

Kwantitatieve aspecten van de afvoer van regenwater in stedelijke gebieden

1. Inleiding

Op 4 mei aanstaande houdt de Commissie voor Hydrologisch Onderzoek - TNO een technische bijeenkomst met als thema 'Verstedelijking en waterhuishouding'. Naar aanleiding van deze bijeenkomst wordt hier een overzicht gegeven van de praktische betekenis van de resultaten die tot dusver zijn verkregen uit het hydrologisch onderzoek in een aantal meetgebieden te Lelystad.

Op grond van een groot aantal verzamelde en bewerkte gegevens is inzicht verkregen



DRS. J. A. VAN DEN BERG
Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders
Wetenschappelijke Afdeling
Lelystad



ING. G. A. VEN
Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders
Wetenschappelijke Afdeling
Lelystad

in de reductie van bruto naar netto neerslag en in de vervorming van netto neerslag naar rioolloop vanaf een verhard oppervlak. Het effect van het in aanmerking nemen van de neerslagverliezen en van de transformatie naar inloophydrogram, wordt getoond aan de hand van overstortingsfrequenties van een denkbeeldig gemengd rioolstelsel in Lelystad. Tevens wordt de waterbalans gegeven van zowel een geheel als gedeeltelijk verhard gebied, namelijk van een parkeerterrein en een woonwijk.

Een woord van dank willen wij richten tot de Grontmij in De Bilt voor de verleende medewerking door het beschikbaar stellen van de 5-minuten regenvalgegevens en het bij de 5-minuten regens gebruikte computerprogramma ter berekening van het aantal overstortingen.

2. Meetgebieden en apparatuur

Er is in Lelystad een drietal meetgebieden van verschillend karakter ingericht waar neerslag, grondwaterstand en afvoeren van het regenwaterriool (gescheiden stelsel) en het drainage stelsel automatisch worden gemeten. Gedetailleerde gegevens van twee van de drie meetgebieden — een woonwijk en een parkeerterrein — zijn vermeld in tabel I. De verschillende hydrologische variabelen worden continu gemeten en na elke significante verandering vindt automatisch een registratie plaats. Hiervoor wordt sinds kort gebruik gemaakt van een

TABEL I - Gegevens van de meetgebieden.

meetgebied	grootte (ha)	verhard oppervlak	aard verharde oppervlak			drainafstand (m)
			daken	asfalt	klinkers en tegels	
woonwijk	2,0	44 %	30 %	32 %	38 %	12
parkeerterrein	0,7	99,6 %	—	45 %	55 %	12

programmeerbare rekenautomaat HP 9825 (Ven, 1977). Verdere informatie over de meetgebieden en de apparatuur is o.a. te vinden bij (Van den Berg, 1977).

3. Het inloophydrogram van een rioolstelsel

Aanvankelijk werd bij ontwerpberoeeningen het inloophydrogram gelijkgesteld aan het pluviogram. De Commissie Riolering (1972) vermeldt dan ook dat het in Nederland gebruikelijk is de afvloeiingscoëfficiënt van het verharde oppervlak op 1 te stellen en die van het onverharde oppervlak op 0. Dit geldt ook voor het gebruik van de zgn. stippengrafiek van Kuipers.

In het begin van de zeventiger jaren zijn verfijningen voorgesteld. Van den Herik en Kooistra (1970) voerden een berging (C) op het verharde oppervlak in, die niet tot afvoer komt (C = 0; 1 of 3 mm waterschijf ten opzichte van het verharde oppervlak). Van Kregten (1972) bracht dit verlies indirect in rekening door extra berging op te tellen bij de berging B, dit is de hoeveelheid neerslag die maximaal in het rioolstelsel kan worden geborgen. Koot (1972) gaf een voorbeeld waarin zowel berging op straat (C = 0; 1,5 of 2,5 mm) als verdamping V (0; 0,1 of 0,2 mm/h) werd verdisconteerd. De afstroomtijd, dit is de tijdsduur die verloopt tussen het tijdstip dat een regendruppel op het verharde oppervlak valt en het tijdstip waarop deze druppel het rioolstelsel bereikt, werd tot nu toe niet in rekening gebracht.

Een probleem bij voornoemde berekeningen is dat de keuze van de grootte van de afvoer reducerende factoren (C en V) niet op waarnemingen was gebaseerd en daardoor een arbitrair karakter droeg. Voor wat betreft het verharde oppervlak heeft het onderzoek in Lelystad vooral inzicht verschaft in de transformatie van pluviogram naar inloophydrogram van het rioolstelsel. Deze transformatie kan worden gesplitst in drie stappen:

- de reductie van de bruto naar de netto neerslaghoeveelheid;
- de verdeling van het totale verlies over het verloop van de regenbui;
- de vervorming van de netto neerslag naar de inloophydrogramintensiteit.

De reductie van bruto neerslag (P) naar netto neerslaghoeveelheid (Q) vindt plaats

volgens de regressie vergelijking (met T_p = de duur van de regenbui)

$$Q = a_1 + a_2 \cdot P + a_3 \cdot \ln(T_p) \quad (1)$$

De regressie coëfficiënten zijn berekend uit 128 regenbuien met een afvoer groter dan 2 mm (correlatie coëfficiënt $\geq 0,95$).

Bij de berekeningen wordt het verlies (P-Q) over het verloop van de regenbui verdeeld als functie van de fractie r_j van de hoeveelheid gevallen neerslag

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^j p_i}{P} \quad (2)$$

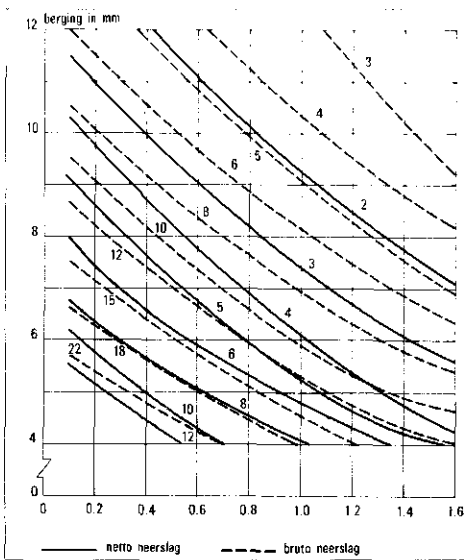
waarin p_i de hoeveelheid neerslag is in het i e-tijdsinterval Δt van de regenbui. Naar analogie met de infiltratieformule volgens Horton wordt de fractie z_j van het neerslagverlies per tijdsinterval beschreven door $z_j = z_0 + (z_0 - z_e) \cdot e^{-\alpha \cdot r_j}$ (3) waarin z_0 de fractie van het neerslagverlies aan het begin van de regenbui voorstelt en z_e een eindwaarde die gedurende de regenbui niet behoeft te worden bereikt.

De vervorming van netto neerslag naar rioolloop onder invloed van tijdelijke berging en afstroomtijd wordt in rekening gebracht door een eenheidsafvoergolf bestaande uit 5 tijdstappen van 5 minuten. Deze eenheidsafvoergolf is uit metingen te Lelystad bepaald met het Nash-cascade model. Elders wordt uitvoeriger ingegaan op elk van deze onderdelen van de neerslagtransformatie (Van den Berg, De Jong en Schultz, 1977).

4. De invloed van het verschil tussen pluviogram en inloophydrogram op de overstortingsfrequentie

De stippengrafiek van Kuipers.

In de stippengrafiek van Kuipers zijn alle regenbuien groter dan 4 mm, die in de periode van 1938 - 1948 in De Bilt zijn gevallen, naar hoeveelheid en tijdsduur weergegeven. Bij het gebruik wordt een constante regenintensiteit verondersteld en iedere bui kan slechts tot één overstorting aanleiding geven. De methode kent geen geheugen, zodat de invloed van een voorafgaande bui niet kan worden meegenomen: bij het begin van elke bui is de berging B volledig beschikbaar. Alle gegevens die aan de stippengrafiek ten grondslag liggen zijn met vergelijking (1) omgerekend naar netto neerslaggegevens. In afb. 1 is het gemid-

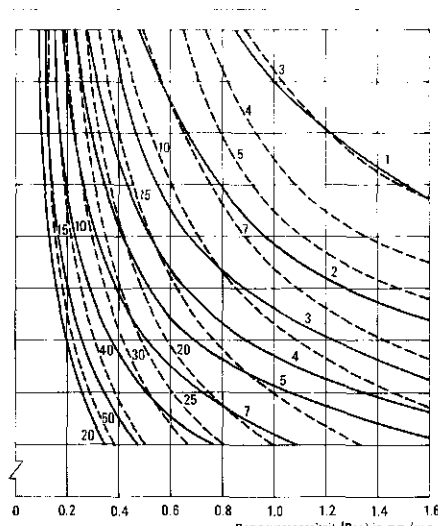


Afb. 1 - Vergelijking van het gemiddeld aantal overstortingen per jaar volgens de stippengrafiek van Kuipers, met en zonder het in aanmerking nemen van neerslagverlies.

deld aantal overstortingen per jaar uitgezet in relatie tot de berging B en de pompovercapaciteit voor zowel de bruto als de netto neerslag. Het blijkt dat in het geval van de netto neerslaghoeveelheid slechts 40 à 50 % van het oorspronkelijk aantal overstortingen per jaar overblijft. Koot kwam tot een soortgelijke reductie van het aantal overstortingen voor $C = 2,5$ mm en $V = 0,1$ à $0,2$ mm/h (Koot, 1972).

De 5-minuten regens

De 5-minutenregens bestaan uit neerslaghoeveelheden per vijf minuten, gemeten te De Bilt in de jaren 1928, 1933 en 1951 tot en met 1960. De neerslagintensiteit gedurende de bui is variabel; eventuele deeloverstortingen worden per bui als 1 overstorting geteld. De vullingstoestand van berging B en berging C wordt bepaald door de voorgeschiedenis zodat hier wel rekening wordt gehouden met de invloed van een voorafgaande bui. Het gegevenbestand 5-minuten regens van de Grontmij is naar netto neerslaghoeveelheid omgerekend met vergelijking (1). Het neerslagverlies over de afzonderlijke 5-minuten tijdvakjes is verdeeld volgens vergelijking (3). Min of meer arbitrair is voor elke bui $z_0 = 1$ en $z_e = 0$ gesteld. Dit betekent dat het verlies aan het begin van de bui 100 procent bedraagt en daarna afneemt tot een lage waarde aan het einde. Met de aldus gecorrigeerde neerslaggegevens zijn met het desbetreffende programma van de Grontmij de gemiddelde aantallen overstortingen berekend in relatie tot de berging B en de pompovercapaciteit. Het aantal op deze wijze berekende overstortingen is slechts 30 % van dat berekend met de



Afb. 2 - Vergelijking van het gemiddeld aantal overstortingen per jaar volgens de 5-minuten regens, met en zonder het in aanmerking nemen van neerslagverlies.

bruto neerslag ($C = 0$), (zie afb. 2). Ten opzichte van de berekening door Van den Herik en Kooistra met $C = 3$ mm is dit percentage 45 %. In een tweede berekening is de neerslag bovendien gecorrigeerd voor vervorming door afstroming en tijdelijke berging. Daartoe is de netto neerslag getransformeerd met een eenheidsafvoergolf bestaande uit 5 stappen van elk 5 minuten waarin achtereenvolgens 43, 25, 14, 10 en 8 % van elke neerslaghoeveelheid per 5-minuten tijdvakje tot inloop in de riolering komt. Het blijkt dat bij de grotere pompovercapaciteiten nog een geringe reductie van het gemiddeld aantal overstortingen optreedt in vergelijking met de netto neerslag.

Praktische betekenis

Vooreerst zijn er geen duidelijke redenen waarom de resultaten van het in Lelystad verrichte onderzoek niet overdraagbaar zouden zijn naar andere vlakke gebieden in Nederland. Integendeel, overstortingsmetingen in Swifterbant en Biddinghuizen hebben aangetoond dat hier slechts in ongeveer de helft van het aantal met de Kuipers-grafiek voorspelde gevallen daadwerkelijk een overstorting optrad (Van den Berg, 1974). Bij nieuw te ontwerpen rioolstelsels kan het rekening houden met de optredende neerslagverliezen een aanzienlijke besparing opleveren. Maar ook bij de zich wijzigende mening ten aanzien van het toelaatbare geachte aantal overstortingen kan het in rekening brengen van de riool-inloop in plaats van de bruto neerslag kostbare aanvullende voorzieningen aan bestaande rioolstelsels wellicht overbodig

maken; een rioolstelsel dat op grond van bruto neerslaggegevens is ontworpen op een gemiddeld aantal overstortingen van tien per jaar (en een ledigingstijd van 10 uur) blijkt met de netto neerslag gemiddeld slechts drie overstortingen per jaar op te leveren (afb. 2). Dit komt dicht bij de norm van 2 à 3 die het Hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen noemt als toelaatbaar in tuinbouwgebieden (Hoogheemraadschap Uitwaterende Sluizen, 1977).

Om de gedachten te bepalen is getracht aan de hand van gegevens uit de literatuur globaal de besparingen aan te geven die het gebruik van netto neerslaggegevens oplevert. Uitgaande van de Kuipers-grafiek, een ledigingstijd van 10 uur en gemiddeld 10 overstortingen per jaar betekent dit een stelsel met $B = 4,7$ mm en $Poc = 0,5$ mm/h in plaats van $B = 7$ mm en $Poc = 0,7$ mm/h ($Poc =$ pompovercapaciteit). Volgens Van den Herik (1973) betekent dit een besparing van 20 % op de aanlegkosten van de riolering (van f 300 naar f 250 per inwoner, prijspeil 1973). Volgens de gegevens van Huiswaard (1976) betekent dit voor een gebied met 30.000 inwoners een afname in de jaarlijkse kosten van het gehele systeem met 8 % (van f 54 naar f 50 per inwoner en per jaar, prijspeil 1975). Voor een min of meer absoluut stelsel met gemiddeld 2 overstortingen per jaar wordt op de aanlegkosten van de riolering 15 % bespaard en op de jaarlijkse kosten van het totale systeem ca. 10 % (een stelsel met $B = 9,5$ mm en $Poc = 1$ mm/h in plaats van $B = 13$ mm en $Poc = 1,3$ mm/h).

5. De waterbalans van een geheel en een gedeeltelijk verhard gebied

De regressievergelijking die het verband geeft tussen bruto en netto neerslaghoeveelheid is gebaseerd op buien met een afvoer ≥ 2 mm waterschijf berekend over het verharde oppervlak. Deze buien hebben een gemiddelde afvloeiingscoëfficiënt van 0,63. Van alle neerslag op het verharde oppervlak komt slechts 50 % via de riolering tot afvoer.

Een deel van het neerslagverlies verdwijnt door verdamping en een ander deel percolleert door de bodem en bereikt het grondwater.

Om een indruk te krijgen waar deze neerslag blijft, is voor zowel het parkeerterrein als de woonwijk een waterbalans opgesteld (voor de jaren 1972 en 1973), zie tabel II. Alle termen van de balans zijn hierin uitgedrukt in mm waterschijf ten opzichte van het totale oppervlak. De werkelijke verdamping van het onverharde oppervlak in de woonwijk is volgens de methode van Thornthwaite geschat uit de potentiële verdamping (Thornthwaite and Mather, 1957).

De potentiële verdamping is berekend uit de open waterverdamping die het KNMI voor Lelystad-Haven publiceert (f-factor van 0,8 (april/augustus); 0,7 (maart en september); 0,6 (oktober/februari)).

Uit tabel II blijkt dat bij het geheel verharde parkeerterrein nog 40 % van de neerslag via de ondergrond wordt afgevoerd! Onder omstandigheden als in Lelystad, waar woningen, straten en pleinen worden aangelegd op een laag zand ter dikte van 1 meter, aangebracht op de oorspronkelijke bodem (die vooral in de eerste woonwijk weinig gerijpt is en derhalve een geringe doorlatendheid bezit) is dan een drainagesysteem vereist.

In tabel III zijn de uitkomsten samengevat van pF-bepalingen aan monsters uit de laag zand onder het parkeerterrein. De grondwaterstand zakt hier maximaal uit tot ca. 1 meter minus het oppervlak. In het zand onder een geheel verhard oppervlak zal slechts een neerwaartse waterbeweging plaatsvinden. De hoogste pF die boven in het zand zal kunnen optreden is dus pF 2 (evenwichtssituatie). In tabel III is eveneens de relatie tussen berging en grondwaterstand in de evenwichtssituatie aangegeven. De berging in het verdichte zand is betrekkelijk klein. Hierdoor kan neerslag snelle fluctuaties van de grondwaterstand tot gevolg hebben: 2 mm neerslag kan een stijging van de grondwaterstand van 10 mm of meer veroorzaken.

In afb. 3 is het verloop van de grondwaterstand (midden tussen de drains) en de drainafvoer weergegeven in relatie tot de hoeveelheid neerslag voor zowel de woonwijk als het parkeerterrein. Het maaiveld in de woonwijk ligt op NAP minus 3,15 m en de bovenkant van het wegdek van het parkeerterrein op NAP minus 4,0 m (de stadsautowegen annex parkeerterreinen liggen in Lelystad verdiept ten opzichte van de woonwijken). Uit afb. 3 blijkt dat de norm van een maximale opbolling van het grondwater tot 0,7 m beneden bovenkant wegdek in een regenrijke periode juist bij het parkeerterrein soms kan worden overschreden. Dit onderstreept nogmaals dat ook een geheel verhard oppervlak een deel van de neerslag via de ondergrond moet kunnen afvoeren. Waar het verharde oppervlak is aangelegd op een betrekkelijk dunne zandlaag welke is gelegen op een weinig doorlatende ondergrond, zal het zandlichaam moeten worden gedraineerd. Voortman kwam bij een onderzoek over de af- en ontwatering van wegen tot een soortgelijke conclusie (Voortman, 1977).

6. Samenvatting en conclusies

— Op grond van een groot aantal ver-

TABEL II - Waterbalans van een woonwijk en een parkeerterrein te Lelystad (in mm waterschijf per jaar ten opzichte van het totale oppervlak).

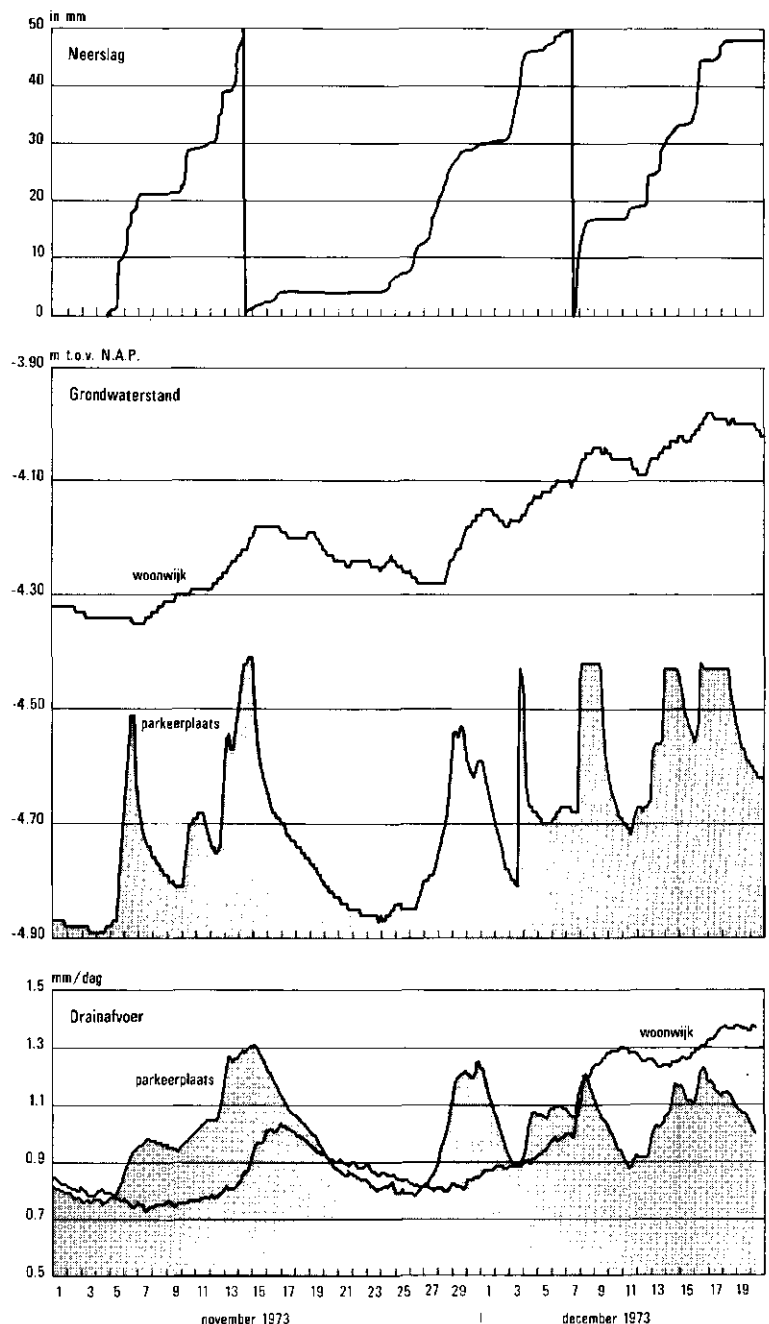
Meetgebied/jaar	E_a	Q_d	Q_r	Som	Neerslag
Woonwijk					
1972	254	250	152	656	726
1973	234	264	190	688	732
1970-1973 (gemidd.)	234	286	156	676	690
Parkeerterrein					
1972	n.v.t.	332	304	636	726
1973	n.v.t.	280	379	659	732

E_a = werkelijke verdamping; Q_d = drainafvoer; Q_r = afvoer van het regenwaterriool.

TABEL III - De pF en de beschikbare berging (in evenwichtssituatie) van het verdichte zand onder een parkeerterrein te Lelystad.

pF	vochtgehalte in vol. proc.	grondwaterstand in m minus m.v.	beschikbare berging in het profiel (mm)
0	37,2		
0,4	31,2	1,0	172
1,0	30,6	0,9	146
1,3	30,2	0,8	122
1,7	15,9	0,7	98
2,0	11,3	0,6	75

Afb. 3 - Neerslag en de respons van grondwaterstand en drainafvoer in twee meetgebieden van verschillend karakter in Lelystad.



6. Samenvatting en conclusies

— Op grond van een groot aantal ver-

zamelde gegevens in enkele meetgebieden te Lelystad is inzicht verkregen in de transformatie van pluviogram naar inloophydrogram van een rioolstelsel.

— Voor het verharde oppervlak blijkt de afvloeiingscoëfficiënt belangrijk kleiner dan 1 te zijn. Voor afvoeren groter dan 2 mm bedraagt de afvloeiingscoëfficiënt gemiddeld 0,63. Het neerslagverlies is onder andere afhankelijk van de hoeveelheid en de duur van de bui.

— Het in rekening brengen van het neerslagverlies blijkt het aantal overstortingen van een gemengd rioolstelsel berekend volgens de stippengrafiek van Kuipers met ruim de helft te verminderen (afb. 1).

— Het in rekening brengen van het neerslagverlies en de verdeling ervan over de bui volgens een negatieve e-macht blijkt bij berekening met de 5-minuten regens van de Grontmij het aantal overstortingen met ca. 70 % te verminderen (afb. 2).

— Als zowel het neerslagverlies als de transformatie van netto neerslag naar inloop in rekening worden gebracht, blijkt slechts bij grotere pompovercapaciteiten nog een geringe reductie van het aantal overstortingen op te treden in vergelijking met de berekening waarin alleen wordt gecorrigeerd voor neerslagverlies.

— Het effect van het in aanmerking nemen van het neerslagverlies en de transformatie van neerslag naar rioolinloop is getoond voor de overstortingsfrequentie. Uiteraard zal dit effect ook van invloed zijn op andere aspecten zoals duur en hoeveelheid per overstorting en de frequentie van water op straat.

— Voor de gemengde rioolstelsels in vlakke gebieden zal als regel het werkelijk aantal overstortingen belangrijk lager zijn dan het aantal waarvan bij het ontwerp is uitgegaan. Dit wordt bevestigd door metingen aan het gemengde rioolstelsel van Swifterbant en Biddinghuizen.

— Uit de waterbalans van twee meetgebieden blijkt dat de drainage 40 % van de neerslag afvoert. Ook een geheel verhard en op de riolering aangesloten oppervlak voert een deel van de neerslag via de ondergrond af. Waar het verharde oppervlak is aangelegd op een betrekkelijk dunne laag zand die is gelegen op een weinig doorlatende ondergrond, zal het zand moeten worden gedraineerd.

Literatuur

Berg, J. A. van den, 1974. *Enige aspecten van de afvoerhydrologie van stedelijke gebieden*. H₂O (7), nr. 23.
 Berg, J. A. van den, 1977. *Urban catchment hydrology in Lelystad*, in: 'Urban hydrological modelling and catchment research in the Netherlands' by

F. C. Zuidema. ASCE Urban water resources research program, Technical Memorandum no. IHP-10.

Berg, J. A. van den, Jong, J. de en Schultz, E., 1977. *Some qualitative and quantitative aspects of surface water in an urban area with separated storm water and waste water sewer systems*. IHP-Symposium On the effects of urbanization and industrialization on the hydrological regime and on water quality, Amsterdam, October 1977. Unesco-IAHS publicatie.

Herik, A. G. van den, 1973. *Rioolstelsels in relatie tot behandeling van afvalwater*. H₂O (6), nr. 21.

Herik, A. G. van den, Kooistra, M. T., 1970. *5-minuten regens*. H₂O (3), nr. 21.

Herik, A. G. van den, Kooistra, M. T., 1973. *'5-minuten regens. Regenintensiteiten en overstorten bij rioleringen'*. Grontmij NV.

Hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Kennemerland en West-Friesland, 1977. *Rioleringen, de verschillende stelsels en hun werking*.

Huiswaard, P. J., 1976. *Relaties tussen riolerings-overstorten en effluentlozingen*. H₂O (9), nr. 8.

Koot, A. J. C., 1972. *Riolering en waterverontreiniging*. H₂O (5), nr. 25.

Kregten, S. J. van, 1972. *Regengegevens ten behoeve van de berekening van rioleringen*. H₂O (5), nr. 20.

Rapport van de Commissie Riolering en Waterverontreiniging van de afdeling voor gezondheids-techniek van het KIVI, 1972. H₂O (5), nr. 10 en 11.

Thorntwaite, C. W. and Mather, J. R., 1957. *Instructions and tables for computing the potential evapotranspiration and the waterbalance*.

Publications in climatology, Vol. X, nr. 2. Drexel Institute of Technology and Climatology, Centerston.

Ven, G. A., 1977. *A programmable system for continual recording of hydrologic variables*.

Flevobericht (in voorbereiding). Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad.

Voortman, B. R., 1977. *De ontwatering van enkele wegen in Lelystad*. Flevobericht nr. 123. Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad.

