

# Enige aspecten van de afvoerhydrologie van stedelijke gebieden

## 1. Inleiding

In de afgelopen jaren is de afvoerhydrologie van stedelijke gebieden steeds sterker in de belangstelling komen te staan, waarvan de 'neerslag', zoals uit de geciteerde literatuur zal blijken, ook in dit tijdschrift is terug te vinden. De aandacht viel hierbij vooral op een rekenmodel waarmee de afvoeren kunnen worden berekend die optreden bij overstortingen uit een rioolstelsel in een vlak gebied [9, 13, 38], en de invloed van de riolering op de waterkwaliteit [14], terwijl in het rapport van de Commissie Riolering en Waterverontreiniging (KIVI) [24] een



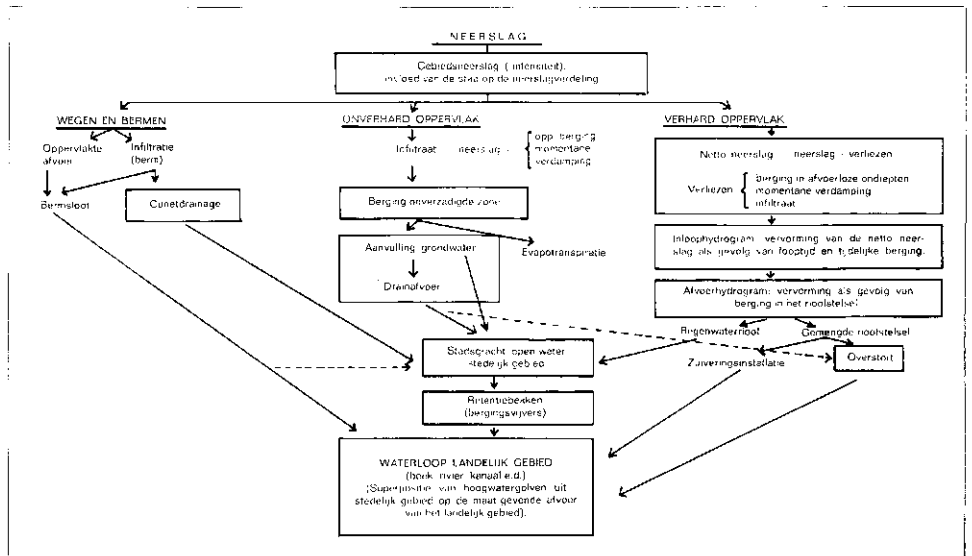
DRS. J. A. VAN DEN BERG  
Wetenschappelijke Afdeling,  
Rijksdienst voor de  
IJsselmeerpolders, Lelystad

overzicht wordt gegeven van zowel de literatuur als de stand van het onderzoek tot 1969.

In dit artikel zullen vooral die aspecten aan de orde komen, die bij het hydrologisch onderzoek in Lelystad centraal staan. Het afvoerproces is schematisch weergegeven in een stroomdiagram (afb. 1). Aan de hand hiervan zal de afvoer van de neerslag op het verharde oppervlak worden besproken; de ontwatering van het onverharde oppervlak zal buiten beschouwing blijven.

## 2. Neerslaghoeveelheid en intensiteit binnen een stedelijk gebied

Voor de berekening van de hoeveelheid neerslag die van het verharde oppervlak moet worden afgevoerd, wordt meestal uitgegaan van de neerslaggegevens van De Bilt. Pluviogrammen zijn er verder van de overige hoofdstations Den Helder, Vlissingen, Eelde en Beek (Zuid-Limburg). Deze zijn door het KNMI bewerkt tot frequenties van k-daagse neerslagsommen [18]. Timmerman bewerkte de dagsommen van alle neerslagstations in Nederland op grond waarvan hij een aantal isohyeten kaarten heeft geconstrueerd [33]. Hieruit kan de geneigtheid tot enkele regionale verschillen worden afgeleid. Of deze tendenzen eveneens voor intensieve buien gelden is nog nauwelijks onderzocht. Hierbij wordt onder regenbui verstaan de hoeveelheid neerslag die er in een bepaald gebied werkelijk valt. De hoeveelheid in de regenmeter is hiervan een schatting; beide hoeveelheden zijn niet identiek. Het is twijfelachtig of het bestaande net van regenmeterstations voldoende dicht is

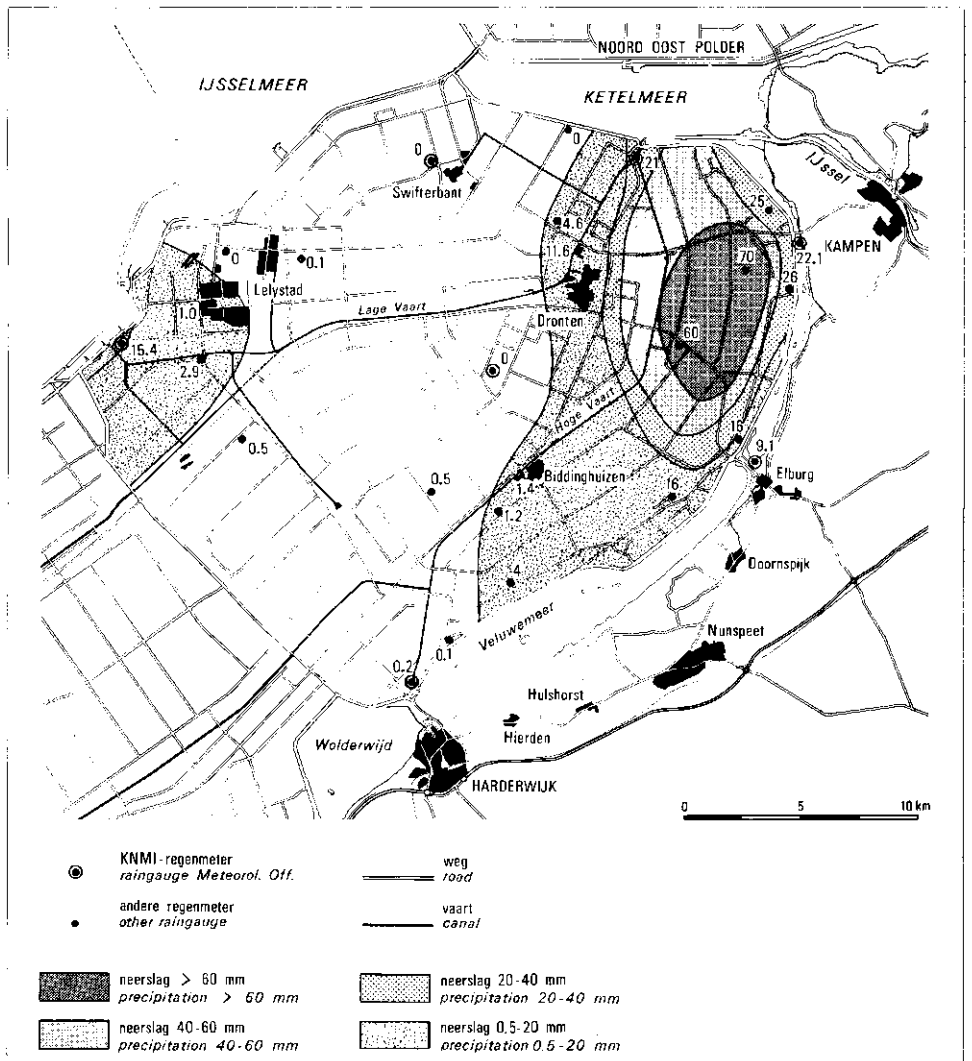


Afb. 1 - Schema van het afvoerproces van neerslag op een stedelijk gebied.

Fig. 1 - Flow diagram for precipitation on an urban area.

Afb. 2 - Isohyeten (lijnen van gelijke hoeveelheid regen) voor de etmaalsom in Oostelijk Flevoland afgetapt op 2 augustus 1972. De regenstations van het KNMI zijn omlijnd aangegeven.

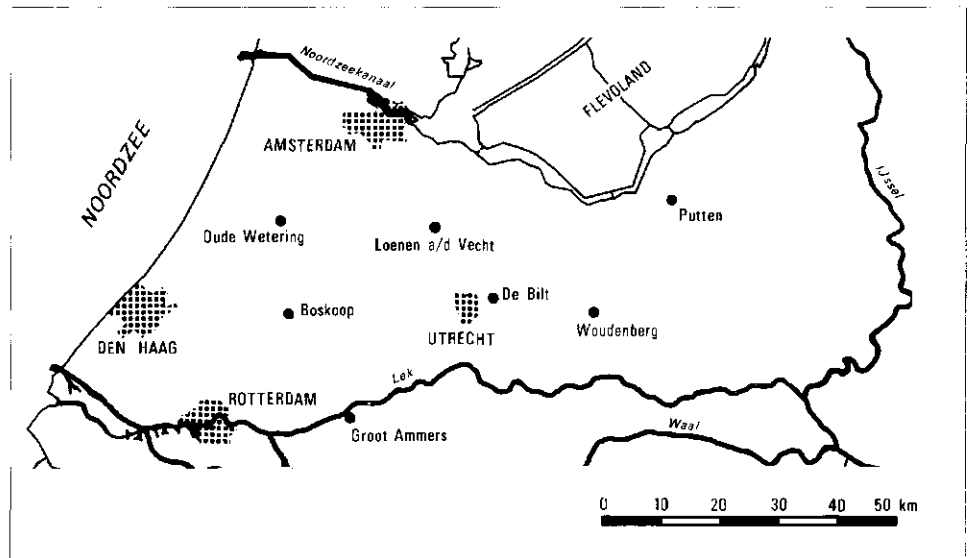
Fig. 2 - Isohyetal map of daily precipitation tapped on 2 August 1972 in Oostelijk Flevoland. The permanent rain-measuring stations of the Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) are encircled.



om betrouwbare verschillen in gemiddelde herhalingstijd aan te tonen, omdat de intensieve buien, waar het bij het opstellen van ontwerpnormen om gaat, vaak een beperkte ruimtelijke verbreiding bezitten en dus gemakkelijk tussen de mazen van het regenmeternet kunnen vallen. Dit laatste kan worden geïllustreerd met afb. 2 waarin voor Oostelijk Flevoland de isohyeten zijn geschetst van de etmaalsom die is afgetapt op 2 augustus 1972. Dik omlijnd zijn de regenmeterstations van het KNMI - ZZW. De overige neerslaggegevens zijn ontleend aan regenmeters die bij sommige landbouwbedrijven ten behoeve van proefvelden zijn opgesteld. Hierbij moet wel rekening worden gehouden met inhomogeniteit ten gevolge van de verschillende apparatuur waarmee de neerslag is gemeten. In het gebied zijn zowel regenglazen als KNMI-regenmeters (2 dm<sup>2</sup>) op 40 cm hoogte, pluviografen en recovergrondregenmeters opgesteld.

Niettemin mag uit afb. 2 worden afgeleid dat het meest intensieve deel van de bui tussen de officiële stations is gevallen. De Bruin merkt in het rapport over het neerslagonderzoek in Salland, waar een tijdelijk regenmeternet werd ingericht met een maaswijdte van 5 km, op dat om alle mogelijke neerslag patronen te kunnen vastleggen, de onderlinge afstand tussen de neerslagstations niet meer dan 1 km mag bedragen [4]. Het rapport van de Commissie Riolering en Waterverontreiniging [24] vermeldt de vergelijking van de regengegevens van de 5 hoofdstations voor de periode 1955 - 1962 met behulp van de stippengrafiek van Kuipers. Hieruit blijken de regengegevens van de kustnabije stations Den Helder, Vlissingen en Eelde gemiddeld een lager aantal overstortingens volgens de stippengrafiek te veroorzaken dan die van De Bilt en Zuid-Limburg. Dit beeld sluit inderdaad aan bij de isohyetenkaarten van Timmerman.

Vervolgens rijst de vraag of er invloed van het stedelijk gebied op de neerslag moet worden verwacht. Grote woon- en industriegebieden hebben eigenschappen waardoor ter plaatse gemakkelijker stijgbewegingen in de atmosfeer optreden dan boven het landelijk gebied. Zo berekende Van Zuylen voor Amsterdam dat de antropogene energieproductie in 1970 ca.  $18 \times 10^{15}$  cal. bedroeg, en daarmee in dezelfde orde van grootte lag als de van de zon afkomstige energie [39]. In deze iets onstabielere lucht zou een versterking van vooral convectieve regens kunnen optreden (dit zijn regens waarbij de tot neerslagvorming leidende verticale luchtbewegingen worden veroorzaakt door plaatselijke dichtheidsverschillen



Afb. 3 - De zes regenstations in het landelijk gebied waarmee de neerslag in De Bilt is vergeleken.

Fig. 3 - Location of the rain-measuring stations in the neighbourhood of De Bilt.

in casu temperatuurverschillen van de lucht). Bovendien worden er door de activiteiten van de mens veel condensatie- en vrieskernen in de atmosfeer gebracht.

Dit behoeft echter niet tot een toename van de hoeveelheid neerslag te leiden, wel is het van invloed op het druppelspectrum. Een toename van het aantal — meest uniforme — condensatiekernen versmalt bij gelijkblijvend watergehalte namelijk het druppelspectrum [7, 10, 32, 40]. Onderzoek heeft voor sommige steden wel, voor andere geen beïnvloeding van de neerslag aangetoond [11, 17, 26, 39].

Gezien het frequente gebruik van de regencijfers van De Bilt is het van belang te weten of het zich zowel naar omvang als naar intensiteit uitbreidende stadsklimaat van Utrecht in de loop van de tijd ook de regenval in De Bilt is gaan beïnvloeden. Om hierover geïnformeerd te zijn, zijn de halfjaarsommen van De Bilt vanaf 1896 vergeleken met de gemiddelden van zes omliggende stations in het landelijk gebied (Loenen a/d Vecht, Putten, Woudenberg, Groot-Ammers, Boskoop en Oude Wetering), zie kaartje van afb. 3. In afb. 4A en B zijn deze getallen cumulatief uitgezet, te beginnen met 1973, voor respectievelijk het zomer- en winterhalfjaar. Uit deze afbeelding blijkt dat de punten op één rechte lijn liggen zodat (toenemende) invloed van de stad Utrecht op de neerslag in De Bilt met 'double mass curve' analyse niet kan worden aangetoond. Van de neerslaggegevens van De Bilt is een detailanalyse gemaakt [13]. Talsma construeerde aan de hand hiervan regenduurlijnen, dit zijn lijnen die voor een bepaalde gemiddelde herhalingstijd het verband weergeven tussen de

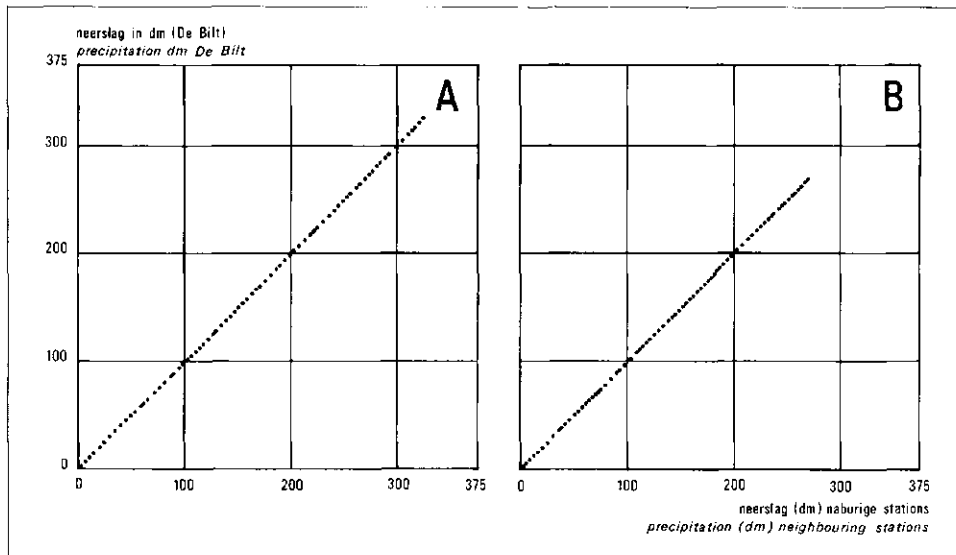
hoeveelheid neerslag en de tijdsduur [31].

Ten behoeve van meetgebieden in de stad waar de relatie tussen neerslag en afvoer wordt bestudeerd, zal de neerslag uiteraard ter plaatse moeten worden gemeten. Het gaat er dan om de gebiedsneerslag te kennen, zodat het niet zeker is of één puntmeting voldoende representatief is. Elke regenbui heeft een zekere ruimtelijke structuur, zodat de regenval in een gebied zowel een functie van de tijd als van de plaats in dat gebied is. Wordt voor tijdreeksen bij een interval gelijk aan nul altijd een correlatiecoëfficiënt van 1 gevonden, voor een afstandreeks van regenmeters geldt dit niet [12, 30]. Bij metingen in Lelystad, waar ten behoeve van een vijftal meetgebieden drie grondregenmeters zijn opgesteld op 140, 260 en 340 m afstand van elkaar, zijn de verschillen per bui gemiddeld gering ( $\pm 0,5$  mm); met de ene regenmeter kan de vangst in de anderen goed worden geschat [2].

Voor het opstellen van verbanden tussen neerslag en de afvoer van het verharde oppervlak moet van de neerslag als invoergegeven meer bekend zijn dan het buitotaal. De kwestie is dan hoe klein het tijdvak kan worden gekozen, zodat ook voor de bijbehorende deelhoeveelheden (intensiteiten) nog een hoge correlatie wordt gevonden. Uit een eerste detailanalyse van de gegevens van een vijftal buiten blijkt voor intensiteiten per 2 minuten en langer, de correlatiecoëfficiënt  $r \geq 0,8$  te zijn.

### 3. Wegen

De meeste wegen in een stedelijk gebied wateren via straatkolken af op de riolering. Wegens bepaalde redenen, bijvoorbeeld



Afb. 4 - De seizoenneerslag van de De Bilt en het gemiddelde van 6 omliggende stations (afb. 3) zijn cumulatief uitgezet voor de periode 1896 - 1973, te beginnen met 1973. A = zomerhalfjaar (mei/okt.); B = winterhalfjaar (nov./april).

Fig. 4 - Double mass curve of the biannual rainfall at De Bilt and the mean of 6 neighbouring stations (fig. 3) for the period 1896 - 1973. The starting point is 1973. A = summer (May till November); B = winter (November till May).

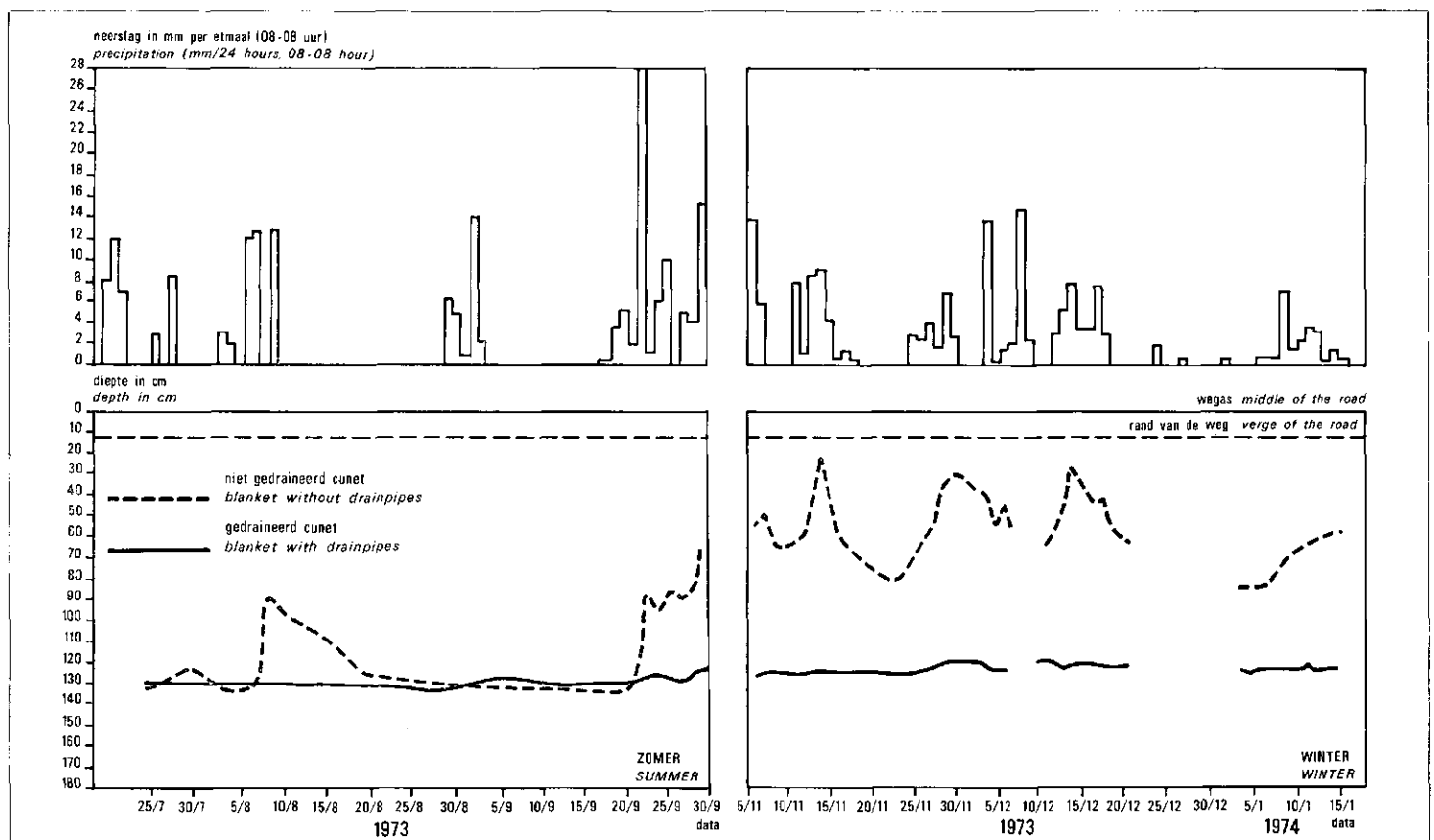
van stedenbouwkundige aard, wordt hiervan soms afgeweken. Zo komt er in Lelystad een stelsel van doorgaande wegen voor die aan weerszijden door een gracht van de woonwijken worden gescheiden. Deze wegen

zijn niet op de riolering aangesloten maar wateren via de berm af op de grachten. Zij liggen in Lelystad bovendien 0,5 à 1 m verdiept ten opzichte van de woonwijken om conflictvrije kruisingen met wegen met

andere functies (bijv. voet- en fietspaden) te vergemakkelijken. In de Bijlmer liggen de hoofdwegen om dezelfde reden op een hoger niveau; de afwatering vindt daar overigens wel plaats via de riolering. De vraag rijst of voor wegen die via de berm afwateren, een ernaast gelegen watergang (voortaan als bermsloot aangeduid) nodig en voldoende is voor een goede ontwatering van het cunet, of dat tevens nog een cunetdrainage nodig is en of bij het ontbreken van een bermsloot hiermee kan worden volstaan. Het antwoord op deze vraag hangt samen met o.a. de topografie van het gebied, de grondsoort en de hoogteligging van het wegdek ten opzichte van het ingestelde waterpeil. Als norm voor de ontwateringsdiepte wordt veelal een maximale opbolling van het grondwater tot 0,7 m beneden bovenkant wegcunet genomen (d.i. 0,8 à 1 m minus wegoppervlak). In Lelystad zijn naar aanleiding van deze vraag een aantal proefvakken ingericht. Gemeten worden het langs het bermoppervlak afstromend water (op verschillende afstand vanaf de weg), de grondwaterstanden in het wegcunet (vlak naast de weg) en in de berm, de afvoer van de cunetdrainage en de neerslag [34A]. De verdiepte hoofdwegen liggen op ca. 4 m -NAP, het grachtpeil bedraagt 5,4 m -NAP. In afb. 5

Afb. 5 - Neerslag en het verloop van de grondwaterstand in een wel en een niet gedraineerd wegcunet.

Fig. 5 - The daily precipitation and the groundwaterlevel in a blanket with drainpipes and in a blanket without drainpipes.



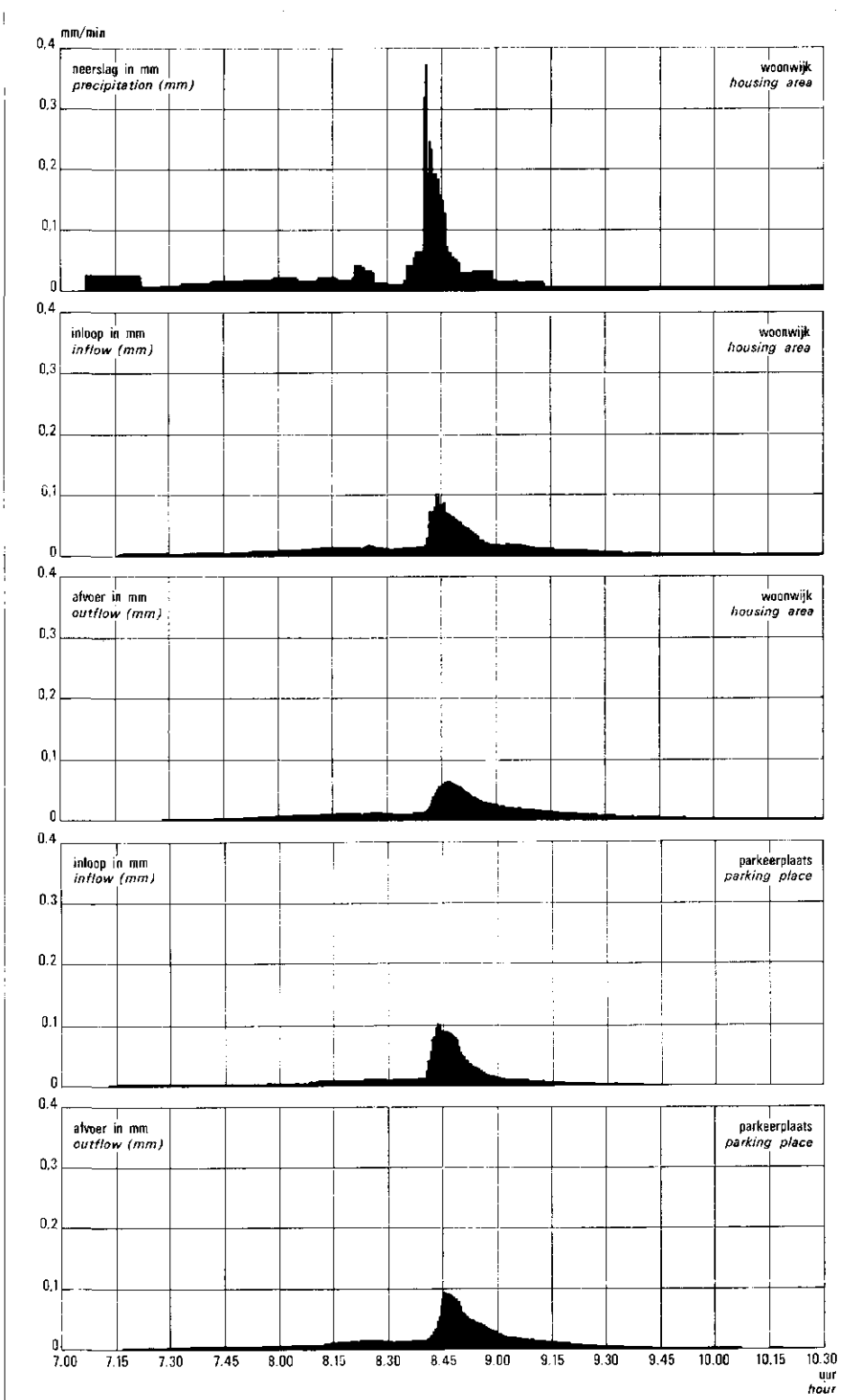
wordt het verschil in ontwateringstoestand getoond tussen een wel en een niet gedraineerde wegcunet in een zomer- en een winterperiode. De gemeten oppervlakte afvoer bedroeg bij regenbuien met een intensiteit groter dan 0,2 mm/min op 4 à 5 m afstand van de wegrand maximaal 30 % van de op de weg en berm gevallen neerslag. Het blijkt dat in de zomer een cunetdrainage, eventueel aangevuld met een bermdrainage, een weg in een vlak gebied goed zal kunnen ontwateren. Het kritieke moment zal dan eventueel in de winter kunnen optreden tijdens, maar vooral na een periode met strenge vorst, waardoor de bovengrond is bevroren. De infiltratiecapaciteit kan nu zover zijn teruggelopen dat in het geval de dooi inzet met veel regen, wateroverlast optreedt eventueel nog versterkt door smeltende sneeuw [19, 29]. Een bezwaar van ontwatering via berm-sloten is dat in het geval van een calamiteit bij wegtransporten van schadelijke stoffen, deze nu sneller het stedelijk oppervlakte-water kunnen bereiken.

**4. De netto neerslag**

Naar analogie van de terminologie voor onverharde gebieden, waar onder netto neerslag wordt verstaan dat deel van de neerslag dat percoleert en daarna aan de grondwaterstroming kan deelnemen, wordt voor het verharde oppervlak met netto neerslag dat deel der neerslag bedoeld dat aan de stroming over het oppervlak blijft deelnemen, totdat het een afvoerkanaal heeft bereikt. De netto neerslag kan oorspronkelijk ook van het onverharde oppervlak afkomstig zijn, evenals een deel der verliezen kan bestaan uit water dat naar het onverharde oppervlak is afgestroomd. Voor vlakke gebieden wordt het netto resultaat van beide effecten verwaarloosd. In aansluiting hierbij kan de afvloeiingscoëfficiënt gedefinieerd worden als de verhouding tussen de hoeveelheid neerslag die via het rioolstelsel wordt afgevoerd en de hoeveelheid neerslag die op het verharde oppervlak is gevallen \*).

De grootte is uiteraard afhankelijk van de terrehelling en de aard van het oppervlak. Voor vlakke gebieden vond Gameson [6] een gemiddelde van ca. 0,75, Watkins [36] voor twee gebieden met een gemiddelde terrehelling van 1 : 100 - 1 : 120 een gemiddelde in de klasse 0,7 - 0,8. Voor sterker hellende gebieden vermeldt Watkins een afvloeiingscoëfficiënt groter dan 1. Andere onderzoekers noemen een gemiddeld ver-

\*) Het woordgebruik en de gehanteerde begrippen zijn in overeenstemming met de omschrijvingen die het rapport van de Commissie Riolering en Waterverontreiniging [24] en het rapport van de Werkgroep Afvoerfactoren Stedelijke Gebieden [38] geven.



Afb. 6 - Pluviogram van 19 oktober 1970 en het inloep- en het afvoerhydrogram van twee meetgebieden in Lelystad, een woonwijk en een parkeerterrein.

Fig. 6 - Hyetograph of 19 October 1970 with the inflow- and outflowhydrographs of two catchment areas in the newtown of Lelystad.

liesbedrag: Manual nr. 9 van de Water Pollution Control Federation 1,5 mm, Pecher maakt nog weer onderscheid tussen bevochtigingsverliezen en verliezen ten gevolge van plasvorming [21]. Dergelijke getallen zullen in de praktijk

van weinig belang zijn. De verliezen, ook wel aangeduid als berging op straat, bestaan in feite immers uit water dat hetzij in de grond dringt, hetzij vroeg of laat verdampt. Het ligt daarom voor de hand dat de som van deze verliezen noch een vast percentage

noch een vaste hoeveelheid neerslag zal zijn. Dit wordt bevestigd door metingen in de meetgebieden in Lelystad, waaruit blijkt dat de afvloeingscoëfficiënt samenhang vertoont met de neerslagintensiteit [3]. Voor een parkeerterrein waarvan de bestrating voor meer dan de helft bestaat uit klinkers en voor de rest uit asfalt, bedraagt de afvloeingscoëfficiënt gemiddeld 0,5 à 0,6 maar voor buien met een hoge gemiddelde intensiteit 0,8!

Het werken met een gemiddeld verlies bergt bovendien het risico in zich van oversimplificatie. Zo schrijft Koot [14]:

'Neerslag kleiner dan de verliezen door bevochtiging en plasvorming zal geen afvoer leveren'. Dit is *sensu stricto* niet juist, omdat er delen verhard oppervlak zijn met relatief geringe verliezen die reeds afvoeren naar de riolering voordat er een hoeveelheid neerslag is gevallen gelijk aan het gemiddeld verlies. Ook dit blijkt duidelijk uit de proefgebieden in Lelystad: na een droge periode kan het beginverlies op de twee platte daken die afzonderlijk worden bemeten, wel 5 mm bedragen, terwijl de meetgebieden waarin tevens wegen zijn opgenomen een meetbare afvoer te zien geven nadat er 0,5 à 1 mm neerslag is gevallen.

Men zal dus moeten gaan werken met een afvloeingscoëfficiënt die past bij het type regenbui dat kritisch is voor de lokale situatie. Tot deze conclusie leidt ook de uitspraak van de Werkgroep Afvoerfactoren Stedelijke Gebieden in haar interimrapport dat nader onderzoek gewenst is naar de afvloeingscoëfficiënten van de verschillende soorten afvoerende oppervlakken, vooral bij vlakke gebieden [38].

Is de afvloeingscoëfficiënt voor een regenbui nog onderwerp van studie, nog moeilijker is het de afvloeingscoëfficiënt per deelperiode van de bui vast te stellen.

Er bestaan reeds modellen waarmee verbanden tussen neerslag en afvoer in formules kunnen worden vastgelegd [15, 20]. Het is dan wel nodig de netto regenintensiteiten te kennen. Informatie hierover kan worden verkregen door onafhankelijk van de neerslag de inloopintensiteiten in de riolering te bepalen [3].

### 5. Het inloop- en het afvoerhydrogram

Als gevolg van berging en looptijd treedt vertraging op waardoor de netto neerslag vervormd in het rioolstelsel stroomt. Het inloophydrogram vertoont ten opzichte van het pluviogram faseverschuiving en amplitudodemping (afb. 6).

Bij de tot heden in zwang zijnde reken-technieken wordt deze vertraging niet in rekening gebracht; het inloophydrogram wordt gelijkgesteld aan het pluviogram eventueel verminderd met een percentage

of een vast bedrag om de berging op straat te verdisconteren. Voorbeelden hiervan zijn de bewerkingen van de 5 minuten gegevens van De Bilt met het zogenaamde bakmodel door Van der Herik en Kooistra [9] en Van Kregten [16] waarmee voor een rioolstelsel de overstortingsfrequenties zijn berekend voor verschillende randvoorwaarden. Bij de stippengrafiek van Kuipers [25] wordt voorts verondersteld dat de regen (= inloop) intensiteit gedurende de gehele bui constant is.

Het buiten beschouwing laten van de vervorming die de regencurve heeft ondergaan op het moment dat het regenwater in de riolering stroomt, is ongetwijfeld de zwakste schakel in de huidige berekeningsketen. Ook de Werkgroep Afvoerfactoren Stedelijke Gebieden pleit er voor de invloed van de vertraging op het inloophydrogram aan een nadere studie te onderwerpen [38].

Om een indruk te geven van de aard van de vervorming zij vermeld dat een eerste analyse van de gegevens uit de 1 tot 3 ha grote meetgebieden in Lelystad een faseverschuiving van enkele minuten te zien geven en dat bijv. voor een parkeerterrein (0,7 ha) de regenintensiteiten groter dan 0,2 mm/min tot ongeveer de helft zijn gedempt bij de inloop in het riool [3]. Na de transformatie tot inloophydrogram treedt nog een vervorming van de regencurve op. Bij de regenwaterriolering van het niet-verbeterde gescheiden stelsel stroomt het regenwater namelijk sterk gedempt (als gevolg van de berging in het rioolstelsel) uit in open watergangen (afb. 6). Bij het gemengde stelsel wordt eerst de (grotere) berging in het rioolstelsel gevuld. Als de inloopintensiteit de overcapaciteit van de pompen blijft overtreffen treden vervolgens de overstorten in werking. Voor de schatting van overstortingshoeveelheden en -frequenties is veel gebruik gemaakt van zgn. theoretische regenkrommen of van de stippengrafiek van Kuipers [25].

Een kort overzicht van deze methoden wordt o.a. gegeven door Van Kregten [16], in het rapport van de Commissie Riolering en Waterverontreiniging wordt op sommige methoden uitvoeriger ingegaan [24]. Het valt buiten het kader van dit artikel in te gaan op de verschillende typen al dan niet verbeterde rioolstelsels. Een overzicht hiervan geeft bijv. Koot, waarbij door hem wordt gesteld dat waar men thans niet onmiddellijk tot de aanleg van een verbeterd rioolstelsel kan of wil overgaan, het gemengde of gescheiden stelsel zodanig moet worden ontworpen dat het naderhand door aanvullende maatregelen kan worden veranderd in een verbeterd stelsel [14].

Door sommige ingenieursbureaus en onderzoekinstellingen in Nederland zijn com-

puterprogramma's ontwikkeld waarmee bij bepaalde randvoorwaarden een optimaal rioolstelsel kan worden berekend.

Aanvankelijk waren de programma's opgesteld voor permanente stroming in volledig gevulde buizen. Deze programma's worden nog steeds toegepast voor de berekening van waterleidingnetten en zij zijn ook toegepast voor het uitvoeren van rioleringsberekeningen. De nieuwere programma's houden rekening met gedeeltelijk gevulde buizen en de berging in het rioolstelsel.

### 6. Het overstort

Het water in de moderne stadswijk krijgt steeds meer een recreatieve functie [28].

De vraag kan dan ook worden gesteld of dit water nog wel in contact mag komen met afvalwater [27]. Dit geldt allereerst voor de overstortingen uit het gemengde stelsel, maar ook de afvoer van het regenwaterriool moet misschien als afvalwater worden aangemerkt, hierop wordt teruggekomen in de volgende paragraaf.

In het rapport van de Commissie Riolering en Waterverontreiniging wordt een literatuuroverzicht gegeven betreffende de verontreinigende invloed van overstortingen [24]. Onderzoek in Amerika heeft uitgewezen dat daar tijdens overstortingen ca. 3 % van de droogweerafvoer (dwa) wordt geloosd, maar aan zwevende stof 25 à 40 % van de jaarlijkse produktie (doordat het afgezette slib tijdens regens wordt opgewoeld).

Dit betekent niet alleen een bacteriologische verontreiniging, maar tevens een belasting van het oppervlaktewater met zuurstofonttrekkende stoffen (uit te drukken in BOD en COD). Op grond van deze overwegingen is men in de loop van de vijftiger jaren van de verdunningstheorie overgegaan op de frequentietheorie. Met andere woorden, uit kwaliteitsoogpunt is niet de mate waarin het huishoudelijk en industrieel afvalwater tijdens de overstorting is verdund met regenwater van belang, maar veel meer de frequentie waarmee overstorting plaatsvindt [24, 25].

De overstortingsfrequentie kan worden verkleind door de berging te vergroten. Dit kan met name worden bereikt met behulp van bergingsreservoirs; er is dan sprake van het verbeterde gemengde stelsel.

Bekend is de berekening van de overstortingsfrequentie met de stippengrafiek van Kuipers [25]. Hierin zijn alle regenbuien groter dan 4 mm, die in de periode van 1938 - 1948 in De Bilt zijn gevallen, naar hoeveelheid en tijdsduur in een grafiek weergegeven. De berging in het rioolstelsel wordt in rekening gebracht door als ondergrens een horizontale lijn te nemen, die de verticale as (waarlangs de neerslaghoeveelheid is uitgezet) snijdt in een punt dat

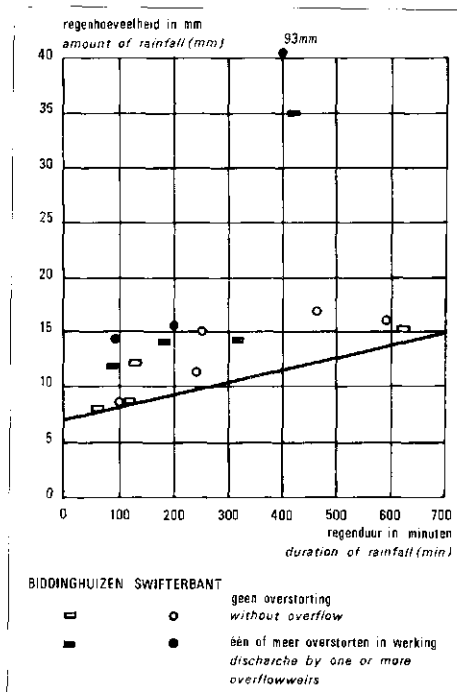
overeenkomt met de berging, uitgedrukt in mm waterschijf ten opzichte van het verharde oppervlak. De overcapaciteit van de pompen (Poc) wordt voorgesteld door een schuine lijn vanuit dit snijpunt en met een helling die overeenkomt met de overcapaciteit uitgedrukt in mm waterschijf per tijdseenheid.

In het begin van de zeventiger jaren publiceerden Van den Herik en Kooistra [9] en Van Kregten [16] de uitkomsten van het zogenaamde bakmodel, dit is een mathematisch model waarmee voor het gemengde stelsel de overstortingshoeveelheden, -frequenties en -intensiteiten kunnen worden berekend. Het model bestaat uit een reservoir met een zekere inhoud, de berging, waaruit met constante capaciteit, de overcapaciteit, wordt gepompt zodra het reservoir zich begint te vullen, en waaruit water kan wegstromen via overstorten zodra het reservoir vol is. In tegenstelling tot de stippengrafiek van Kuipers wordt bij dit model rekening gehouden met de vorm van de regencurve en de invloed van opeenvolgende regens. Bij Van den Herik en Kooistra kan elke regenbui een nieuwe overstorting veroorzaken. Van Kregten telt alleen een volgende overstorting mee als deze minstens 10 uur na het einde van de voorafgaande bui begint, omdat tussenliggende overstortingen minder kans op vervuiling geven. Er zijn in Nederland nog weinig resultaten gepubliceerd van onderzoek naar het aantal werkelijk optredende overstortingen uit een naar bepaalde criteria ontworpen rioolstelsel.

In 2 dorpen in Oostelijk Flevoland (Swifterbant en Biddinghuizen) zijn de overstortingen gedurende het tijdvak van 1 augustus 1971 tot 31 oktober 1972 geregistreerd met behulp van peilschrijvers. In beide dorpen is een gemengd rioolstelsel aangelegd met 3 overstorten. In Biddinghuizen liggen deze min of meer verspreid over het gebied, in Swifterbant zijn ze alle drie dicht bij de zuiveringsinstallatie gelegen.

De rioolstelsels zijn ontworpen op een gemiddelde overstortingsfrequentie van 10 x per jaar. Met de stippengrafiek van Kuipers is de benodigde berging vastgesteld op 7 mm (t.o.v. het verharde oppervlak) en een overcapaciteit van 0,7 mm/uur (ledigingstijd 10 uur).

In een soortgelijke afbeelding als de stippengrafiek zijn alle regenbuien getekend, waarvan de gemiddelde intensiteit boven de pomplijn ligt (afb. 7). Uit superpositie van afb. 7 op de stippengrafiek blijkt dat ongeveer de helft van de stippen boven de pomplijn in het gebied ligt waar volgens de metingen in werkelijkheid nog geen overstortingen optreden. Met andere woorden, in werkelijkheid bedroeg de overstortingsfrequentie de helft van wat was berekend.



Afb. 7 - Regenbuien waarvan de gemiddelde intensiteit boven de bergings annex pomplijn ligt in de stippengrafiek van Kuipers voor twee woonkernen in Oostelijk Flevoland. (B = 7 mm, Poc = 0,7 mm/uur, periode 1 augustus 1971 - 31 oktober 1972).

Fig. 7 - Rainstorms with a mean intensity higher than the sum of the sewer storage (7 mm) and the capacity of the pumps for the rainwater discharge (0,7 mm/hr) at two villages in Oostelijk Flevoland with a combined sewer system. Period 1 August 1971 - 31 October 1972.

De verklaring hiervoor zal vermoedelijk allereerst gezocht dienen te worden in het feit dat bij de gehanteerde berekeningsmethode het inloophydrogram gelijkgesteld is aan de regencurve. Voorts speelt hier het feit een rol dat in sommige stamriolen nog extra berging aanwezig is, omdat de woonkernen nog niet de omvang hebben bereikt waarop het rioolstelsel is gedimensioneerd.

In het rapport van de Commissie Riolering en Waterverontreiniging werd wel reeds gewezen op de juridische aspecten van overstortingen op oppervlaktewater dat in beheer is bij een zuiveringsschap of een waterschap. Het uitvoeringsbesluit van de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren schrijft voor dat bij een aanvraag tot verlening van een vergunning voor de aanleg of wijziging van een riolensysteem o.a. de technische gegevens van de overstorten moeten worden overgelegd. Voor zover bekend wordt er in Nederland evenwel nog geen aanslag geheven die direct is gerelateerd aan het aantal riooloverstortingen. In elk geval is er ten dezen nog geen landelijk beleid vastgesteld.

#### 7. Het open water

Open water in een stedelijk gebied is een

essentieel onderdeel van het gescheiden rioolstelsel, het vormt een belangrijk deel van de berging in het regenwaterafvoersysteem. Ook het drainagesysteem zal erop afvoeren.

Als uitvloeisel van de Wet Verontreiniging Oppervlaktewateren is sedert 1 januari 1971 bij de lozing van afvalwater op Rijkswateren een 'verontreinigingsheffing rijkswateren' verschuldigd. De afvoer van het gemengde stelsel en van het vuilwaterriool van het gescheiden stelsel zal derhalve in steeds meer gemeenten eerst naar een zuiveringsinstallatie worden geleid om daarna het effluent op het oppervlaktewater te lozen.

Daar van de afvoer van een stedelijk drainagesysteem geen verontreinigende invloed is aangetoond en het in het algemeen ook niet behoeft te worden verwacht, betekent de lozing van de drainage via de riolering een onnodige extra belasting van de zuiveringsinstallatie. Het verdient derhalve aanbeveling de drainage zoveel mogelijk rechtstreeks of via het regenwaterriool van het gescheiden stelsel op het open water af te voeren. Over de kwaliteit van het water dat wordt aangevoerd door het regenwaterriool (rwa), wordt verschillend gedacht. Uit het literatuuroverzicht dat Koot geeft, blijkt dat de rwa de meeste componenten in dezelfde concentratie kan bevatten als het overstortingswater, zie tabel I [14]. Het water dat via de regenwaterriolen op het open water wordt geloosd, mag dus niet a priori als schoon worden verondersteld.

In Lelystad waar een gescheiden rioolstelsel is aangelegd, wordt sinds een paar jaar de kwaliteit van zowel het water in de grachten als het water in een meetput van de rwa geregeld bemonsterd en onderzocht [8]. De resultaten zijn vermeld in tabel II. Uit tabel II blijkt dat de regenwaterrioolafvoer in Lelystad vooral wat betreft COD en BOD aan de minimumkant zitten, vergeleken met de getallen in tabel IA. Wat betreft het MPN-getal (dit is het 'most probable number' colibacteriën) van het grachtwater, dit voldoet aan de normen voor zwemwater, maar dit mag gezien het geringe aantal waarnemingen niet representatief voor het gehele jaar worden geacht. In 1973 is wel enkele malen een lichte bacteriologische verontreiniging geconstateerd. Gelet op alle genoemde parameters doet zich het merkwaardige feit voor dat het stedelijk oppervlaktewater in Lelystad van een betere kwaliteit is gebleken dan het 'buiten'-water waarmee het grachtensysteem kan worden ververst [8, 41].

Voor grote woon- en industriegebieden is aangetoond dat de neerslag door uitwassing van de onderste luchtlag, het grootste

TABEL I.

A. Verontreiniging van water uit regenwaterriolen in stedelijke gebieden.

B. Verontreiniging van overstortwater uit een gemengd rioolstelsel. Volgens Field en Struzeski [5].

A.		min.	max.
BOD	(mg/l)	1	> 700
COD	(mg/l)	5	3.100
zwevende + opgeloste stof	(mg/l)	450	14.600
organisch deel	(mg/l)	12	1.600
zwevende stof	(mg/l)	2	11.300
bezinkbare stof	(ml/l)	0,5	5.400
organische N	(mg/l)	0,1	16
NH <sub>3</sub> -N	(mg/l)	0,1	2,5
oplosbare PO <sub>4</sub>	(mg/l)	0,1	10
totaal PO <sub>4</sub>	(mg/l)	0,1	125
chloride	(mg/l)	2	25.000 *)
olie	(mg/l)	0	110
fenolen	(mg/l)	0	0,2
lood	(mg/l)	0	1,9
totaal aantal coliformen	per 100 ml	200	146 x 10 <sup>6</sup>
aantal faecale coliformen	per 100 ml	55	112 x 10 <sup>6</sup>
aantal faecale streptococci	per 100 ml	200	1,2 x 10 <sup>6</sup>

\*) Gladheidsbestrijding.

B.		min.	max.
BOD	(mg/l)	30	600
zwevende + opgeloste stof	(mg/l)	150	2.300
organisch deel	(mg/l)	15	820
zwevende stof	(mg/l)	20	1.700
bezinkbare stof	(ml/l)	2	1.550
pH		4,9	8,7
organische N	(mg/l)	1,5	33,1
NH <sub>3</sub> -N	(mg/l)	0,1	12,5
oplosbare PO <sub>4</sub>	(mg/l)	0,1	6,2
totaal aantal coliformen	per 100 ml	2 x 10 <sup>4</sup>	90 x 10 <sup>6</sup>
aantal faecale coliformen	per 100 ml	2 x 10 <sup>4</sup>	17 x 10 <sup>6</sup>
aantal faecale streptococci	per 100 ml	2 x 10 <sup>4</sup>	2 x 10 <sup>6</sup>

TABEL II - De waterkwaliteit van de grachten en in een rwa meetput in Lelystad (gemiddelde voor 1972). Volgens Greiner [8].

	grachtwater	meetput regenwaterriool bij uitstroompunt		
		neerslag ≥ 5 mm	neerslag < 5 mm	1 à 2 mm na 3 droge weken
MPN/100 ml	< 95 *)	—	—	—
N (NH <sub>4</sub> )	0,2 mg/l	0,6	1,5	3,4
N (Kjeldahl)	1,3 mg/l	—	—	5,6
P (PO <sub>4</sub> )	0,05 mg/l	—	—	0,78
P (totaal)	0,15 mg/l	0,1	0,3	0,95
COD	36,3 mg/l	16,9	32,8	105
BOD	2,2 mg/l	4,6	4,8	27
O <sub>2</sub>	11,5 mg/l	—	—	0,4
Cl	— mg/l	—	—	23
pH	—	—	—	6,9

\*) Gebaseerd op 3 monsters.

gehalte aan verontreiniging bevat in en dichtbij de stad [1, 27].

## 8. Retentiebekkens

Retentiebekkens, ook wel bergingsvijvers genoemd, kunnen nodig zijn, als de afvoercapaciteit van de waterloop waarop het stedelijk gebied loost, op de kritieke momenten te gering is. Zo kan zich de situatie voordoen waarbij de maximale capaciteit van een polderwatergang voor de afvoer behorende bij de berekeningsregen van het rioolstelsel onvoldoende is, terwijl

de aanpassing van de polderwatergang duurder is dan de aanleg van één of meer retentiebekkens.

In het geval van lozing op een rivier kan de hoogwaterstand de vrije lozing beperken of zelfs geheel beletten. Deze beide voorbeelden tonen aan dat de berekening van berging zowel voor het zomer- als voor het winterhalfjaar uitgevoerd moet worden omdat enerzijds de meest hevige regens in het zomerhalfjaar vallen, terwijl anderzijds de hoogwaterstanden van het buitenwater meestal in het winterhalfjaar optreden [22]. Voor de berekening van de bufferinhoud

wordt doorgaans een regen met grotere herhalingsstijd gekozen dan voor de berekening van de berging in het rioolstelsel omdat overschrijding van de bufferinhoud uitgebreide en langdurige wateroverlast in het stedelijk gebied kan veroorzaken [34]. Bovendien is de bemalingscapaciteit van een stadspolder in het algemeen veel kleiner dan die van een rioolstelsel. Als uitgangspunt voor de dimensioneringsberekeningen wordt vaak de situatie aangehouden met een gemiddelde herhalingsstijd van 1 x per 10 jaar. Vervolgens kan de benodigde bergingsoppervlakte worden berekend bij de toegestane stijging van de waterspiegel. Het is raadzaam om ook de te verwachten extra stijging te berekenen behorende bij een regenbui met een periodiciteit van 1 x per 25 of 1 x per 50 jaar.

Als ledigingstijd wordt vaak een etmaal genomen. Pecher stelt echter dat de ledigingstijd van retentiebekkens niet langer mag zijn dan 5 à 8 uren in verband met de mogelijke opeenvolging van buien [22]. Om dezelfde reden moet bij de capaciteitsberekeningen een maximale aanvoer van het onverharde oppervlak, hetzij via directe grondwaterafvoer, hetzij via het drainagestelsel, in rekening worden gebracht. Welke afvoer hiervoor als maatgevend moet worden beschouwd is discutabel. In de meetgebieden van Lelystad wordt een afvoer van 5 mm/etmaal (gerekend naar het onverharde oppervlak) zelden overschreden. De hoogste afvoer die hier is waargenomen bedroeg 7 mm/etmaal, d.i. 0,8 l/sec. ha en werd veroorzaakt door een regenbui met periodiciteit van ca. 1 x per 50 jaar.

Al naar gelang de plaats waar de bekkens in het rioolstelsel worden opgenomen, kunnen zij tevens dienst doen als slibvangers, het aantal overstortingen uit het gemengde stelsel verminderen of bij het gescheiden stelsel ervoor zorgen dat de neerslag slechts met beperkte frequentie rechtstreeks op het oppervlaktewater loost [14].

## 9. Aansluiting op waterloop landelijk gebied

In de vorige paragrafen is beschreven hoe het wateroverschot (inclusief het afvalwater) in verschillende deelstromen uit het stedelijk gebied wordt afgevoerd. Het aantal en de aard van deze deelstromen is afhankelijk van de natuurlijke gesteldheid en de gekozen inrichting van het gebied (afb. 1).

Bij een gescheiden rioolstelsel levert het dwa riool via de rioolwaterzuiveringsinstallatie (rzi) een min of meer gestage stroom water van bekende kwaliteit en het rwa riool een aanbod van water waarvan

de kwaliteit discutabel is en de hoeveelheid sterk kan wisselen.

Met andere woorden deze laatste deelstroom is in sterke mate bepalend voor kritieke situaties in de waterlopen van het landelijk gebied.

Bij het gemengde stelsel vormt de afvoer van de rzi een in veel mindere mate constante stroom maar veroorzaken de overstorten toch de piekafvoeren die kritiek kunnen zijn voor deze waterlopen. Bovendien is het overstortingswater van slechte kwaliteit. Het regenwateroverschot van het onverharde oppervlak levert water van onverdachte kwaliteit, tenzij er uitwassing van opgespoten (zee-)zand optreedt of het wordt vermengd met kwelwater, waardoor er kans bestaat op zoutbezwaar. Dit water kan hetzij rechtstreeks naar het grondwater of een waterloop afvloeien hetzij via drains naar een landelijke of stedelijke waterloop worden afgevoerd.

Nagegaan zal moeten worden of het lozen van bovengenoemde afvoeren zonder meer mogelijk is. Is dit niet het geval, dan zal onderzocht moeten worden welke oplossing zowel in ecologisch als in economisch opzicht optimaal is [38]. Voor de berekening zal de totale afvoer uit het stedelijk gebied behorende bij de maatgevende situatie (bijv. 1 x per 10 jaar) gesuperponeerd moeten worden op de afvoer van het landelijk gebied.

Weliswaar zal tussen beide piekafvoeren, veroorzaakt door dezelfde bui, een faseverschil optreden, maar omdat er een zekere persistentie in weertype bestaat (autocorrelatie tussen regenbuien) is het mogelijk dat de topafvoer van een regenbui uit het landelijk gebied samenvalt met de topafvoer van een volgende bui uit het stedelijk gebied. Voor de berekening van de hoogwatergolf uit het landelijk gebied zijn verschillende methoden ontwikkeld die in de literatuur zijn beschreven [37].

Ook het golfverloop in niet-permanente omstandigheden kan worden berekend [35]. Al naar gelang de omstandigheden zal de kritieke situatie in het winter- of in het zomerhalfjaar optreden. Als deze wordt overschreden zal een of ander vertragsmechanisme moeten worden ingebouwd, zoals in de vorige paragraaf is beschreven. De schrijver is veel dank verschuldigd aan: het KNMI voor het verstrekken van de neerslaggegevens van De Bilt en de zes andere in par. 2 genoemde regenstations voor de periode 1896 - 1973; de heer G. A. Ven (Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders) die de computerprogramma's schreef voor het rekenwerk m.u.v. dat voor afb. 6; drs. G. F. A. van Zuylen (Universiteit van

Amsterdam) voor de door hem gemaakte opmerkingen.

Het rekenwerk voor afb. 6 werd uitgevoerd op de EL X8 computer van het Mathematisch Centrum te Amsterdam, het overige op de Control Data Cyber 73 van SARA en een tafelcomputer (HP 30).

### Samenvatting

Bij de waterbeheersing in stedelijke gebieden spelen zowel kwantitatieve als kwalitatieve aspecten een rol. Wat betreft de kwantitatieve aspecten rijst allereerst de vraag of we voldoende zijn geïnformeerd over de kans van voorkomen van buien met hoge intensiteiten en of deze kans in het stedelijk gebied al of niet groter is.

Uit een analyse van de halfjaarlijkse neerslagsommen van De Bilt en een zestal naburige stations in het landelijk gebied blijkt geen (toenemende) invloed van het stadsklimaat van Utrecht op de totale hoeveelheid neerslag in De Bilt. Om neerslaggegevens als invoer in een model te kunnen gebruiken, geven buitotalen onvoldoende informatie. Van belang zijn dan de deelhoeveelheden per tijdvak van bijv. enkele minuten (intensiteiten). Daar de neerslag zowel naar tijd als naar plaats verandert, moeten de intensiteiten van de gebiedsneerslag bekend zijn. Hoe klein het tijdvak nog kan worden gekozen, kan worden bepaald als de correlatie tussen intensiteiten op verschillende punten in het gebied bekend is. Inloop- en afvoerhydrogram en de ontwatering van wel en niet gedraineerde wegen worden geïllustreerd aan de hand van gegevens van meetgebieden in Lelystad. Van twee dorpen in Oostelijk Flevoland wordt het gemeten aantal overstortingen vergeleken met de stippengrafiek van Kuipers.

De kwalitatieve aspecten van een gescheiden rioolstelsel, waarbij het regenwaterriool loost op het open water in de stad, worden eveneens besproken aan de hand van metingen in Lelystad.

### Literatuur

1. Andersson, T. *Small-scale variations of the contamination of rain caused by washout from the lower layers of the atmosphere*. Tellus XXI, 1969, 5.
2. Berg, J. A. van den, *Neerslagmetingen in een stedelijk gebied*. Flevovericht nr. 88, RIJP, 1973.
3. Berg, J. A. van den, *Neerslag-afvoerrelaties* (publicatie in voorbereiding).
4. Bruin, H. A. R. de, *Gegevens betreffende neerslag en verdamping verzameld in Salland gedurende 1970-1972 ten behoeve van de Werkgroep Hydrologisch Onderzoek Overijssel*. WR nr. 73-4, KNMI 1973.
5. Field, R., Struzeski, E. J., *Management and control of combined sewer overflows*. J. Water Pollution Control Federation (44) 1972, nr. 7.
6. Gameson, A. L. N., Davidson, R. N. *Storm-*

*waterinvestigations at Northampton*. J. Institute of Sewage Purification nr. 2, 1963.

7. Georgii, H. W. *Kondensationskerne-Wolkenkerne*. Promet 1972 4.
8. Greiner, R. W. *Het verversingssysteem van de grachten te Lelystad*. Werkdocument 1974 - 113 Bbw, RIJP.
9. Herik, A. G. van den, Kooistra, M. T. *5-minuten regens*. H<sub>2</sub>O (3) 1970, nr. 21.
10. Hobbs, P. V., Radke, L. F., Shummway, S. E. *Cloud condensation nuclei from industrial sources and their apparent influence on precipitation in Washington State*. J. Atmosph. Sci. 27, 1970.
11. Huff, F. A., Changon, S. A., Lewis, T. A. *Climatological assessment of urban effects on precipitation*. Conference on air pollution meteorology of the Am. Met. Soc. in cooperation with Air Pollution Control Association, april 5-9, 1971. Raleigh, North Carolina. Am. Met. Soc. Boston 1971, Massachusetts.
12. Hutchinson, P. *Accuracy of estimates of daily areal mean rainfall*. Weather 1971.
13. KNMI. *Detailanalyse van Pluviogrammen A*.
14. Koot, A. J. C. *Riolering en waterverontreiniging*. H<sub>2</sub>O (5) 1972, nr. 25.
15. Krajenhof van de Leur, D. A. *Runoff models with linear elements*. Proc. and informations nr. 13. TNO, Den Haag, 1966.
16. Kregten, S. J. van, *Regengegevens ten behoeve van de berekening van rioleringen*. H<sub>2</sub>O (5) 1972, nr. 20.
17. Kockmond, W. C., Mack, E. J. *The vertical distribution of cloud and airtken nuclei downwind of urban pollution sources*. J. Appl. Met. 11, 1972.
18. Levert, C. *Frequentie van k-daagse neerslagsommen op Nederlandse stations*. KMNI, 1963.
19. Maarleveld, G. C. *Mondelinge mededeling*.
20. Nes, T. J. van de, *Linear analysis of a physically based model of a distributed surface run-off system*. Agricultural Research Report 799. Wageningen, 1973.
21. Pecher, R. *Der Abflussbeiwert und seine Abhängigkeit von der Regendauer*. Dissertation, Technische Hochschule München, 1969.
22. Pecher, R. *Einfluss der Niederschlagsereignisse und des Einzugsgebietes auf die Bemessung von Regenrückhaltebecken, Regenklärbecken und Regenüberläufen*. Wasserwirtschaft, 63, 1972, 2.
23. Popta, T. van, *Regenwaterafvoerstelsels voor satellietsteden van Parijs*. De Ingenieur, jrg. 85, nr. 24, 1973.
24. Rapport van de Commissie Riolering en Waterverontreiniging van de afdeling voor gezondheidstechniek van het KIVI. H<sub>2</sub>O (5) 1972 nr. 10 en 11.
25. Ribbuis, E. J. *Waterverontreinigingen door regenoverstorten*. Publieke Werken (19) 1951.
26. Schmuck, A. *The effect of cities on atmospheric precipitation* (on the example of Wrocław). Rev. of Geoph. 12, 1967.
27. Scholte Ubink, D. W. *Opmerkingen bij 'Riolering en waterverontreiniging'* (Koot) H<sub>2</sub>O (5) 1972, nr. 25.
28. Smid, J. E. *Het rioleringsstelsel in onze woonkernen*. Flevovericht nr. 45, RIJP 1964.
29. Stoeckeler, J. H., Weitzman, S. *Infiltration rates in frozen soils in northern Minnesota*. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 24 1960.
30. Stol, P. T. *The relative efficiency of the density of raingauge networks*. Journ. of Hydrology, Vol. XV, no. 3, 1972.
31. Talsma, A. *Het bepalen van regenduurlijnen voor perioden van 5 tot 90 minuten*. H<sub>2</sub>O (2) 1969, nr. 13.



32. Terlieu, B., Gagin, A. *Cloud condensation nuclei and their possible influence on precipitation*. J. appl. Met. 10 1971.
33. Timmerman, H. *The influence of topography and orography on the precipitation patterns in the Netherlands*. KNMI, Med. en verhandelingen nr. 80, 1963.
34. Veldkamp, F. B. *Problemen van waterafvoer in stedelijke gebieden*. Proc. and informations nr. 9. TNO, Den Haag, 1963.
- 34A. Voortman, B. R. *Onderzoek naar de af- en ontwatering van wegen te Lelystad*. Werkdocument 89 B1 RIJP, 1974.
35. Warmerdam, P. M. M. *Niet stationaire stromingen in open waterlopen*. Ingenieurscriptie mei 1971, LH Wageningen.
36. Watkins, L. H. *Research on surface-water drainage*. Proc. Institution of Civil Engineers 1963.
37. Werkgroep Afvloeiingsfactoren. *Tweede interimrapport*, 1970.
38. Werkgroep Afvoerfactoren Stedelijke Gebieden. *Kwantitatieve aspecten van de afvoer van stedelijke gebieden*. Interimrapport 1973.
39. Zuylen, G. F. A. van, *Stadsklimaten*. Fysische geografie, aspecten van het landschapsonderzoek, 1973.
40. Zuylen, G. F. A. van, *Is de mens bezig het wereldklimaat te beïnvloeden?* KNAG Geografisch Tijdschrift VII (1973) nr. 5.
41. Zwierstra, L. J. *Verversing grachten in Lelystad*. Intern Rapport nr. 122 RIJP, 1968.

