waarden berekend kunnen worden (Kotz en Nadarajah, 2000). Wanneer een P -waarde kleiner is dan 0.05 (dus bij een significantieniveau van 5%) wordt verworpen dat de jaarmaxima afkomstig zijn uit de desbetreffende verdeling. De resultaten van de toetsen zijn weergegeven in Tabel 4-2. Hieruit blijkt

dat beide verdelingen worden geaccepteerd als verdeling voor de verschillende duren en kan dus geconcludeerd worden dat de zowel de Gumbel als de GEV verdeling geschikt zijn om de 4-, 8-, 12- en 24-uurs neerslaghoeveelheden van jaarmaxima te beschrijven.

Toets	GEV verdeling				Gumbel verdeling			
	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur
Anderson-Darling	0.839	0.995	0.937	0.915	0.774	0.995	0.864	0.719
Kolgomorov-Smirnov	0.645	0.998	0.989	0.860	0.423	0.998	0.960	0.644
Cramér-von Mises	0.739	0.994	0.966	0.907	0.686	0.992	0.939	0.711

Tabel 4-2: P-waarden betreffende een drietal aanpassingstoetsen voor de GEV verdeling en de Gumbel verdeling voor jaarmaxima te De Bilt met een duur van 4, 8, 12 en 24 uur. Waarden kleiner dan 0.05 duiden erop dat de desbetreffende verdeling niet geschikt is om de jaarmaxima te beschrijven.

De tweede vraag zoals die aan het begin van deze paragraaf werd gesteld betreft de vormparameter in de GEV verdeling. Zoals reeds eerder opgemerkt, betekent de aanwezigheid van deze vormparameter een extra vrijheidsgraad ten opzichte van de Gumbel verdeling. Enerzijds worden de data hierdoor beter beschreven, anderzijds worden de betrouwbaarheidsintervallen ook breder. Deze betrouwbaarheidsintervallen geven een indicatie van de statistische onzekerheid in terugkeerniveaus die bepaald zijn middels een bepaalde kansverdeling. In Figuur 4-2 is goed te zien dat de intervallen van de GEV verdeling breder zijn dan die van de Gumbel verdeling (ongeveer 3x zo breed). De figuur geeft terugkeerniveaus inclusief betrouwbaarheidsintervallen volgens de GEV verdeling en de Gumbel verdeling voor neerslaghoeveelheden van De Bilt voor de verschillende duren, tezamen met de jaarmaxima van De Bilt voor het tijdvak 1906-2003. Met behulp van een test ontwikkeld door Hosking et al. (1985) kan onderzocht worden of de vormparameter van de GEV verdeling significant afwijkt van 0. Voor de 4-, 8-, 12- en 24-uurs neerslaghoeveelheden van jaarmaxima te De Bilt met waarden van de vormparameter van respectievelijk -0.08, -0.01, -0.07 en -0.07 is dit niet het geval. Dit betekent dat ook op basis hiervan de Gumbel verdeling als verdeling geaccepteerd kan worden en dat de GEV verdeling geen significante verbetering van de beschrijving van de data met zich meebrengt, maar wel extra onzekerheid. Echter, bij extrapolaties (in dit geval gebeurtenissen die minder vaak voorkomen dan 1x per 100 jaar) zijn de betrouwbaarheidsintervallen van de Gumbel verdeling te smal (bijvoorbeeld Coles, 2001). Ook uit een studie van Buishand (1983b), gebaseerd op neerslagreeksen over 55 jaar van 15 Nederlandse stations, blijkt dat de Gumbel verdeling voor gebeurtenissen die vaker optreden dan 1x per 100 jaar goed voldoet, maar dat voor minder vaak voorkomende gebeurtenissen de voorkeur wordt gegeven aan de meer algemene GEV verdeling.



Figuur 4-2: Terugkeerniveaus volgens de GEV verdeling en de Gumbel verdeling voor 4- (a), 8- (b), 12- (c) en 24-uurs (d) neerslaghoeveelheden (jaarmaxima) van De Bilt inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen (bepaald middels de Monte Carlo methodiek). Tevens zijn de jaarmaxima van De Bilt voor het tijdvak 1906-2003 weergegeven. De terugkeerniveaus en de jaarmaxima bij een duur van 24 uur staan ook weergegeven in Figuur 4-1.

Uit het voorafgaande blijkt dat zowel de GEV verdeling als de Gumbel verdeling kandidaatverdelingen zijn om de jaarmaxima te beschrijven. Om een eenduidige keuze voor het type kansverdeling te kunnen maken, worden in het volgende hoofdstuk (Hoofdstuk 5) tevens meerdaagse neerslaghoeveelheden geanalyseerd. Vervolgens wordt in Hoofdstuk 6 een definitieve keuze gemaakt.

4.2 Peak-over-threshold waarden

4.2.1 Bayesiaanse analyse

Analoog aan de werkwijze bij de jaarmaxima is ook voor de POT-waarden een Bayesiaanse analyse uitgevoerd. Een drietal veel gebruikte verdelingen worden getoetst die in potentie POT-waarden van neerslaghoeveelheden zouden kunnen beschrijven. Het betreft de volgende verdelingen:

- Gegeneraliseerde Pareto verdeling (GPD),
- Conditionele Weibull verdeling (CWD),
- Exponentiële verdeling.

Zoals ook het geval was bij de verdelingen voor het beschrijven van jaarmaxima zijn genoemde verdelingen gerelateerd aan elkaar. De exponentiële verdeling is een speciaal geval van zowel de GPD als de CWD. De vormparameter is bij de exponentiële verdeling op een vaste waarde gezet (zie voor meer details Paragraaf 4.2.2).

Bij de analyse van POT-waarden worden waarden boven een bepaalde drempel geanalyseerd (Paragraaf 2.3.2). De keuze van de drempel is niet triviaal en kan de hoogte van de resultaten sterk beïnvloeden. De Bayesiaanse analyse is daarom uitgevoerd voor een viertal drempels, overeenkomend met overschrijdingsfrequenties van respectievelijk 10x, 5x, 2x en 1x per jaar. De waarden van de drempels bij de verschillende duren zijn weergegeven in Tabel 4-3.

Overschrijdingsfrequentie van de drempel	Duur			
	4 uur	8 uur	12 uur	24 uur
10x per jaar	9.2	11.7	12.9	15.5
5x per jaar	12.0	15.1	17.2	20.9
2x per jaar	16.5	20.5	23.0	27.8
1x per jaar	20.1	24.8	27.7	33.2

Tabel 4-3: *Drempels (in mm) en bijbehorende overschrijdingsfrequenties voor duren van 4, 8, 12 en 24 uur, geldig voor station De Bilt.*

De geschatte verdelingen bij een drempel van 5x per jaar voor 24 uur zijn weergegeven in Figuur 4-3. In deze figuur zijn tevens de POT-waarden te De Bilt voor het tijdvak 1906-2003 weergegeven met behulp van plotposities (zie Box D).

Om POT-waarden grafisch weer te kunnen geven op waarschijnlijkheidspapier wordt net als bij jaarmaxima gebruik gemaakt van plotposities. In deze studie wordt hiervoor opnieuw gebruik gemaakt van de plotposities van Benard en Bos-Levenbach (1953):

$$F_i = \frac{i - 0.3}{W + 0.4}, \quad (4.6)$$

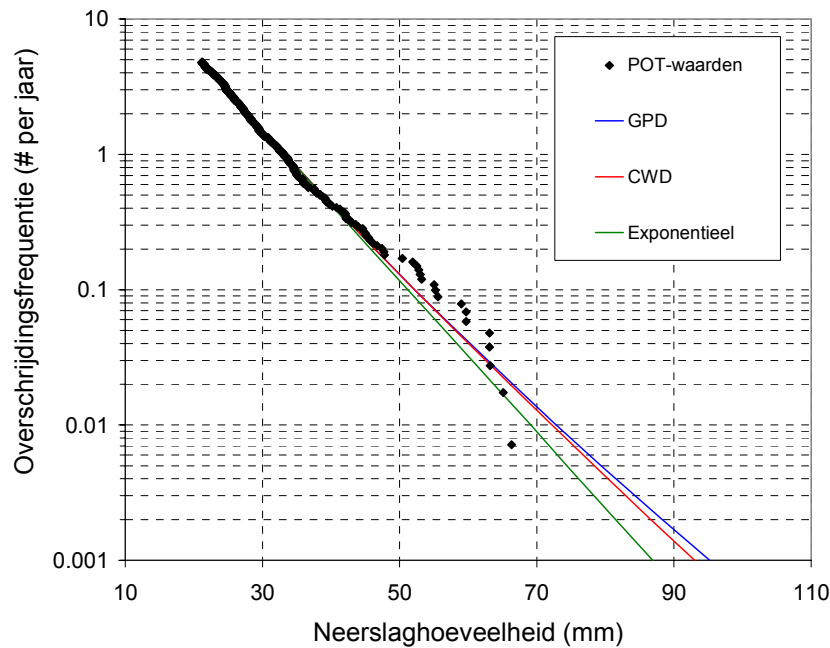
waarbij F_i staat voor de plotpositie van de POT-waarde x_i als een kanswaarde, i voor het rangnummer van de POT-waarden (gesorteerd van hoog naar laag: de hoogste POT-waarde heeft dan rangnummer 1) en W voor het aantal POT-waarden.

Ook de plotposities van POT-waarden kunnen uitgedrukt worden als frequentiewaarden (# per jaar). Hierdoor wordt F_i getransformeerd tot $F_{i,POT}$:

$$F_{i,POT} = F_i \cdot \frac{W}{N}, \quad (4.7)$$

waarbij N staat voor het aantal jaren.

Box D *Bepaling plotposities van POT-waarden.*

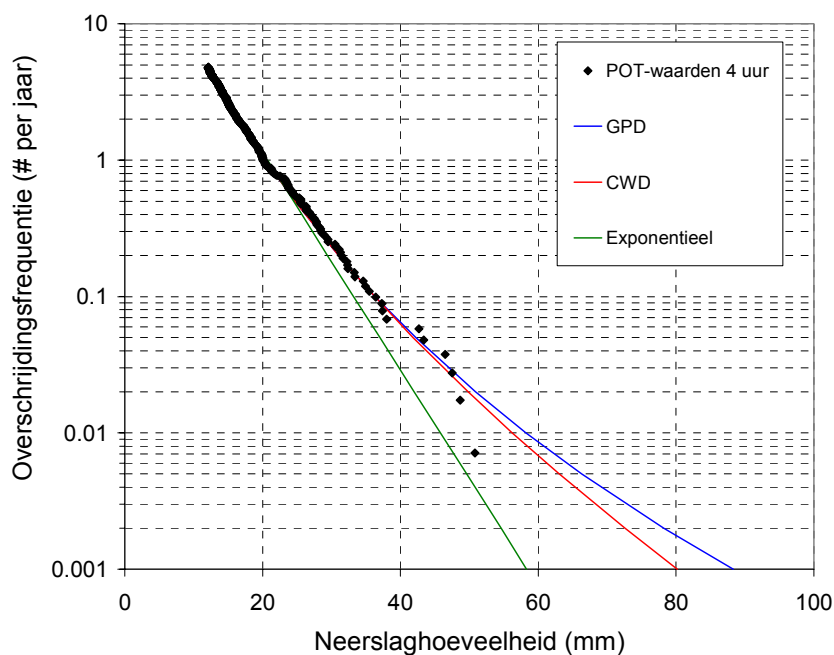


Figuur 4-3: Verdelingen voor de POT-waarden met een drempel van 5x per jaar voor 24-uurs neerslaghoeveelheden in De Bilt.

De resultaten van de Bayesiaanse analyse (Tabel 4-4) laten zien dat voor de meeste beschouwde drempels de exponentiële verdeling meer gewicht krijgt dan de GPD en de CWD. Bij de lage drempel (10x per jaar) voldoet de exponentiële verdeling echter minder goed ten opzichte van de GPD en CWD. De voorkeur gaat dan uit naar de CWD. Bij neerslagduren van 4 en 8 uur met een drempelwaarde van 10x per jaar en bij de neerslagduur van 4 uur met een drempelwaarde van 5x per jaar heeft de exponentiële verdeling een gewicht van bijna nul. In Figuur 4-4 is te zien dat de exponentiële verdeling voor de drempelwaarde van 5x per jaar de POT-waarden met een duur van 4 uur inderdaad minder goed beschrijft. Omdat over het geheel gezien geen verdeling altijd hogere gewichten krijgt voor de verschillende uren en drempels en aangezien de exponentiële verdeling een speciaal geval is van zowel de GPD als de CWD worden de drie verdelingen allen in Paragraaf 4.2.2 verder uitgewerkt.

Duur	Verdeling	Drempel			
		10x / jaar	5x / jaar	2x / jaar	1x / jaar
4 uur	GPD	0.29	0.39	0.14	0.21
	CWD	0.71	0.55	0.15	0.20
	Exponentiële verdeling	0.00	0.06	0.71	0.59
8 uur	GPD	0.41	0.17	0.19	0.17
	CWD	0.58	0.19	0.22	0.17
	Exponentiële verdeling	0.02	0.64	0.59	0.66
12 uur	GPD	0.27	0.18	0.15	0.24
	CWD	0.33	0.20	0.15	0.25
	Exponentiële verdeling	0.39	0.63	0.70	0.51
24 uur	GPD	0.08	0.12	0.17	0.17
	CWD	0.07	0.11	0.19	0.18
	Exponentiële verdeling	0.85	0.77	0.64	0.65

Tabel 4-4: *Geschiktheid van kansverdelingen voor de POT-waarden van 4-, 8-, 12-, en 24-uurs neerslaghoeveelheden te De Bilt voor verschillende drempelwaarden (10, 5, 2 en 1x per jaar), uitgedrukt in Bayes gewichten. Voor iedere duur en per drempel is het grootste gewicht vet gedrukt.*



Figuur 4-4: *Verdelingen voor de POT-waarden met een drempelwaarde van 5x per jaar voor 4-uurs neerslaghoeveelheden in De Bilt.*

4.2.2 Analyse kansverdelingen

Zoals ook het geval was bij het modelleren van de jaarmaxima, staat bij het modelleren van de POT-waarden de vraag centraal voor welke verdeling gekozen moet worden; de GPD, de CWD of de bijzondere vorm van beide verdelingen: de exponentiële verdeling (zie voor de karakteristieken van deze verdelingen Box E).

De cumulatieve verdelingsfunctie van de GPD (F_{GPD}) is als volgt gedefinieerd:

$$F_{GPD}(x) = 1 - \left[1 - \frac{\gamma}{\sigma}(x - \omega) \right]^{1/\gamma}, \quad \text{met } x \geq \omega, \quad (4.8)$$

waar x staat voor de neerslaghoeveelheid (in mm), ω voor de drempelwaarde (in mm), σ voor de schaalparameter (in mm) en γ voor de vormparameter.

De GPD werd geïntroduceerd door Pickands (1975). Het is een asymptotische verdeling voor overschrijdingen van hoge drempels en de maxima van trekkingen uit de GPD zijn GEV (zie Paragraaf 4.1.2) verdeeld. Deze maxima hebben een vormparameter die gelijk is aan de vormparameter van de GPD. De GPD is dus sterk gerelateerd aan de GEV verdeling. Bij een positieve waarde van de vormparameter γ is de GPD begrensd aan de bovenkant van de verdeling ($\omega + \sigma/\gamma$). Bij een negatieve waarde van γ is de GPD Pareto verdeeld.

De cumulatieve verdelingsfunctie van de CWD (F_{CWD}) is als volgt gedefinieerd:

$$F_{CWD}(x) = 1 - \exp \left[\left(\frac{\omega}{\alpha} \right)^\kappa - \left(\frac{x}{\alpha} \right)^\kappa \right], \quad \text{met } x \geq \omega, \quad (4.9)$$

waar α staat voor de schaalparameter (in mm) en κ voor de vormparameter.

De cumulatieve verdelingsfunctie van de exponentiële verdeling (F_{exp}) is als volgt gedefinieerd:

$$F_{exp}(x) = 1 - \exp \left[-\frac{x - \omega}{\alpha} \right], \quad \text{met } x \geq \omega. \quad (4.10)$$

waar α staat voor de schaalparameter (in mm).

De exponentiële verdeling is een speciaal geval van zowel de GPD als de CWD. Bij deze verdelingen heeft de vormparameter dan een vaste waarde (0 bij de GPD en 1 bij de CWD).

Box E Karakteristieken van de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling.

Voor een weloverwogen keuze moeten worden meegenomen:

- 1) Kan aannemelijk gemaakt worden dat de POT-waarden afkomstig zijn uit een populatie die beschreven kan worden met de GPD, CWD of de exponentiële verdeling? Met andere woorden: passen de POT-waarden goed bij deze verdelingen?
- 2) Is een beschrijving met behulp van een extra vormparameter (bij de GPD en CWD) significant beter dan een beschrijving zonder deze parameter (bij de exponentiële verdeling)? En hiermee samenhangend: is extrapolatie verantwoord naar overschrijdingsfrequenties van 1x per 1000 jaar?
- 3) Welke invloed heeft de drempel op de resultaten en wat is de optimale drempelkeuze uit statistisch oogpunt?

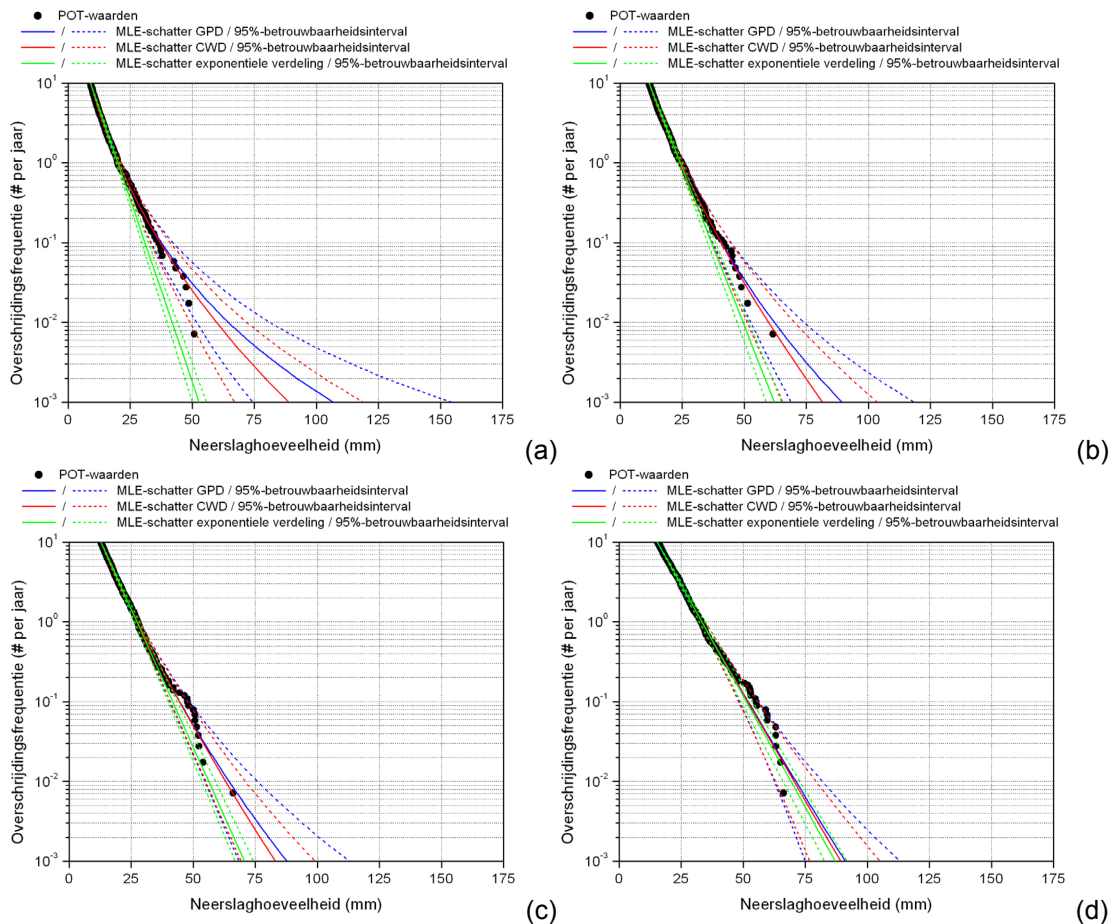
Bij het nalopen van deze vragen zullen de analyses telkens worden uitgevoerd voor drempels met overschrijdingsfrequenties van 10x, 5x, 2x en 1x per jaar zoals ook beschouwd bij de Bayesiaanse analyse in Paragraaf 4.2.1.

Voor het beantwoorden van de eerste vraag is een aantal aanpassingstoetsen uitgevoerd. De toetsen betreffen net als bij de analyse van de jaarmaxima de AD-toets, de KS-toets en de CM-toets. De resultaten van de toetsen zijn weergegeven in Tabel 4-5. De hierin vermelde P -waarden zijn voor de GPD en CWD voor alle toetsen groter dan 0.05 en meestal zelfs beduidend hoger. Dit duidt erop dat de data uit een populatie met de desbetreffende verdelingen afkomstig kunnen zijn. Voor de exponentiële verdeling zijn de P -waarden over het algemeen wat kleiner. Dit is vooral het geval bij duren van 4 en 8 uur bij een drempel van 10x per jaar waar de P -waarden kleiner zijn dan 0.05. Voor deze combinaties van duren en drempel wordt de exponentiële verdeling middels de aanpassingstoetsen daardoor verworpen als mogelijke kansverdeling om de data mee te beschrijven. Bij een combinatie van een duur van 4 uur en een drempel van 5x per jaar zijn de P -waarden ook betrekkelijk laag maar nog wel groter dan 0.05.

Verdeling	Toets	Drempel (per jaar)	Duur			
			4 uur	8 uur	12 uur	24 uur
GPD	AD	10x	0.374	0.811	0.829	0.584
		5x	0.745	0.888	0.760	0.621
		2x	0.812	0.565	0.704	0.848
		1x	0.923	0.999	0.746	0.401
	KS	10x	0.283	0.654	0.797	0.566
		5x	0.565	0.842	0.583	0.485
		2x	0.359	0.334	0.868	0.771
		1x	0.792	0.991	0.620	0.269
	CM	10x	0.591	0.797	0.876	0.745
		5x	0.856	0.926	0.754	0.551
		2x	0.682	0.563	0.726	0.849
		1x	0.920	0.998	0.842	0.400
CWD	AD	10x	0.448	0.852	0.889	0.581
		5x	0.784	0.899	0.792	0.606
		2x	0.828	0.605	0.688	0.872
		1x	0.935	0.999	0.730	0.460
	KS	10x	0.312	0.769	0.897	0.572
		5x	0.601	0.846	0.647	0.481
		2x	0.392	0.363	0.871	0.806
		1x	0.807	0.996	0.618	0.334
	CM	10x	0.695	0.857	0.931	0.746
		5x	0.881	0.914	0.788	0.538
		2x	0.703	0.599	0.715	0.873
		1x	0.931	0.999	0.816	0.452
Exponentiële verdeling	AD	10x	<u>0.000</u>	<u>0.029</u>	0.237	0.611
		5x	0.059	0.551	0.390	0.609
		2x	0.714	0.259	0.689	0.474
		1x	0.845	0.994	0.268	0.336
	KS	10x	<u>0.000</u>	<u>0.013</u>	0.259	0.642
		5x	0.092	0.520	0.310	0.647
		2x	0.223	0.124	0.671	0.490
		1x	0.497	0.977	0.411	0.223
	CM	10x	<u>0.000</u>	<u>0.029</u>	0.261	0.762
		5x	0.083	0.662	0.444	0.582
		2x	0.572	0.303	0.711	0.497
		1x	0.747	0.988	0.337	0.338

Tabel 4-5: *P-waarden betreffende een drietal aanpassingstoetsen voor de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling voor verschillende duren (4, 8, 12 en 24 uur) van neerslaghoeveelheden (POT-waarden) te De Bilt en verschillende drempels (10x, 5x, 2x en 1x per jaar). De testen betreffen de Anderson-Darling (AD) toets, de Kolmogorov-Smirnov (KS) toets en de Cramér-von Mises (CM) toets. Waarden kleiner dan 0.05 duiden erop dat de desbetreffende verdeling niet geschikt is om de jaarmaxima te beschrijven en zijn onderstreept.*

De tweede vraag die aan het begin van deze paragraaf gesteld werd, betreft de vormparameter. Zoals ook het geval was bij verdelingen die de jaarmaxima beschrijven, zorgt de vormparameter er nu ook weer voor dat de POT-waarden met behulp van de GPD en de CWD beter beschreven worden dan de exponentiële verdeling waar geen vormparameter is opgenomen. Door de extra vrijheidsgraad worden de betrouwbaarheidsintervallen groter. De geschatte verdelingen inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor een drempel van 10x per jaar zijn te zien in Figuur 4-5, tezamen met de POT-waarden van De Bilt voor het tijdvak 1906-2003.



Figuur 4-5: *Terugkeerniveaus volgens de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling voor 4- (a), 8- (b), 12- (c) en 24-uurs (d) neerslaghoeveelheden (POT-waarden) van De Bilt inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen voor een drempel die 10x per jaar wordt overschreden. Tevens zijn de POT-waarden van De Bilt voor het tijdvak 1906-2003 weergegeven.*

In Figuur 4-5 is duidelijk te zien dat de betrouwbaarheidsintervallen van de GPD en de CWD breder zijn dan die van de exponentiële verdeling. Verder is ook te zien dat de betrouwbaarheidsintervallen van de CWD wat smaller zijn dan die van de GPD. Beide constatering kunnen ook gedaan worden bij drempels van respectievelijk 5x, 2x en 1x per jaar. De laatste constatering kan verklaard worden doordat de vormparameter van de CWD minder uitgesproken of resoluut is dan de vormparameter van de GPD. Dit uit zich in het niet aanwezig zijn van een bovengrens bij de CWD wanneer de vormparameter κ kleiner is dan 1 terwijl dit wel het geval is bij de GPD wanneer de vormparameter γ kleiner is dan 0. Visueel gezien is daarmee de kromming bij de GPD vaak sterker dan bij de CWD. Dit gedrag vindt ook plaats wanneer κ groter is dan 1 en γ groter dan 0. Met andere woorden zou gesteld kunnen worden dat de GPD of voor het één of voor het ander kiest, terwijl de CWD wat meer de gulden middenweg volgt. Ook is te zien dat bij de eerder genoemde combinaties van duren en drempels (duren van 4 en 8 uur bij een

drempel van 10x per jaar) de exponentiële verdeling de POT-waarden niet goed beschrijft, dit in tegenstelling tot duren van 24 en (in mindere mate) 12 uur, waar de verschillen tussen enerzijds de exponentiële verdeling en anderzijds de GPD en de CWD betrekkelijk klein zijn.

Getoetst is of de vormparameter afwijkt van 0 (GPD) en 1 (CWD). Dit is gedaan middels de Monte Carlo methodiek, waarmee 95%-betrouwbaarheidsintervallen van onder andere de vormparameter bepaald kunnen worden (Press et al., 1992, Paragraaf 15.6). Resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 4-6. De tabel laat zien dat de waarden 0 (GPD) en 1 (CWD) voor de meeste combinaties van duren en drempels binnen de 95%-betrouwbaarheidsintervallen van de vormparameter liggen. De vormparameters wijken in deze gevallen niet significant af van deze waarden. Dit betekent dat op basis hiervan de exponentiële verdeling als verdeling geaccepteerd kan worden en dat de GPD en de CWD geen significante verbetering van de beschrijving van de data met zich meebrengen. Echter, bij bepaalde combinaties van duren en drempels (8 uur/10x, 4 uur/10x en 4 uur/5x) is de exponentiële verdeling niet geschikt om de POT-waarden te beschrijven en kunnen de GPD en CWD als alternatief dienen.

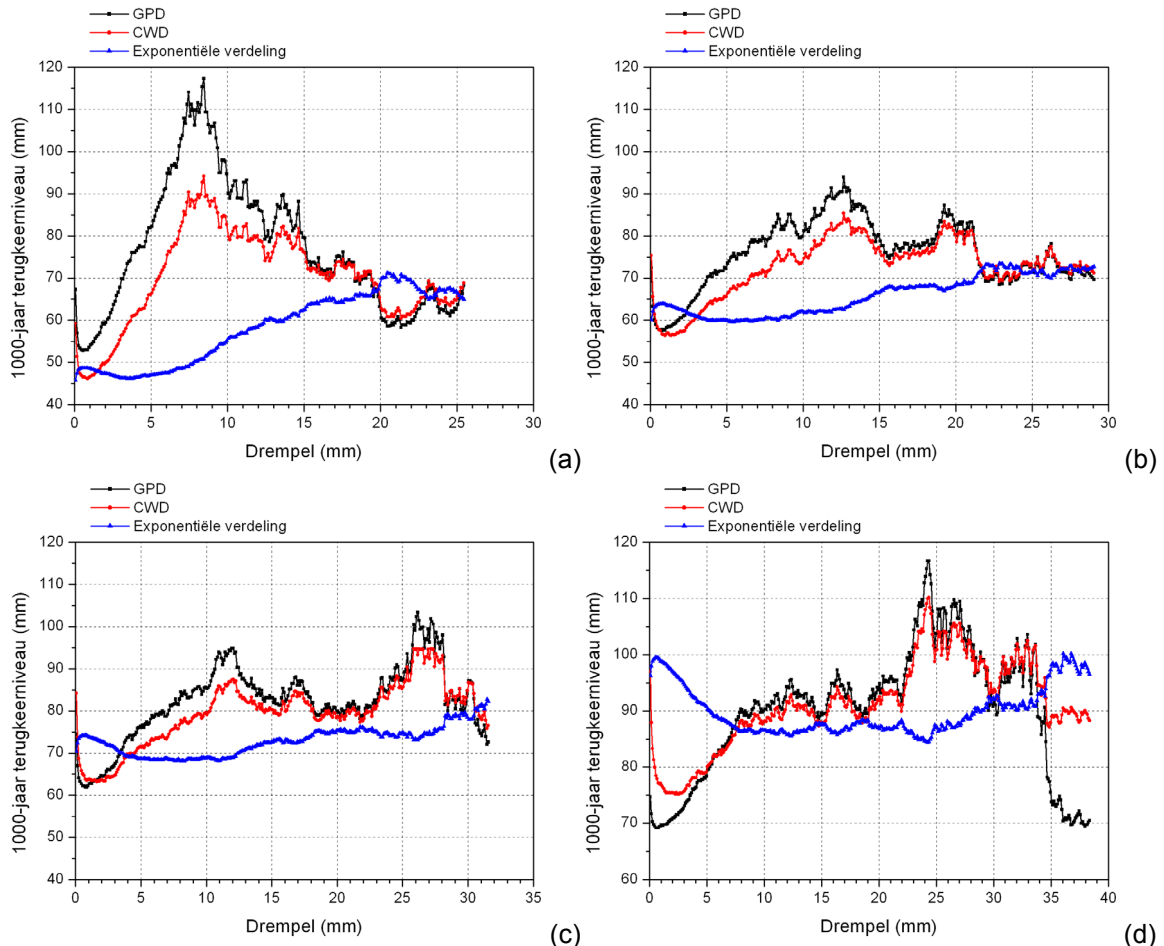
Bovenstaande is in lijn met de Bayesiaanse analyse van Paragraaf 4.2.1 en de aanpassingstoetsen die eerder in deze paragraaf zijn beschouwd.

Drempel (overschrijdingen per jaar)	Duur (uur)	Verdeling	
		GPD	CWD
10	4	-0.19 (-0.27 – -0.11)	0.42 (0.25 – 0.63)
	8	-0.11 (-0.18 – -0.04)	0.62 (0.42 – 0.88)
	12	-0.07 (-0.14 – -0.00)	0.65 (0.57 – 1.00)
	24	-0.02 (-0.08 – 0.05)	0.96 (0.76 – 1.19)
5	4	-0.14 (-0.24 – -0.03)	0.53 (0.26 – 0.87)
	8	-0.06 (-0.15 – 0.04)	0.76 (0.46 – 1.12)
	12	-0.06 (-0.15 – 0.05)	0.74 (0.41 – 1.16)
	24	-0.04 (-0.12 – 0.06)	0.86 (0.49 – 1.26)
2	4	-0.04 (-0.18 – 0.14)	0.84 (0.37 – 1.53)
	8	-0.09 (-0.25 – 0.09)	0.59 (0.26 – 1.34)
	12	-0.04 (-0.18 – 0.13)	0.81 (0.27 – 1.65)
	24	-0.08 (-0.22 – 0.11)	0.63 (0.26 – 1.46)
1	4	0.09 (-0.10 – 0.33)	1.36 (0.70 – 2.52)
	8	-0.02 (-0.21 – 0.25)	0.88 (0.27 – 2.05)
	12	-0.14 (-0.34 – 0.14)	0.34 (0.27 – 1.52)
	24	-0.03 (-0.21 – 0.25)	0.75 (0.27 – 1.58)

Tabel 4-6: Vormparameter (95%-betrouwbaarheidsintervallen) van de GPD en de CWD voor een viertal drempels (10, 5, 2 en 1x per jaar) en duren van 4, 8, 12 en 24 uur voor neerslaghoeveelheden te De Bilt. Vet gedrukte waarden wijken significant af van 0 (GPD) of 1 (CWD).

De laatste te bespreken vraag betreft het optimaliseren van de drempel. Immers, POT-waarden betreffen overschrijdingen van een bepaalde drempel en deze drempel moet op voorhand gekozen worden. Dit zorgt voor een extra complexiteit omdat de resultaten sterk afhankelijk kunnen zijn van de hoogte van de drempel. Als de drempel te laag is, wordt de analyse beïnvloed door lage waarden die een structurele afwijking (bias) in de resultaten kunnen veroorzaken. Een te hoge drempel daarentegen zorgt voor een lage betrouwbaarheid van de resultaten. Het is daarom van belang een goede balans te vinden in bias en betrouwbaarheid bij het bepalen van een drempel.

Voor het bepalen van een optimale drempel is gebruik gemaakt van zogenaamde 'drempelplaatjes', waarbij per drempel terugkeerniveaus berekend zijn en tegen elkaar uiteengezet. Gekeken kan worden of er bij een bepaalde drempel een stabilisatie optreedt in de hoogte van de terugkeerniveaus voordat door toename van de statistische onzekerheden de grilligheid in terugkeerniveaus te groot wordt. De drempelplaatjes zijn weergegeven in Figuur 4-6. Hierin zijn voor de verschillende durren de 1000-jaar terugkeerniveaus weergegeven volgens de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling.



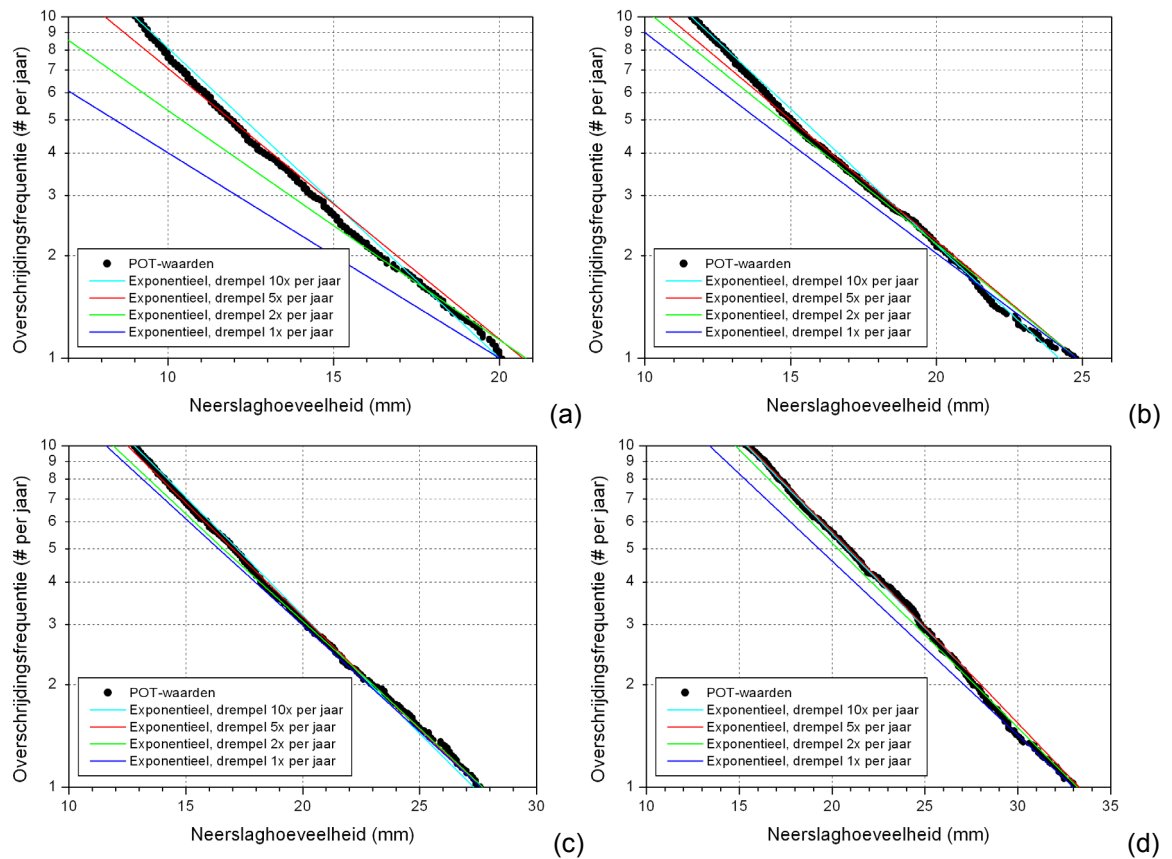
Figuur 4-6: Drempelplaatjes voor de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling waarbij per drempel (in mm) de hoogte van het 1000-jaar terugkeerniveau (in mm) is weergegeven. De resultaten betreffen 4- (a), 8- (b), 12- (c) en 24-uurs (d) neerslaghoeveelheden te De Bilt.

In Figuur 4-6 is te zien dat voor de verschillende durren de GPD en CWD ongeveer hetzelfde beeld geven met uitzondering van de zeer lage en hoge drempels (< 5 mm en > 35 mm) bij een duur van 24 uur. In het algemeen wijken de resultaten van de exponentiële verdeling behoorlijk af van die van de GPD en CWD, zowel wat betreft het absolute niveau van de terugkeerniveaus en het meer robuustere beeld over het hele drempeltraject, beide veroorzaakt door het ontbreken van de vormparameter. Voor zowel de GPD, de CWD als de exponentiële verdeling is een systematische afwijking zichtbaar voor lage drempels. Bij een duur van 24 uur lijkt vanaf drempels van ongeveer 10 mm enigszins een stabilisatie op te treden. Bij hogere drempels zijn opnieuw afwijkingen te zien die een springeriger karakter hebben, veroorzaakt door het afnemen van het aantal waarnemingen en daarmee het toenemen van de onbetrouwbaarheid. Een goede balans tussen systematische afwijkingen en statistische betrouwbaarheid lijkt voor een duur van 24 uur daardoor te bestaan bij een drempel van 10 mm die overeenkomt met een overschrijdingsfrequentie van ongeveer 20x per

jaar. Voor de andere duren (4, 8 en 12 uur) is er nauwelijks sprake van een stabilisatie. Bij de exponentiële verdeling is een voornamelijk opwaartse lijn zichtbaar, bij de GPD en CWD is het beeld zeer wisselend met pieken en dalen. Aangezien de figuur aangeeft dat de terugkeerniveaus sterk afhankelijk zijn van de drempel en er niet of nauwelijks sprake is van een stabilisatie bij een bepaalde drempel, is een keuze voor het gebruik van POT-waarden niet voor de hand liggend voor de lagere overschrijdingsfrequenties. Hierop wordt teruggekomen in Hoofdstuk 6, nadat in Hoofdstuk 5 meerdaagse neerslaghoeveelheden geanalyseerd zijn.

4.2.3 Hoge overschrijdingsfrequenties

In de voorgaande paragraaf vindt de optimalisering van de drempel plaats door middel van afstemming op een overschrijdingsfrequentie van 1x per 1000 jaar. Het hoeft echter niet zo te zijn dat met deze drempel de resultaten voor hoge overschrijdingsfrequenties (van 10x per jaar tot 1x per jaar) eveneens optimaal zijn. Daarom is nagegaan in hoeverre de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling in staat zijn om de POT-waarden met overschrijdingsfrequenties van 10x per jaar tot 1x per jaar te beschrijven. Een grafische weergave hiervan met betrekking tot de exponentiële verdeling is te zien in Figuur 4-7 waarbij de POT-waarden zijn afgebeeld en tevens de exponentiële verdeling volgens 4 verschillende drempels (10x, 5x, 2x en 1x per jaar). In de figuur is zichtbaar dat de exponentiële verdeling met als drempels 2x en vooral 1x per jaar de POT-waarden voor de verschillende duren niet goed beschrijven. Het verschil tussen de exponentiële verdelingen met als drempels 10x en 5x per jaar is minimaal en deze verdelingen zijn in staat de POT-waarden te beschrijven. Ook de CWD met drempels van 10x en 5x per jaar beschrijft de POT-waarden in het traject 10x per jaar tot 1x per jaar in voldoende mate (niet weergegeven). Voor een duur van 4 uur geldt zelfs dat de CWD de voorkeur geniet gezien de lichte kromming die aanwezig is in de POT-waarden.



Figuur 4-7: Overschrijdingsfrequenties van 10x per jaar tot 1x van POT-waarden van 4- (a), 8- (b), 12- (c) en 24-uurs (d) neerslaghoeveelheden te De Bilt. De POT-waarden zijn beschreven met de exponentiële verdeling met als drempels 10x, 5x, 2x en 1x per jaar.

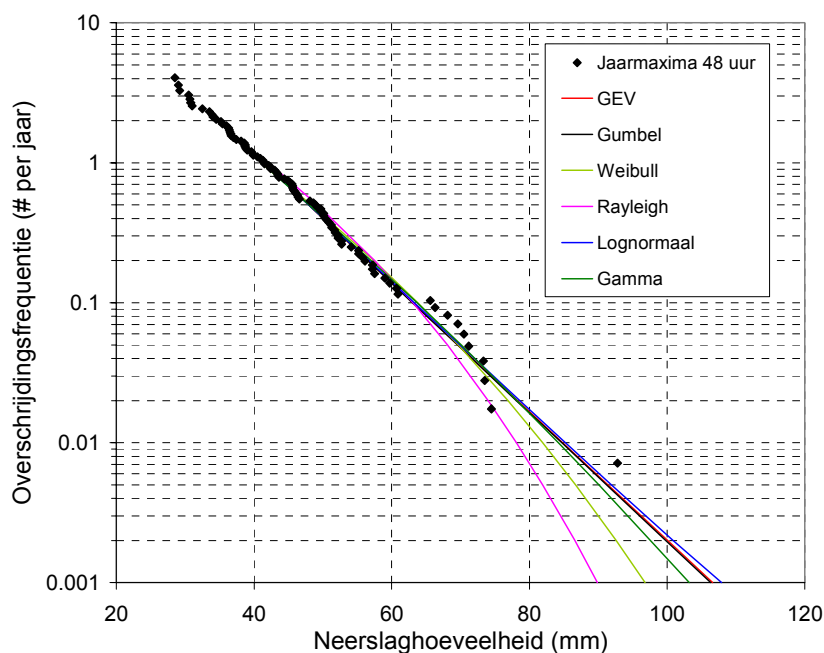
5 Jaarstatistiek van De Bilt: 2, 4 en 8 dagen

In dit hoofdstuk wordt de statistiek besproken voor duren van 2, 4 en 8 dagen (respectievelijk 48, 96 en 192 uur). De indeling van de paragrafen komt overeen met die van Hoofdstuk 4: in Paragraaf 5.1 wordt de statistiek op basis van jaarmaxima behandeld, in Paragraaf 5.2 op basis van POT-waarden.

5.1 Jaarmaxima

5.1.1 Bayesiaanse analyse

Ook voor de jaarmaxima met betrekking tot neerslaghoeveelheden met een duur van 2, 4 en 8 dagen is een Bayesiaanse analyse uitgevoerd. In Figuur 5-1 zijn als voorbeeld de verdelingen die binnen deze analyse beschouwd worden grafisch weergegeven voor de duur van 2 dagen, inclusief de bijbehorende jaarmaxima.



Figuur 5-1: Verdelingen voor de jaarmaxima van 2-daagse neerslaghoeveelheden in De Bilt.

Tabel 5-1 geeft de geschiktheid weer van de zes kansverdelingen die ook gebruikt zijn voor de 4-, 8-, 12- en 24-uurs neerslaghoeveelheden van jaarmaxima. Net als voor de kortere duren blijken de GEV en Gumbel verdeling ook voor deze neerslagduren een relatief zwaar gewicht te krijgen. Dus voor deze lange duren ligt het eveneens voor de hand om de Gumbel verdeling en de aanverwante GEV verdeling verder uit te werken.

Verdeling	Duur		
	2 dagen	4 dagen	8 dagen
GEV	0.13	0.23	0.28
Gumbel	0.49	0.31	0.23
Weibull	0.09	0.12	0.18
Rayleigh	0.05	0.03	0.04
Lognormaal	0.08	0.15	0.12
Gamma	0.16	0.16	0.15

Tabel 5-1: *Geschiktheid van kansverdelingen voor jaarmaxima van 2-, 4- en 8-daagse neerslaghoeveelheden te De Bilt, uitgedrukt in Bayes gewichten. Voor iedere duur is het grootste gewicht vet gedrukt.*

5.1.2 Analyse kansverdelingen

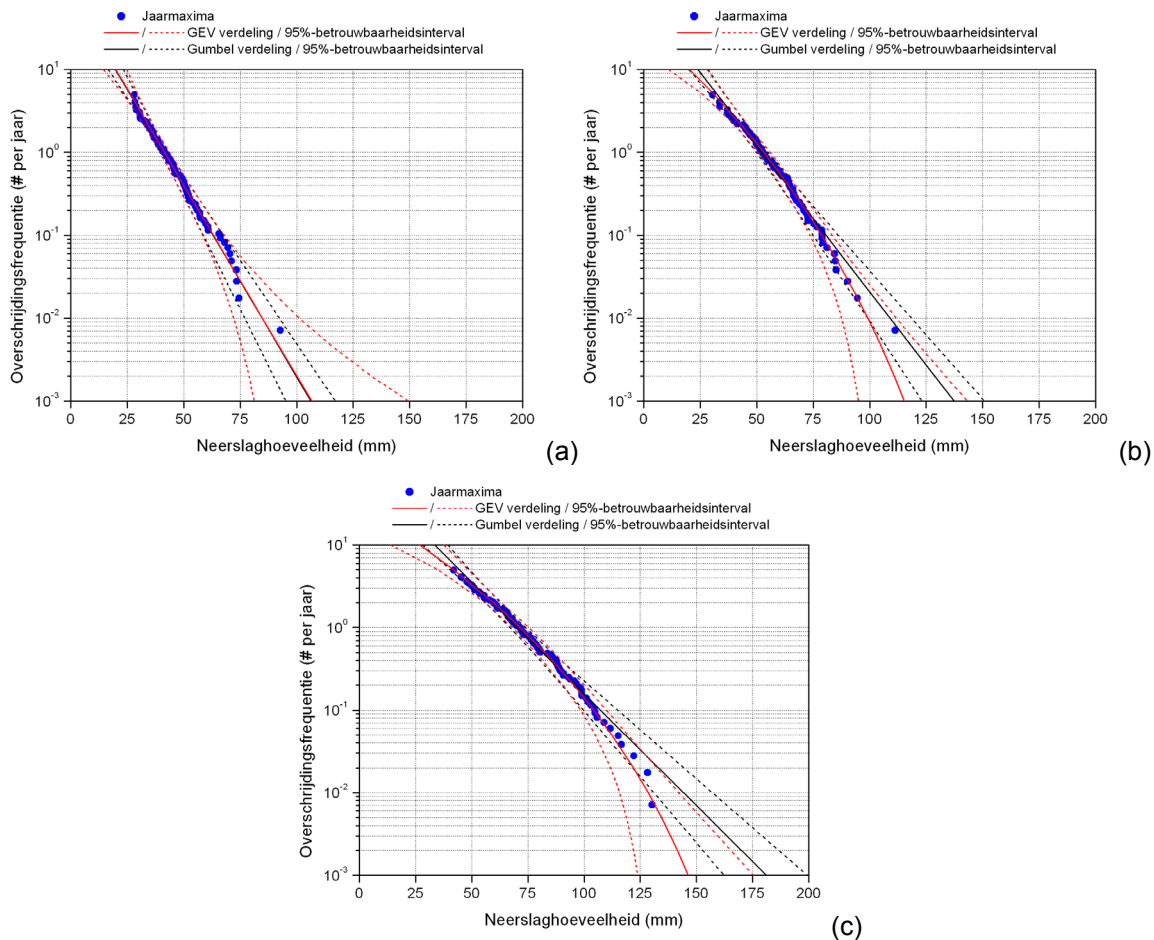
In deze paragraaf wordt nagegaan in hoeverre de GEV en Gumbel verdeling de jaarmaxima van 2-, 4- en 8-daagse neerslaghoeveelheden kunnen beschrijven door in te gaan op een aantal punten zoals die ook aan de orde kwamen bij de 4-, 8-, 12- en 24-uurs neerslaghoeveelheden.

Voor de GEV verdeling en de Gumbel verdeling zijn aanpassingstoetsen uitgevoerd (zie ook Paragraaf 4.1.2). In Tabel 5-2 is te zien dat alle waarden duidelijk groter zijn dan de kritische waarde van 0.05 en dus kan voor deze duren zowel de GEV als de Gumbel verdeling geaccepteerd worden.

Toets	GEV verdeling			Gumbel verdeling		
	2 dagen	4 dagen	8 dagen	2 dagen	4 dagen	8 dagen
Anderson-Darling	0.996	0.996	0.961	0.996	0.867	0.961
Kolgomorov-Smirnov	0.995	0.967	0.976	0.995	0.866	0.991
Cramér-von Mises	0.996	0.988	0.998	0.996	0.856	0.951

Tabel 5-2: *P-waarden betreffende een drietal aanpassingstoetsen voor de GEV verdeling en de Gumbel verdeling voor jaarmaxima te De Bilt met een duur van 2, 4 en 8 dagen. Waarden kleiner dan 0.05 duiden erop dat de desbetreffende verdeling niet geschikt is om de jaarmaxima te beschrijven.*

Figuur 5-2 geeft de terugkeerniveaus aan volgens de GEV verdeling en de Gumbel verdeling inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen, tezamen met de jaarmaxima van De Bilt voor het tijdvak 1906-2003. Zoals al eerder te zien was voor de kortere duren, is in de figuur zichtbaar dat voor alle beschouwde duren de betrouwbaarheidsintervallen die horen bij de GEV verdeling een stuk breder zijn dan die van de Gumbel verdeling. In Figuur 5-2 valt verder op dat bij duren van 4 en 8 dagen de GEV verdeling anders afbuigt dan het geval is bij duren van 4, 8, 12 en 24 uur (Figuur 4-2). De 1000-jaar terugkeerniveaus bij laatst genoemde duren zijn volgens de GEV verdeling hoger dan die volgens de Gumbel verdeling, bij duren van 4 en 8 dagen is dit omgekeerd. Dit wordt veroorzaakt doordat de vormparameter voor deze duren van teken is gewisseld.



Figuur 5-2: Terugkeerniveaus volgens de GEV verdeling en de Gumbel verdeling voor 2- (a), 4- (b) en 8-daagse (c) neerslaghoeveelheden (jaarmaxima) van De Bilt inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen. Tevens zijn de jaarmaxima van De Bilt voor het tijdvak 1906-2003 weergegeven. De terugkeerniveaus en de overschrijdingsfrequenties van de jaarmaxima bij een duur van 2 dagen staan ook weergegeven in Figuur 5-1.

De in Paragraaf 4.1.2 genoemde test van Hosking et al. (1985) is nu toegepast voor de meerdaagse neerslaghoeveelheden. Hieruit blijkt dat ook voor deze durven de vormparameter θ van de GEV verdeling (respectievelijk -0.00 , 0.10 en 0.13) niet significant afwijkt van 0. Voor durven van 4 en 8 dagen is de waarde van de vormparameter in absolute zin echter wel vrij groot. In Figuur 5-2 is dit goed te zien aangezien de GEV verdeling en Gumbel verdeling voor lagere overschrijdingsfrequenties behoorlijk van elkaar verschillen.

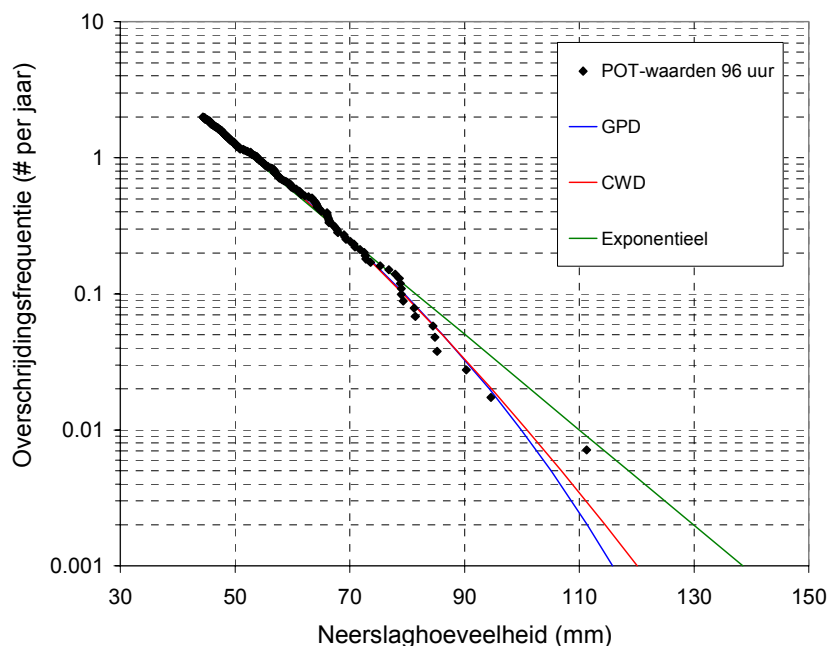
5.2 Peak-over-threshold waarden

5.2.1 Bayesiaanse analyse

Met een Bayesiaanse analyse zijn ook voor de 2-, 4- en 8-daagse neerslaghoeveelheden van POT-waarden verdelingen getoetst. Deze analyse is net als voor de kortere durven uitgevoerd voor een drietal verdelingen (GPD, CWD en exponentiële verdeling) en een viertal drempels, overeenkomend met overschrijdingsfrequenties van respectievelijk 10x, 5x, 2x en 1x per jaar (Tabel 5-3). Ter illustratie zijn in Figuur 5-3 voor een duur van 4 dagen en een drempel van 2x per jaar deze verdelingen inclusief de bijbehorende POT-waarden weergegeven.

Overschrijdingsfrequentie van de drempel	Duur		
	2 dagen	4 dagen	8 dagen
10x per jaar	19.0	23.4	25.2
5x per jaar	26.2	33.5	43.8
2x per jaar	34.9	44.5	60.4
1x per jaar	42.2	54.1	71.8

Tabel 5-3: Drempels (in mm) en bijbehorende overschrijdingsfrequenties voor duren van 2, 4 en 8 dagen, geldig voor station De Bilt.



Figuur 5-3: Verdelingen voor de POT-waarden met een drempelwaarde van 2x per jaar voor 4-daagse neerslaghoeveelheden in De Bilt.

Uit Tabel 5-4 is af te lezen dat de exponentiële verdeling over het algemeen een hoog gewicht heeft ten opzichte van de GPD en CWD. Bij duren van 4 en 8 dagen en een drempel van 10x per jaar voldoet de exponentiële verdeling echter duidelijk minder goed ten opzichte van de GPD en CWD. Opmerkelijk is verder dat bij een combinatie van een duur van 8 dagen en een drempel van 10x per jaar de CWD een veel hoger gewicht krijgt dan de GPD. Omdat van de drie verdelingen er geen verdeling een duidelijke voorkeur heeft en daarnaast de exponentiële verdeling een speciaal geval is van zowel de GPD als de CWD worden deze drie verdelingen in de volgende paragraaf verder uitgewerkt.

Duur	Verdeling	Drempel			
		10x / jaar	5x / jaar	2x / jaar	1x / jaar
2 dagen	GPD	0.15	0.09	0.15	0.17
	CWD	0.20	0.09	0.14	0.17
	Exponentiële verdeling	0.65	0.82	0.71	0.66
4 dagen	GPD	0.37	0.13	0.26	0.24
	CWD	0.53	0.12	0.23	0.26
	Exponentiële verdeling	0.10	0.75	0.51	0.50
8 dagen	GPD	0.01	0.36	0.22	0.23
	CWD	0.99	0.36	0.19	0.20
	Exponentiële verdeling	0.00	0.28	0.59	0.57

Tabel 5-4: Geschiktheid van kansverdelingen voor de POT-waarden van 2-, 4- en 8-daagse neerslaghoeveelheden te De Bilt voor verschillende drempelwaarden (10, 5, 2 en 1x per jaar), uitgedrukt in Bayes gewichten. Voor iedere duur en per drempel is het grootste gewicht vet gedrukt.

5.2.2 Analyse kansverdelingen

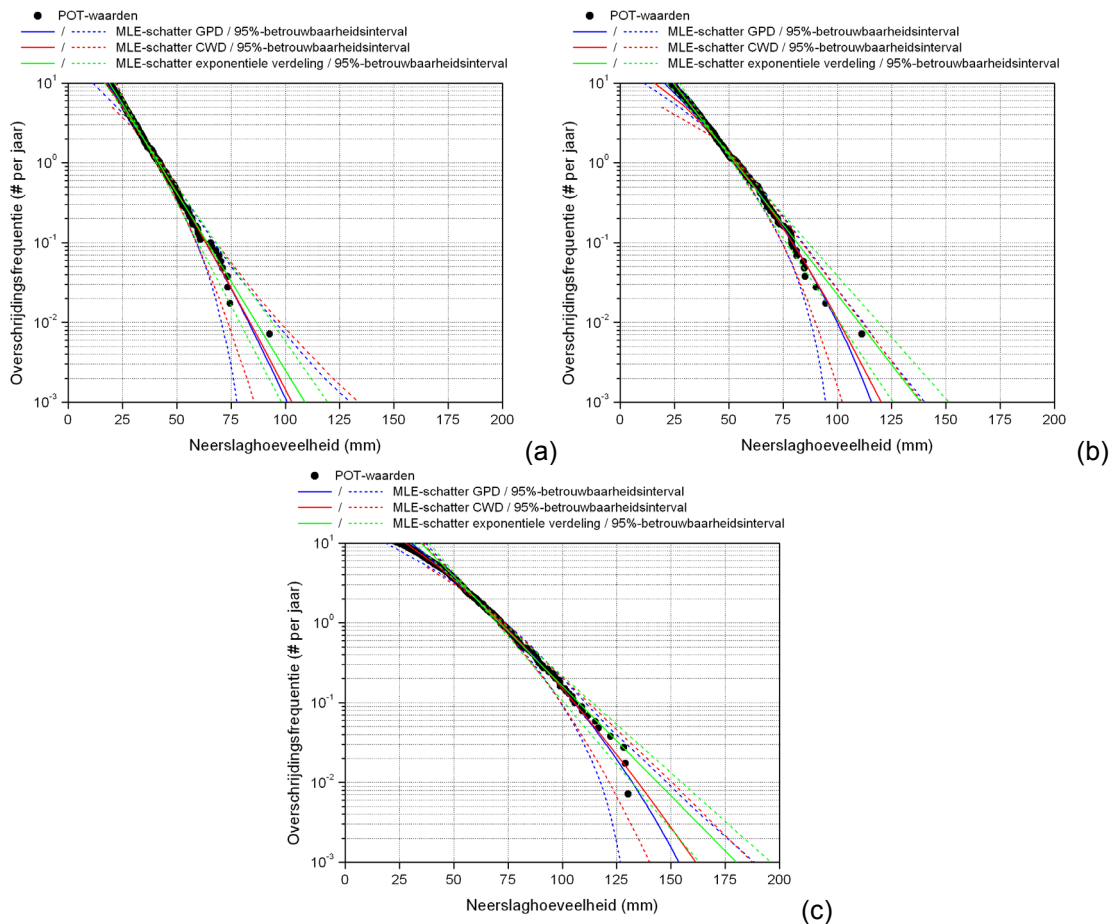
In deze paragraaf wordt bekeken in hoeverre de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling de POT-waarden van 2-, 4- en 8-daagse neerslaghoeveelheden kunnen beschrijven.

De GPD, de CWD en de exponentiële verdeling zijn middels de aanpassingstoetsen beschouwd of ze voldoen voor de meerdaagse neerslaghoeveelheden. In Tabel 5-5 is te zien dat voor vrijwel alle combinaties van drempels, duren en verdelingen de P -waarden beduidend hoger zijn dan 0.05. Op basis hiervan zijn deze combinaties mogelijk als beschrijving van de POT-waarden. Slechts bij een drempel van 10x per jaar voldoen de GPD en de exponentiële verdeling een aantal keren niet.

Toets	Drempel (per jaar)	GPD			CWD			Exponentiële verdeling		
		2 dagen	4 dagen	8 dagen	2 dagen	4 dagen	8 dagen	2 dagen	4 dagen	8 dagen
AD	10x	0.477	0.725	<u>0.029</u>	0.602	0.893	0.827	0.205	0.095	<u>0.000</u>
	5x	0.965	0.971	0.734	0.972	0.979	0.821	0.970	0.977	0.211
	2x	0.658	0.987	0.987	0.660	0.973	0.991	0.655	0.863	0.948
	1x	0.987	0.997	0.775	0.988	0.998	0.792	0.998	0.871	0.824
KS	10x	0.064	0.501	0.091	0.120	0.790	0.691	<u>0.011</u>	<u>0.038</u>	<u>0.000</u>
	5x	0.941	0.980	0.801	0.956	0.990	0.724	0.955	0.991	0.278
	2x	0.594	0.840	0.966	0.587	0.780	0.968	0.725	0.871	0.952
	1x	0.992	0.940	0.673	0.993	0.970	0.750	0.997	0.622	0.970
CS	10x	0.372	0.590	<u>0.045</u>	0.484	0.810	0.819	0.158	0.075	<u>0.000</u>
	5x	0.977	0.954	0.715	0.982	0.970	0.776	0.982	0.983	0.238
	2x	0.819	0.948	0.989	0.813	0.913	0.993	0.739	0.775	0.888
	1x	0.985	0.984	0.916	0.987	0.988	0.938	0.979	0.739	0.942

Tabel 5-5: P-waarden betreffende een drietal aanpassingstoetsen voor de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling voor verschillende duren (2, 4 en 8 dagen) van neerslaghoeveelheden (POT-waarden) te De Bilt en verschillende drempels (10x, 5x, 2x en 1x per jaar). De testen betreffen de Anderson-Darling (AD) toets, de Kolmogorov-Smirnov (KS) toets en de Cramér-von Mises (CM) toets. Waarden kleiner dan 0.05 duiden erop dat de desbetreffende verdeling niet geschikt is om de jaarmaxima te beschrijven en zijn onderstreept.

In Figuur 5-4 zijn voor de verschillende duren en een drempel van 2x per jaar de terugkeerniveaus van de verdelingen inclusief de 95%-betrouwbaarheidsintervallen en de bijbehorende POT-waarden weergegeven, tezamen met de POT-waarden van De Bilt voor het tijdvak 1906-2003. In de figuur is te zien dat bij een drempel van 2x per jaar de exponentiële verdeling de POT-waarden minder goed beschrijft voor duren van 4 en 8 dagen. Dit wordt ondersteund door de waarden van de vormparameter van de CWD vermeld in Tabel 5-6, die significant afwijken van 0. De andere drempels (10x, 5x en 1x per jaar) geven een soortgelijk beeld.

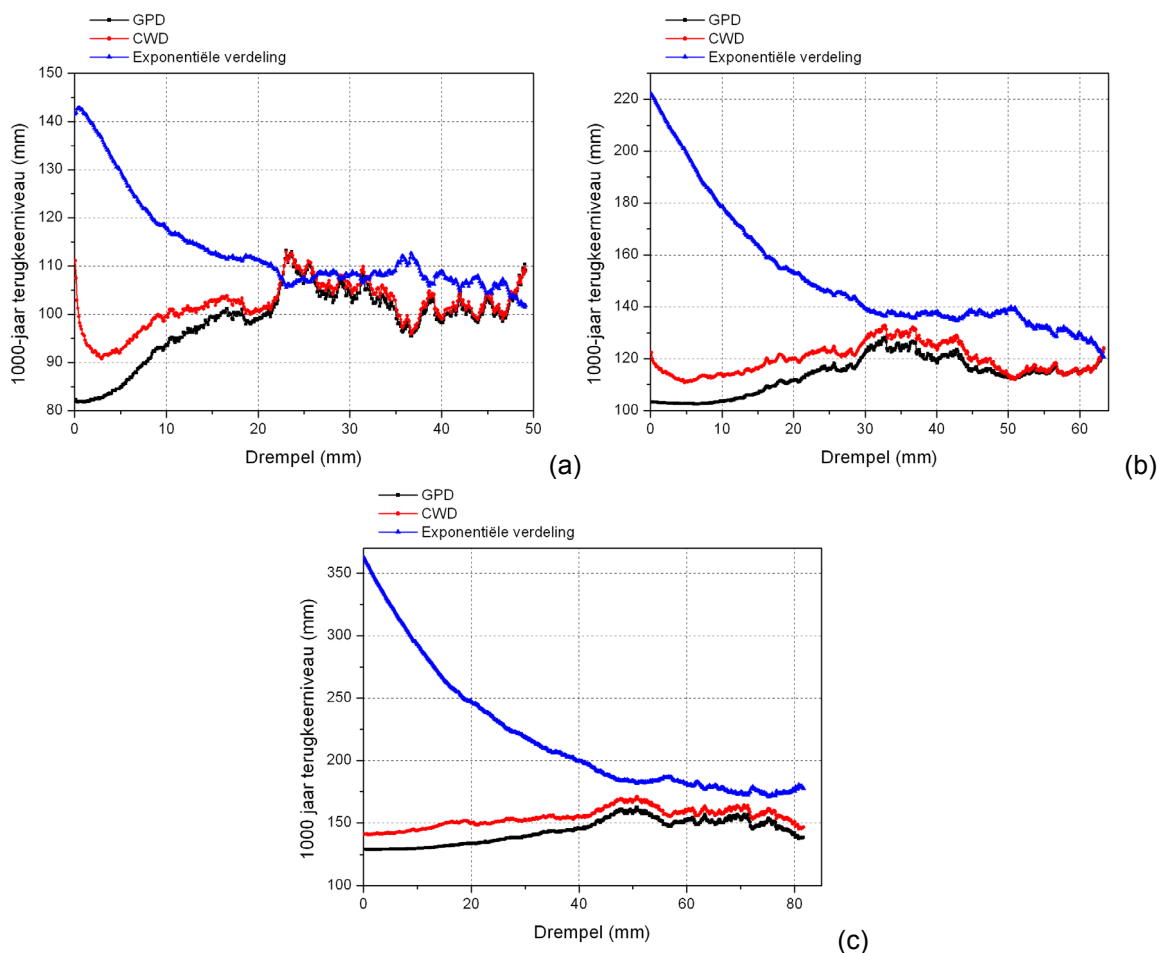


Figuur 5-4: Terugkeerniveaus volgens de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling voor 2- (a), 4- (b) en 8-daagse (c) neerslaghoeveelheden (POT-waarden) van De Bilt inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen met als drempel 2x per jaar. Tevens zijn de POT-waarden van De Bilt voor het tijdvak 1906-2003 weergegeven.

Drempel (overschrijdingen per jaar)	Duur (dagen)	Verdeling	
		GPD	CWD
10	2	0.05 (-0.01 – 0.11)	1.18 (0.98 – 1.41)
	4	0.09 (0.03 – 0.15)	1.32 (1.12 – 1.56)
	8	0.21 (0.16 – 0.26)	1.71 (1.54 – 1.90)
5	2	0.00 (-0.08 – 0.10)	0.99 (0.65 – 1.41)
	4	0.05 (-0.03 – 0.15)	1.16 (0.79 – 1.62)
	8	0.10 (0.03 – 0.20)	1.44 (1.08 – 1.83)
2	2	0.04 (-0.08 – 0.21)	1.20 (0.54 – 2.02)
	4	0.11 (-0.01 – 0.27)	1.57 (1.05 – 2.46)
	8	0.10 (-0.03 – 0.26)	1.45 (1.04 – 2.05)
1	2	0.03 (-0.16 – 0.28)	1.14 (0.28 – 1.95)
	4	0.11 (-0.06 – 0.40)	1.84 (1.26 – 3.06)
	8	0.12 (-0.03 – 0.37)	1.59 (1.17 – 2.28)

Tabel 5-6: Vormparameter (95%-betrouwbaarheidsintervallen) van de GPD en de CWD voor een viertal drempels (10, 5, 2 en 1x per jaar) en duren van 2, 4 en 8 dagen te De Bilt. Vet gedrukte waarden wijken significant af van 0 (GPD) of 1 (CWD).

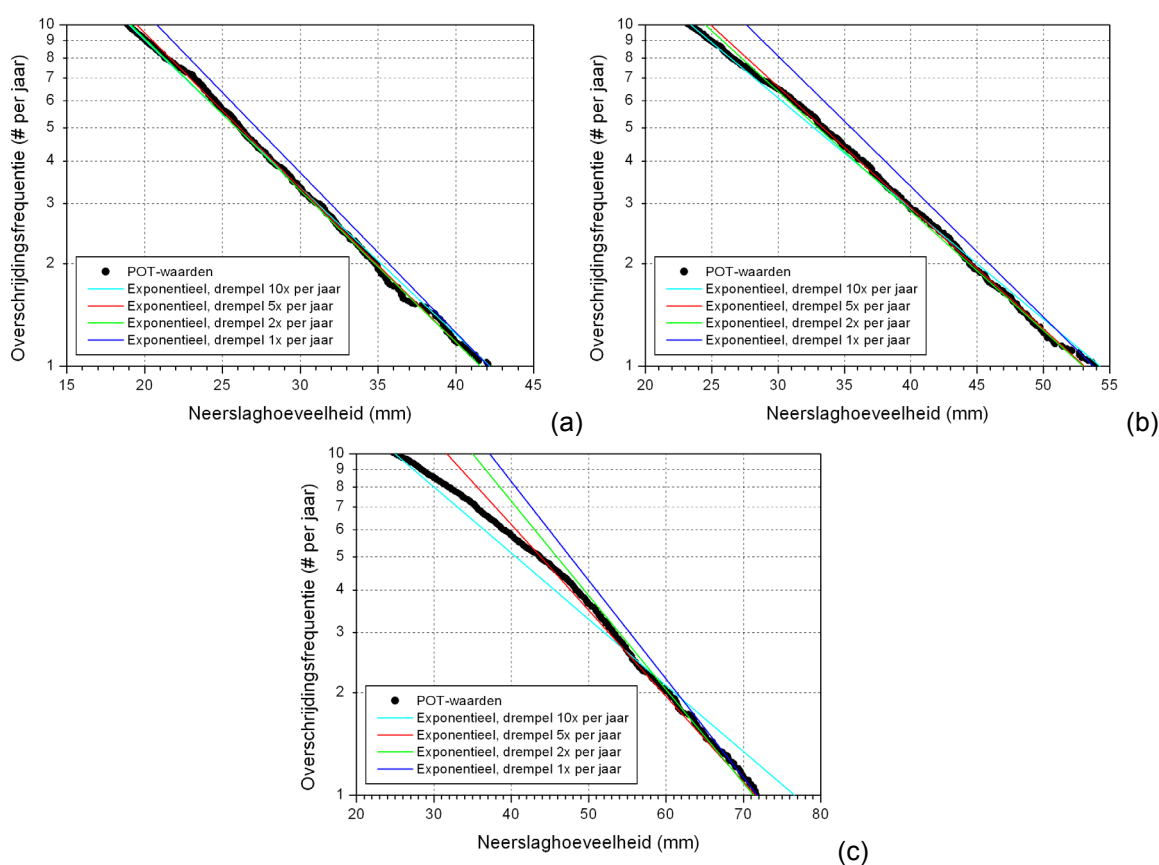
Om de hoogte van de drempel te kunnen bepalen wordt gebruik gemaakt van de drempelplaatjes in Figuur 5-5. Het is ook nu belangrijk een drempel te kiezen waarbij een goede balans bestaat tussen systematische afwijkingen en statistische onzekerheid in de terugkeerniveaus. In de figuur is te zien dat bij de exponentiële verdeling nauwelijks of niet een stabilisatie aanwezig is voor duren van 4 en 8 dagen, erop duidend dat deze verdeling niet geschikt is om POT-waarden te beschrijven voor deze duren. Alleen bij een duur van 2 dagen is vanaf een drempel van ongeveer 23 mm (7x per jaar) enigszins een stabilisatie zichtbaar. Bij de GPD en CWD lijkt voor alle duren een stabilisatie op te treden, bij een duur van 2 dagen vanaf een drempel van ongeveer 23 mm (7x per jaar), bij een duur van 4 dagen vanaf een drempel van ongeveer 25 mm (9x per jaar) en bij een duur van 8 dagen vanaf een drempel van ongeveer 40 mm (6x per jaar). Op basis van voorgaande kan geconcludeerd worden dat de exponentiële verdeling met een drempel van 5x per jaar voldoet als beschrijving voor POT-waarden met een duur van 2 dagen. Voor duren van 4 en 8 dagen beschrijven de GPD en CWD met een drempel van 5x per jaar de POT-waarden het beste. Uit de aanpassingstoetsen bleken deze combinaties van duren, drempels en verdelingen ook goed te voldoen. Ook de bevindingen betreffende de vormparameters van de GPD en CWD ondersteunen dit.



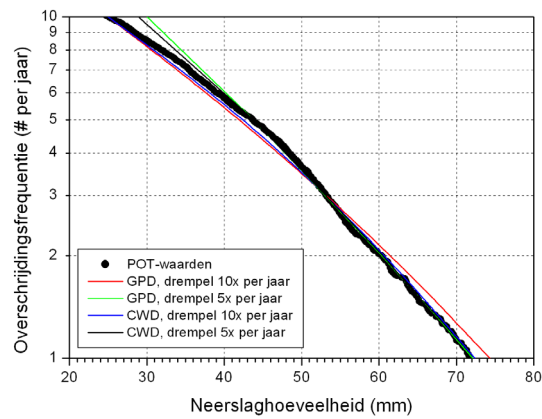
Figuur 5-5: Drempelplaatjes voor de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling waarbij per drempel (in mm) de hoogte van het 1000-jaar terugkeerniveau (in mm) is weergegeven. De resultaten betreffen 2- (a), 4- (b) en 8-daagse (c) neerslaghoeveelheden te De Bilt.

5.2.3 Hoge overschrijdingsfrequenties

Voor de bepaling van terugkeerniveaus die horen bij hoge overschrijdingsfrequenties (van 10x per jaar tot 1x per jaar) is evenals bij duren van 4, 8, 12 en 24 uur de exponentiële verdeling beschouwd met verschillende drempels. In Figuur 5-6 is te zien dat vooral bij duren van 2 en 4 dagen de exponentiële verdeling met drempels van 10x en 5x per jaar de POT-waarden goed beschrijft. Dit geldt echter niet voor een duur van 8 dagen, ook niet gecombineerd met andere drempels. Voor deze duur zijn daarom ook de GPD en de CWD beschouwd, die zijn weergegeven in Figuur 5-7 voor drempels van 10x en 5x per jaar. Op basis van deze figuur is te zien dat de CWD met als drempel 10x per jaar het best aansluit bij de POT-waarden met overschrijdingsfrequenties van meer dan 1x per jaar. Ook voor duren van 2 en 4 dagen beschrijft de CWD met een drempel van 10x per jaar de POT-waarden in voldoende mate (niet weergegeven).



Figuur 5-6: Overschrijdingsfrequenties van 10x per jaar tot 1x van POT-waarden van 2- (a), 4- (b) en 8-daagse neerslaghoeveelheden te De Bilt. De POT-waarden zijn beschreven met de exponentiële verdeling met als drempels 10x, 5x, 2x en 1x per jaar.



Figuur 5-7: Overschrijdingsfrequenties van 10x per jaar tot 1x van POT-waarden van 8-daagse neerslaghoeveelheden te De Bilt. De POT-waarden zijn beschreven met de GPD en de CWD met als drempels 10x en 5x per jaar.

6 Overkoepelende jaarstatistiek van De Bilt

Dit hoofdstuk beschrijft de uiteindelijke methodiek die gebruikt wordt om de neerslagstatistiek van De Bilt te bepalen, alsmede de keuzes die gemaakt zijn bij het opstellen van deze methodiek. Beargumenteerd wordt dat voor lage overschrijdingsfrequenties (van 1x per jaar tot 1x per 1000 jaar) de statistiek bepaald wordt met behulp van jaarmaxima beschreven door een GEV verdeling met voorgeschreven vormparameter. De statistiek voor hoge overschrijdingsfrequenties (van 10x per jaar tot 2x per jaar) wordt bepaald met behulp van POT-waarden beschreven door de CWD met een drempel van 10x per jaar. Tenslotte wordt bij de lage overschrijdingsfrequenties consistentie tussen duren onderling verkregen door het modelleren van de schaalparameter in de GEV verdeling. In tabelvorm:

	Overschrijdingsfrequentie	
	Laag (van 1x per jaar tot 1x per 1000 jaar)	Hoog (van 10x per jaar tot 2x per jaar)
Data	Jaarmaxima	POT-waarden
Kansverdeling	GEV verdeling met voorgeschreven vormparameter	CWD met een drempel van 10x per jaar
Consistentie tussen duren	Modellering van de GEV-schaalparameter	-

Tabel 6-1: Keuzen in het bepalen van de statistiek van De Bilt.

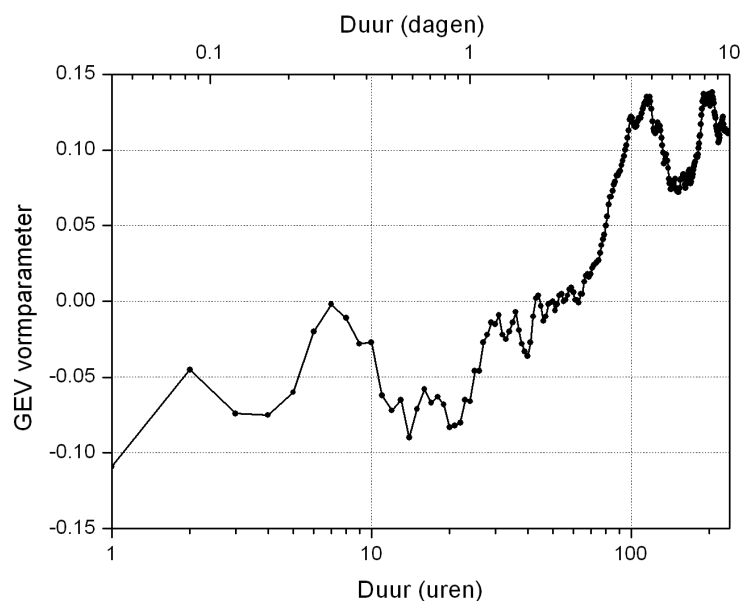
6.1 Data

In deze studie is gebruik gemaakt van jaarmaxima en POT-waarden. Een belangrijk verschil bij het analyseren van deze twee soorten data is het aanwezig zijn van een drempel bij POT-waarden. Daarbij is het belangrijk een drempel te kiezen waarbij een goede balans bestaat tussen systematische afwijkingen en statistische onzekerheid in de terugkeerniveaus. In Hoofdstuk 4 en 5 is hiernaar gekeken door te zoeken naar eventuele stabilisaties in terugkeerniveaus bij toenemende duren. Voor duren korter dan één dag is nauwelijks een stabilisatie aanwezig, terwijl voor langere duren wel enigszins een stabilisatie optreedt. Deze stabilisatie vindt echter plaats bij wisselende drempels en bovendien vertonen de terugkeerniveaus in het stabilisatietraject een zeer fluctuerend beeld. Hierdoor is het niet mogelijk om een keuze te maken voor een drempel die dezelfde is voor de verschillende duren wat betreft de overschrijdingsfrequentie ervan. Dit is het geval voor alle verdelingen die nader beschouwd zijn met betrekking tot de analyse van POT-waarden (de GPD, de CWD en de exponentiële verdeling). Om deze reden worden in deze studie de neerslaghoeveelheden die corresponderen met lage overschrijdingsfrequenties niet gemodelleerd met POT-waarden maar met jaarmaxima waarbij een drempelkeuze niet aan de orde is.

Echter, de neerslaghoeveelheden die corresponderen met hoge overschrijdingsfrequenties worden wel met POT-waarden gemodelleerd. Het gebruik van jaarmaxima is hier geen alternatief aangezien in dat geval een extrapolatie naar hogere overschrijdingsfrequenties (oftewel naar de onderkant van de verdeling) noodzakelijk is. Een extrapolatie brengt ongewenste onzekerheden in terugkeerniveaus met zich mee, terwijl bij het gebruik van POT-waarden met een drempel van 10x per jaar geen extrapolatie nodig is.

6.2 Kansverdeling

In Hoofdstuk 4 en 5 zijn voor verschillende duren jaarmaxima van neerslaghoeveelheden te De Bilt gemodelleerd met behulp van de GEV verdeling en de Gumbel verdeling. Beide verdelingen hebben een lokatie- en schaalparameter, terwijl de GEV verdeling daarnaast tevens een vormparameter heeft. Afzonderlijke analyses lieten zien dat deze vormparameter voor alle beschouwde duren niet significant afwijkt van 0 en dat daardoor de Gumbel verdeling het meest voor de hand ligt. Echter, wordt gekeken naar de vormparameter van alle duren van 1 uur tot 10 dagen tezamen (stapgrootte 1 uur) voor station De Bilt, dan is er een duidelijk patroon waarneembaar (Figuur 6-1). In de figuur is te zien dat voor duren van 1 uur tot ongeveer 1 dag de vormparameter vrij constant is rond waarden van -0.05 en dat voor duren van 1 dag tot 10 dagen de vormparameter geleidelijk toeneemt tot waarden dichtbij 0.15 , de waarde van 0 hierbij doorkruisend bij een duur van ongeveer 2 dagen.



Figuur 6-1: Vormparameter van de GEV verdeling voor station De Bilt voor duren van 1 uur tot 10 dagen (stapgrootte 1 uur).

Op basis van de figuur lijkt dus sprake te zijn van een patroon in de vormparameter. Dit kan een argument zijn om de jaarmaxima met de GEV verdeling te beschrijven, ondanks dat de vormparameter voor geen van de duren significant afwijkt van 0 op het 5%-niveau. Het is echter mogelijk dat het waargenomen patroon niet veel anders is dan een schijnpatroon door correlaties tussen de geschatte vormparameters voor opeenvolgende duren. Daarnaast hebben de waarden van de vormparameter een te grote onzekerheid wanneer ze slechts op basis van één enkele stationsreeks beschreven worden. Het is daarom van belang om gebruik te maken van meerdere stations om die onzekerheid te verkleinen en een eventueel werkelijk aanwezig patroon vast te stellen. Buishand (1983b) heeft op basis van 15 Nederlandse stations en het tijdvak 1920-1974 laten zien dat er een patroon aanwezig is in de vormparameter en dat er geen verband bestaat tussen de vormparameters ruimtelijk gezien (ook in Buishand, 1989). Voor geheel Nederland heeft hij daardoor een relatie tussen de vormparameter θ en de duur kunnen afleiden, geldig voor duren van 1 dag tot 10 dagen:

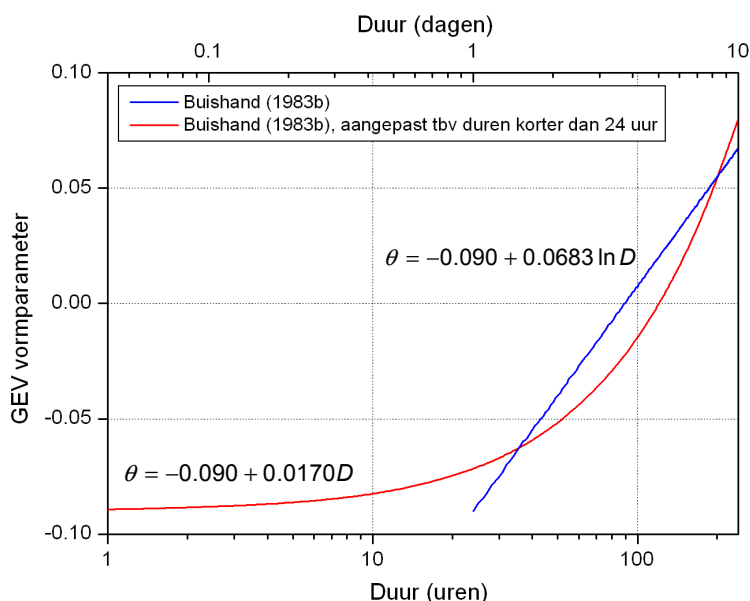
$$\theta = -0.090 + 0.0683 \ln D, \quad (6.1)$$

met D de duur in dagen.

Gellens (2003) heeft voor verschillende duren de vormparameter bepaald aan de hand van een aantal Belgische stations. Voor duren van 1 dag tot 10 dagen komen zijn resultaten goed overeen met de resultaten van Buishand (1983b). Voor duren korter dan 1 dag bleek het lineaire verband echter niet op te gaan en was er sprake van een min of meer constante waarde voor de vormparameter. Analooq aan Gellens (2003) is daarom gekozen om het verband tussen de duur en de vormparameter te beschrijven met een aangepaste functie. De parameters van deze functie zijn bepaald door gebruik te maken van de waarden die ook door Buishand (1983b) zijn gebruikt, aangevuld met de waarde -0.090 voor duren korter dan 1 dag. De modellering van de vormparameter θ resulteert in:

$$\theta = -0.090 + 0.0170D, \quad (6.2)$$

en is grafisch weergegeven in Figuur 6-2, waarin ook de relatie volgens Buishand (1983b) uitgezet is. Door het aanwezig zijn van het patroon in de vormparameter wordt in deze studie gekozen om voor de lage overschrijdingsfrequenties terugkeerniveaus te bepalen middels het beschrijven van jaarmaxima met de GEV verdeling en dus niet met de Gumbel verdeling. Deze keuze heeft vooral invloed op de zeer lage overschrijdingsfrequenties (van 1x per 100 jaar tot 1x per 1000 jaar). De oude statistiek zoals gepresenteerd in Tabel 1-2 is wel gebaseerd op de Gumbel verdeling maar gaat ook niet verder dan overschrijdingsfrequenties van 1x per 100 jaar.



Figuur 6-2: Vormparameter van de GEV verdeling gemodelleerd voor stations binnen Nederland voor duren van 1 uur tot 10 dagen. De blauwe lijn is volgens Buishand (1983b), de rode lijn betreft de aanpassing ten behoeve van duren korter dan 24 uur.

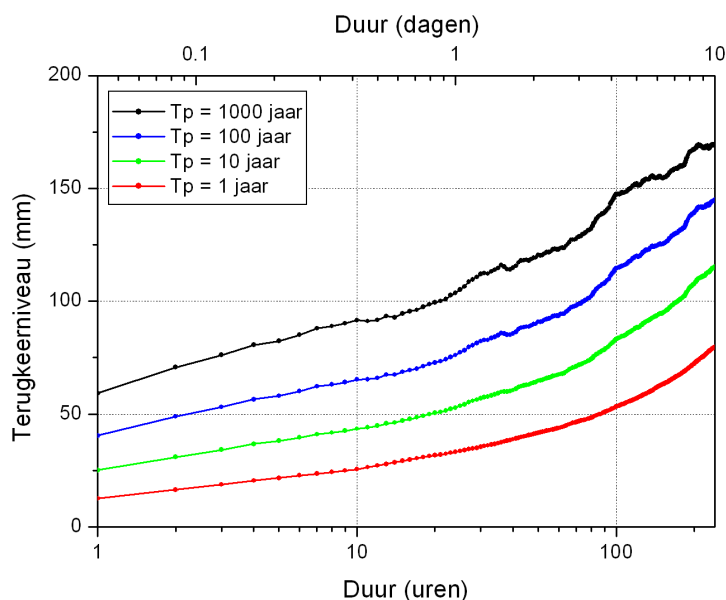
Bij de voorgeschreven vormparameter worden opnieuw de lokatie- en schaalparameter bepaald. Vervolgens worden de terugkeerniveaus berekend. Aangezien de lokatie- en schaalparameter bepaald worden met behulp van de reeks van De Bilt, betekent het opleggen van een voorgeschreven vormparameter voor heel Nederland niet dat ook de resulterende terugkeerniveaus voor heel Nederland gelijk zijn. Deze niveaus zijn mede afhankelijk van de hoogte van de lokatie- en schaalparameter die geografisch gezien wél verschillend kunnen zijn. In Hoofdstuk 8 wordt verder ingegaan op de statistiek van een aantal andere Nederlandse stations.

Bovenstaand gebruik van jaarmaxima is van toepassing op lage overschrijdingsfrequenties. Voor hoge overschrijdingsfrequenties wordt gebruik gemaakt van POT-waarden. Hoofdstuk 4 en 5 laten

zien dat de exponentiële verdeling en de CWD met een drempel van 10x per jaar de POT-waarden in voldoende mate beschrijven voor durren variërend van 4 uur tot en met 4 dagen. Voor de duur van 8 dagen is dit echter alleen het geval voor de CWD. Uit consistentieoverwegingen wordt daarom voor alle durren de CWD met een drempel van 10x per jaar gebruikt voor de hoge overschrijdingsfrequenties.

6.3 Consistentie tussen durren

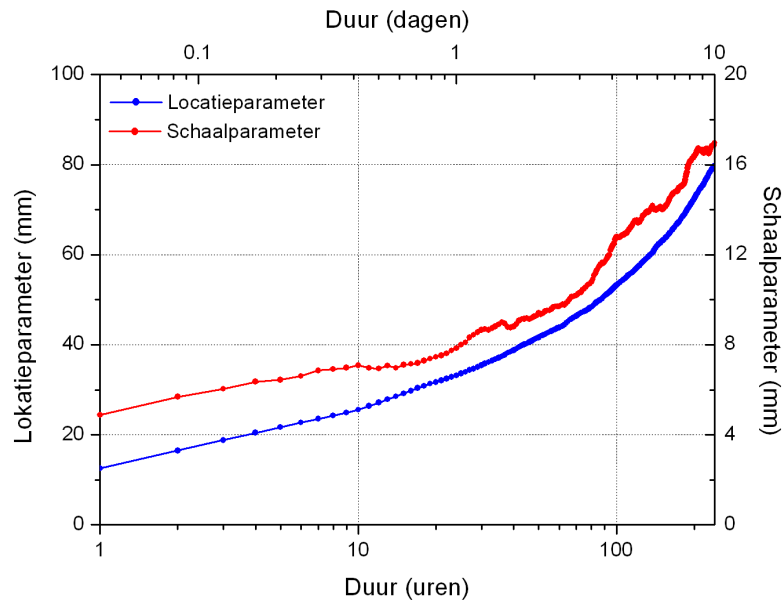
In Paragraaf 6.1 is een keuze gemaakt voor de data waarvan gebruik wordt gemaakt en in Paragraaf 6.2 voor de kansverdelingen ter beschrijving van de data. Daarmee is echter nog niet gegarandeerd dat er voldoende consistentie bestaat in de terugkeerniveaus tussen de verschillende durren. Zo dienen de terugkeerniveaus bij een toenemende duur een monotoon stijgende functie te volgen (gelijkblijvend of toenemend), maar laat Figuur 6-3 zien dat dit niet altijd het geval is, getuige de daling in vooral het 1000-jaar terugkeerniveau bij onder andere een duur van 36 tot 39 uur.



Figuur 6-3: Terugkeerniveau als functie van de duur voor een viertal lage overschrijdingsfrequenties (1x per jaar, 1x per 10 jaar, 1x per 100 jaar en 1x per 1000 jaar). De terugkeerniveaus zijn (met tussenstappen van één uur) bepaald door analyse van jaarmaxima van De Bilt met de GEV verdeling met een voorgeschreven vormparameter.

Consistentie in de terugkeerniveaus kan verkregen worden door oftewel de terugkeerniveaus zelf aan te passen of door de achterliggende parameters van de GEV verdeling aan te passen. Gekozen wordt om in deze studie de parameters aan te passen aangezien bij aanpassing van de terugkeerniveaus de uiteindelijke waarden niet meer exact afkomstig zijn van een GEV verdeling terwijl dit wel het geval is bij modellering van de parameters van de GEV verdeling.

De vormparameter van de GEV verdeling is gemodelleerd middels Vergelijking (6.2). De lokatie- en schaalparameter als functie van de duur zijn weergegeven in Figuur 6-4. De figuur laat zien dat de lokatieparameter geen aanpassing behoeft aangezien het verloop bij oplopende durren reeds monotoon stijgend en bovendien zeer “glad” is. Dit geldt niet voor de schaalparameter en daarom is aanpassing voor deze parameter wel nodig.

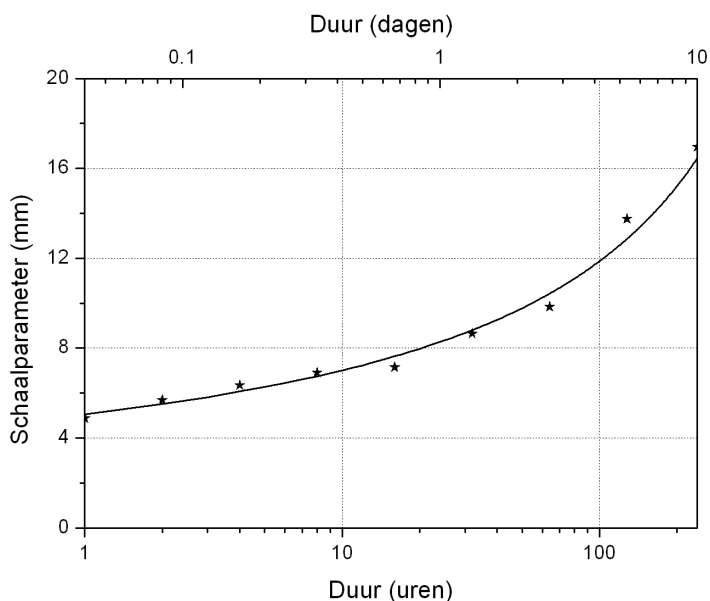


Figuur 6-4: Lokatie- en schaalparameter van de GEV verdeling voor verschillende uren bij een voorgeschreven vormparameter. De waarden zijn bepaald aan de hand van jaarmaxima van De Bilt.

Figuur 6-4 laat zien dat er geen rechtlijnig verband bestaat tussen de logaritme van de duur en de schaalparameter. Door middel van een machtstransformatie op de schaalparameter kan er een dergelijk rechtlijnig verband wel verkregen worden. Dit rechtlijnig verband kan vervolgens gemodelleerd worden middels lineaire regressie, waarbij de waarde van de macht geoptimaliseerd is. De modellering van de schaalparameter β middels lineaire regressie resulteert in:

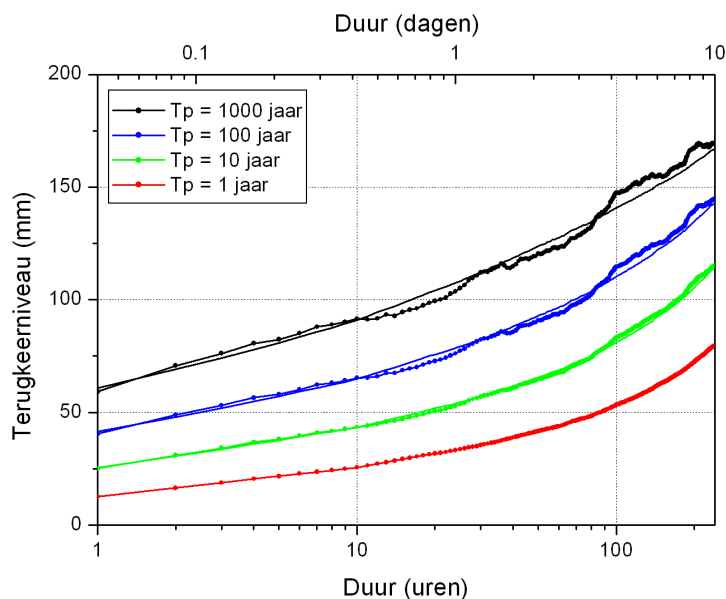
$$\beta = (0.0918 - 0.0215 \ln D)^{-1/1.13}, \quad (6.3)$$

en is grafisch weergegeven in Figuur 6-5.



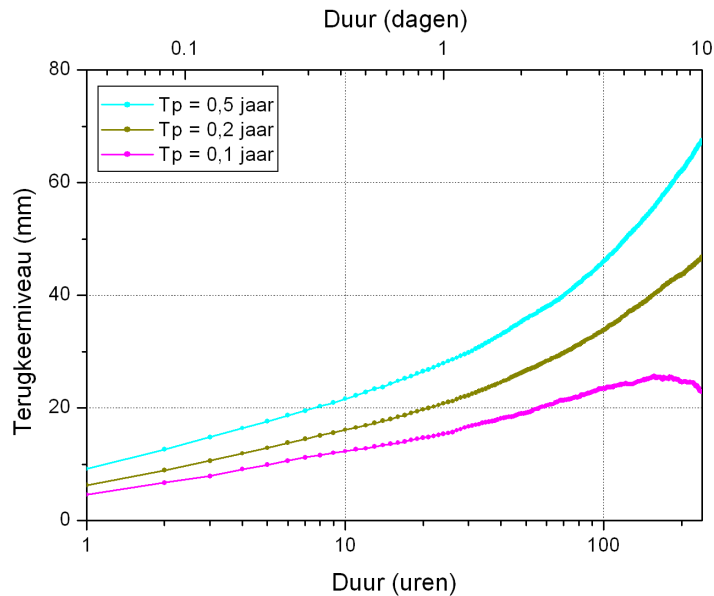
Figuur 6-5: Schaalparameter voor (sterretjes) en na (lijnen) het toepassen van lineaire regressie. Bij het toepassen van de regressie is een selectie van uren gekozen zodanig dat de uren op logaritmische schaal evenredig verdeeld zijn (met uitzondering van de langste duur). De uren betreffen 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 en 240 uur. De waarden zijn bepaald aan de hand van jaarmaxima van De Bilt.

Met behulp van de gemodelleerde schaalparameters kunnen opnieuw terugkeerniveaus berekend worden. Voor een viertal overschrijdingsfrequenties zijn deze terugkeerniveaus uitgezet in Figuur 6-6, samen met de terugkeerniveaus die berekend zijn zonder de schaalparameter te modelleren en die ook te zien zijn in Figuur 6-3. Te zien is dat de terugkeerniveaus nu voor de verschillende overschrijdingsfrequenties gladde monotone functies volgen met de duur en dat er dus sprake is van consistentie tussen uren onderling. Het verloop van het 10-jaar terugkeerniveau is nauwelijks aangepast en dat van het 1-jaar terugkeerniveau nog minder, omdat de schaalparameter vooral van invloed is op de staart van de verdeling. Hoe minder verder in de staart van de verdeling des te meer worden de terugkeerniveaus bepaald door de lokatieparameter die niet aangepast is.



Figuur 6-6: Terugkeerniveau als functie van de duur voor een viertal overschrijdingsfrequenties (1x per jaar, 1x per 10 jaar, 1x per 100 jaar en 1x per 1000 jaar). De terugkeerniveaus zijn bepaald enerzijds door analyse van jaarmaxima van De Bilt met de GEV verdeling met een voorgeschreven vormparameter (de door lijnen verbonden punten) en anderzijds door analyse van jaarmaxima van De Bilt met de GEV verdeling met een voorgeschreven vormparameter en een gemodelleerde schaalparameter (de doorgetrokken lijnen).

Het voorgaande betreft het consistent maken van terugkeerniveaus voor lage overschrijdingsfrequenties. Ook voor de hogere overschrijdingsfrequenties is deze consistentie tussen de verschillende durren onder de loep genomen. Hiervoor zijn in Figuur 6-7 voor een drietal hoge overschrijdingsfrequenties (10x per jaar, 5x per jaar en 2x per jaar) terugkeerniveaus volgens de CWD met een drempel van 10x per jaar uitgezet tegen de logaritme van de duur. Het eerste wat opvalt in de figuur is dat bij een overschrijdingsfrequentie van 10x per jaar het terugkeerniveau vanaf een duur van ongeveer 4 dagen begint af te vlakken en zelfs kleiner wordt vanaf een duur van 6 dagen, iets wat praktisch gezien niet mogelijk is. Dit is het gevolg van de manier van selecteren van onafhankelijke neerslaggebeurtenissen. Bij lange durren worden immers minder gebeurtenissen geselecteerd dan bij korte durren; bij een duur van 1 uur zijn het er gemiddeld per jaar ongeveer 114 terwijl het er bij een duur van 10 dagen per jaar ongeveer 12 zijn dat nauwelijks meer is dan de hoogste overschrijdingsfrequentie die in deze studie beschouwd wordt (10x per jaar). De hieraan gekoppelde terugkeerniveaus zijn dan ook relatief laag en durren van 4 en 8 dagen bij een overschrijdingsfrequentie van 10x per jaar kunnen daarom niet ingevuld worden. Verder is te zien in Figuur 6-7 dat, uitgezonderd de bovengenoemde daling, sprake is van monotoon stijgende en gladde functies. Daardoor is het niet nodig consistentie tussen durren te forceren, maar wordt gebruik gemaakt van de terugkeerniveaus zoals deze bepaald worden na directe analyse van de POT-waarden met de CWD met een drempel van 10x per jaar.



Figuur 6-7: Terugkeerniveau als functie van de duur voor een drietal overschrijdingsfrequenties (10x per jaar, 5x per jaar en 2x per jaar). De terugkeerniveaus zijn bepaald door analyse van POT-waarden van De Bilt met de CWD met een drempel van 10x per jaar.

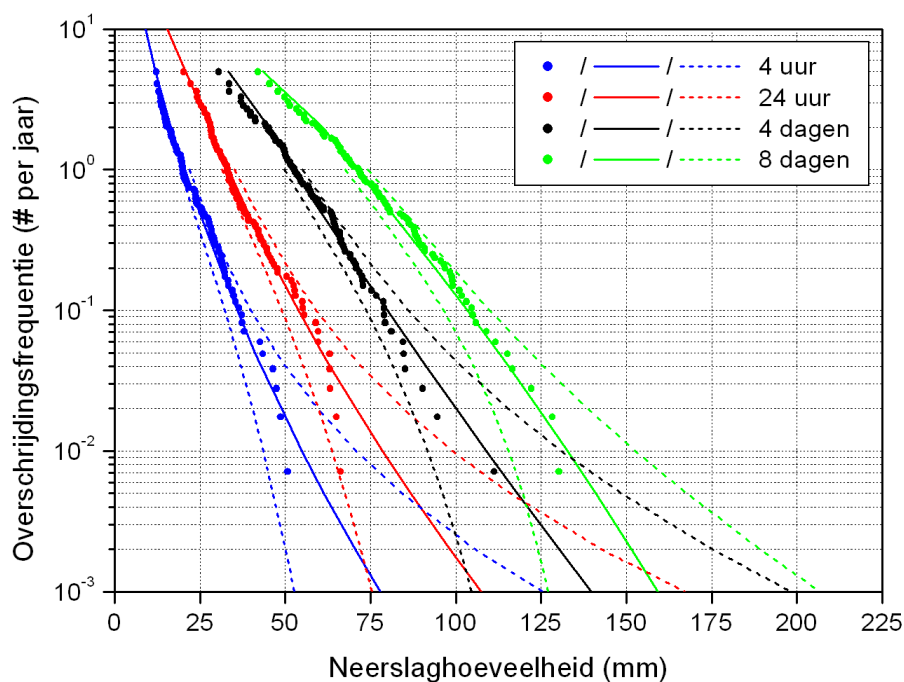
De terugkeerniveaus die volgen uit bovenstaande resultaten voor zowel de lage als hoge overschrijdingsfrequenties worden gepresenteerd voor een aantal uren in Tabel 6-2. Voor een viertal uren zijn deze terugkeerniveaus grafisch weergegeven tezamen met de desbetreffende jaarmaxima in Figuur 6-8. Voor de lage overschrijdingsfrequenties zijn in de figuur ook de 95%-betrouwbaarheidsintervallen weergegeven die ook te zien zijn in Tabel 6-3. Deze intervallen zijn tot stand gekomen met behulp van Monte-Carlo simulaties en geldig voor een GEV verdeling met lokatie-, schaal- en vormparameter die gebaseerd zijn op één enkele reeks. De vormparameter is hier echter niet aan de hand van enkel de reeks van station De Bilt bepaald maar aan de hand van meerdere stations en heeft daardoor een grotere betrouwbaarheid. Aangezien de betrouwbaarheidsintervallen van de GEV verdeling vooral bij de lage overschrijdingsfrequenties sterk bepaald worden door de vormparameter zijn de werkelijke betrouwbaarheidsintervallen smaller dan de intervallen in Figuur 6-8 en Tabel 6-3. Een kwantitatieve benadering van het verschil is in deze studie niet uitgevoerd.

Jaar	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	9	12	13	15	19	-	-	-
5x per jaar	12	15	17	21	26	33	43	45
2x per jaar	16	20	23	28	35	45	61	64
1x per jaar	21	24	27	33	41	52	71	75
1x per 2 jaar	25	29	32	39	48	60	81	86
1x per 5 jaar	31	36	40	47	58	71	94	99
1x per 10 jaar	36	41	46	54	65	80	103	109
1x per 20 jaar	41	47	52	61	73	89	113	118
1x per 25 jaar	43	49	54	63	75	91	115	121
1x per 50 jaar	49	56	61	71	84	100	124	130
1x per 100 jaar	55	62	68	79	92	109	133	138
1x per 200 jaar	61	69	75	87	101	118	141	146
1x per 500 jaar	71	79	86	98	113	130	152	156
1x per 1000 jaar	78	88	95	108	123	140	159	163

Tabel 6-2: Terugkeerniveaus (mm) van neerslaghoeveelheden voor verschillende overschrijdingsfrequenties en duren. De niveaus voor de hoge overschrijdingsfrequenties (boven de stippellijn) zijn bepaald door analyse van POT-waarden van De Bilt met de CWD met een drempel van 10x per jaar, de niveaus voor de lage overschrijdingsfrequenties (onder de stippellijn) zijn bepaald door analyse van jaarmaxima van De Bilt met de GEV verdeling met een voorgeschreven vormparameter en consistent gemaakt voor duren onderling.

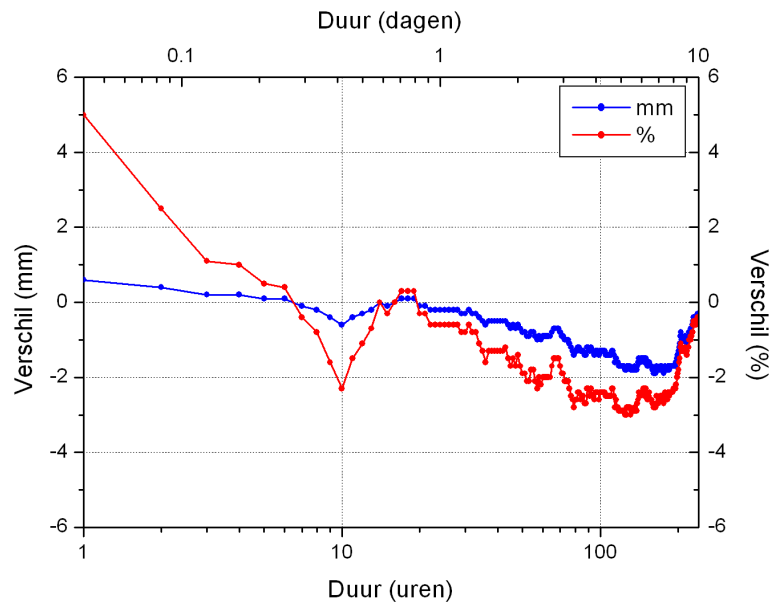
Jaar	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
1x per jaar	19-22	23-26	26-29	31-35	39-44	50-55	68-74	72-79
1x per 2 jaar	23-27	27-31	30-35	37-42	45-51	57-64	77-85	82-90
1x per 5 jaar	28-34	33-39	37-43	44-51	54-62	67-76	89-99	94-105
1x per 10 jaar	32-40	37-46	41-50	49-59	59-71	74-86	96-110	102-116
1x per 20 jaar	36-47	41-54	46-59	54-69	65-82	80-98	103-122	109-127
1x per 25 jaar	37-50	43-57	47-62	55-72	67-85	82-102	105-126	111-131
1x per 50 jaar	40-60	46-67	51-73	60-85	71-99	87-115	111-139	116-144
1x per 100 jaar	44-71	50-80	54-86	64-99	76-114	92-131	116-153	121-157
1x per 200 jaar	46-84	53-94	58-102	68-116	80-132	96-149	120-168	125-172
1x per 500 jaar	50-106	57-117	62-126	72-143	85-160	101-175	124-189	130-192
1x per 1000 jaar	53-126	60-139	65-149	75-167	88-185	105-198	127-207	132-208

Tabel 6-3: Onder- en bovengrenzen van de 95%-betrouwbaarheidsintervallen (mm) behorende bij de terugkeerniveaus uit Tabel 6-2, voor overschrijdingsfrequenties van 1x per jaar en minder.



Figuur 6-8: Terugkeerniveaus (doorgetrokken lijnen) inclusief 95%-betrouwbaarheidsintervallen (gestippelde lijnen) voor een aantal duren, te weten 4 uur, 24 uur, 4 dagen en 8 dagen. De punten staan voor de corresponderende jaarmaxima van De Bilt. De betrouwbaarheidsintervallen zijn breder dan verwacht mag worden. Zie voor meer details hierover de hoofdttekst.

Het is niet vanzelfsprekend dat er een vloeiende overgang van de hoge naar de lage overschrijdingsfrequenties plaatsvindt. Dit wordt veroorzaakt doordat de hoge overschrijdingsfrequenties (van 10x per jaar tot 2x per jaar) bepaald zijn middels beschrijving van POT-waarden en de lage overschrijdingsfrequenties (van 1x per jaar tot 1x per 1000 jaar) middels beschrijving van jaarmaxima. Met behulp van de numerieke presentatie in Tabel 6-2 is het moeilijk na te gaan of deze overgang goed verloopt. Aan de hand van de grafische presentatie in Figuur 6-8 is op te maken dat voor de gepresenteerde duren de overgangen in ieder geval redelijk verlopen; er zijn geen plotselinge “knikken” waarneembaar. Om een gedetailleerder beeld van de overgang te verkrijgen is voor de verschillende duren het verschil berekend tussen het 1-jaar terugkeerniveau dat bepaald is aan de hand van de POT-waarden en het 1-jaar terugkeerniveau dat bepaald is aan de hand van de jaarmaxima, zowel absoluut in mm als relatief in %. Het resultaat hiervan is weergegeven in Figuur 6-9. Duidelijk is te zien dat voor alle duren de verschillen marginaal zijn, uiteenlopend van ongeveer –2 tot +1 mm; waarden die maximaal slechts 5% bedragen.



Figuur 6-9: Verschil tussen het 1-jaar terugkeerniveau berekend met behulp van POT-waarden van De Bilt en het 1-jaar terugkeerniveau berekend met jaarmaxima van De Bilt, zowel absoluut (mm) als relatief (%) uitgedrukt.

Als de nieuwe waarden van Tabel 6-2 vergeleken worden met de waarden volgens de huidige beschikbare statistiek (zie Tabel 1-2), dan valt met name op dat voor de lage overschrijdingsfrequenties de terugkeerniveaus bij duren korter dan ongeveer 5 dagen hoger zijn geworden en bij langere duren lager (tot maximaal ongeveer 10% bij een overschrijdingsfrequentie van 1x per 100 jaar). Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de terugkeerniveaus van Tabel 1-2 voor de lage overschrijdingsfrequenties bepaald zijn aan de hand van de Gumbel verdeling en die van Tabel 6-2 aan de hand van de GEV verdeling waarvan de vormparameter bij een duur van ongeveer 5 dagen van teken wisselt. De overige (marginale) verschillen tussen de twee tabellen worden veroorzaakt door de toegevoegde waarde van neerslaggegevens in het tijdvak 1978-2003 die wel meegenomen zijn in Tabel 6-2 en niet in Tabel 1-2. Deze extra neerslaggegevens hebben nauwelijks invloed op de hoogte van de terugkeerniveaus. Ze zorgen ervoor dat bij de lagere overschrijdingsfrequenties en bij korte duren (minder dan 2 dagen) de niveaus licht lager worden en bij langere duren (meer dan 2 dagen) licht hoger. De verschillen veroorzaakt door de extra neerslaggegevens (1978-2003) zijn echter duidelijk kleiner dan de verschillen veroorzaakt door de andere analysemethode (GEV in plaats van Gumbel).

7 Seizoens- en maandstatistiek van De Bilt

In dit hoofdstuk wordt seizoens- en maandstatistiek van De Bilt afgeleid. Voor de seizoenen worden het groeiseizoen beschouwd en de periode buiten het groeiseizoen. In deze studie is het groeiseizoen gedefinieerd als de 8-maandelijkse periode maart tot en met oktober en de periode buiten het groeiseizoen als de 4-maandelijkse periode november tot en met februari. Tevens wordt de oogstperiode beschouwd, gedefinieerd als de 2-maandelijkse periode september-oktober.

Bij het afleiden van de seizoensstatistiek wordt gebruik gemaakt van de methodieken zoals deze ook bij het afleiden van de jaarstatistiek van De Bilt zijn gebruikt. Gesteld kan worden of de seizoensstatistiek consistent dient te zijn met de jaarstatistiek, iets wat niet bij voorhand gegarandeerd is. Wanneer in de toepassing de aandacht vooral uitgaat naar de seizoensstatistiek en minder naar de jaarstatistiek kan beargumenteerd worden om gebruik te maken van de onafhankelijke analyses van afzonderlijke seizoenen en dus geen methode toe te passen om de seizoensstatistiek consistent te maken met de jaarstatistiek. In dat geval genieten de resultaten van de onafhankelijke analyses van afzonderlijke seizoenen de voorkeur. Deze worden besproken in Paragraaf 7.1. Er zijn echter ook toepassingen waarbij de aandacht naar zowel de seizoensstatistiek als de jaarstatistiek uitgaat. Hierbij is het belangrijk dat de seizoensstatistiek wel consistent is met de jaarstatistiek. Daarom wordt in deze studie een methode gebruikt die hiervoor zorgt. Gekozen is voor een methode die onder andere ook is toegepast door Roskam et al. (2000) wat betreft waterstanden, golfhoogten en golfperiodes en door Verkaik et al. (2003) wat betreft windsnelheden, beide om directionele statistiek consistent te maken met omni-directionele statistiek. Deze methode wordt beschreven en uitgewerkt in Paragraaf 7.2.

7.1 Afleiding van de statistiek

Bij het afleiden van de seizoensstatistiek wordt gebruik gemaakt van de methoden zoals die ook gebruikt zijn bij het afleiden van de jaarstatistiek van De Bilt. Dit betekent dat de neerslaghoeveelheden voor lage overschrijdingsfrequenties (van 1x per jaar tot 1x per 1000 jaar) bepaald worden door jaarmaxima (of beter gezegd seizoensmaxima) te beschrijven met de GEV verdeling. Zoals reeds in Hoofdstuk 6 is beargumenteerd is de vormparameter van de GEV verdeling niet gebaseerd op enkel de neerslagreeksen van De Bilt, maar door gebruik te maken van meerdere stations. Buishand (1983b) en Gellens (2003) laten zien dat de vormparameter voor verschillende seizoenen (6-maandelijkse periodes) nauwelijks afwijkt ten opzichte van de vormparameter voor het gehele jaar. Voor het groeiseizoen en de periode buiten het groeiseizoen wordt er daarom gebruik gemaakt van de voorgeschreven vormparameter zoals ook gebruikt voor de statistiek van het gehele jaar, aangezien de lengtes van deze periodes (respectievelijk 8 en 4 maanden) niet veel afwijken van een 6-maandelijkse periode. Ook voor de 2-maandelijkse oogstperiode wordt dezelfde voorgeschreven vormparameter gehanteerd. Omdat de lengte van deze periode beduidend korter is dan een 6-maandelijkse periode, is het toepassen van de voorgeschreven vormparameter bij deze periode minder betrouwbaar. De vormparameter θ is dus op eenzelfde manier als bij de jaarstatistiek een functie van de duur D in dagen:

$$\theta = -0.090 + 0.0170D. \quad (7.1)$$

Het consistent maken van terugkeerniveaus ten opzichte van duren onderling wordt opnieuw bereikt door het modelleren van de schaalparameter β , resulterend in:

$$\beta_1 = (0.0564 - 0.0158 \ln D)^{-1/1.37}, \quad (7.2)$$

$$\beta_2 = (1.1895 + 0.0513 \ln D)^{1/0.10}, \quad (7.3)$$

$$\beta_3 = (0.8424 - 0.0258 \ln D)^{-1/0.08}, \quad (7.4)$$

waarbij β_1 staat voor de schaalparameter horend bij het groeiseizoen, β_2 voor de schaalparameter horend bij de periode buiten het groeiseizoen en β_3 voor de schaalparameter horend bij de oogstperiode.

Tenslotte worden neerslaghoeveelheden voor hoge overschrijdingsfrequenties (van 10x per jaar tot 2x per jaar) bepaald door POT-waarden te beschrijven met de CWD met een drempel die 10x per jaar wordt overschreden.

Resultaten voor de 3 verschillende perioden, respectievelijk het groeiseizoen (maart-oktober), de periode buiten het groeiseizoen (november-februari) en de oogstperiode (september-oktober) voor een aantal overschrijdingsfrequenties en duren worden gepresenteerd in Tabel 7-1, Tabel 7-2 en Tabel 7-3. Met behulp van deze tabellen kunnen de 3 perioden onderling vergeleken worden en met behulp van Tabel 6-2 en Figuur 6-8 kunnen ze vergeleken worden met de jaarstatistiek. Op basis daarvan kan gesteld worden dat de statistiek voor het groeiseizoen weinig afwijkt van de jaarstatistiek. De terugkeerniveaus voor de periode buiten het groeiseizoen daarentegen zijn een stuk lager. De terugkeerniveaus voor de oogstperiode zijn over het algemeen wat lager dan die voor het groeiseizoen en die voor het gehele jaar, met uitzondering van de langere duren in combinatie met lage overschrijdingsfrequenties waar de niveaus ongeveer even hoog zijn.

Maart-Oktober	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	8	10	11	13	15	-	-	-
5x per jaar	11	14	15	18	23	28	-	-
2x per jaar	16	20	21	26	33	41	55	58
1x per jaar	20	24	26	32	40	51	67	71
1x per 2 jaar	25	29	32	38	47	59	77	82
1x per 5 jaar	31	35	39	46	56	70	90	96
1x per 10 jaar	36	41	45	52	63	78	100	106
1x per 20 jaar	41	47	51	59	71	87	110	115
1x per 25 jaar	43	49	53	62	74	89	113	118
1x per 50 jaar	49	55	59	69	82	98	122	127
1x per 100 jaar	55	61	67	77	90	107	130	136
1x per 200 jaar	61	68	74	85	99	116	139	144
1x per 500 jaar	70	78	84	96	111	128	150	155
1x per 1000 jaar	78	87	93	105	120	138	158	162

Tabel 7-1: *Terugkeerniveaus (mm) van neerslaghoeveelheden voor verschillende overschrijdingsfrequenties en duren, geldend voor het groeizoen (maart-oktober). De niveaus voor de hoge overschrijdingsfrequenties (boven de stippellijn) zijn bepaald door analyse van POT-waarden van De Bilt met de CWD met een drempel van 10x per jaar, de niveaus voor de lage overschrijdingsfrequenties (onder de stippellijn) zijn bepaald door analyse van jaarmaxima van De Bilt met de GEV verdeling met een voorgeschreven vormparameter, consistent gemaakt voor duren onderling door het modelleren van de schaalparameter.*

November-Februari	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	5	6	6	-	-	-	-	-
5x per jaar	7	9	10	12	-	-	-	-
2x per jaar	9	13	14	18	23	30	-	-
1x per jaar	11	15	17	22	28	38	54	58
1x per 2 jaar	13	17	20	26	33	45	64	68
1x per 5 jaar	15	21	24	31	41	55	75	80
1x per 10 jaar	17	24	28	36	47	62	84	88
1x per 20 jaar	20	27	31	41	53	70	92	97
1x per 25 jaar	20	28	33	42	55	72	94	99
1x per 50 jaar	23	31	36	47	61	80	102	107
1x per 100 jaar	25	35	41	53	68	87	110	114
1x per 200 jaar	28	38	45	58	75	95	117	121
1x per 500 jaar	32	43	51	66	85	106	127	130
1x per 1000 jaar	35	48	56	73	92	114	134	137

Tabel 7-2: *Terugkeerniveaus (mm) van neerslaghoeveelheden voor verschillende overschrijdingsfrequenties en duren, geldend voor de periode buiten het groeiseizoen (november-februari). De niveaus voor de hoge overschrijdingsfrequenties (boven de stippellijn) zijn bepaald door analyse van POT-waarden van De Bilt met de CWD met een drempel van 10x per jaar, de niveaus voor de lage overschrijdingsfrequenties (onder de stippellijn) zijn bepaald door analyse van jaarmaxima van De Bilt met de GEV verdeling met een voorgeschreven vormparameter, consistent gemaakt voor duren onderling door het modelleren van de schaalparameter.*

September-Oktober	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	-	-	-	-	-	-	-	-
5x per jaar	6	-	-	-	-	-	-	-
2x per jaar	10	12	13	15	18	21	-	-
1x per jaar	12	15	17	21	27	36	48	51
1x per 2 jaar	15	19	21	27	35	46	61	65
1x per 5 jaar	19	25	28	35	46	60	78	82
1x per 10 jaar	23	29	33	42	54	70	91	95
1x per 20 jaar	27	34	39	49	63	81	102	107
1x per 25 jaar	28	36	41	52	66	85	106	111
1x per 50 jaar	32	41	47	60	76	96	118	122
1x per 100 jaar	37	47	53	68	85	107	129	133
1x per 200 jaar	41	53	60	76	96	118	139	143
1x per 500 jaar	48	61	70	88	110	133	153	156
1x per 1000 jaar	53	68	78	98	121	145	163	165

Tabel 7-3: Terugkeerniveaus (mm) van neerslaghoeveelheden voor verschillende overschrijdingsfrequenties en duren, geldend voor de oogstperiode (september-oktober). De niveaus voor de hoge overschrijdingsfrequenties (boven de stippellijn) zijn bepaald door analyse van POT-waarden van De Bilt met de CWD met een drempel van 10x per jaar, de niveaus voor de lage overschrijdingsfrequenties (onder de stippellijn) zijn bepaald door analyse van jaarmaxima van De Bilt met de GEV verdeling met een voorgeschreven vormparameter, consistent gemaakt voor duren onderling door het modelleren van de schaalparameter.

7.2 Consistentie met de jaarstatistiek

In de vorige paragraaf werd voor verschillende seizoenen de statistiek van neerslaghoeveelheden van De Bilt afgeleid, zowel voor hoge als lage overschrijdingsfrequenties. Hoewel deze afleiding gebruik maakt van methoden zoals die ook worden toegepast voor de afleiding van de jaarstatistiek, vindt de eigenlijke afleiding van de seizoensstatistiek onafhankelijk van de afleiding van de jaarstatistiek plaats. Hierdoor kan er sprake zijn van inconsistenties tussen de seizoensstatistiek en de jaarstatistiek. Zo kan het afgeleide terugkeerniveau voor het zomerseizoen bij een overschrijdingsfrequentie van 1x per 1000 jaar hoger uitvallen dan het afgeleide terugkeerniveau voor het gehele jaar bij eenzelfde overschrijdingsfrequentie, wat vanzelfsprekend niet mogelijk is.

Consistentie is aanwezig wanneer de overschrijdingsfrequentie bij een bepaalde neerslaghoeveelheid opgeteld over complementaire seizoenen gelijk is aan de overschrijdingsfrequentie bij diezelfde neerslaghoeveelheid voor het gehele jaar. In formulevorm betekent dit:

$$f_{s1}(x) + f_{s2}(x) = f_{\text{jaar}}(x), \quad (7.5)$$

waarbij f_{s1} staat voor de overschrijdingsfrequentie per jaar in een bepaald seizoen, f_{s2} voor de overschrijdingsfrequentie per jaar in het complementerende seizoen en f_{jaar} voor de totale overschrijdingsfrequentie per jaar, allen bij een neerslaghoeveelheid x .

Door de onafhankelijke analyses van afzonderlijke seizoenen en het gehele jaar zal vergelijking (7.5) in de meeste gevallen niet opgaan en is er geen sprake van consistentie.

De consistentie kan opgelegd worden door een correctie toe te passen op de overschrijdingsfrequenties die horen bij de afzonderlijke seizoenen:

$$\tilde{f}_{s1}(x) + \tilde{f}_{s2}(x) = f_{\text{jaar}}(x), \quad (7.6)$$

met

$$\tilde{f}_{s1}(x) = f_{s1}(x) \cdot \frac{f_{\text{jaar}}(x)}{f_{s1}(x) + f_{s2}(x)} \quad (7.7)$$

en

$$\tilde{f}_{s2}(x) = f_{s2}(x) \cdot \frac{f_{\text{jaar}}(x)}{f_{s1}(x) + f_{s2}(x)}, \quad (7.8)$$

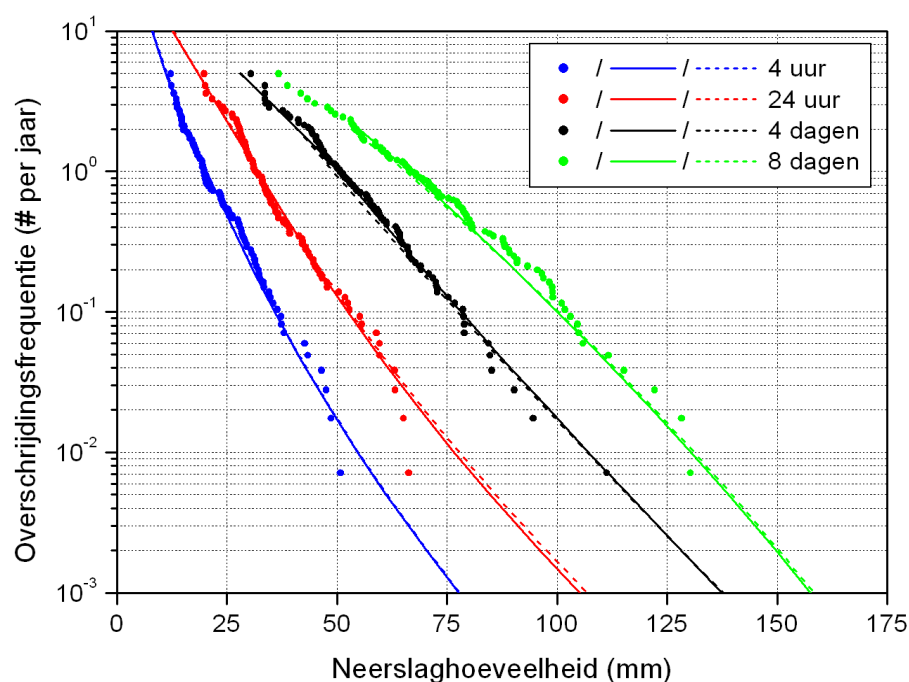
waarbij $\tilde{f}_{s1}$ staat voor de gecorrigeerde overschrijdingsfrequentie per jaar in een bepaald seizoen en $\tilde{f}_{s2}$ voor de gecorrigeerde overschrijdingsfrequentie per jaar in het complementerende seizoen.

Bovenstaande kan ook worden toegepast op de 2-maandelijkse periode september-oktober. Als complementerende periode wordt dan de periode november-augustus genomen.

Resultaten voor de 3 verschillende perioden, respectievelijk het groeiseizoen (maart-oktober), de periode buiten het groeiseizoen (november-februari) en de oogstperiode (september-oktober) voor een aantal overschrijdingsfrequenties en duren worden gepresenteerd in Tabel 7-4, Tabel 7-5 en Tabel 7-6. De resultaten voor de 3 verschillende perioden voor een aantal duren (4 uur, 24 uur, 4 dagen en 8 dagen) worden grafisch gepresenteerd in Figuur 7-1, Figuur 7-2 en Figuur 7-3. Hierin zijn ook de terugkeerniveaus weergegeven die niet consistent zijn gemaakt met de jaarstatistiek. In de figuren is te zien dat het consistent maken met de jaarstatistiek bij het groeiseizoen en de periode buiten het groeiseizoen slechts marginale verschillen oplevert. Bij de oogstperiode worden de terugkeerniveaus veelal naar beneden gecorrigeerd, vooral bij de langere duren.

Maart-Oktober	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	8	10	11	13	15	-	-	-
5x per jaar	11	14	15	18	23	28	-	-
2x per jaar	16	20	22	26	33	41	53	55
1x per jaar	20	24	26	32	39	49	66	70
1x per 2 jaar	25	29	32	38	46	58	77	82
1x per 5 jaar	31	36	39	46	56	69	90	96
1x per 10 jaar	36	41	45	53	63	77	100	106
1x per 20 jaar	41	47	51	60	71	86	110	116
1x per 25 jaar	43	49	54	62	74	89	113	119
1x per 50 jaar	49	55	60	70	82	98	122	128
1x per 100 jaar	55	62	68	78	91	107	131	137
1x per 200 jaar	61	69	75	86	100	116	140	145
1x per 500 jaar	71	79	86	98	112	128	151	156
1x per 1000 jaar	78	88	94	107	122	138	158	163

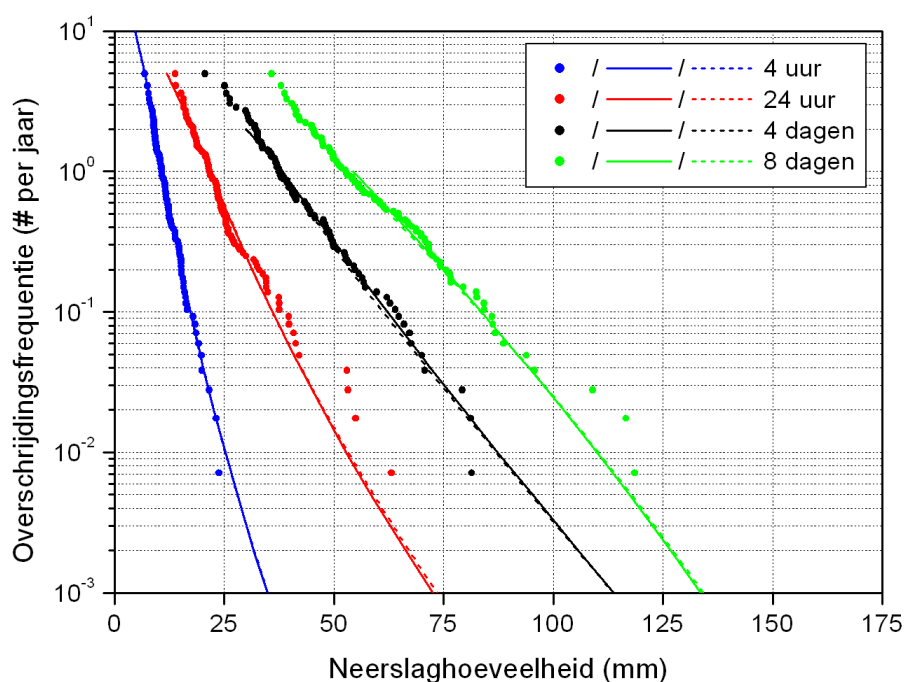
Tabel 7-4: Als Tabel 7-1, maar nu consistent gemaakt met de jaarstatistiek.



Figuur 7-1: Terugkeerniveaus voor een aantal uren, te weten 4 uur, 24 uur, 4 dagen en 8 dagen, geldend voor het groeizoen (maart-oktober). De punten staan voor de corresponderende jaarmaxima van De Bilt, de getrokken lijnen voor het model dat niet consistent is gemaakt met de jaarstatistiek, de stippellijnen voor het model dat wél consistent is gemaakt met de jaarstatistiek.

November-Februari	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	5	6	6	-	-	-	-	-
5x per jaar	7	9	10	12	-	-	-	-
2x per jaar	9	13	14	18	23	30	-	-
1x per jaar	11	15	17	22	28	38	53	57
1x per 2 jaar	13	17	20	26	33	45	63	67
1x per 5 jaar	15	21	24	31	40	54	75	79
1x per 10 jaar	17	24	28	36	46	61	83	88
1x per 20 jaar	20	27	31	41	53	69	92	97
1x per 25 jaar	20	28	33	43	55	71	95	99
1x per 50 jaar	23	31	37	48	61	79	103	107
1x per 100 jaar	25	35	41	53	68	87	110	115
1x per 200 jaar	28	38	45	59	75	95	118	122
1x per 500 jaar	32	44	52	67	85	106	127	131
1x per 1000 jaar	35	48	57	74	93	114	134	137

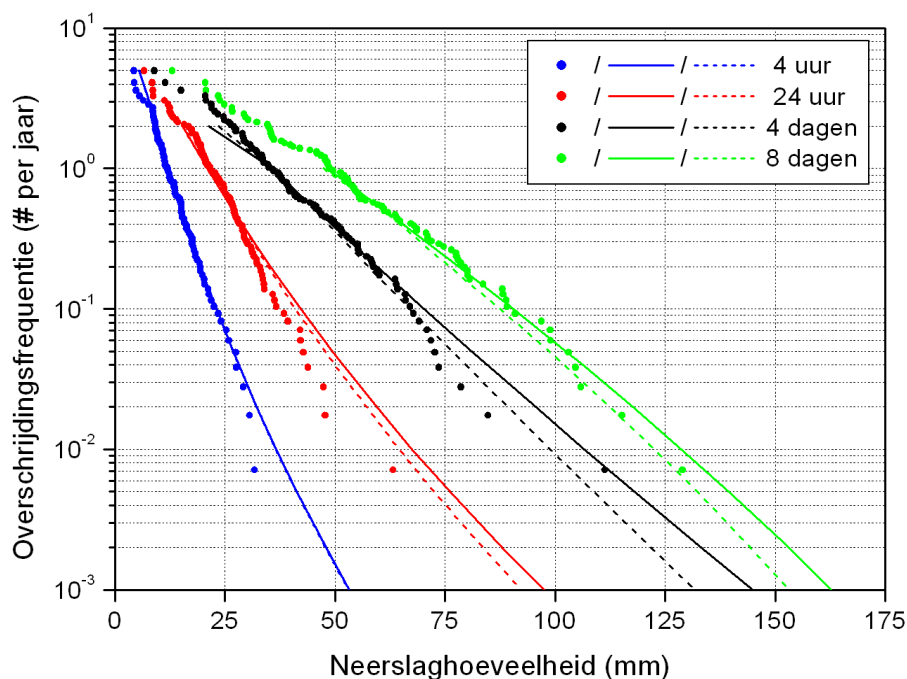
Tabel 7-5: Als Tabel 7-2 maar nu consistent gemaakt met de jaarstatistiek.



Figuur 7-2: Terugkeerniveaus voor een aantal uren, te weten 4 uur, 24 uur, 4 dagen en 8 dagen, geldend voor de periode buiten het groeizoen (november-februari). De punten staan voor de corresponderende jaarmaxima van De Bilt, de getrokken lijnen voor het model dat niet consistent is gemaakt met de jaarstatistiek, de stippellijnen voor het model dat wél consistent is gemaakt met de jaarstatistiek.

September-Oktober	Uren				Dagen			
	4	8	12	24	2	4	8	9
10x per jaar	-	-	-	-	-	-	-	-
5x per jaar	6	-	-	-	-	-	-	-
2x per jaar	9	12	13	15	19	24	-	-
1x per jaar	12	15	17	21	27	35	47	50
1x per 2 jaar	15	19	22	27	35	46	61	64
1x per 5 jaar	19	24	28	35	44	58	76	80
1x per 10 jaar	23	29	33	41	52	67	88	92
1x per 20 jaar	27	34	38	48	60	77	99	104
1x per 25 jaar	28	35	40	50	63	80	102	107
1x per 50 jaar	32	40	46	57	71	89	113	118
1x per 100 jaar	37	46	52	65	80	99	123	128
1x per 200 jaar	41	52	59	72	89	109	132	137
1x per 500 jaar	48	60	68	84	102	122	144	149
1x per 1000 jaar	53	66	75	92	112	132	153	157

Tabel 7-6: Als Tabel 7-3 maar nu consistent gemaakt met de jaarstatistiek.



Figuur 7-3: Terugkeerniveaus voor een aantal uren, te weten 4 uur, 24 uur, 4 dagen en 8 dagen, geldend voor de oogstperiode (september-oktober). De punten staan voor de corresponderende jaarmaxima van De Bilt, de getrokken lijnen voor het model dat niet consistent is gemaakt met de jaarstatistiek, de stippellijnen voor het model dat wél consistent is gemaakt met de jaarstatistiek.

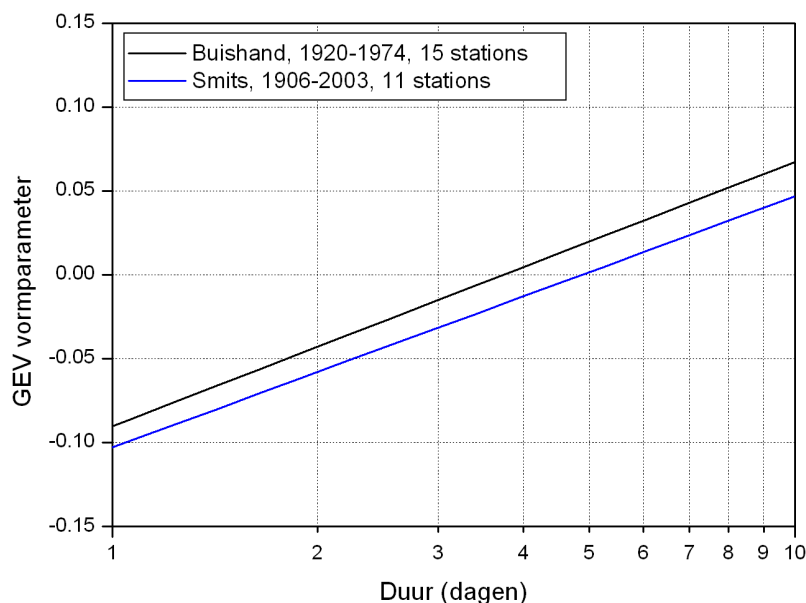
8 Representativiteit van de statistiek voor Nederland

De statistiek zoals die is afgeleid in Hoofdstuk 4 tot en met 7 is gebaseerd op station De Bilt. Er kan niet zonder meer worden aangenomen dat de statistiek van overige lokaties binnen Nederland hieraan gelijk is. Hoewel Nederland op grote schaal gezien maar een klein land is, bestaan er immers grote verschillen in land-/zeeligging, grondsoorten, land-/bodemgebruik, en in mindere mate in orografie. Al deze factoren zijn van invloed op het lokale neerslagklimaat binnen Nederland. Door naast De Bilt ook andere stations te analyseren kan een inschatting gegeven worden in hoeverre dergelijke factoren de statistiek beïnvloeden. Binnen deze studie zal een analyse van een tiental overige lokaties (zie Figuur 2-6) onafhankelijk van elkaar plaatsvinden (Paragraaf 8.1). Zo kan een uitspraak worden gedaan over de ruimtelijke spreiding van de statistiek en over de afwijkingen in de statistiek ten opzichte van die van De Bilt (Paragraaf 8.2).

8.1 Afleiding statistiek

De analysemethode zoals die is toegepast op station De Bilt is eveneens toegepast op de overige lokaties. Één onderdeel van deze methode is echter niet toegepast op de reeksen van de overige lokaties en betreft het modelleren van de schaalparameter om durven onderling consistent te maken. Dit is niet uitgevoerd omdat er nu slechts de beschikking is over dagsommen van neerslag en niet over uursommen van neerslag waardoor durven korter dan 24 uur niet in de modellering meegenomen kunnen worden. Dit zal echter voor de vergelijking van de verschillende stations onderling weinig gevolgen hebben daar ook De Bilt voor deze vergelijking op dezelfde wijze wordt geanalyseerd. De analysemethode gebruikt verder een voorgeschreven vormparameter voor de GEV verdeling die gebaseerd is op eerder onderzoek van Buishand (1983b) van 15 stations voor het tijdvak 1920-1974. Op basis van de 11 stations die in deze studie gebruikt worden voor het tijdvak 1906-2003 en middels dezelfde methodiek als toegepast door Buishand (1983b), is gekeken of er aanleiding is om een aangepaste waarde voor de voorgeschreven vormparameter te hanteren. Hieruit is gebleken dat de waarden slechts marginaal van elkaar verschillen (Figuur 8-1) en kunnen derhalve de waarden volgens Vergelijking (6.1) gebruikt worden.

Het toepassen van een voorgeschreven vormparameter voor alle stations betekent dat de statistische onzekerheid enigszins beperkt blijft en dat daardoor de vergelijking tussen de stations minder verstoord wordt door ruis.

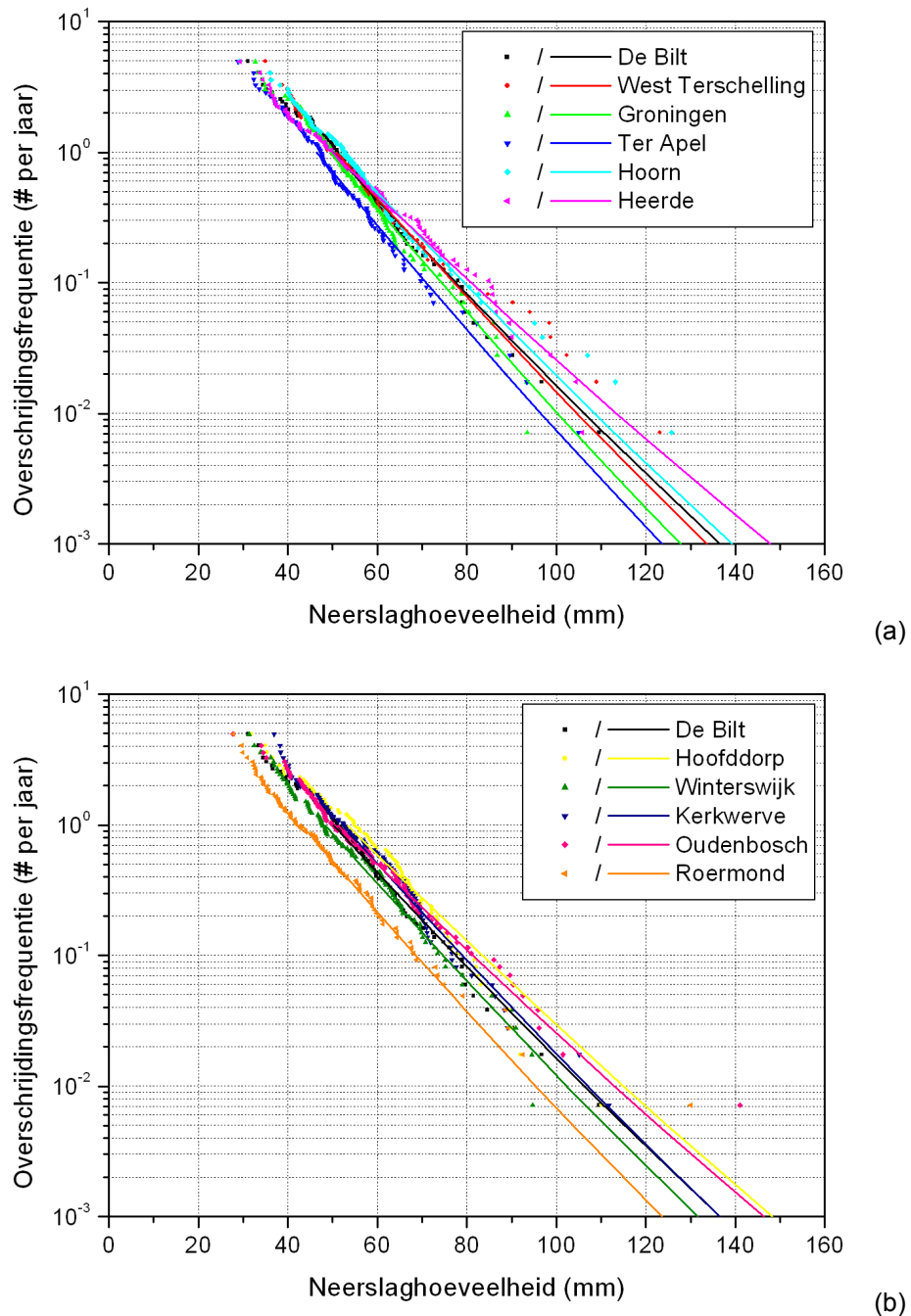


Figuur 8-1: Voorgeschreven vormparameter volgens Buishand (1983b) en volgens analyse nieuwe gegevens.

De resultaten voor de 11 stations voor overschrijdingsfrequenties van 1x per 10 jaar en 1x per 1000 jaar en voor durren van 2, 4 en 8 dagen staan weergegeven in Tabel 8-1. Terugkeerniveaus voor verschillende overschrijdingsfrequenties en voor een duur van 4 dagen zijn grafisch weergegeven in Figuur 8-2, tezamen met de jaarmaxima van de stations voor het tijdvak 1906-2003. In de tabel en figuur zijn ter vergelijking ook de resultaten voor station Bilt opgenomen. Deze waarden zijn iets lager dan de waarden gepresenteerd in Hoofdstuk 6. Dit kan verklaard worden doordat de resultaten niet gebaseerd zijn op uurwaarden, maar op dagwaarden. Vooral voor korte durren (het meest bij 1 dag) mag verwacht worden dat de terugkeerniveaus lager zijn dan bij gebruik van uurwaarden. De analyse op basis van dagwaarden heeft namelijk een neerslaghoeveelheid altijd betrekking op een periode met aanvang 8 UT, terwijl de analyse op basis van uurwaarden betrekking heeft op een periode met willekeurige uurvakken als aanvang.

Station	T = 10 jaar			T = 1000 jaar		
	2 dagen	4 dagen	8 dagen	2 dagen	4 dagen	8 dagen
De Bilt	61	78	104	116	137	162
West Terschelling	62	77	102	120	134	158
Groningen	59	74	98	110	128	149
Ter Apel	59	71	93	114	124	143
Hoorn	58	79	103	106	139	160
Heerde	65	81	110	127	148	180
Hoofddorp	64	83	109	122	148	167
Winterswijk	60	75	100	117	132	155
Kerkwerpe	61	79	100	114	137	150
Oudenbosch	61	81	105	117	146	164
Roermond	55	69	92	109	124	150

Tabel 8-1: Terugkeerniveaus (mm) bij een overschrijdingsfrequentie van eens per 10 jaar ($T = 10$ jaar) en van eens per 1000 jaar ($T = 1000$ jaar) voor een aantal stations en voor durren van 2, 4 en 8 dagen.



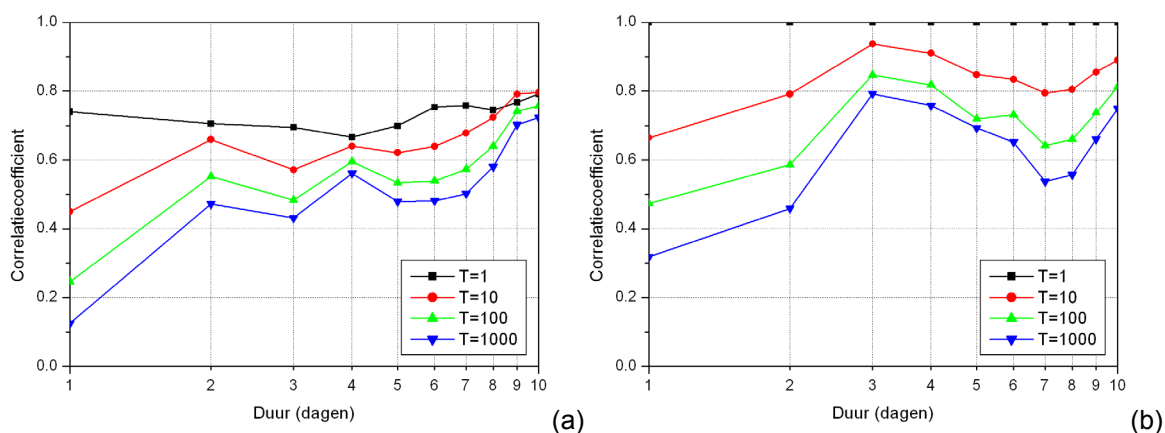
Figuur 8-2: Terugkeerniveaus (mm) voor een duur van 4 dagen. De stations West Terschelling, Groningen, Ter Apel, Hoorn en Heerde zijn weergegeven in (a) en Hoofddorp, Winterswijk, Kerkrade, Oudenbosch en Roermond in (b). In beide figuren is station De Bilt weergegeven ter referentie. De punten staan voor de corresponderende jaarmaxima, de lijnen voor het model.

8.2 Ruimtelijke variatie

Uit de resultaten van de gehanteerde analysemethode valt op te maken dat er verschillen in de statistiek tussen stations onderling bestaan. Het verschil tussen de hoogste en laagste waarde van de terugkeerniveaus bedraagt steeds ongeveer 20%, voor de verschillende duren en voor zowel de overschrijdingsfrequentie van 1x per 10 jaar als die van 1x per 1000 jaar. Voor beide overschrijdingsfrequenties is onafhankelijk van elkaar voor alle duren een test toegepast om te

onderzoeken of dit verschil statistisch significant is: de zogenaamde “sample range test” (Owen, 1962). Hieruit blijkt dat dat het geval is voor de duur van 8 dagen in combinatie met de overschrijdingsfrequentie van 1x per 10 jaar. Wanneer in ogenschouw wordt genomen dat de betrouwbaarheidsintervallen die gebruikt worden bij deze test te breed zijn (zie Paragraaf 6.3 en Figuur 6-8) en dat er afhankelijkheid bestaat tussen de stations, is het aannemelijk dat het verschil voor duren van 2 en 4 dagen voor deze overschrijdingsfrequentie ook significant is. Door de toenemende onzekerheid in de resultaten bij hogere extremen kan met de test niet worden aangetoond dat het verschil bij een overschrijdingsfrequentie van 1x per 1000 jaar ook statistisch significant is. Station De Bilt geeft een goede indicatie van het gemiddelde beeld over alle stations waarbij afwijkingen ten opzichte van station De Bilt maximaal 12% bedragen.

Verder is geen duidelijk ruimtelijk patroon te herkennen op basis van land-/zeeligging. Ook de mogelijke invloed van de andere hiervoor besproken factoren (grondsoort, land-/bodemgebruik, orografie) is niet terug te zien op de hoogte van de terugkeerniveaus. Al deze factoren kunnen wel degelijk van invloed zijn op de terugkeerniveaus, maar door de beperkte dekking van het aantal stations is dit moeilijk in beeld te krijgen. De factoren zijn echter gerelateerd aan gematigde neerslaggrootheden en daarom is bekeken in hoeverre de terugkeerniveaus zijn gecorreleerd aan de gemiddelde jaarsom. Daarnaast is de correlatie ook onderzocht tussen de terugkeerniveaus en de lokatieparameter van de extreme waarden verdeling. Voor duren van 1 tot 10 dagen en voor vier verschillende overschrijdingsfrequenties zijn de correlaties uitgezet in Figuur 8-3. De figuur laat zien dat voor lagere overschrijdingsfrequenties de correlaties over het algemeen minder hoog zijn. Dit is niet opmerkelijk, aangezien de gemiddelde jaarsom nauw verbonden is met normale neerslaggebeurtenissen en minder met extreme neerslaghoeveelheden. Hoewel de lokatieparameter gebaseerd is op jaarmaxima geldt dit in mindere mate ook voor deze grootheid. Verder neemt met het afnemen van de overschrijdingsfrequentie de statistische onzekerheid toe, wat tevens een verklaring is voor het afnemen van de mate van correlatie. Figuur 8-3 maakt ook duidelijk dat bij duren van 6 dagen en korter de lokatieparameter beter correleert met de terugkeerniveaus dan de gemiddelde jaarsom. Beide grootheden zouden gebruikt kunnen worden om de extreme neerslagstatistiek voor een bepaald station te bepalen door de resultaten voor De Bilt te schalen met de ratio van de grootheid van het desbetreffende station en die van De Bilt. Het voordeel van de gemiddelde jaarsom is dat hiervan een vrij goede schatting beschikbaar is voor elke willekeurige lokatie in Nederland (zie bijvoorbeeld Heijboer en Nellestijn, 2002) terwijl dit niet het geval is bij de lokatieparameter van de extreme waarden verdeling. Het gebruik van de gemiddelde jaarsom is onder andere gedaan in Buishand en Velds (1980). Bij de kortste duren van 1, 2 en 3 dagen is de correlatie met de gemiddelde jaarsom echter vrij laag waardoor de methode voor deze duren minder goed toepasbaar is. Voor nog kortere duren (korter dan één dag) bestaan aanwijzingen dat er geen plaatselijke verschillen binnen Nederland zijn (Buishand et al., 1991) zodat voor deze duren de statistiek afgeleid voor De Bilt toegepast kan worden voor een willekeurige plaats in Nederland.



Figuur 8-3: Correlaties tussen de gemiddelde jaarsom en terugkeerniveaus (a) en tussen de lokatieparameter van de extreme waarde verdeling en terugkeerniveaus (b) voor verschillende overschrijdingsfrequenties en duren.

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 resultaten voor De Bilt op basis van de gemiddelde jaarsom toegepast kunnen worden om een eerste indicatie te krijgen van de statistiek voor overige lokaties. Om uiteindelijk tot een betrouwbaardere schatting van de statistiek voor overige lokaties te komen wordt aanbevolen om een analyse van een groter aantal stations in onderlinge samenhang uit te voeren.

9 Neerslagpatronen

Bij het doorrekenen van onafhankelijke neerslaggebeurtenissen met behulp van neerslag-afvoer modellen is niet alleen de duur van de neerslaggebeurtenis met bijbehorende hoeveelheid van belang (zoals afgeleid in de Hoofdstukken 4 tot en met 8), maar ook de manier waarop de hoeveelheid neerslag over de tijd is verdeeld. Een neerslaggebeurtenis die uniform verdeeld over een dag valt zorgt in een watersysteem veelal voor minder wateroverlast dan een gebeurtenis waarin een duidelijke piek gedurende deze dag voorkomt. Als slechts gekeken wordt naar de duur en de hoeveelheid van de gebeurtenis hebben dergelijke gebeurtenissen een gelijke kans, terwijl de gevolgen in termen van wateroverlast duidelijk kunnen verschillen. De kans van de neerslaggebeurtenis is daardoor niet eenduidig bepaald met alleen de kans op de neerslaghoeveelheid. Door de verschillen in de verdeling van de neerslag binnen een neerslaggebeurtenis te karakteriseren kunnen representatieve neerslagverdelingen worden gekozen met een bepaalde kans van voorkomen. De verdeling van de neerslag binnen een neerslaggebeurtenis wordt in het vervolg van de rapportage het neerslagpatroon genoemd.

Een neerslaggebeurtenis wordt daarbij gekenmerkt door de duur en het verloop van de intensiteit. De keuze van de neerslaggebeurtenissen is niet arbitrair: voor het beoordelen van het functioneren van watersystemen is het van belang om een verzameling van gebeurtenissen te definiëren met bijbehorende kans van voorkomen, die representatief en relevant zijn voor het betreffende waterhuishoudkundige systeem. De neerslagpatronen kunnen vervolgens worden gebruikt bij de bepaling van wateroverlast op een probabilistische wijze ('stochastenmethode') of op basis van ontwerpbuien ('ontwerpbuimethode'). Bij de probabilistische methode worden alle neerslagpatronen met bijbehorende kansen van voorkomen gebruikt voor de bepaling van de mate van wateroverlast. Bij een methode op basis van ontwerpbuien dient uit de neerslagpatronen een maatgevend of representatief patroon te worden gekozen waarmee het watersysteem wordt doorgerekend.

Er is voor de Nederlandse situatie tot nu toe weinig onderzoek op het gebied van neerslagpatronen uitgevoerd. Een pragmatische aanpak is gegeven in Lammers en Versteeg (2000), maar de uitgangspunten en onderbouwing van de gegenereerde patronen is voor verbetering vatbaar. In de literatuur zijn verschillende methoden te vinden die ingaan op het vaststellen van patronen (storm profiles). Zie hiervoor bijvoorbeeld Pilgrim en Cordery (1975), Cordery et al. (1984) en Srikanthan en McMahon (1985). Het doel van deze methoden is het vaststellen van een gemiddeld maatgevend neerslagpatroon voor de bepaling van maatgevende afvoeren en waterstanden. In Reynard en Stewart (1993) worden de verschillende methoden vergeleken en wordt gepleit voor de zogenaamde 'average variability method'.

Het vaststellen van patronen in de 'average variability method' is gedaan door een beperkt aantal historische neerslaggebeurtenissen (vaak de 25 meest extreme gebeurtenissen) te analyseren en op basis van deze gebeurtenissen een gemiddeld patroon af te leiden. Hierbij worden de gebeurtenissen allereerst onderverdeeld in een beperkt aantal tijdsblokken. Per gebeurtenis worden de neerslaghoeveelheden binnen elk tijdsblok uitgedrukt als de relatieve neerslaghoeveelheid (percentage van de totale hoeveelheid van de betreffende gebeurtenis). Op basis van de neerslaghoeveelheden wordt ook aan elk tijdsblok van de gebeurtenis een rangnummer toegekend, waarbij het tijdsblok met de hoogste neerslaghoeveelheid het hoogste rangnummer krijgt. De relatieve neerslaghoeveelheid over alle gebeurtenissen wordt per rangnummer gemiddeld. Voor de constructie van het gemiddelde maatgevende patroon wordt aan het tijdsblok met gemiddeld het hoogste rangnummer de hoogste relatieve neerslaghoeveelheid

toegekend. Het tijdsblok met gemiddeld de 2^{de} rang de 2^{de} hoogste relatieve neerslaghoeveelheid enzovoort.

De methoden uit de eerder genoemde literatuur onderscheiden zich in de manier van sorteren van de neerslaggegevens of de manier van middelen van de neerslaghoeveelheden. Voor alle methoden geldt dat door de middeling een afvlakking van de pieken en mede daardoor een afvlakking van de variabiliteit van de neerslag optreedt. Deze afvlakking wordt deels ondervangen door het beperkt aantal neerslaggebeurtenissen waaruit het gemiddelde wordt bepaald.

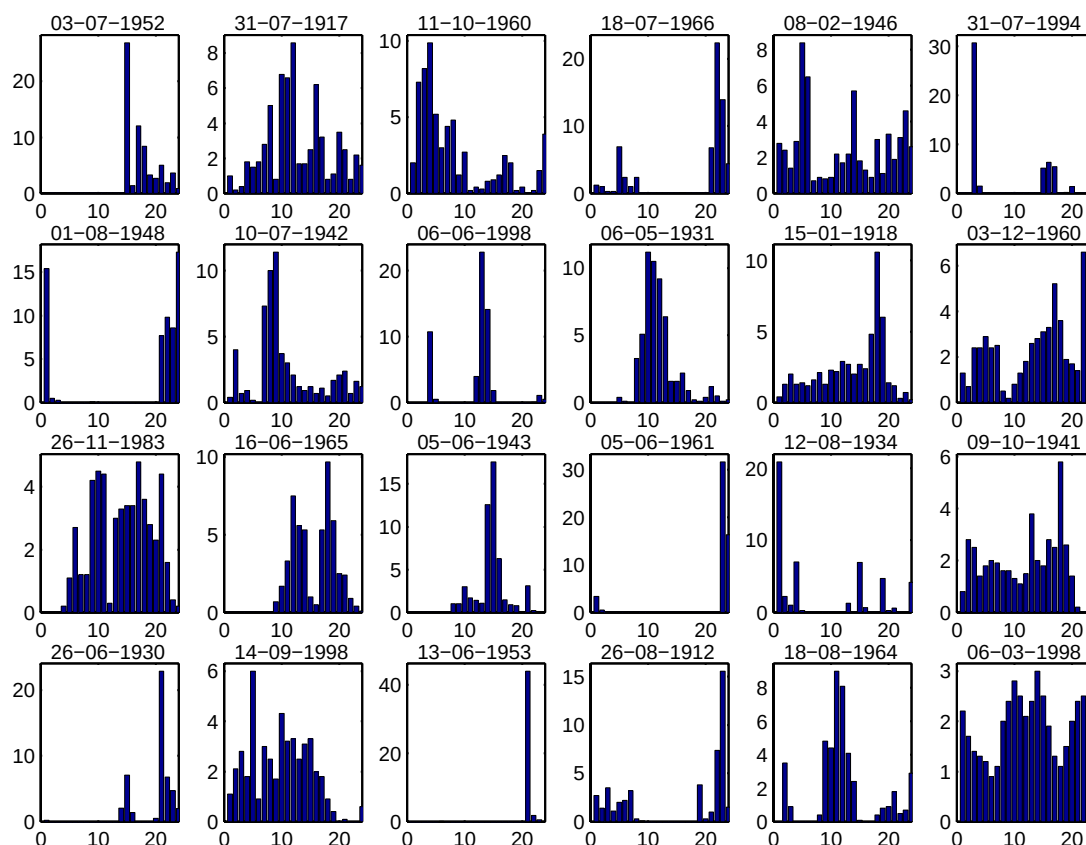
Bij de methoden wordt dus duidelijk een gemiddeld maatgevend patroon bepaald. Bij de bepaling van de in dit rapport beoogde neerslagpatronen gaat het vooral om het bepalen van meerdere karakteristieke patronen waaraan een kans van voorkomen kan worden toegekend, om deze te kunnen toepassen bij probabilistische berekeningen. In Huff (1967) wordt wel een methode voorgesteld waarin rekening is gehouden met de kansdichtheid van het voorkomen van verschillende neerslagpatronen. Er wordt daarin echter geen onderscheid gemaakt tussen neerslaggebeurtenissen waarin de neerslag uniform, geconcentreerd in één piek of juist in meerdere pieken valt. Omdat dit onderscheid voor de te beschouwen watersystemen van belang is wordt in deze studie een alternatieve methode uitgewerkt.

9.1 Neerslaggebeurtenissen

9.1.1 Diversiteit

Om te komen tot karakteristieke neerslagpatronen worden eerst de neerslaggebeurtenissen en de kenmerken van de neerslaggebeurtenissen geanalyseerd. De analyse van de neerslaggebeurtenissen en de bepaling van de neerslagpatronen is gedaan op basis van POT-gebeurtenissen zoals in Hoofdstuk 2 besproken. Door gebruik te maken van deze waarden en niet van de jaarmaxima kunnen meer gebeurtenissen in de analyse worden betrokken. De patronen zijn onderzocht voor neerslaggebeurtenissen met een duur van 1, 2, 4 en 8 dagen.

In de geselecteerde neerslaggebeurtenissen is een grote diversiteit aan neerslagpatronen te zien. Ter illustratie zijn in Figuur 9-1 de 24 meest extreme neerslaggebeurtenissen met een duur van 24 uur weergegeven. Op de x-as van de deelfiguren staan geen klokuren, maar begin- en eindtijdstippen van de verschillende POT-gebeurtenissen. Merk verder op dat de schaal van de y-as niet in alle figuren gelijk is.



Figuur 9-1: Neerslagpatronen van de 24 meest extreme POT-gebeurtenissen met een duur van 24 uur.

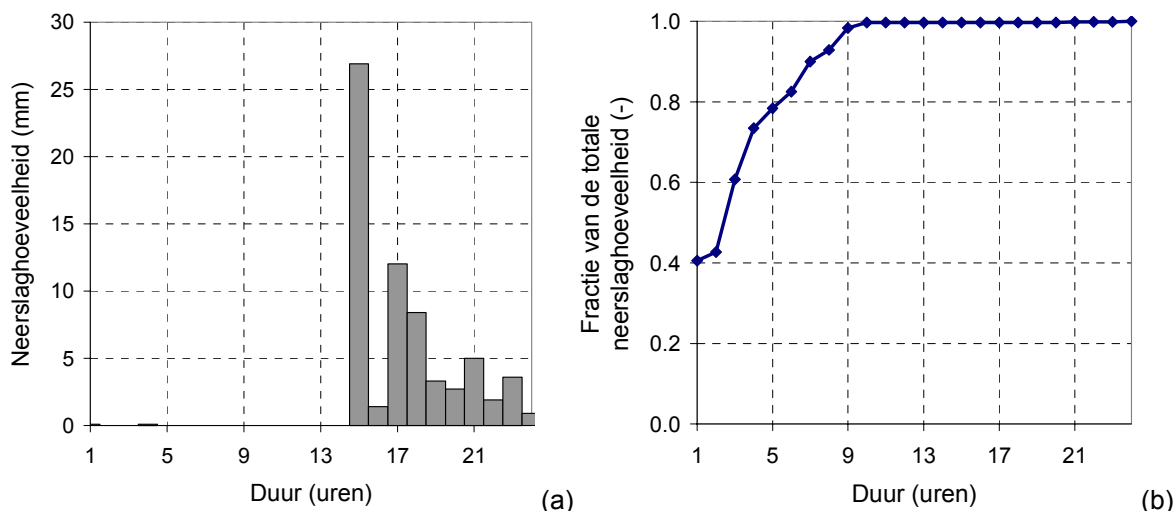
In de figuur is duidelijk te zien dat er neerslaggebeurtenissen voorkomen waarin een groot deel van de neerslag binnen een korte duur valt, maar dat er ook neerslaggebeurtenissen voorkomen waarin de neerslag meer gespreid over de volledige duur valt. Als gekeken wordt naar neerslaggebeurtenissen met een duur van 2, 4 en 8 dagen is een nog grotere diversiteit aan neerslagpatronen te zien. Door deze grote diversiteit kan de neerslag niet worden gekarakteriseerd met één maatgevend patroon. Het is beter de neerslag te karakteriseren met meerdere patronen. Dit kunnen bijvoorbeeld patronen zijn waarbij in een relatief korte tijd veel neerslag valt en patronen waarbij de neerslag meer uniform valt.

9.1.2 Kenmerken

Om meer inzicht te krijgen in karakteristieken van de neerslaggebeurtenissen is een kwantitatieve analyse van neerslaghoeveelheden binnen een neerslaggebeurtenis uitgevoerd. Hiertoe is per gebeurtenis het maximum van 1 uur bepaald, het maximum van 2 aaneengesloten uren, het maximum van 3 aaneengesloten uren, etcetera, tot de duur van de gebeurtenis. In de rest van dit hoofdstuk wordt gesproken over de cumulatieve neerslaghoeveelheden. Het betreft dus geen opsomming over de gehele duur van de gebeurtenis van alle aaneengesloten uurvakken. Om gebeurtenissen met verschillende neerslaghoeveelheden onderling te kunnen vergelijken is de neerslaghoeveelheid per tijdsblok vervolgens uitgedrukt als fractie van de totale neerslaghoeveelheid van de betreffende gebeurtenis.

In Figuur 9-2 is de bepaling van de cumulatieve neerslaghoeveelheid geïllustreerd voor een willekeurige neerslaggebeurtenis met een duur van 24 uur. In de figuur is te zien dat in 1 uur maximaal 40% van de totale neerslaghoeveelheid valt. Na ongeveer 10 uur is bijna de volledige

neerslaghoeveelheid gevallen. De x-as in Figuur 9-2a geeft opeenvolgende uurvakken aan. De x-as in Figuur 9-2b slaat op aaneengesloten uren waarvoor een maximum is bepaald.



Figuur 9-2: *Bewerking van de neerslaggebeurtenissen naar een cumulatieve neerslaghoeveelheid: beschrijving van de neerslaggebeurtenis (a) en beschrijving van de cumulatieve neerslaghoeveelheid van de neerslaggebeurtenis (b).*

De bovenstaande cumulatieve neerslaghoeveelheden zijn bepaald voor de duizend meest extreme gebeurtenissen met uren van 1, 2, 4 en 8 dagen. Op basis van deze cumulatieve neerslaghoeveelheden kunnen voor iedere duur percentielen worden bepaald. Met deze percentielen kan worden aangegeven welke neerslaghoeveelheid wordt overschreden in een bepaald percentage van het aantal gebeurtenissen. In Tabel 9-1 zijn voor de onderzochte uren (1, 2, 4 en 8 dagen) de fracties van de neerslaghoeveelheden weergegeven voor het 10-, 50- en 90%-percentiel. In de tabel zijn de waarden opgenomen voor een beperkt aantal tijdsblokken van de gebeurtenissen, namelijk 1 uur, 1/8, 1/4, 1/2 en 3/4 deel van de duur van de gebeurtenis. Ter verduidelijking van de tabel het volgende voorbeeld: voor gebeurtenissen met een duur van 24 uur geldt dat binnen 1 uur in 10% van de neerslaggebeurtenissen meer dan 55% van de totale neerslag van de gebeurtenis is gevallen. Met andere woorden: de kans dat meer dan 55% van de neerslag van een 24-uurs gebeurtenis binnen 1 uur valt is bij benadering 10%.

Duur van de gebeurtenis	Percentiel	Fractie van de neerslaghoeveelheid				
		1 uur	1/8 duur	1/4 duur	1/2 duur	3/4 duur
24 uur		1 uur	3 uur	6 uur	12 uur	18 uur
	90%	0.12	0.26	0.42	0.61	0.80
	50%	0.21	0.43	0.61	0.79	0.93
	10%	0.55	0.77	0.89	0.97	1.00
48 uur		1 uur	6 uur	12 uur	24 uur	36 uur
	90%	0.10	0.29	0.40	0.59	0.75
	50%	0.17	0.47	0.58	0.77	0.89
	10%	0.46	0.73	0.82	0.96	1.00
96 uur		1 uur	12 uur	24 uur	48 uur	72 uur
	90%	0.08	0.28	0.41	0.57	0.72
	50%	0.12	0.44	0.54	0.73	0.87
	10%	0.34	0.63	0.82	0.92	0.98
192 uur		1 uur	24 uur	48 uur	96 uur	144 uur
	90%	0.05	0.29	0.40	0.57	0.72
	50%	0.09	0.37	0.51	0.70	0.86
	10%	0.21	0.60	0.68	0.86	0.95

Tabel 9-1: Overzichtstabel met de verschillende neerslagfracties bij verschillende percentielen en bij verschillende duren.

Op deze manier kan, gegeven de duur van de gebeurtenis, worden bepaald wat de kans op een bepaalde (fractie van de) neerslaghoeveelheid voor een bepaald tijdsblok van de gebeurtenis is. Uit de tabel blijkt bijvoorbeeld dat voor elke duur binnen een kwart van de tijd in 50% van de gebeurtenissen meer dan 50% van de neerslag valt en in 90% van de gebeurtenissen meer dan 40% van de neerslag.

9.1.3 Analyse

Bij de bepaling van neerslagpatronen dienen op voorhand enkele vragen te worden beantwoord die belangrijk zijn voor de bepaling van wateroverlast in watersystemen:

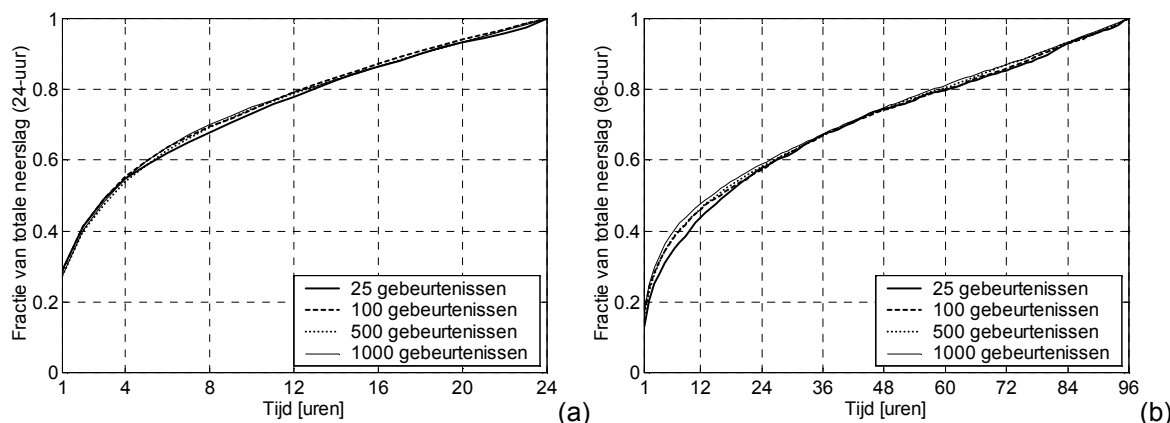
- Zijn de patronen afhankelijk van de totale neerslaghoeveelheid (oftewel de kans op voorkomen van de hoeveelheid) van de gebeurtenis? Met andere woorden: wijkt de vorm waarin de neerslag valt bij minder frequente neerslaggebeurtenissen (1x per jaar tot 1x per 100 jaar) af van die bij meer frequente neerslaghoeveelheden (10x per jaar tot 1x per jaar)?
- Zijn de patronen afhankelijk van de duur? Met andere woorden: wijkt de verdeling van de neerslag voor korte duren (24 uur) af van de verdeling voor langere duren?
- Zijn de patronen seizoensafhankelijk? In de zomer vallen meestal heftige, kortdurende buien terwijl in de winter meer langdurige neerslagperioden het weerbeeld bepalen. Is op basis van de data te concluderen dat de neerslaggebeurtenissen in de zomer piekeriger en in de winter vlakker zijn?

Het belang van de antwoorden op elk van deze vragen is of er op een bepaald aspect onderscheid gemaakt kan worden tussen de gebeurtenissen en of er dus afwijkende neerslagpatronen voor opgesteld dienen te worden. Als bijvoorbeeld het gedrag van de gebeurtenissen verschilt bij andere duren, dienen meerdere patronen gemaakt te worden die dit onderscheid weergeven.

Bovenstaande vragen worden beantwoord op basis van de eerder geïntroduceerde cumulatieve neerslaghoeveelheden.

Afhankelijkheid neerslaghoeveelheid

Om te toetsen of het neerslagpatroon afhankelijk is van de neerslaghoeveelheid is voor een oplopend aantal gebeurtenissen het 50%-percentiel van de cumulatieve verdeling bepaald. Dit is gedaan voor achtereenvolgens de 25, 100, 500 en 1000 meest extreme gebeurtenissen. In Figuur 9-3 zijn de resultaten afgebeeld voor een duur van 24 uur en een duur van 96 uur. In de figuur is te zien dat er nauwelijks verschillen optreden tussen de 50%-percentielen van de cumulatieve verdelingen met 25 of 1000 gebeurtenissen. Er treden geen systematische afwijkingen op ten gevolge van de veranderingen in het aantal gebeurtenissen. Er kan dan ook worden geconcludeerd dat neerslagpatronen niet afhankelijk zijn van de totale neerslaghoeveelheid. Dit geldt ook voor durren van 48 en 192 uur.

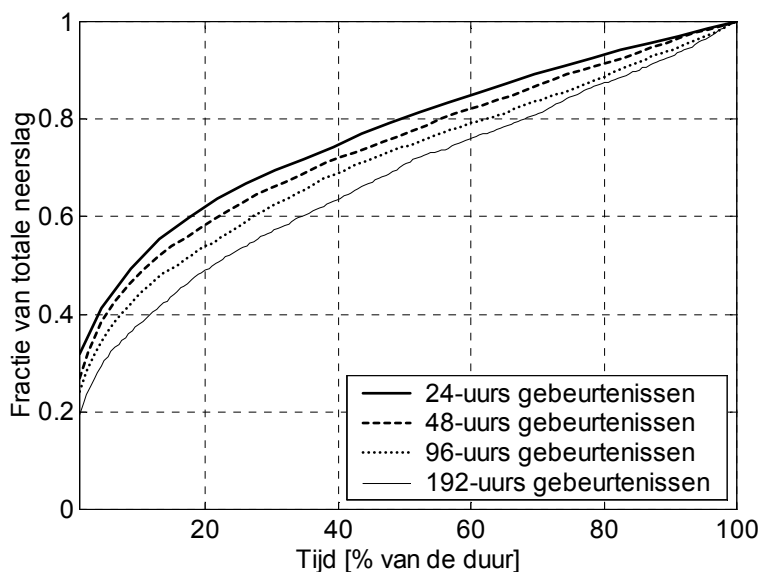


Figuur 9-3: De cumulatieve verdeling van neerslag met een duur van 24 uur (a) en 96 uur (b) voor een oplopend aantal gebeurtenissen.

Op basis van deze resultaten wordt geconcludeerd, dat er geen afzonderlijke neerslagpatronen hoeven te worden opgesteld voor enerzijds de extreme gebeurtenissen en anderzijds de minder extreme gebeurtenissen.

Afhankelijkheid van de duur van de gebeurtenissen

Om te toetsen of het neerslagpatroon verandert bij langere durren zijn de 50%-percentielen van de cumulatieve verdelingen voor durren van 24, 48, 96 en 192 uur met elkaar vergeleken. Om de cumulatieve verdelingen met elkaar te kunnen vergelijken wordt de duur daartoe uitgedrukt als percentage van de totale duur. In Figuur 9-4 zijn de resultaten afgebeeld voor de 100 meest extreme neerslaggebeurtenissen. In de figuur is te zien dat de cumulatieve verdelingen voor de verschillende durren verschillen. Voor een neerslagduur van 192 uur valt binnen 20% van de duur gemiddeld minder dan 50% van de totale neerslaghoeveelheid, voor een neerslagduur van 24 uur is dit meer dan 60%. In het algemeen komt het er op neer dat bij kortere durren binnen eenzelfde percentage van de tijd een grotere fractie van de totale neerslaghoeveelheid valt. Hieruit blijkt duidelijk dat patronen voor langere neerslaggebeurtenissen gemiddeld een meer uniform karakter kennen dan korte neerslaggebeurtenissen.

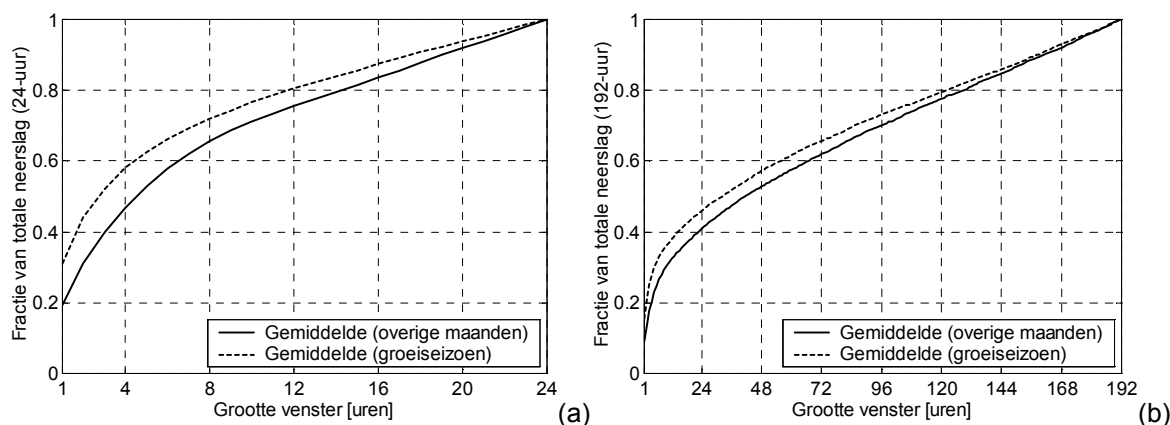


Figuur 9-4: De cumulatieve verdeling van neerslag met een duur van 24 uur, 48 uur, 96 uur en 192 uur.

Geconcludeerd kan worden, dat er voor verschillende dueren van de gebeurtenissen ook verschillende patronen opgesteld dienen te worden. De resultaten die volgen uit bovenstaande figuur kunnen overigens ook worden afgeleid uit Tabel 9-1.

Seizoensafhankelijkheid

Naast de afhankelijkheid voor de duur en de neerslaghoeveelheid is onderzocht of de neerslagpatronen voor de seizoenen verschillen. Er is onderscheid gemaakt tussen het groeiseizoen (maart tot en met oktober) en de periode buiten het groeiseizoen, overeenkomstig Hoofdstuk 7. Het blijkt dat bij 24-uurs gebeurtenissen ongeveer 71% van de gebeurtenissen in het groeiseizoen valt en 29% daarbuiten. Naarmate de duur langer wordt, loopt het percentage dat in het groeiseizoen valt iets terug. Bij 192-uurs gebeurtenissen is dit nog 66%. Opnieuw is voor de 1000 meest extreme neerslaggebeurtenissen het 50%-percentiel van de cumulatieve neerslagverdeling berekend. De resultaten voor 24- en 192-uurs gebeurtenissen zijn afgebeeld in Figuur 9-5. In de figuur is te zien dat in het groeiseizoen duidelijk meer neerslag in een korte tijd valt dan in de periode buiten het groeiseizoen. Dit is conform de verwachting omdat in de zomer relatief intensievere buien vallen. Voor een duur van 24 uur is de cumulatieve verdeling in het eerste uur voor het groeiseizoen 50%-60% hoger dan in de periode buiten het groeiseizoen, voor een duur van 192 uur is dit 30%-50%. Bij langere dueren wordt het onderscheid tussen het groeiseizoen en de rest van het jaar minder duidelijk.



Figuur 9-5: De cumulatieve verdeling van neerslag met een duur van 24 uur (a) en 192 uur (b) voor de verschillende seizoenen.

Omdat er duidelijke verschillen aanwezig zijn tussen de verschillende seizoenen, dienen er voor elk van de seizoenen aparte patronen te worden opgesteld. Deze uitsplitsing is in de rest van dit hoofdstuk echter niet gedaan.

9.2 Analyse en constructie neerslagpatronen

Om tot representatieve neerslagpatronen te komen wordt een alternatieve methode voor het bepalen van de patronen voorgesteld. Hiertoe is eerst een analyse uitgevoerd van de 1000 meest extreme neerslaggebeurtenissen om de karakteristieken ervan vast te stellen. Om tot karakteristieke neerslagpatronen te komen worden voor de verschillende durren de volgende stappen doorlopen:

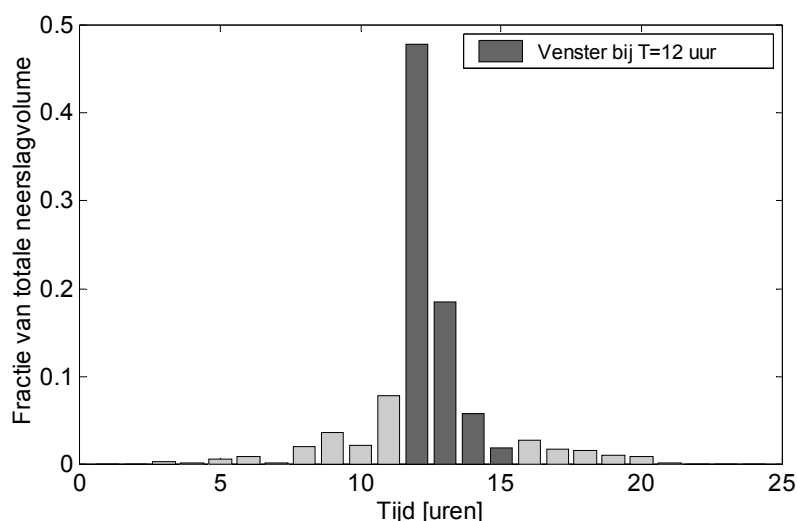
Stap 1: Kenmerken op basis van visuele analyse

Welke overeenkomsten zijn te zien in de gebeurtenissen? Bij het analyseren van de verschillende neerslagpatronen (Figuur 9-1) is het meest in het oog springende kenmerk voor het scheiden van de verschillende gebeurtenissen het aantal pieken. Betreft het een patroon zonder duidelijke pieken of is er sprake van 1, 2 of meer pieken? Patronen met 2 pieken kunnen er ook weer heel verschillend uitzien. De belangrijkste variatie die hierbij een rol speelt is de tijd tussen de twee pieken: is er sprake van een lange of juist een korte tussenduur? Er wordt verwacht dat in ongeveer 10-15% van de gevallen sprake is van een min of meer uniform patroon, en dat in ongeveer 25-35% van de gevallen sprake is van een 2-pieks gebeurtenis. De overige gebeurtenissen (50-65%) vallen in de categorie van de 1-pieks gebeurtenissen.

Stap 2: Onderverdeling van gebeurtenissen

Vervolgens wordt een onderverdeling gemaakt tussen de verschillende gebeurtenissen door het percentage neerslag dat binnen een bepaald percentage van de tijd valt te analyseren. Er wordt alleen gekeken naar blokken van 1/6 deel van de totale tijd (zie ook Figuur 9-6). Wil er sprake zijn van een piek, dan moet er binnen 1/6 deel van de tijd minstens 35% van de totale hoeveelheid neerslag gevallen zijn. Als binnen een ander 1/6 deel van de tijd nog eens meer dan 25% valt, zijn er 2 pieken. Hierbij is aangenomen dat er tussen het eindtijdstip van de 1e piek en het begintijdstip van de 2e piek minimaal 1/4 van de totale duur zit. In alle andere gevallen wordt gesproken van een patroon zonder pieken. In het geval van 3 of meer "pieken" is dus aangenomen dat het patroon geen pieken heeft. Het aantal 3-pieks gebeurtenissen komt overigens slechts 3 keer voor (in 1000 gebeurtenissen). De gebruikte keuze van de tijd tussen 2 pieken, zorgt ervoor dat ongeveer 30% van de geanalyseerde gebeurtenissen in de categorie van de 2-pieks gebeurtenissen valt, wat

overeenkomt met het gevormde beeld in Stap 1. Een nadere toelichting over het vaststellen van geen, één of twee pieken staat in Box F.



Figuur 9-6: Voorbeeld van een 1-pieks gebeurtenis waarbij het venster dat hoort bij tijdstip $T=12$ uur is weergegeven.

Voor de 2-pieks gebeurtenissen wordt verder nog onderscheid gemaakt tussen gebeurtenissen met een korte of een lange duur tussen de pieken. Als de tijd tussen het eind van de eerste piek en het begin van de 2e piek groter is dan 55% van de totale duur van de gebeurtenis, dan heeft de gebeurtenis een lange tussenduur. Anders wordt gesproken van een korte tussenduur. De keuze van 55% van de duur tussen het eind van de eerste en het begin van de tweede piek is zo gemaakt, dat het aantal gebeurtenissen dat in beide categorieën valt (korte en lange tussenduur) ongeveer even groot is.

Voor een venster van $1/6$ van de duur van de gebeurtenis wordt de neerslagsom bepaald. Het actieve uurvak bevindt zich niet in het midden van het venster, maar aan het begin. Is de neerslagsom groter dan 35%, dan wordt gesproken van een piek. Het eerste uurvak van dit blok heet het begintijdstip van de piek. Vervolgens wordt één uur opgeschoven in de tijd en wordt wederom de neerslagsom van een venster van $1/6$ van de duur bepaald. Geldt ook nu weer dat meer dan 35% van de neerslag gevallen is, dan is dit het 2e tijdstip van deze piek. Dan wordt weer één uur opgeschoven en wordt dit herhaald totdat bij de som binnen een venster minder dan 35% van de neerslag oplevert. Kennelijk valt het eind van de piek één uurvak eerder. Dit uurvak is gedefinieerd als het eindtijdstip van de piek. Zie ook Figuur 9-6.

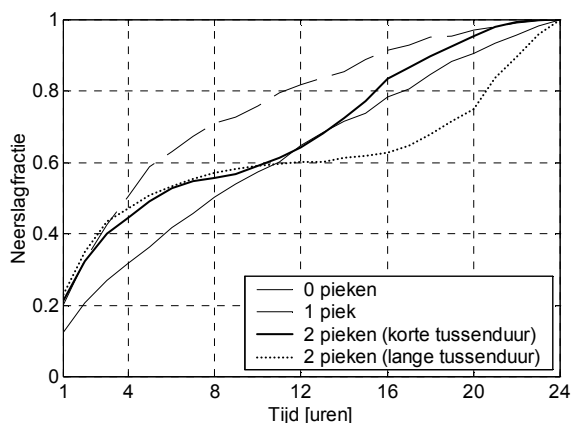
Box F Methode voor het vaststellen van wel of geen piek, inclusief de bijbehorende begin- en eindtijden.

De gebruikte verhoudingen en percentages in deze stap zijn geoptimaliseerd door Stap 1 tot en met 4 te doorlopen voor verschillende waarden. Hierbij is als maat aangehouden dat het beeld dat volgt uit een automatische bepaling van het type gebeurtenis met bovenstaande 'harde' getallen, overeen moet komen met het beeld uit Stap 1.

Stap 3: Visualisatie van gekozen onderverdeling

Op basis van de karakteristieken van de gebeurtenissen worden de cumulatieve verdelingen bekeken. Figuur 9-7 en Figuur 9-8 laten de cumulatieve verdelingen zien zoals deze geïntroduceerd zijn in Paragraaf 9.1.2 voor de gemaakte keuzes uit Stap 2. In Figuur 9-7 zijn de

50%-percentielen weergegeven van de verschillende typen gebeurtenissen voor 24-uurs gebeurtenissen. In de figuur is te zien dat het om verschillende soorten gebeurtenissen gaat. De grafiek voor de gebeurtenissen zonder piek verloopt praktisch lineair, en die van de gebeurtenissen met 1 piek heeft een bol verloop. De grafieken voor gebeurtenissen met 2 pieken vertonen in feite 2 delen. Voor de gebeurtenissen met een langere tussenduur is het middenstuk langer en vlakker. In Figuur 9-8 is met vier percentielen een beeld geschetst van het verloop van de gebeurtenissen zonder piek, de gebeurtenissen met één piek en die met twee pieken.

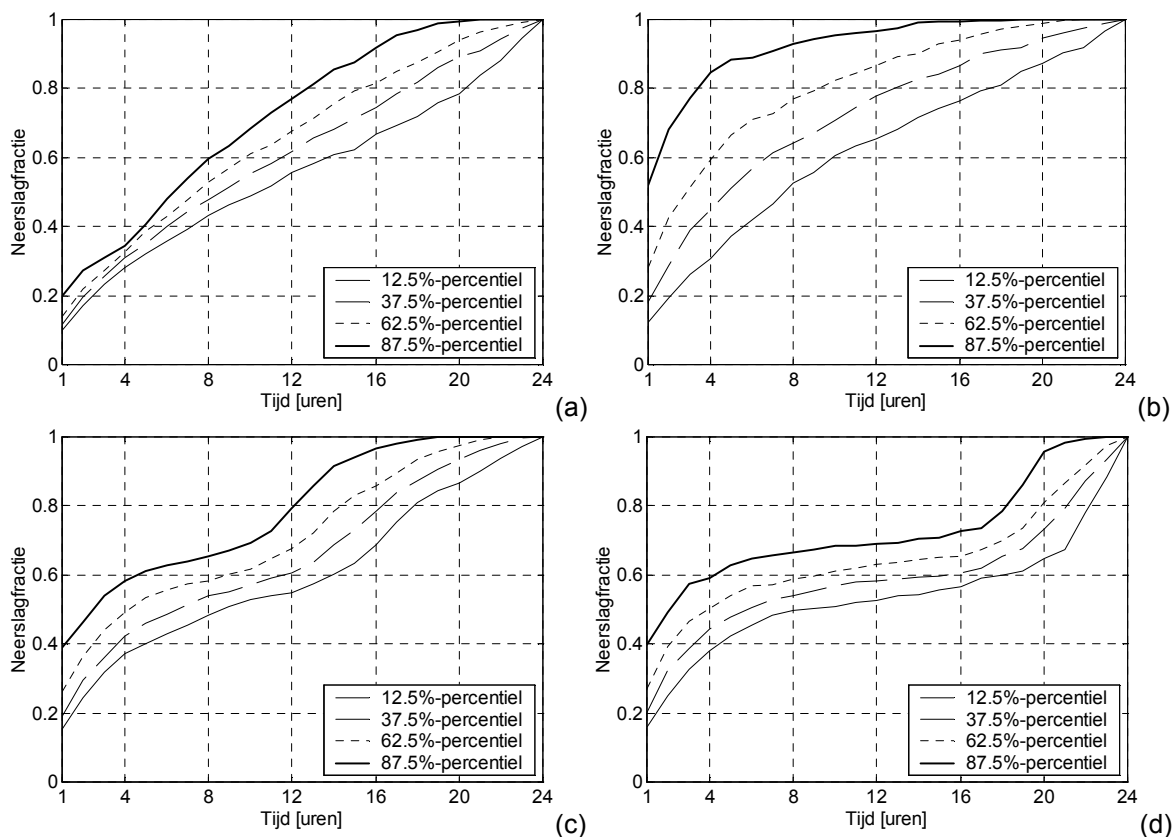


Figuur 9-7: De cumulatieve verdelingen van 24-uurs neerslaggebeurtenissen met een duur van 24 uur. Te zien zijn de 50%-percentielen van 0, 1, en 2-pieks gebeurtenissen.

Uit Figuur 9-8 volgt dat de percentielen van de gebeurtenissen zonder piek veel weg hebben van de lagere percentielen van de gebeurtenissen met 1 piek. Verder kan uit de figuur worden afgeleid dat zelfs bij de cumulatieve verdeling voor gebeurtenissen zonder pieken, er sprake is van een 'piekje' (het uurmaximum begint al op 10-20%). Onder de eerder geïntroduceerde aannames geldt dit niet als een echte piek (binnen 1/6 deel van de tijd valt nooit meer dan 35% van het totaal). Voor de overige durven (48 uur, 96 uur en 192 uur) verandert dit beeld nauwelijks.

De verschillen tussen de 2-pieks gebeurtenissen worden duidelijk zichtbaar als Figuur 9-8c en Figuur 9-8d met elkaar worden vergeleken. Met name de vorm van het middenstuk en de steilheid van de piek aan het eind vallen op.

Verder valt op dat de afstanden tussen de percentielen bij de gebeurtenissen met 1 piek (Figuur 9-8b) een stuk groter zijn dan die bij de gebeurtenissen zonder piek en met 2 pieken (Figuur 9-8a, c en d). Met andere woorden: de variatie in het verloop van de gebeurtenissen met 1 piek is veel groter dan bij de overige gebeurtenissen.



Figuur 9-8: De cumulatieve verdelingen van 24-uurs neerslaggebeurtenissen voor verschillende typen. Te zien zijn vier percentielen voor gebeurtenissen zonder piek (a), gebeurtenissen met 1 piek (b), gebeurtenissen met 2 pieken met een korte tussenduur (c) en gebeurtenissen met 2 pieken met een lange tussenduur (d).

Stap 4: Bepaling kans op een bepaald type neerslaggebeurtenis

De verschillende typen neerslaggebeurtenissen hebben ieder een bepaalde kans van voorkomen. Met andere woorden: hoeveel van de 1000 onderzochte extreme gebeurtenissen bevatten 0, 1 of 2 pieken? Afhankelijk van de duur verschillen deze kansen, hoewel de verschillen klein zijn (zie Tabel 9-2). Ook is te zien dat, onafhankelijk van de duur, de kans op een 2-pieks gebeurtenis ongeveer gelijk is aan 30% op basis van de door ons gemaakte aannames. In ongeveer 60% is sprake van gebeurtenissen met 1 piek en de overige 10% heeft geen pieken. Dit beeld komt overeen met wat in Stap 1 reeds is aangegeven. Op basis van de verhoudingen van de kansen tussen de verschillende typen gebeurtenissen, wordt later het aantal patronen vastgesteld (zie Stap 5).

Duur van de gebeurtenis	Kans op type gebeurtenis (1000 gebeurtenissen totaal)			
	0 pieken	1 piek	2 pieken	
			Korte tussenduur	Lange tussenduur
24 uur	0.12	0.65	0.13	0.10
48 uur	0.09	0.60	0.19	0.12
96 uur	0.10	0.59	0.18	0.13
192 uur	0.14	0.56	0.18	0.12

Tabel 9-2: Verzamel tabel met voor de verschillende duren van een gebeurtenis de kans op 0, 1 of 2 pieken.

Stap 5: Constructie neerslagpatronen

Op basis van de kenmerken van de gebeurtenissen, die in de vorige paragraaf zijn vastgesteld, kunnen patronen worden gegenereerd. Het aantal patronen in elke categorie wordt vastgesteld op basis van de kansen uit Tabel 9-2. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de patronen voor 0, 1 en 2 pieken.

Voor de gebeurtenissen met 2 pieken wordt gekozen voor 2 patronen (één met korte tussenduur en één met lange tussenduur). Er worden dan 2 patronen gebruikt voor ongeveer 30% van het totale aantal gebeurtenissen (zie ook Tabel 9-2). Hoewel er binnen de 2-pieks gebeurtenissen nog variaties kunnen optreden, komen deze relatief zo weinig voor, dat het weinig zinvol is om meer dan 2 patronen in deze categorie te bepalen. Om in verhouding te blijven (Tabel 9-2), worden voor de overige 70% van het aantal gebeurtenissen 5 patronen gekozen. Hiervan wordt er één voor gebeurtenissen zonder pieken gebruikt en 4 voor gebeurtenissen met één piek.

Voor het genereren van de patronen wordt gebruik gemaakt van de reeds eerder geïntroduceerde cumulatieve verdelingen.

Bij de analyse wordt uitgegaan van 1000 neerslaggebeurtenissen. Dit levert ongeveer 125 individuele gebeurtenissen op die in een bepaalde categorie vallen (zie Tabel 9-2). De cumulatieve verdelingen die gebruikt worden voor de patronen, zijn gebaseerd op 100 neerslaggebeurtenissen, dat zijn immers de gebeurtenissen waarvoor interesse bestaat. Als er meer beschikbaar zijn van een bepaald type gebeurtenis, worden de 100 meest extreme gebeurtenissen genomen. Dit zorgt ervoor dat elk patroon op eenzelfde aantal gebeurtenissen is gebaseerd.

Voor de gebeurtenissen zonder piek wordt één representatief patroon gegenereerd. Dit patroon wordt gemaakt op basis van een vergelijkbare cumulatieve verdeling als in Figuur 9-2b. Er wordt gezocht naar een patroon dat zo goed mogelijk past bij een uniforme verdeling. Bij een volledig uniforme verdeling zou de cumulatieve verdeling een rechte lijn zijn. Daarom is gekozen voor een percentiel dat tussen de 12.5% en de 37.5% ligt en dat zo goed mogelijk een rechte lijn benadert. Dit is het 15%-percentiel.

Voor de gebeurtenissen met één piek zijn 4 representatieve patronen gekozen. Deze worden gemaakt op basis van cumulatieve verdelingen als in Figuur 9-8b. Er wordt gekozen voor de percentielen in Tabel 9-3, omdat deze een evenwichtige verdeling van de kansmassa opleveren, zodat elk patroon een even grote kans van voorkomen heeft.

Box G Percentielen van de gebruikte cumulatieve verdelingen.

Genereren van patronen zonder pieken en met één piek.

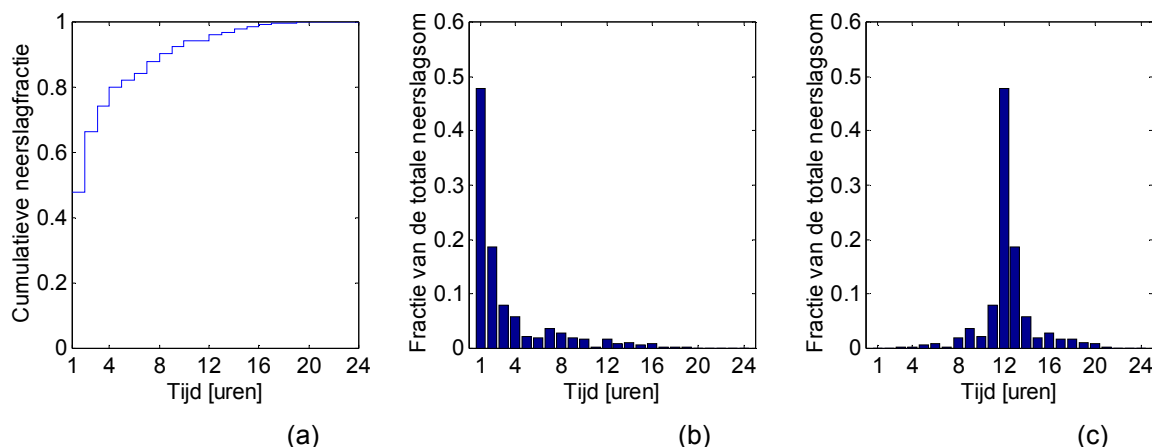
Het patroon zonder pieken wordt gelijk gekozen aan de 15%-percentiellijn van de gebeurtenissen zonder piek (voor details, zie Box G). Voor de 1-pieks patronen wordt gekozen voor de 12.5%, 37.5%, 62.5% en 87.5% percentielslijnen. Deze komen overeen met de klassen van neerslaggebeurtenissen die vallen tussen de grenzen als aangegeven in Tabel 9-3. De 12.5%-percentiellijn is dus bijvoorbeeld representatief voor alle cumulatieven onder het 25%-percentiel en heeft een kans van voorkomen van 25% binnen de 1-pieks gebeurtenissen.

Percentiel	Klassegrenzen	Kans(massa)
12.5%	0% – 25%	0.25
37.5%	25% – 50%	0.25
62.5%	50% – 75%	0.25
87.5%	75% – 100%	0.25

Tabel 9-3: Overzicht van de representatieve percentielen en de bijbehorende kans van voorkomen voor 3 klassen van 1-pieks gebeurtenissen.

Elk van deze percentielen is representatief voor een bepaalde klasse neerslagpatronen en heeft een bepaalde overschrijdingskans. Met behulp van Tabel 9-2 en Tabel 9-3 kunnen de kansen per neerslaggebeurtenis worden berekend (voor een duur van 24 uur zie ook Tabel 9-6).

Met behulp van de cumulatieve verdelingen is het nu mogelijk om een neerslagpatroon te construeren. De toenames in de cumulatieve verdeling bepalen de hoogte van de neerslagintensiteit (Figuur 9-2b). Vervolgens wordt met deze blokken een patroon gemaakt. Er wordt begonnen met het plaatsen van het hoogste (eerste) blok halverwege de duur van de gebeurtenis (de lokatie van de piek binnen een gebeurtenis is minder belangrijk dan de vorm). Het tweede blok plaatsen we hier direct rechts van, het derde blok links enzovoort (zie Figuur 9-9). Met deze opbouw van het patroon worden wijzigingen aangebracht in de vorm; het verschijnsel van 'menging' zoals uiteengezet in Box H is hier van belang.



Figuur 9-9: Genereren van een neerslagpatroon op basis van een cumulatieve verdeling. (a) Cumulatieve verdeling. (b) Bijbehorende toenames in de verdeling. (c) Het gegenereerde patroon.

De cumulatieve verdelingen zijn geen één-op-één weergave van de neerslaggebeurtenissen. De cumulatieve verdelingen van de individuele gebeurtenissen geven aan wat de maximale hoeveelheid neerslag is, die binnen een bepaald tijdsblok valt (1 uur, of 2 uur etc.). Het is heel goed mogelijk dat het 1-uurs maximum van een gebeurtenis zich aan het begin van een patroon bevindt, en het 2-uurs maximum aan het eind. Dit verschijnsel wordt 'menging' genoemd. Door de menging sluiten de cumulatieve verdelingen minder goed aan op het verloop van de historisch opgetreden neerslaggebeurtenis. Deze menging kan door bijvoorbeeld een andere ordening van de data van de individuele neerslaggebeurtenissen worden voorkomen.

Door gebruik te maken van cumulatieve verdelingen is er niet gekozen voor het handhaven van de temporele samenhang van neerslag. Reden hiervoor is dat handhaving hiervan een ander aspect van de neerslaggebeurtenissen verwaarloost. In probabilistische toepassingen zijn we, gegeven de duur van de gebeurtenis, met name geïnteresseerd in de hoeveelheid neerslag die met een bepaalde kans (percentiel) binnen 1 uur, 2 uur, 3 uur etcetera kan vallen. Op deze manier wordt aangesloten bij de neerslagfracties zoals gepresenteerd in Tabel 9-1. Als menging wordt meegenomen worden deze hoeveelheden voor alle duren correct gerepresenteerd en ontstaat een overschatting van de gepiektheid van de gebeurtenis. Voor relatief korte duren (bijvoorbeeld een dag) is de verwachting dat de overschatting geringer is dan bij langere duren (bijvoorbeeld 8 dagen). Als menging niet wordt meegenomen ontstaat in het algemeen een afvlakking van de genoemde hoeveelheden. In deze studie is niet onderzocht welke invloed de gekozen methode heeft op de patronen en op de waterstanden bij gebruik in neerslag-afvoer modellen. Aanbevolen wordt om een kwantitatief beeld te scheppen van de invloed van de menging op de uiteindelijke patronen. Op basis daarvan kan het belang van het wel of niet meenemen van menging worden aangegeven.

Menging speelt overigens geen rol bij de selectie van de gebeurtenissen (0, 1 of 2 pieken) omdat hier de originele gebeurtenissen aan ten grondslag liggen. Met het verschijnsel van menging wordt rekening gehouden bij het bepalen van de patronen van de gebeurtenissen met twee pieken door splitsing van de gebeurtenis (zie Stap 5). Bij dergelijke gebeurtenissen wordt verwacht dat het effect van menging het grootst is.

Box H Menging.

Genereren van patronen voor 2 pieken

Het genereren van de patronen voor 2-pieks gebeurtenissen geschiedt op een iets andere manier om de neerslaghoeveelheden die bij de twee pieken horen intact te houden en menging te voorkomen. Als bij dergelijke gebeurtenissen menging optreedt wordt namelijk systematisch één van de twee pieken overschat en de andere onderschat. Een belangrijke constatering hierbij is dat de eerste en de tweede piek niet (significant) van vorm verschillen. Een belangrijk onderscheidend aspect van de gebeurtenissen is de duur tussen de twee pieken. Hiertoe worden de 2-pieks gebeurtenissen nader bekeken en worden de tussenduren en de neerslaghoeveelheden in de eerste en de tweede piek geanalyseerd:

Tussenduren

Als eerste wordt (per gebeurtenis) het tijdstip bepaald waarop de eerste piek eindigt. Dit is het laatste tijdstip waarvoor geldt dat binnen een venster van 1/6 van de totale duur meer dan 35% van de totale hoeveelheid neerslag valt. Merk op dat dit nog wel het eerste tijdstip binnen het venster is. Hetzelfde doen we voor het begin van de tweede piek. Zo krijgen we een beeld van de tijd tussen de 2 pieken, afhankelijk van de duur van de gebeurtenis. De tijdstippen van de pieken van de 1000 meest extreme gebeurtenissen zijn op deze manier apart bepaald voor elke gebeurtenis. Deze zijn tot slot gemiddeld om tot een schatting te komen van deze tijdstippen in een representatieve gebeurtenis met 2 pieken. Voor zowel de gebeurtenissen met een korte als een lange tussenduur zijn deze resultaten verzameld in Tabel 9-4.

Duur van de gebeurtenis	Korte tussenduur			Lange tussenduur		
	Eind 1e piek	Begin 2e piek	Tussenduur	Eind 1e piek	Begin 2e piek	Tussenduur
24 uur	6	16	10	3	19	16
48 uur	13	31	18	4	37	33
96 uur	25	61	36	9	74	65
192 uur	43	119	76	18	146	128

Tabel 9-4: Tijdstippen die volgen uit een analyse van de cumulatieve verdelingen van 2-pieks gebeurtenissen met een korte en een lange tussenduur.

Voor korte tussenduren valt op dat de eerste piek op ongeveer 25% van de neerslagduur eindigt, en dat de tweede piek op ongeveer 65% van de neerslagduur begint (onafhankelijk van de duur). De tussenduur is in verhouding met de totale duur en bedraagt iets minder dan de helft daarvan. Bij de lange tussenduren ligt het eind van de eerste piek op ongeveer 10% van de neerslagduur en het begin van de tweede piek op ongeveer 75% van de totale duur. Ook hier is de tussenduur in verhouding met de totale duur en bedraagt ongeveer 66% daarvan.

Neerslaghoeveelheden

Daarnaast zijn de neerslaghoeveelheden berekend voor drie afzonderlijke delen van een gebeurtenis. Hierbij is als volgt te werk gegaan. Zoals gezegd zijn de begin- en eindtijdstippen per piek reeds bepaald. Voor de hoeveelheden geldt nu het volgende (zie ook Figuur 9-10):

1. De hoeveelheid neerslag behorende bij het eerste deel (inclusief de eerste piek) is gelijk aan de hoeveelheid neerslag die gevallen is vanaf het eerste tijdstip van de gebeurtenis tot en met het laatste tijdstip van de eerste piek plus de neerslag binnen de rest van het venster van 1/6 van de duur dat hoort bij het laatste tijdstip van de eerste piek. Deze neerslag draagt immers wel bij aan de hoeveelheid neerslag van deze periode.

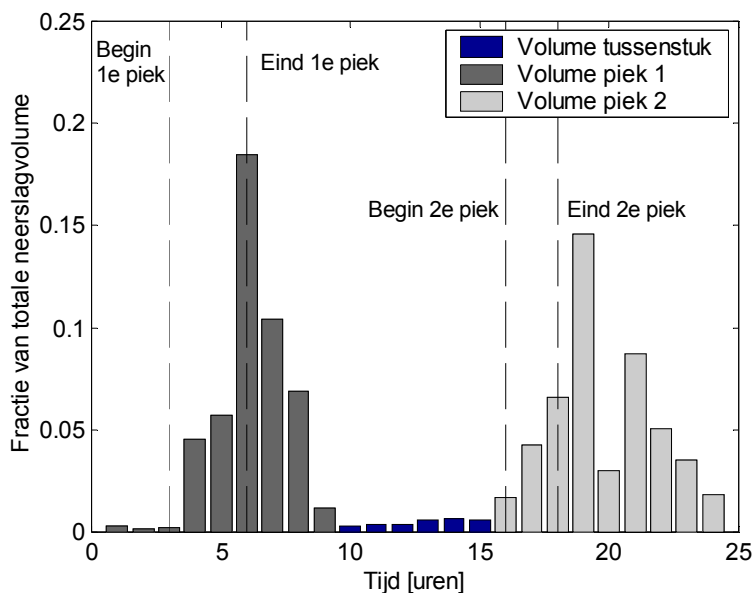
2. De hoeveelheid neerslag behorende bij het tweede deel (inclusief de tweede piek) is gelijk aan de hoeveelheid neerslag die gevallen is vanaf het eerste tijdstip van de tweede piek tot en met het laatste tijdstip van de gebeurtenis.
3. De hoeveelheid neerslag die hoort bij het tussenstuk is het restant van de totale hoeveelheid van de neerslaggebeurtenis.

De neerslaghoeveelheden zijn berekend voor elke individuele gebeurtenis met 2 pieken en vervolgens gemiddeld, net als bij de tijdstippen hierboven. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen korte en lange tussenduren. De corresponderende neerslagfracties zijn verzameld in Tabel 9-5.

Duur van de gebeurtenis	Korte tussenduur			Lange tussenduur		
	Neerslagfractie "1e piek"	Neerslagfractie "tussenstuk"	Neerslagfractie "2e piek"	Neerslagfractie "1e piek"	Neerslagfractie "tussenstuk"	Neerslagfractie "2e piek"
24 uur	0.46	0.05	0.49	0.47	0.09	0.44
48 uur	0.45	0.05	0.50	0.44	0.11	0.45
96 uur	0.45	0.06	0.49	0.43	0.13	0.44
192 uur	0.45	0.07	0.48	0.43	0.14	0.43

Tabel 9-5: Neerslagfracties die volgen uit een analyse van de cumulatieve verdelingen van 2-pieks gebeurtenissen met een korte en een lange tussenduur.

In de tabel is te zien dat de hoeveelheden in de eerste en tweede piek vrijwel even groot zijn. De neerslagfractie in het tussenstuk bij korte duren is ongeveer 6% en bij lange tussenduren ongeveer 12%.

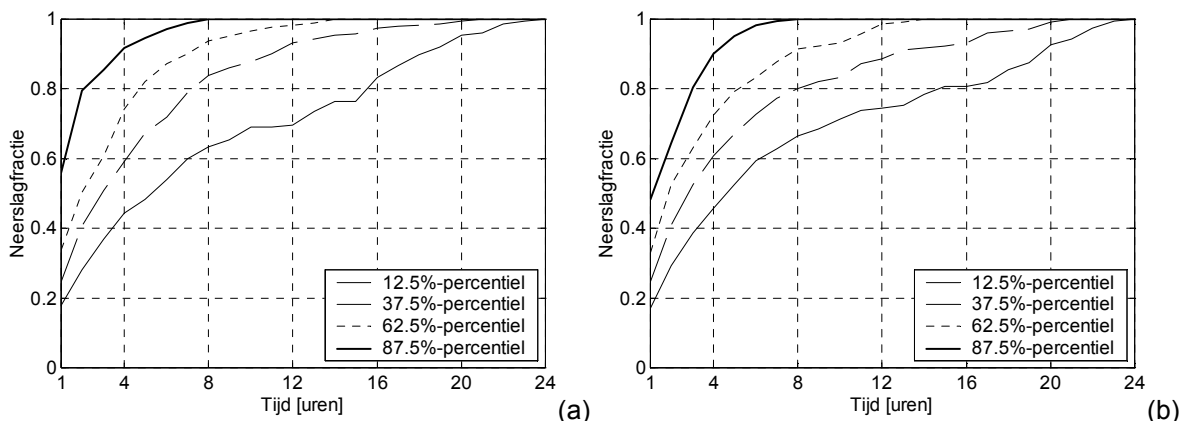


Figuur 9-10: Eigenschappen van een generiek (24-uurs) patroon voor een 2-pieks gebeurtenis met een korte tussenduur.

Om ervoor te zorgen dat de karakteristieke kenmerken van elk van de twee pieken behouden blijven, worden deze apart geanalyseerd. De gebeurtenis wordt in tweeën geknipt op bijvoorbeeld de helft van de duur (en dus een stuk ná het eind van de eerste piek, maar vóór de tweede piek). Vervolgens wordt voor elk van deze delen afzonderlijk de cumulatieve verdeling bepaald. Deze twee cumulatieve verdelingen worden weer gebruikt om de neerslagpatronen te construeren. Op

deze treedt geen menging op. Gebeurt dit wel dan zou de middeling van de gebeurtenissen het karakter van de 2 pieken veranderen.

In plaats van de patronen te baseren op één cumulatieve verdeling van de hele gebeurtenis (Figuur 9-9) is dus gekozen om de twee cumulatieve verdelingen van de gesplitste gebeurtenissen te gebruiken (zie Figuur 9-11). Het eerste deel geeft een beschrijving van de 1e piek, het tweede deel van de 2e piek.



Figuur 9-11: De cumulatieve verdelingen van 48-uurs 2-pieks neerslaggebeurtenissen met een lange tussenduur, waarbij (a) het eerste deel voorstelt en (b) het tweede deel.

Het generieke cumulatieve neerslagpatroon voor een gebeurtenis met 2 pieken bestaat uit drie delen (zie ook weer Figuur 9-10):

1. *Het eerste deel (inclusief de 1e piek)*

Deze wordt gemaakt met het 50%-percentiel van het eerste deel van de gebeurtenis. Slechts het deel van de lijn dat eindigt bij de getallen uit Tabel 9-4 (eind 1e piek) wordt gebruikt. Vervolgens wordt de cumulatieve verdeling zodanig geschaald, dat het volume van dit gedeelte overeenkomt met de corresponderende hoeveelheid zoals berekend in Tabel 9-5 (neerslagfractie eerste piek).

2. *Het tweede deel (inclusief de 2e piek)*

Deze wordt gemaakt met het 50%-percentiel van het tweede deel van de gebeurtenis. Het tijdstip waarop begonnen wordt met dit deel, wordt uit de getallen van Tabel 9-4 (begin 2e piek) gehaald. Vervolgens is deze cumulatieve verdeling zodanig geschaald, dat het volume van dit gedeelte overeenkomt met de corresponderende hoeveelheid zoals berekend in Tabel 9-5 (neerslagfractie tweede piek).

3. *Het derde deel ("tussenstuk")*

Deze wordt gemaakt met het 50%-percentiel van het tussenstuk van de gehele gebeurtenis met 2 pieken. Afhankelijk van het type gebeurtenis, is dit dus het 50%-percentiel van de gebeurtenissen met een korte of een lange tussenduur. Het tussenstuk loopt van het eind van de eerste piek naar het begin van de tweede piek. Vervolgens is deze cumulatieve verdeling zodanig geschaald, dat het volume van dit gedeelte overeenkomt met de corresponderende hoeveelheid zoals berekend in Tabel 9-5 (neerslagfractie tussenstuk).

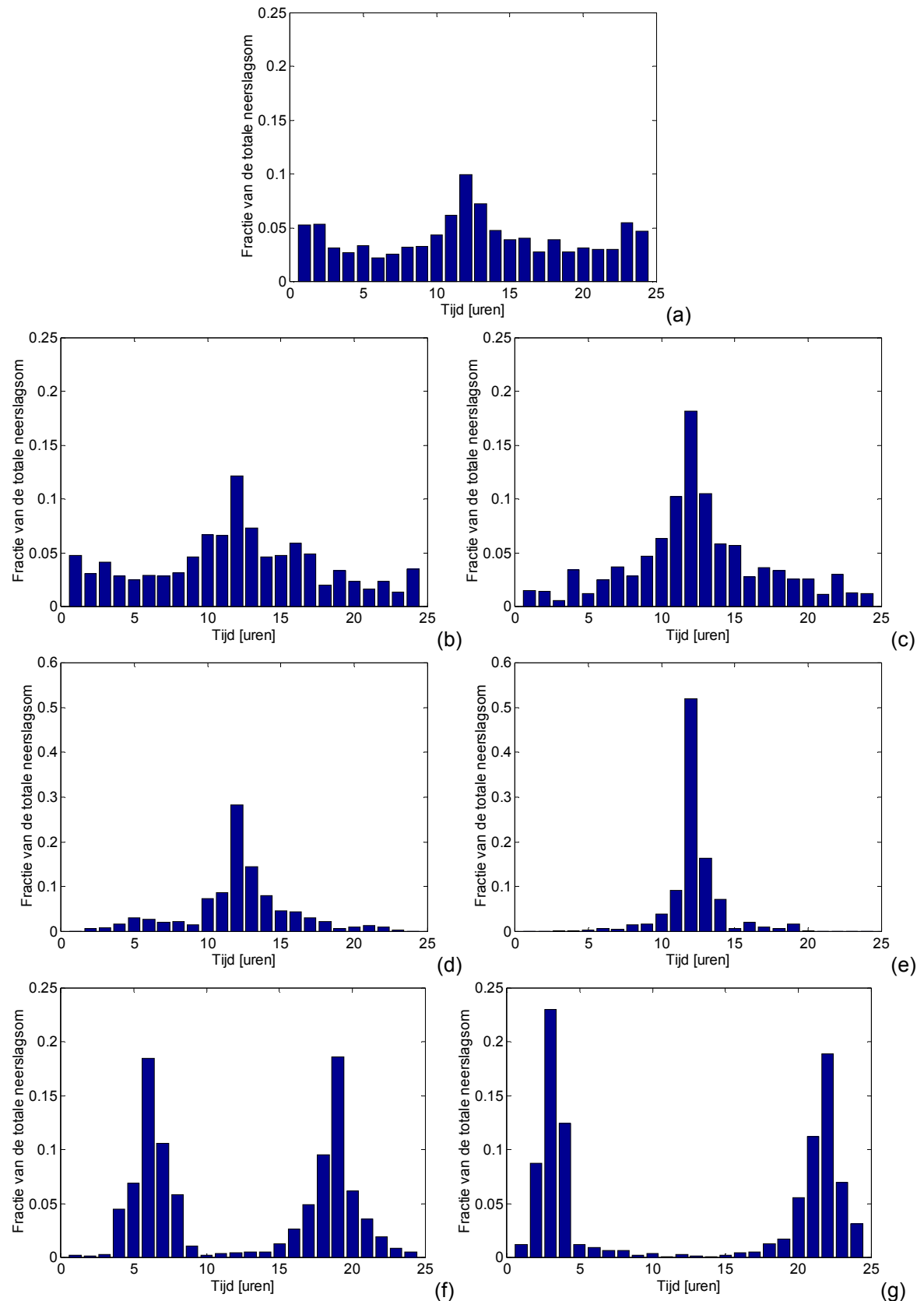
Op een gelijksoortige manier als hierboven besproken bij de gebeurtenissen zonder piek en met één piek, is een neerslagpatroon geconstrueerd op basis van deze samengestelde cumulatieven voor de 2-pieks gebeurtenissen. Het enige punt waar verder nog rekening mee moet worden gehouden is dat de lokaties van de begintijdstippen van de pieken consistent zijn met de waarden

uit Tabel 9-4. Dit wordt gedaan door elk van de pieken steeds één tijdsblok door te schuiven, totdat de correct begintijdstippen zijn bereikt.

Tot slot worden ter illustratie de kansen op een bepaald type neerslaggebeurtenis en de bijbehorende patronen voor een duur van 24 uur gepresenteerd in Tabel 9-6 en Figuur 9-12. De resultaten van dit onderzoek aangaande de patronen in numerieke vorm zijn voor de duren van 1, 2, 4 en 8 dagen te vinden op de website van de STOWA (www.stowa.nl). Hierbij moet in ogenschouw worden genomen dat de invloed van een aantal uitgangspunten bij de gebruikte methode in dit onderzoek niet kwantitatief is uitgewerkt en verder onderzocht dient te worden.

Duur van de gebeurtenis	Kans op type gebeurtenis (1000 gebeurtenissen totaal)						
	Geen piek	1 piek				2 pieken	
		Laag	Middellaag	Middelhoog	Hoog	Korte tussenduur	Lange tussenduur
24 uur	0.12	0.16	0.16	0.16	0.16	0.13	0.11

Tabel 9-6: Tabel met kansen op een bepaald type neerslaggebeurtenis voor een duur van 24 uur.



Figuur 9-12: Karakteristieke neerslagpatronen voor neerslaggebeurtenissen met een duur van 24 uur. Een uniform patroon zonder piek (a), vier 1-pieks patronen (b-e) en 2-pieks patronen met een korte tussenduur (f) en een lange tussenduur (g).

9.3 Discussie

Bij het genereren van de patronen is gebruik gemaakt van de percentielen van cumulatieve verdelingen. Aan elk type gebeurtenis liggen 100 cumulatieve verdelingen van neerslaggebeurtenissen ten grondslag. De percentielen die bij deze 100 gebeurtenissen horen zijn geen gladde functies, wat komt door de beperkte sample-grootte. Deze grilligheid in de cumulatieve verdelingen resulteert in een zekere hoeveelheid ruis in het patroon, ondanks dat er gebruik is gemaakt van een soort middeling van de kenmerken van de patronen. Een andere keuze zou zijn om de patronen te vereenvoudigen door bijvoorbeeld de tijdsblokken buiten de pieken allemaal dezelfde waarde te geven, of door te werken met een uniform patroon in het geval van een patroon zonder pieken. Een dergelijke versimpeling van een patroon is ook gebruikelijk op andere toepassingsterreinen, bijvoorbeeld bij het genereren van afvoergolven. Met name in het toepassingsgebied van het waterbeheer bestaat er interesse in een generiek patroon. Afhankelijk van de toepassing waarvoor de patronen gebruikt gaan worden, kan een keuze gemaakt worden over de mate van detail die in de patronen naar voren komt. De bovengenoemde vereenvoudiging is verder niet uitgewerkt in het rapport, maar dient meer ter illustratie en ondersteuning wat betreft de mogelijkheden.

Het verschijnsel menging speelt bij het genereren van patronen een rol (zie Box H). Er is bij het genereren van de patronen echter niet gekozen voor het handhaven van de temporele samenhang van neerslag. Door deze keuze wordt aangesloten bij de neerslaghoeveelheden zoals opgenomen in Tabel 9-1. Er ontstaat echter wel een overschatting van de gepiektheid van de gebeurtenis. Als menging niet wordt meegenomen ontstaat in het algemeen een afvlakking van de genoemde neerslaghoeveelheden. Wat het effect van menging precies is bij het genereren van de uiteindelijke patronen is onduidelijk. Wel is duidelijk, dat als menging effect heeft, dat het tot uiting komt in patronen die geconcentreerder zijn dan de originele patronen. Immers, de neerslaghoeveelheden van 1-uurs maxima, 2-uurs maxima etc, worden naast elkaar geplaatst bij het genereren van de patronen. In de originele patronen hoefde dit niet het geval te zijn. Kwalitatief is het effect van menging bij het genereren van de patronen met de voorgestelde methode dus wel duidelijk, de kwantitatieve effecten dienen echter nader te worden onderzocht.

Bij gebeurtenissen met twee pieken heeft menging het effect dat het zwaartepunt van de neerslag in één van de twee pieken zal vallen. Om dit effect te voorkomen, zijn de eerste en tweede piek losgekoppeld, zodat menging tussen de twee pieken onderling geen rol van betekenis meer zal spelen. De begin- en eindtijdstippen van de pieken zijn bepaald op basis van de individuele gebeurtenissen. Ook de neerslaghoeveelheden van de 2 pieken worden apart berekend door de gebeurtenissen in tweeën te knippen. Bij het vaststellen van de precieze vorm van het tussenstuk kan menging nog wel van belang zijn. Omdat dit enkel een klein deel van de neerslag betreft kan dit voor de beoogde toepassing verwaarloosbaar worden geacht.

Verder is gekozen om in de patronen een symmetrie aan te brengen rond de piek. In de literatuur wordt er ook wel voor gekozen om asymmetrie toe te laten. Echter, uit de in dit rapport gehanteerde definitie van de neerslaggebeurtenissen (zie Figuur 9-1 voor gebeurtenissen van 24 uur) volgt niet direct of asymmetrie gewenst is.

Aanbevolen wordt om de invloed van een aantal uitgangspunten bij de gebruikte methode (zoals de selectie van 1-, 2-, 3- (etc.) uurs neerslagsommen, menging, symmetrie) nader uit te werken. Dit kan door patronen in te voeren in een neerslag-afvoer model, en na te gaan welke invloed de patronen hebben op de waterstanden. Op deze manier kan de 'optimale' mix van eigenschappen bepaald worden.

10 Aanbevelingen

- De in dit onderzoek afgeleide frequentietabellen wordt aanbevolen om als standaard te hanteren in het waterbeheer.
- De in deze studie afgeleide statistiek is tot stand gekomen door de generaliseerde extreme waarden verdeling toe te passen op jaarmaxima. Vooral de vormparameter van deze verdeling heeft veel invloed op de uiteindelijke resultaten en is hier bepaald door gebruik te maken van literatuur. Deze literatuur is afkomstig uit 1983 en daardoor wordt er geen gebruik gemaakt van data van de afgelopen 25 jaar. Een analyse van stationsreeksen met daarin tevens de recente data leidt tot een betrouwbaardere afleiding van de vormparameter.
- In verband met eventuele klimaatsveranderingen zijn klimaatscenario's bepaald, ook wat betreft neerslag. Om voldoende rekening te houden met de klimaatsveranderingen is het gewenst om de scenario's eerst door te rekenen op de stationsreeksen. Vervolgens kan de in deze studie gepresenteerde statistische methode toegepast worden om overschrijdingsfrequenties af te leiden.
- In deze studie is een analyse uitgevoerd om te onderzoeken in hoeverre de afgeleide statistiek representatief is voor Nederland. Om een beter beeld te krijgen van de verschillen die ruimtelijk gezien aanwezig zijn en van de factoren die hiervoor verantwoordelijk zijn is een uitgebreide regionale analyse noodzakelijk.
- Voor het genereren van neerslagpatronen wordt aanbevolen om de gevoeligheid van een aantal uitgangspunten bij de gebruikte methode (zoals de selectie van 1-, 2-, 3- (etc.) uren neerslagsommen, menging, symmetrie) nader uit te werken. Dit kan door patronen in te voeren in neerslag-afvoer modellen, en na te gaan welke invloed de patronen hebben op de waterstanden.
- De resultaten uit deze studie voor overschrijdingsfrequenties van eens per 100 jaar of nog lagere overschrijdingsfrequenties hebben relatief brede betrouwbaarheidsintervallen. Om de onzekerheid in de resultaten te verkleinen zou gebruik gemaakt kunnen worden van zogenaamde 'resampling' of 'pooling' technieken.
- In deze studie ligt de nadruk vooral op niet-verstedelijkt gebied en daarmee op neerslaggebeurtenissen met relatief lange duren (vanaf 4 uur). Voor verstedelijkt gebied is statistiek voor relatief korte duren van groter belang. Uitbreiding (volgens de gehanteerde statistische methode) naar deze duren (korter dan 4 uur) is daarom gewenst. Ook statistiek voor duren langer dan 9 dagen kan van belang zijn voor toepassingen waarbij grondwaterstanden een rol spelen.
- De normeringsmethodiek wordt toegepast op regionale watersystemen. Als relatief grote watersystemen worden bekeken kan de ruimtelijke spreiding van een bui tijdens een neerslaggebeurtenis van grote invloed zijn op de resulterende waterstanden. De afgeleide statistiek in deze studie geldt echter voor neerslag op een bepaalde plaats en zegt niets over de uitgestrektheid van het neerslaggebied. Uitbreiding van de 'puntstatistiek' naar 'gebiedsstatistiek' is daarom wenselijk.
- Om de kans op overschrijding van de waterstand (op een bepaalde lokatie) in te schatten is het van belang de kans op extreme gebeurtenissen te kennen. Deze gebeurtenissen worden echter ook bepaald door de beginvoorwaarde van de resterende berging in het systeem en de mogelijkheid tot lozing. Met behulp van conditionele statistiek kan hiermee rekening gehouden worden.

Referenties

- Beersma, J.J., Buishand, T.A. en Buiteveld H., 2004. Droog, droger, droogst – KNMI/RIZA bijdrage aan de tweede fase van de droogtestudie Nederland. KNMI publicatie: 199-II.
- Benard, A. en Bos-Levenbach, E.C., 1953. The plotting of observations on probability paper. *Statistica*, **7**, 163-173.
- Benschop, H., 2000. Handboek Waarnemingen, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Bruin, A.T.H., 2002. Veranderingen in neerslagkarakteristieken in Nederland gedurende de periode 1901-2001. KNMI Technisch Rapport TR-246, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Buishand, T.A., 1983a. De kansverdeling van D-uurlijkse neerslagsommen ($D = 1, 2, 4, 6, 12, 24$ of 48) in Nederland. KNMI Wetenschappelijk Rapport W.R. 83-5, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Buishand, T.A., 1983b. Uitzonderlijk hoge neerslaghoeveelheden en theorie van de extreme waarden. *Cultuurtechnisch Tijdschrift*, **23**, 9-20.
- Buishand, T.A., 1988. Correctie pluviograafwaarnemingen. KNMI Memorandum, FM-88-28, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Buishand, T.A., 1989. Statistics of extremes in climatology. *Statistica Neerlandica*, **43-1**, 1-30.
- Buishand, T.A., en Velds, C.A., 1980. Klimaat van Nederland 1, Neerslag en verdamping. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Buishand, T.A., Acker van, J.B.M. en Luijelaar van, H., 1991. Analyse van kwartiersommen van de neerslag. *H₂O: Tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling*, **11**, 294-299.
- Coles, S., 2001. *An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values*. Springer-Verlag, Londen, 208 pp.
- Colenbrander, H.J., en Stol, Ph.Th., 1970. Neerslag en neerslagverdeling naar plaats en tijd. Deelrapport 5 in: Hydrologisch onderzoek in het Leerinkbeekgebied. Tweede interimrapport werkgroep I, Comm. ter Bestudering van de Waterbehoefte van de Gelderse Landbouwgronden, Provincie Gelderland, Arnhem, 98-108.
- Cordery, I., Pilgrim, D.H. en Rowbottom, I.A., 1984. Time patterns of rainfall for estimating design floods on a frequency basis. *Water Science and Technology*, **16**, 155-165.
- Edwards, A.W.F., 1972. *Likelihood: An account of the statistical concept of likelihood and its applications to scientific inference*. Cambridge University Press, Cambridge, 235 pp.
- Gellens, D., 2003. Etude des précipitations extrêmes: Etablissement des fractiles et des périodes de retour d'événements pluviométriques. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles.
- Heijboer, D. en Nellestijn, J.W., 2002. Klimaatatlas van Nederland; de Normaalperiode 1971-2000. Uitgeverij Elmar B.V., Rijswijk, Nederland, 182 pp.
- Hosking, J.R.M., Wallis, J.R. en Wood, E.F., 1985. Estimation of the Generalized Extreme-Value Distribution by the Method of Probability-Weighted Moments. *Technometrics*, **27**, 251-261.
- Huff, F.A., 1967. Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water Resources Research*, **3-4**, 1007-1019.

- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Linden van der, P.J. en Xiaosu, D. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, 944 pp.
- Jenkinson, A.F., 1955. The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) values of meteorological elements. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **81**, 158-171.
- Klein Tank, A.M.G. en Sluijter, R.J.C.F., 2003. Nederland is verder opgewarmd. Hoofdstuk 1 in De toestand van het klimaat in Nederland 2003, Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut.
- Klein Tank, A.M.G. en Coauteurs, 2002. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, **22**, 1441-1453.
- Kok, M., Lammers, I.B.M., Lobbrecht, A.H., Versteeg, R.P., van Bakel, P.J.T. en van der Bolt, F.J.E., 2000. Hoogwaternormering Regionale Watersystemen. HKV [LIJN IN WATER](#) en Alterra in opdracht van de commissie Waterbeheer 21e eeuw. Lelystad, juni 2000.
- Kok, M., Klein Tank, A.M.G., Versteeg, R.P. en Smits, A., 2002. Statistiek van extreme neerslag. Definitiestudie. HKV [LIJN IN WATER](#) en KNMI. PR509.
- Kotz, S. en Nadarajah, S., 2000. *Extreme value distributions: Theory and Applications*. Imperial College Press, London, 185 pp.
- Können, G.P., 2001. Climate scenarios for impact studies in the Netherlands. KNMI publicatie, persoonlijk memo.
- Können, G.P., Fransen, W. en Mureau, R., 1997. Meteorologie ten behoeve van de 'Vierde Nota Waterhuishouding (NW4)'. Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ).
- Lammers, I.B.M. en Versteeg, R.P., 2000. Neerslagpatronen. Neerslagmodellering voor de stochastische methode. HKV [LIJN IN WATER](#), RO031.10, oktober 2000.
- Langbein, W.B., 1949. Annual floods and the partial-duration flood series. *Transactions American Geophysical Union*, **30**, 879-881.
- Noortwijk van, J.M., Kalk, H.J., Duits, M.T. en Chbab, E.H., 2002. Bayesian statistics for flood prevention. HKV [LIJN IN WATER](#) in opdracht van Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA).
- Owen, D.B., 1962. *Handbook of Statistical Tables*. Pergamon Press/Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Pickands, J., 1975. Statistical inference using extreme order statistics. *The Anals of Statistics*, **3**, 119-131.
- Pilgrim, D.H. en Cordery, I., 1975. Rainfall temporal patterns for design floods. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, **101**, 81-95.
- Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. en Flannery, B.P., 1992. *Numerical Recipies in FORTRAN: the Art of Scientific Computing* (2de editie). Cambridge University Press, Cambridge, 963 pp.
- Reynard, N.S. en Stewart, E.J., 1993. The derivation of design rainfall profiles for upland areas of the United Kingdom. *Meteorological Magazine*, **122**, 116-123.
- Roskam, A.P., Hoekema, J. en Seijffert, J.J.W., 2000. Richtingsafhankelijke extreme waarden voor HW-standen, golfhoogte en golfperioden. Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ).

- Srikanthan, R. en McMahon, T.A., 1985. Temporal storm patterns re-examined. *Civil Engineering Transactions Institution of Engineers, Australia*, **CE27**, 230-237.
- STOWA, 2001. Normering regionale wateroverlast. Opzet en Inhoud van het normeringssysteem. HKV LIJN IN WATER en WL|delft hydraulics in opdracht van de Unie van Waterschappen, het IPO, Rijkswaterstaat en de STOWA. STOWA rapport 2001-35.
- Verkaik, J.W., Smits, A. en Ettema, J., 2003. Wind statistics of the Netherlands including coastal zone. KNMI publicatie.
- Von Mises, R., 1936. La Distribution de la Plus Grande de n Valeurs. Reprinted in *Selected Papers, II*, Amer. Math. Soc., Providence, RI (1954), 271-294.
- Waterloopkundig Laboratorium (WL) en European-American Center for Policy Analysis/Rand (EAC/RAND), 1993. Toetsing uitgangspunten rivierdijkversterkingen: deelrapport 2: Maatgevende belastingen.