Analyse van kwartiersommen van de neerslag

Samenvatting
Door de ontwikkeling van computerprogramma's voor het oplossen van rioleringsvraagstukken is er behoefte ontstaan aan tijdreeksen van de hoeveelheid neerslag over korte tijdsintervallen. In dit artikel wordt een 15-minuten bestand besproken van de stations Eelde, De Bilt, en Beek (L). De pluviograafregistraties van deze stations werden gedigitaliseerd voor de jaren 1955 t/m 1979.
De gedigitaliseerde waarden werden zodanig gecorrigeerd dat de uursommen en dagwaarden overeenkomen met die in andere gegevensbestanden van het KNMI. Uitvoerig wordt ingegaan op de regenduurlijnen voor overschrijdingsfrequenties van tienmaal per jaar tot eens in de 100 jaar. Deze regenduurlijnen zijn gebaseerd op een partiële reeksanalyse. Hoewel de reeksen een lengte van 25 jaar hebben, is er toch nog een vrij groot toevalseffect door de grote variabiliteit van de neerslag. Het is daarom niet mogelijk systematische verschillen tussen de drie stations te onderkennen, ofschoon voor herhalingstijden tussen de 1 en 10 jaar de 15- en 30-minuten waarden voor Beek 15 tot 20% boven die voor de twee andere stations liggen. De getallen uit de regenduurlijnen van het beschouwde 15-minuten bestand komen in het algemeen redelijk overeen met die in andere publikaties.

1. Inleiding

Bij hydraulische berekeningen van rioolstelsels en waterlopen wordt in toenemende mate gebruik gemaakt van neerslag-afvoer modellen en niet-stationaire stromingsmodellen. Toepassing van dergelijke modellen leidt tot een behoefte aan gedetailleerde informatie over de neerslag als invoer-variabele.
De meest gedetailleerde gegevens van het neerslagverloop worden ingewonnen met zelfregistrerende regenmeters of pluviografen. De pluviograafregistraties zijn echter voor het grootste deel alleen in analoge vorm beschikbaar als een continue lijn op een papierstrook of rol. Voor gebruik in rekenmodellen is het nodig om deze analoge gegevens te digitaliseren, dat wil zeggen het continue verloop van de neerslaglijn moet worden omgezet in een rij getallen.
In dit artikel wordt een 15-minuten bestand van de neerslag besproken dat recentelijk door Grontmij in samenwerking met het KNMI is opgebouwd. Eerst wordt enige informatie gegeven over pluviografen bij het KNMI. Daarna wordt beschreven hoe de pluviograafregistraties werden gedigitaliseerd en op welke wijze de gedigitaliseerde waarden werden gecorrigeerd om ze in overeenstemming te brengen met andere bestanden van regencijfers van het KNMI. Vervolgens wordt een frequentie-analyse gepresenteerd van de neerslaghoeveelheden in tijdsintervallen van 15 minuten tot 5 uren. Hierbij wordt aandacht besteed aan partiële reeksanalyse, plaatselijke verschillen binnen Nederland en verschillen met de getallen in andere publikaties.

DR. IR. T. A. BUISHAND
Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut,
De Bilt

IR. J. B. M. VAN ACKER
Advies- en ingenieursbureau Grontmij NV,
De Bilt

IR. H. VAN LUIJTELAAR
Advies- en ingenieursbureau Grontmij NV,
De Bilt

2. Achtergrond

Al in de vorige eeuw waren er pluviografen in gebruik. De Bilt heeft een waarnemingsreeks vanaf 1897. In het midden van de jaren vijftig werden pluviografen in Den Helder, Eelde, Vlissingen en Beek (L) geïnstalleerd. Een verdere uitbreiding van het aantal stations met een pluviograaf vond plaats in de jaren zeventig.
De eerste pluviografen werkten mechanisch. Bij de meeste werd de neerslag opgevangen in een verzamelbak, waarin zich een vlotter bevond met daaraan een schrijfpen. De stand van de vlotter, en daarmee de opgevangen hoeveelheid neerslag, werd geregistreerd op een stuk papier dat om een rond-draaiende trommel was gespannen.
Na elke 10 mm neerslag ledigde de verzamelbak zich automatisch door een hevelsysteem. De registratiestrook (pluviogram) moest elke dag worden vernieuwd. Daar dit op sommige stations als een bezwaar werd gevoeld, werden vanaf de jaren zeventig de mechanische pluviografen geleidelijk vervangen door elektrische pluviografen. Ook deze pluviografen werken met een vlotter en een hevelsysteem. De hoeveelheid neerslag wordt echter op een aparte, binnen opgestelde, recorder opgetekend. Bij een aantal automatische stations wordt sinds kort de hoeveelheid neerslag direct digitaal vastgelegd met behulp van een elektrische pluviograaf.
Van de meeste pluviograafregistraties van het KNMI zijn per uurvak de neerslaghoeveelheid en de regenduur in een databank vastgelegd. Voor de meeste rioleringsberekeningen is een tijdsinterval van een uur echter te lang. In het kader van de activiteiten van een door de Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO opgerichte Werkgroep van Regenwaarnemingen werden in de jaren zestig de pluviogrammen van De Bilt voor een twaalftal jaren (1928, 1933, 1951 t/m 1960) gedigitaliseerd in vaste tijdsintervallen van vijf minuten. De KNMI-publikatie 'Detail-analyse van pluviogrammen, deel A' [1] geeft een uitvoerige beschrijving van de digitale vastlegging van deze gegevens en tevens een groot aantal frequentietabellen van de neerslaghoeveelheden in tijds-intervallen van 5 tot 660 minuten. Door een ernstige ziekte van de drijvende kracht achter het project, dr. C. Levert, is een gepland vervolgdeel nooit verschenen. Het gedigitaliseerde bestand vormde het basismateriaal voor de studie '5-minuten regens' van Grontmij [2]. Een waarnemingsreeks van 12 jaar wordt door sommigen echter niet lang genoeg geacht voor het trekken van betrouwbare conclusies. Bovendien is wel eens de vraag gerezen of de gegevens van De Bilt voor heel Nederland gebruikt mogen worden. Dit vormde voor Grontmij aanleiding om begin jaren tachtig een start te maken met het digitaliseren van pluviograafstroken van meerdere stations over ons land voor een tijdvak van 25 jaar. Gekozen werd voor de registraties van Eelde, De Bilt en Beek (L) over de jaren 1955 t/m 1979. In samenwerking met het KNMI is het gedigitaliseerde 15-minuten bestand in overeenstemming gebracht met de aftappingen van de gewone regenmeter op deze stations en zijn statistische bewerkingen uitgevoerd.

3. Digitaliseren

In afb. 1 is als voorbeeld een pluviogram van De Bilt weergegeven. De registratiestrook van een mechanische pluviograaf heeft een lengte van 38,4 cm wat overeenkomt met een tijdsduur van 24 uren (horizontale as). De breedte van een strook bedraagt 7,5 cm wat overeenkomt met 10 mm neerslag (verticale as). De registratie van een elektrische pluviograaf

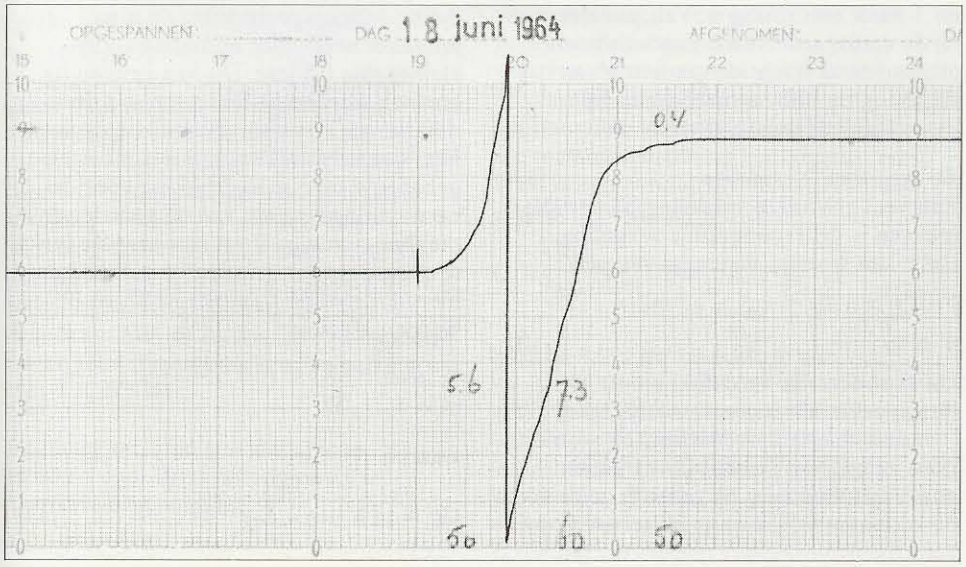
volgt hetzelfde principe, maar het pluviogram heeft aanzienlijk grotere afmetingen. Het digitaliseren van pluviogrammen houdt in dat het continue verloop van de neerslaglijn wordt gediscretiseerd tot een rij getallen. Daartoe wordt de neerslaglijn met een digitaliseerpen afgetast, waarbij de coördinaten van de afgetaste punten worden vastgelegd.

Bij het digitaliseren zijn verschillende werkwijzen mogelijk:
- Opnemen van punten waar het verloop van de neerslaglijn een knik vertoont [3].
- Opnemen van punten van de neerslaglijn met een vaste tussenafstand in verticale richting [4]. Bij deze werkwijze worden de tijdstippen geregistreerd, waarop de neerslag met een vast volume (bijvoorbeeld 0,1 mm) is toegenomen.
- Opnemen van punten van de neerslaglijn met een vaste tussenafstand in horizontale richting, zoals bij de in paragraaf 2 genoemde detailanalyse van pluviogrammen.
- Continu het verloop van de gehele neerslaglijn volgen, waarbij met vaste tussenpozen de positie van de pen wordt geregistreerd [5]. Het aantal punten dat van de neerslaglijn wordt vastgelegd is hierbij ook afhankelijk van de snelheid waarmee de pen over de registratie wordt bewogen.

In het hier beschreven onderzoek is voor de als derde genoemde werkwijze gekozen. Als vast tijdsinterval is 15 minuten aangehouden. Overwegingen, die tot de keuze van deze methode leidden, zijn:
- Objectiviteit. De keuze van de op te nemen punten wordt niet bepaald door degene die digitaliseert (zoals bij het opnemen van knikpunten).
- Reproduceerbaarheid, in verband met controles achteraf.
- Overzichtelijkheid van de handelingen bij het digitaliseren en eenvoud van opslag en verwerking van de gegevens (in tegenstelling tot de drie andere methoden wordt per dag een vast aantal gegevens opgeslagen).

Bij de keuze van 15 minuten als vast tijdsinterval heeft een afweging plaatsgevonden tussen het streven naar een zo kort mogelijk tijdsinterval en de leesbaarheid van de pluviogrammen. Problemen met het aflezen treden vooral op bij de dagstroken van de mechanische pluviografen (ruim 90% van de te digitaliseren pluviogrammen) in perioden met zware neerslag. Daar de neerslaglijn dan vrijwel verticaal loopt, zijn de neerslaghoeveelheden over zeer korte tijdsintervallen moeilijk te bepalen.
Bij het digitaliseren zijn als vaste opnamepunten de klokkwartieren (0.15, 0.30, 0.45, 1.00, ..., 23.45, 0.00 uur) aangehouden. Tot 1971 werd bij de pluviograafregistraties de middelbare plaatselijke tijd (MPT) gehanteerd, daarna de middelbare tijd van Greenwich (GMT). Deze tijden lopen respectievelijk 40 en 60 minuten achter op de Middeneuropese tijd (huidige wintertijd in Nederland). Per pluviogram zijn alleen die delen gedigitaliseerd, waar de neerslaglijn een met het oog waarneembare stijging vertoont (en er dus neerslag wordt geregistreerd). Aan de overige gedeelten is automatisch de waarde nul toegekend. Het digitaliseren werd uitgevoerd met behulp van een Tektronix-digitizer, die was aangesloten op een Harris-100 computer.

Afb. 1 - Registratie van de neerslag in De Bilt op 18 juni 1964 (verkleind). Het stijgende verloop van de lijn tussen 19h10 en 21h50 geeft een bui weer met een totale neerslaghoeveelheid van 13,3 mm. Kort voor 20h heeft de verzamelbak zich automatisch geledigd.



4. Controle en correctie

Neerslag is een moeilijk te meten grootheid. In het algemeen komt de afgetapte hoeveelheid van de gewone regenmeter beter overeen met de werkelijke neerslag dan wat een pluviograaf aangeeft. Volgens een richtlijn van de Wereld Meteorologische Organisatie (WMO) moeten daarom de neerslaghoeveelheden uit pluviograafregistraties zodanig gecorrigeerd worden dat zij in overeenstemming zijn met de aftappingen van de gewone regenmeter [6]. Bij het routinematig vastleggen van de uurwaarden werd deze richtlijn tot 1982 strikt nageleefd door het KNMI. Registraties kunnen onbruikbaar zijn vanwege storingen van de apparatuur. Soms moest de pluviograaf gedurende korte tijd buiten werking worden gesteld. Daar op de betreffende hoofdstations de toestand van het weer van uur tot uur wordt bijgehouden, kon in dergelijke gevallen de afgetapte neerslaghoeveelheid van de gewone regenmeter redelijk over de verschillende uurvakken worden verdeeld.

Vanwege bovengenoemde problemen bij de meting van de neerslag met een pluviograaf en het feit dat bij het digitaliseren af en toe fouten zijn gemaakt, verschillen de dagsommen van de gedigitaliseerde 15-minuten reeksen van die in de KNMI-publikaties. De gemiddelde jaarsom uit de gedigitaliseerde pluviogrammen is voor De Bilt ongeveer 7% lager dan het officiële jaargemiddelde op basis van de gewone regenmeter; voor Eelde en Beek bedragen deze verschillen respectievelijk 8 en 10%. De verschillen zijn hoofdzakelijk een gevolg van het feit dat de gebruikte pluviografen minder neerslag registreren dan de opgevangen hoeveelheid in een gewone regenmeter.

Door de 15-minuten waarden aan te passen aan de uurwaarden van het KNMI werd een ononderbroken reeks verkregen, die in overeenstemming is met de gepubliceerde dagwaarden. In principe zou men voor elk nat uurvak de 15-minuten waarden kunnen vermenigvuldigen met een factor:

$$f_{15} = R/P \qquad (1)$$

waarbij R de gecorrigeerde uurwaarde in het KNMI-bestand is en P de uursom volgens de gedigitaliseerde pluviogrammen. Bij afronding van de zo

gecorrigeerde 15-minuten waarden op honderdsten (of tienden) van een millimeter is er een grote kans dat de uursom van de afgeronde waarden toch weer enigszins verschilt van de uurwaarde in het KNMI-bestand. Dit probleem werd omzeild door de correctiefactor toe te passen op het cumulatieve verloop van de 15-minuten waarden $x_1, \ldots, x_4$:

$$S_0 = 0,\ S_k = S_{k-1} + x_k,\ k = 1, \ldots, 4 \qquad (2)$$

De som S_4 is gelijk aan de uursom P volgens de pluviograaf. Het gecorrigeerde cumulatieve verloop wordt gegeven door:

$$\begin{aligned} &\tilde{S}_0 = 0 \\ &\tilde{S}_k = f_{15} * S_k,\ k = 1, 2, 3 \qquad (3) \\ &\tilde{S}_4 = f_{15} * S_4 \equiv R \end{aligned}$$

Bij afronding van de $\tilde{S}_k$'s op honderdsten van een millimeter zijn de 15-minuten waarden volgens

$$\tilde{x}_k = \tilde{S}_k - \tilde{S}_{k-1},\ k = 1, \ldots, 4 \qquad (4)$$

ook in honderdsten van een millimeter uitgedrukt. De som van de $\tilde{x}_k$'s is dan altijd precies gelijk aan de uursom R in het KNMI-bestand. De factor f_{15} wordt oneindig als $P = 0$ en $R > 0$. In dat geval zijn de 15-minuten waarden aan de uurwaarden aangepast door eerst $x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 0{,}005$ mm te stellen en dan een correctie uit te voeren volgens de vergelijkingen (1) t/m (4). Dezelfde procedure werd gevolgd bij het aanvullen van hiaten in de gedigitaliseerde reeksen. Bij Eelde en Beek waren geen uurwaarden beschikbaar voor de jaren 1955 en 1956. De 15-minuten waarden zijn voor deze gevallen volgens dezelfde procedure aan de dagsommen aangepast.
De pluviogrammen van dagen met grote correcties werden nauwkeurig onderzocht en zonodig opnieuw gedigitaliseerd. Hierbij kwamen alle uurvakken aan de orde waarvoor het verschil tussen R en P meer dan 2 mm bedroeg. Grote correcties waren soms nodig bij neerslag in de vorm van sneeuw en op dagen met driftsneeuw (in incidentele gevallen was er bij Eelde en Beek een verschil van meer dan 10 mm tussen de dagwaarden van de gewone regenmeter en de pluviograaf).

5. Partiële reeksen en regenduurlijnen

In de praktijk wordt veel gebruik gemaakt van statistische informatie over het voorkomen van zware neerslag. Er zijn verschillende methoden om zware neerslaggebeurtenissen uit een neerslagreeks te selecteren [7]. Bij het hier beschouwde 15-minuten bestand zijn partiële reeksen geconstrueerd. Het gebruik van partiële reeksen is min of meer noodzakelijk als er interesse is voor gebeurtenissen die gemiddeld vijf- tot tienmaal per jaar voorkomen. De gevolgde partiële reeksanalyse wordt in deze paragraaf enigszins diepgaand behandeld. Het resultaat is een verzameling regenduurlijnen voor overschrijdingsfrequenties van tienmaal per jaar tot eens in de 100 jaar.

Steekproefkwantielen in een partiële reeks
Een partiële reeks ontstaat door uit de oorspronkelijke reeks de lokale maxima van de neerslaghoeveelheid over een bepaalde tijdsduur D te selecteren (bijvoorbeeld voor D = 60 min).
Deze maxima worden gewoonlijk aangeduid als pieken. Voor korte tijdsduren zal een piek vaak betrekking hebben op een deel van een bui of regen, terwijl bij langere tijdsduren droge perioden binnen een piek kunnen voorkomen. In het hier beschreven onderzoek werd als eis opgelegd dat er tussen twee opeenvolgende pieken een droge periode is van minstens vijf uren. Door deze eis zijn de piekhoogten $Q_1, Q_2, \ldots$ nagenoeg onafhankelijk en wordt vermeden dat de pieken in groepjes bij elkaar liggen. Voor elk station werden zeven verschillende partiële reeksen geconstrueerd, en wel voor D = 15, 30, 60, 120, 180, 240 en 300 min. Uit elke partiële reeks werden de hoogste pieken geselecteerd.
Deze pieken werden geordend tot:

$$q_{[1]} \geq q_{[2]} \geq \cdots \geq q_{[K]} \qquad (5)$$

met K = 250. Als de reeks N jaar lang is, dan wordt de waarde $q_{[N]}$ gemiddeld eenmaal per jaar overschreden. Meer algemeen, de waarde q(T) die gemiddeld eens in de T jaar wordt overschreden, kan worden geschat als het steekproefkwantiel $q_{[N/T]}$. Een belangrijk bezwaar van deze steekproefkwantielen is dat bij hoge herhalingstijden het verband tussen $q_{[N/T]}$ en T vaak zeer grillig is. Vandaar dat men bij de constructie van regenduurlijnen meestal eerst tracht de verdeling van piekhoogten door een theoretische kansverdeling te benaderen.

De exponentiële verdeling
Een veel gebruikte verdeling bij partiële reeksen is de exponentiële verdeling. Deze kan worden weergegeven als:

$$\Pr(Q_i > q \mid Q_i \geq q_0) = e^{-(q-q_0)/\sigma},\quad q \geq q_0 \qquad (6)$$

De exponentiële verdeling wordt hier dus opgevat als een voorwaardelijke (conditionele) kansverdeling. Er worden geen aannamen gemaakt over pieken onder het niveau q_0. Algemeen geldt voor de voorwaardelijke kans in het linker lid van (6):

$$\Pr(Q_i > q \mid Q_i \geq q_0) = \lambda(q)/\lambda(q_0) \qquad (7)$$

met $\lambda(q)$ het verwachte aantal pieken $\geq q$ in een jaar. Voor de piekhoogte q is de herhalingstijd gelijk aan $T = 1/\lambda(q)$.
De neerslaghoeveelheid met een overschrijdingsfrequentie van eens in de T jaar, kan men verkrijgen door de inverse van (6) te bepalen:

$$\begin{aligned} q(T) &= q_0 - \sigma \ln(\Pr(Q_i > q \mid Q_i \geq q_0)) \\ &= q_0 + \sigma \ln(\lambda(q_0)) + \sigma \ln T \qquad (8) \end{aligned}$$

Vergelijking (8) kan worden herschreven als:

$$q(T) = \mu + \sigma \ln T \qquad (9)$$

waarbij $\mu = q(1) = q_0 + \sigma \ln(\lambda(q_0))$.
De waarde van q(T) verandert dus lineair met de logaritme van de herhalingstijd T. De onbekende parameters μ en σ in (9) kunnen geschat worden op basis van de hoogste K pieken. De methode van de grootste aannemelijkheid ('maximum likelihood') levert als schatters voor μ en σ [8]:

$$\hat{\mu} = q_{[K]} + \hat{\sigma} \ln k;\ \hat{\sigma} = \bar{q} - q_{[K]} \qquad (10)$$

waarbij $\bar{q}$ het gemiddelde is van $q_{[1]}, \ldots, q_{[K]}$ en k = K/N (het gemiddelde aantal pieken per jaar). Substitutie van (10) in (9) geeft:

$$\hat{q}(T) = q_{[K]} + (\bar{q} - q_{[K]}) \ln(kT) \qquad (11)$$

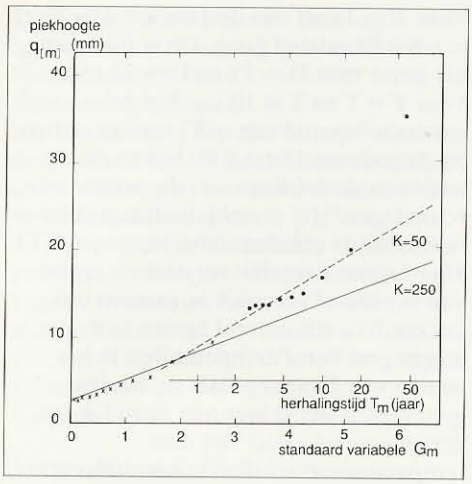
Voor T = l/k levert (11) het steekproefkwantiel $q_{[K]}$ op. Bij de afleiding van (10) is aangenomen dat het jaarlijkse aantal pieken $\geq q_0$ een Poisson verdeling volgt en dat de niet-geordende piekhoogten $Q_1, Q_2, \ldots$ onafhankelijk zijn. De grootheid $\hat{q}(T)$ blijft echter een goede schatter van q(T) als niet helemaal aan deze veronderstellingen is voldaan.

Transformatie van piekhoogten
Het gebruik van de exponentiële verdeling stuit op problemen als men interesse heeft voor herhalingstijden kleiner dan 0,5 jaar. Dit kan eenvoudig grafisch worden gedemonstreerd door middel van een waarschijnlijkheidsplot. Een waarschijnlijkheidsplot is meestal gebaseerd op een uitdrukking voor de verwachtingswaarde van de geordende piekhoogten $q_{[m]}$. Voor een partiële reeks met exponentieel verdeelde pieken kan hiervoor met de formules in [8] en [9] worden afgeleid:

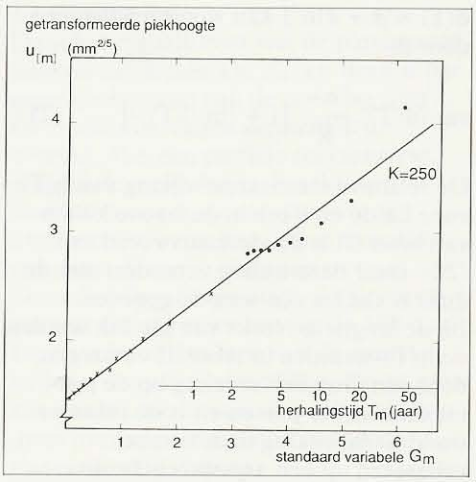
$$E(q_{[m]}) = \mu - \sigma \ln k + \sigma G_m,\quad m = 1, \ldots, K \qquad (12)$$

waarbij

$$G_m = \ln K + \gamma - \sum_{i=1}^{m-1} i^{-1} \qquad (13)$$



Afb. 2 - Waarschijnlijkheidsplot van de piekhoogten in de partiële reeks van 15-minuten waarden van Beek (L). Een punt geeft één enkele piekhoogte weer; een kruisje heeft betrekking op het gemiddelde van twintig opeenvolgende piekhoogten. De rechte lijnen geven de aangepaste exponentiële verdeling weer op basis van de hoogste K pieken. De standaard variabele G_m wordt gegeven door vergelijking (13) met K = 250.



Afb. 3 - Als afb. 2, maar nu voor de getransformeerde piekhoogten in de partiële reeks van 15-minuten waarden van Beek (L).

met γ de constante van Euler ($\approx 0{,}5772$). De verwachtingswaarde verandert dus lineair met de standaard variabele G_m. Deze variabele kan gerelateerd worden aan de overschrijdingsfrequentie (herhalingstijd). Uit (9) en (12) volgt dat de piekhoogte E ($q_{[m]}$) gemiddeld eens in de T_m jaar wordt overschreden, waarbij T_m gegeven wordt door:

$$T_m = \frac{1}{k} e^{G_m}, \; m = 1, \ldots, K \qquad (14)$$

Zet men de geordende piekhoogten $q_{[m]}$ tegen G_m uit, dan zullen de punten min of meer langs de rechte lijn volgens vergelijking (12) liggen als aan de veronderstelling van de exponentiële verdeling is voldaan. Als voorbeeld zijn in afb. 2 de geordende 15-minuten waarden van Beek grafisch weergegeven. Er is hier geen sprake van een rechtlijnig verband tussen $q_{[m]}$ en G_m. Opvallend is dat de 15-minuten waarde $q_{[1]}$ in deze reeks aanzienlijk verschilt van de volgende waarde $q_{[2]}$. De exponentiële verdeling volgens vergelijking (11) met K = 250 leidt voor T > 2 jaar tot een ernstige onderschatting van q(T). Voor deze hogere herhalingstijden kan een beter resultaat worden verkregen door de exponentiële verdeling aan te passen op de hoogste 50 pieken. Met de keuze K = 50 kunnen echter geen uitspraken worden gedaan voor T < 0,5 jaar.

Een beter rechtlijnig verband is te bereiken door de piekhoogten Q_i te transformeren volgens:

$$U_i = Q_i^{\theta}, \; \theta > 0 \qquad (15)$$

De parameter θ wordt zodanig gekozen dat de U_i's bij benadering exponentieel verdeeld zijn. Daar vergelijking (15) een monotoon stijgende functie voorstelt, geldt voor de geordende getransformeerde piekhoogten:

$$u_{[m]} = q_{[m]}^{\theta}, \; m = 1, \ldots, K \qquad (16)$$

Bij een geschikte keuze van θ is het verband tussen $u_{[m]}$ en G_m vrijwel lineair. Als voorbeeld zijn in afb. 3 de getransformeerde geordende 15-minuten waarden van Beek grafisch weergegeven voor $\theta = 0{,}4$.
Naast bovenstaande visuele beoordeling zijn er ook statistische toetsen om te onderzoeken of een variabele exponentieel verdeeld is. Een bekende toets is die van Shapiro en Wilk, zie [10]. Om deze toets toe te passen, worden de $u_{[m]}$'s eerst gereduceerd volgens:

$$v_{[m]} = u_{[m]} - u_{[K]}, \; m = 1, \ldots, K\text{-}1 \qquad (17)$$

Als de U_i's exponentieel verdeeld zijn, dan vormen de $v_{[m]}$'s een geordende steekproef uit een exponentiële verdeling waarvan de ondergrens gelijk is aan nul. De variatiecoëfficiënt van deze exponentiële verdeling is gelijk aan 1. De toetsingsgrootheid van Shapiro en Wilk is een eenduidige functie van de steekproefvariatiecoëfficiënt:

$$C_v = \left\{ \sum_{m=1}^{K-1} (v_{[m]} - \bar{v})^2 / (K\text{-}1) \right\}^{1/2} / \bar{v} \qquad (18)$$

waarbij $\bar{v}$ het gemiddelde is van $v_{[1]}, \ldots, v_{[K-1]}$. Uit tabel I blijkt dat C_v voor de drie gedigitaliseerde reeksen in de buurt van 1 ligt als $\theta = 0{,}4$ en wel voor alle duren tussen de 15 en 300 min. Voor deze waarde van θ wordt in geen enkel geval de veronderstelling van een exponentiële verdeling verworpen (onbetrouwbaarheid $\alpha = 0{,}10$). Deze conclusie is gebaseerd op kritieke waarden in [11].

TABEL I - *Waarde van de variatiecoëfficiënt C_v na transformatie van de piekhoogten volgens vergelijking (15) met $\theta = 0{,}4$. Het aantal pieken K is steeds gelijk aan 250.*

Duur D (min)	Eelde	De Bilt	Beek
15	0,80	0,98	0,99
30	0,90	1,07	0,95
60	0,97	1,04	1,02
120	0,97	1,01	1,00
180	1,01	1,02	1,02
240	0,98	1,04	1,05
300	0,96	1,05	1,04

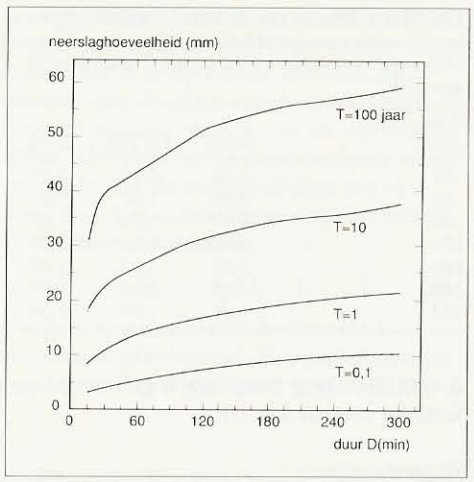
Regenduurlijnen
De neerslaghoeveelheid q(T) die gemiddeld eens in de T jaar wordt overschreden volgt uit:

$$q(T) = (u(T))^{1/\theta} = (\mu + \sigma \ln T)^{1/\theta} \qquad (19)$$

Hierin is u(T) de overeenkomstige grenswaarde voor de getransformeerde neerslaghoeveelheden. Voor de keuze $\theta = 0{,}4$ geeft tabel II een overzicht van geschatte waarden van de parameters μ en σ. Naast de waarde voor de individuele stations vermeldt de tabel tevens de middelste waarde (mediaan) van de drie stations. Uit de tabel blijkt dat de parameter μ toeneemt met de duur D. Dit was te verwachten omdat deze parameter gerelateerd is aan de neerslaghoeveelheid die gemiddeld eenmaal per jaar wordt overschreden. De parameter σ verandert daarentegen nauwelijks met D.
Een regenduurlijn geeft voor een vaste herhalingstijd het verband tussen q(T) en de duur D weer. In afb. 4 zijn enige voorbeelden van regenduurlijnen gegeven. Bij deze regenduurlijnen is uitgegaan van de mediaan van de parameterschattingen. Voor D = 15 min. werden de waarden van q(T) met een factor 1,15 vermenigvuldigd. De reden hiervoor is dat de parameters in tabel II betrekking hebben op neerslaghoeveelheden in vaste, opeenvolgende kwartiervakjes. De pieken in de partiële reeks voor D = 15 min. kunnen daardoor lager zijn dan de neerslaghoeveelheden in het meest intensieve 15-minuten vakje binnen een regen of bui. De correctiefactor 1,15 is ontleend aan onderzoek op basis van jaarmaxima [12]. Om dezelfde reden werd voor D = 30 min. een correctiefactor 1,06 toegepast. Voor langere duren werd correctie niet nodig geacht.

6. Betrouwbaarheid en plaatselijke verschillen

In tabel II zijn de parameterschattingen voor Beek meestal hoger dan de mediaan van de drie stations. Voor T ≥ 1 jaar



Afb. 4 - Regenduurlijnen voor verschillende herhalingstijden T op basis van de medianen van de parameterschattingen (tabel II) van Eelde, De Bilt en Beek (L).

zullen de regenduurlijnen voor dit station daarom boven die in afb. 4 liggen. Voor Eelde zijn de geschatte waarden van μ en σ relatief laag. In tabel III is voor een aantal duren de waarde van q(T) op basis van de mediaan van de parameterschattingen vergeleken met de waarden voor Eelde en Beek. De tabel geeft tevens de overeenkomstige getallen voor een 72-jarige reeks van De Bilt (1906-1977) ontleend aan de KNMI-publikatie 'Neerslag en verdamping' [12] en de mediaan van de steekproefkwantielen van de vijf hoofdstations Den Helder/De Kooy, Eelde, De Bilt, Vlissingen en Beek voor het 20-jarige tijdvak 1961-1980 [13].

Waar nodig werd van de correctiefactoren aan het einde van paragraaf 5 gebruik gemaakt om de waarde van q(T) voor vaste D-minuten vakjes te herleiden naar een waarde voor een D-minuten vakje met een willekeurig begintijdstip.

Daar neerslag een zeer variabel element is, zowel in de tijd als in de ruimte, kunnen bij verschillende meetreeksen louter door toeval grote verschillen gevonden worden tussen de geschatte waarden van q(T). Enig inzicht in de grootte van het effect van toevallige fluctuaties kan worden verkregen door de standaardafwijking van $\hat{q}(T)$ te bepalen. Voor de variantie van de schatter $\hat{q}(T)$ op basis van vergelijking (19) kan met behulp van een Taylor-ontwikkeling [14] worden aangetoond:

$$\frac{\text{var}\,(\hat{q}(T))}{(q(T))^2} \approx \frac{1}{\theta^2}\,\frac{\text{var}\,(\hat{u}(T))}{(u(T))^2} \qquad (20)$$

Hierbij is eenvoudigheidshalve aangenomen dat de waarde van θ van te voren vaststaat. De variantie van $\hat{u}(T) = \hat{\mu} + \hat{\sigma}\ln T$ kan worden benaderd door [8]:

$$\text{var}\,(\hat{u}(T)) \approx \frac{\sigma^2}{K}\left[1 + (\ln(kT))^2\right] \qquad (21)$$

De relatieve standaardafwijking van $\hat{q}(T)$ voor Eelde en Beek in de laatste kolom van tabel III is de vierkantswortel van (20). Daar deze weinig verandert met de duur is slechts één waarde gegeven.
Bij de langjarige reeks van De Bilt werden de $\hat{q}(T)$-waarden in tabel III verkregen door een Gumbelverdeling op de jaarmaxima aan te passen en is de relatieve standaardafwijking in deze tabel gebaseerd op een asymptotische uitdrukking [15] voor deze verdeling. Uit de tabel blijkt dat voor T = 1 jaar een partiële reeks van 25 jaar met gemiddeld 10 pieken per jaar vrijwel gelijkwaardig is aan de jaarmaxima van een 72-jarige reeks. Voor hogere herhalingstijden wordt met de jaarmaxima van de langjarige reeks een nauwkeurigere schatting van q(T) verkregen.

Voor $T \geq 1$ jaar zijn de getallen voor Beek in tabel III relatief hoog. Dit is met name het geval voor D = 15 en D = 30 min. Voor T = 1 en T = 10 jaar ligt de geschatte waarde van q(T) van dit station bij deze duren 15 tot 20% boven die op basis van de mediaan van de parameterschattingen. Het verschil bedraagt ruim tweemaal de standaardafwijking van $\hat{q}(T)$. Hoewel een dergelijk verschil op grond van het toeval mogelijk is, kunnen ook andere factoren een rol spelen zoals de wat hogere zomertemperaturen in het zuiden van Limburg. Met de huidige gegevens is het echter niet mogelijk om een eventueel effect van deze temperatuurverschillen te kwantificeren. Het feit dat voor een 50-jarige reeks van Ukkel (Brussel) [16] bij duren $\leq$ 120 min. de geschatte q(T)-waarden voor T = 1 en T = 10 jaar ongeveer dezelfde zijn als die voor het veel noordelijker gelegen Eelde onderstreept dit. De extreem hoge maximale 15-minuten waarde in Beek (afb. 2) heeft slechts een geringe invloed op de geschatte kwantielen.

TABEL II – *Geschatte waarden van de parameters μ en σ voor de getransformeerde piekhoogten (θ = 0,4).*

Parameter	Duur D (min)	Geschatte waarde ($mm^{2/5}$) Eelde	De Bilt	Beek	Mediaan ($mm^{2/5}$)
μ	15	2,22	2,23	2,35	2,23
	30	2,55	2,53	2,68	2,55
	60	2,75	2,82	2,90	2,82
	120	2,98	3,09	3,15	3,09
	180	3,10	3,23	3,26	3,23
	240	3,23	3,33	3,33	3,33
	300	3,32	3,41	3,41	3,41
σ	15	0,33	0,33	0,38	0,33
	30	0,37	0,35	0,41	0,37
	60	0,36	0,37	0,41	0,37
	120	0,35	0,38	0,42	0,38
	180	0,34	0,38	0,40	0,38
	240	0,36	0,37	0,38	0,37
	300	0,37	0,37	0,39	0,37

TABEL III – *Neerslaghoeveelheden (mm) die in een bepaalde tijdsduur D gemiddeld eens in de T jaar worden overschreden bij verschillende uitgangsgegevens.*

	Neerslagreeks(en)	D (min) 15	30	60	120	240	Relatieve standaardafwijking (%)
T = 0, 1	Eelde	3,0	4,0	5,1	7,0	8,9	3
	Beek	3,0	4,2	5,4	7,0	9,4	3,5
	Mediaan	3,0	4,0	5,4	7,3	9,7	--
	Hoofdstations 1961-80 [13]	--	--	5,4	6,9	8,9	--
T = 1	Eelde	8,4	11,0	12,5	15,3	18,8	5
	Beek	9,7	12,5	14,3	17,6	20,2	5,5
	Mediaan	8,5	11,0	13,3	16,8	20,2	--
	Hoofdstations 1961-80 [13]	--	--	13,8	16,4	20,2	--
	De Bilt 1906-77 [12]	9,2	11,6	14,2	17,5	21,0	4,5
T = 10	Eelde	17,6	22,6	24,2	27,9	33,2	7,5
	Beek	21,5	26,5	29,0	34,4	35,1	7,5
	Mediaan	17,8	22,6	25,8	31,3	35,8	--
	De Bilt 1906-77 [12]	18,1	22,7	26,7	31,2	36,5	5,5
T = 100	Eelde	31,1	39,6	40,8	45,2	52,8	9
	Beek	39,1	47,2	50,2	58,3	58,2	9,5
	Mediaan	31,3	39,6	43,5	51,5	56,9	--
	De Bilt 1906-77 [12]	26,9	33,8	39,3	44,8	52,0	6,5

Deze zijn 1 à 2% lager als de waarde van $q_{[1]}$ buiten beschouwing gelaten wordt. Hoewel de geschatte kwantielen voor Eelde relatief laag zijn, is voor $T \geq 1$ jaar het verschil met de waarden op basis van de mediaan van de parameterschattingen altijd kleiner dan tweemaal de geschatte standaardafwijking van $\hat{q}(T)$. Voor $T =$ 10 jaar komen de kwantielen voor Eelde ruwweg overeen met die uit het Hydrologisch Onderzoek Lelystad van de voormalige Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders [17]. Voor $0,5 < T < 5$ jaar liggen de getallen voor Eelde in het algemeen 5 à 10% boven die voor Lelystad.

De getallen voor Eelde en Beek voor $T = 100$ jaar berusten op een sterke extrapolatie van de aangepaste kansverdeling. De bijbehorende standaardafwijking is groot en bovendien moet nog rekening worden gehouden met een extra onzekerheid omdat de geldigheid van de veronderstelde verdeling voor $T = 100$ jaar in het geding is. De getallen voor de afzonderlijke stations zijn dan ook van weinig waarde. Voor Beek wordt zelfs bij $D = 120$ min. voor $\hat{q}(100)$ een hogere waarde gevonden dan bij $D = 240$ min.

De geschatte waarden van q(100) in de laatste twee rijen van tabel III hebben elk betrekking op ruim 70 stationsjaren gegevens. Toepassing van vergelijking (19) met de mediaan van $\hat{\mu}$ en $\hat{\sigma}$ uit tabel II levert een waarde van $\hat{q}(100)$ op die gemiddeld ruim 10% boven die voor de langjarige reeks van De Bilt ligt.
De waarden die gemiddeld eens in de 100 jaar worden overschreden, zijn dus vrij onzeker. Deze onzekerheid kan alleen worden verkleind door aanzienlijk meer neerslagreeksen te analyseren. Uit een onderzoek met 15 langjarige reeksen dagsommen [18] bleek dat q(100) ongeveer 10% onderschat wordt als men een Gumbelverdeling op de jaarmaxima aanpast.

De wijze waarop de partiële reeks uit de oorspronkelijke reeks is afgeleid, beïnvloedt de waarde van de kwantielen. Dit kan van belang zijn bij lage herhalingstijden. Uit tabel III blijkt dat voor $T = 0,1$ jaar de geschatte neerslaghoeveelheden redelijk overeenkomen met die uit een onderzoek [13] op basis van de uurwaarden van de vijf hoofdstations voor het tijdvak 1961-1980, hoewel bij dit eerdere onderzoek een ander criterium werd gebruikt om een piek te selecteren. Door het 15-minuten bestand is het nu ook mogelijk voor $D = 15$ en $D = 30$ min. een betrouwbare waarde voor q(0,1) op te geven.

7. Conclusies

Door het digitaliseren van de pluviograafstroken van Eelde, De Bilt en Beek is het gegevensbestand van de neerslag over korte tijdsintervallen aanzienlijk uitgebreid. Met een partiële reeksanalyse, waarbij de piekhoogten beschreven worden door een getransformeerde exponentiële verdeling, is het mogelijk regenduurlijnen te construeren voor overschrijdingsfrequenties van tienmaal per jaar tot ongeveer eens in de 100 jaar. De enorme variabiliteit van de neerslag leidt tot toevallige verschillen, die zo groot zijn dat het niet mogelijk is uitspraken te doen over systematische verschillen tussen de drie stations.

Verantwoording

De controle en correctie van het gedigitaliseerde bestand werd ondersteund door drs. A. van Engelen en ir. S. R. Holthuijsen. Drs. A. van Engelen las enkele concepten van dit artikel kritisch door.

Literatuur

1. KNMI (1968). *Detailanalyse van pluviogrammen. A. Frequentieverdelingen van de hoeveelheden neerslag in tijdvakken van 5 tot 660 minuten, De Bilt, 1928, 1933, 1951-1960.* Publ. 147, KNMI, De Bilt.
2. Herik, A. G. van den en Kooistra, M. T. (1973). *5-minuten regens.* Grontmij NV, De Bilt.
3. Sansom, J. (1987). *Digitising pluviographs.* J. Hydrol. New Zealand (26), No. 2, 197-209.
4. Folland, C. K. and Colgate, M. G. (1978). *Recent and planned rainfall studies in the Meteorological Office with an application to urban drainage design.* In: P. R. Helliwell, ed. *Urban Storm Drainage, Proceedings of an International Conference on Urban Storm Drainage.* Southampton, pp. 51-70. Pentech Press, London.
5. Verworn, H.-R. und Sieker, F. (1979). *Digitale Regenschreiber-Auswertungen.* Korrespondenz Abwasser (26), nr. 10, 587-593.
6. WMO (1981). *Guide to hydrological practices. Vol. 1 - Data acquisition and processing, 4th edition.* WMO Publ. 168, Geneva, Switzerland.
7. Buishand, T. A. (1984). *Neerslaggegevens bij rioleringsberekeningen.* H_2O (17) nr. 7, 142-147. Rectificatie (17) nr. 9, 195.
8. Buishand, T. A. (1989). *The partial duration series method with a fixed number of peaks.* J. Hydrol. (109), 1-9.
9. Weissman, I. (1978). *Estimation of parameters and large quantiles based on the k largest observations.* J. Am. Stat. Assoc. (73), No. 364, 812-815.
10. Stephens, M. A. (1978). *On the W test for exponentiality with origin known.* Technometrics (20), No. 1, 33-35.
11. Gomes, M. I. and Montfort, M. A. J. van (1987). *Exponentiality versus generalized Pareto, quick tests.* In: F. Nobilis, ed. *Proceedings Third International Conference on Statistical Climatology.* Vienna, June 23-27, 1986, pp. 185-195. Austrian Society of Meteorology, Vienna.
12. Buishand, T. A. en Velds, C. A. (1980). *Klimaat van Nederland 1. Neerslag en verdamping.* Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.
13. Buishand, T. A. (1983). *De kansverdeling van D-uurlijkse neerslagsommen (D = 1, 2, 4, 6, 12, 24 of 48) in Nederland.* Wetensch. Rapp. WR 83-5, KNMI, De Bilt.
14. Stuart, A. and Ord, J. K. (1987). *Kendall's advanced theory of statistics. Vol. 1 - Distribution theory, 5th edition.* Charles Griffin, London.
15. Phien, H. N. (1987). *A review of methods of parameter estimation for the extreme value type-1 distribution.* J. Hydrol. (90), 251-268.
16. Demarée, G. (1985). *Intensity-duration-frequency relationship of point precipitation at Uccle. Reference period 1934-1983.* Publ. Reeks A, nr. 116, Kon. Meteor. Inst. van België, Brussel.
17. Ven, F. H. M. van de (1989). *Van neerslag tot rioolinloop in vlak gebied.* Van Zee tot Land 57, Rijkswaterstaat, directie Flevoland, Lelystad. Tevens proefschrift TU Delft.
18. Buishand, T. A. (1983). *Uitzonderlijk hoge neerslaghoeveelheden en de theorie van de extreme waarden.* Cultuurtechnisch Tijdschrift (23), nr. 1, 9-20. Rectificatie (23), nr. 2, 81.

● ● ●

BASF Antwerpen wil fosfaatlozingen in Schelde stoppen

Het Antwerpse chemiebedrijf BASF, dat tot ergernis van Nederland jaarlijks miljoenen liters fosfaat in de Schelde loost, wil daar binnenkort mee stoppen. BASF heeft een overeenkomst in die zin gesloten met de Vlaamse deelregering, zo staat in de Gazet van Antwerpen van 25 april jl.
Het 'convenant' kwam tot stand onder druk van de voorgenomen milieuheffingen waaraan BASF hoogstwaarschijnlijk miljoenen kwijt zou zijn. Die financiële druk deed het bedrijf besluiten een einde te maken aan de fosfaatlozingen. Dat vergt ook kostbare investeringen, maar de vervuiling stopt er wel door.
Volgens de kabinetschef van de Vlaamse milieuminister, Theo Kelchtermans, zal BASF 'op zeer korte termijn' met de lozingen stoppen. 'Een concrete datum staat nog niet vast'. Nederland dringt al tijden aan op milieumaatregelen voor een schone Schelde, onder meer in het overleg over de zogeheten Waterverdragen. Nederland schortte deze besprekingen begin dit jaar op omdat de Belgen niet voldoende milieumaatregelen wilden nemen. Intussen heeft Nederland, zoals aangekondigd, wel al eigen verdragsteksten opgesteld en toegezonden aan de Belgische delegatieleider M. Poppe.
Die zou daarover dezer dagen overleggen met zijn Nederlandse tegenspeler, oud-premier Barend Biesheuvel (ANP).