

Regengegevens ten behoeve van de berekening van rioleringen

1. Inleiding

Bij het ontwerpen en de berekening van rioleringen wordt gebruik gemaakt van regengegevens, die de basisgegevens van het ontwerp moeten verschaffen. Hierbij zal moeten worden voldaan aan de eisen van voldoende afwatering van het verhard oppervlak, maar ook aan de eisen van de kwantiteits- en kwaliteitsbeheerder van het open water, waarop wordt geloosd. De te stellen eisen worden uitgedrukt in grootheden, zoals b.v. overstortingsfrequentie of overstortingshoeveelheden.

De grootheden, waarom het hier gaat, zullen eerst worden behandeld. Vervolgens zal het mathematische model, waarmee deze grootheden worden bepaald, worden beschouwd. Dit model geldt voornamelijk voor rioleringen in vlakke gebieden. Daarna volgt een kritische beschouwing van de traditionele methoden voor de bepaling van de gewenste grootheden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van krommen van het type Braak en van de stippengrafiek van Kuipers.

Nadelen, verbonden aan deze methoden, vormden de aanleiding om te trachten de berekeningsmethoden te verbeteren. Dit geschiedt door de regen niet min of meer op zich zelf te beschouwen, maar steeds in verband te brengen met de riolering. Daartoe is de regen van de 5-minuten analyse van pluviogrammen van de Bilt over een periode van 12 jaar met behulp van de computer door het mathematische model gevoerd.

Deze recente onderzoeken zullen worden beschreven. Een overzicht van de eerste resultaten wordt gegeven. Daarbij worden de resultaten zoveel mogelijk vergeleken met elders verkregen uitkomsten van overeenkomstige onderzoeken en met de uitkomsten van de traditionele methoden.

In de nabeschuiving wordt tenslotte nagegaan wat de analyse nog verder zou kunnen opleveren en wat men met deze analyse nog niet te weten kan komen.

2. Te bepalen grootheden

De riooltechnicus zal bij het ontwerpen van rioleringen te maken krijgen met grootheden als frequentie van water op straat, duur van water op straat en hoeveelheid van water op straat. Deze grootheden bepalen voornamelijk de afvoerkapaciteit, waarop hij zijn riolering zal gaan ontwerpen. Daarnaast zal hij te maken krijgen met de eisen van de beheerders van het open water, waarop zal worden geloosd. Deze eisen worden geformuleerd door grootheden als overstortingsfrequentie, overstortingshoeveelheid en overstortingsduur voor zover het het kwaliteitsbeheer betreft. De kwantiteitsbeheerder zal ook in de overstortingsfrequentie zijn geïnteresseerd, maar daarnaast in de overstortingshoeveelheid in korte tijd of overstortingsintensiteit (het uitloophydrogram), voorts de overstortingshoeveelheid in lange tijd (seizoen, jaar) en de hoeveelheid regenwater via de zuiveringsinstallatie. Bovendien is hier van belang de vraag hoeveel meer water van stedelijk dan van landelijk gebied moet worden afgevoerd. Van vele van de genoemde groot-

heden is het wenselijk de variatie binnen de dag of binnen het jaar per seizoen te kennen.

Speciale vraagstukken doen zich voor bij de bepaling van de inhoud van bergreservoirs of van de afmetingen van bergsloten.

Een overzicht van de genoemde grootheden wordt gegeven in tabel I.

TABEL I - Overzicht van de grootheden, waar het om gaat

riooltechnicus	beheerder van open water	
	kwaliteit	kwantiteit
1. frequentie van water op straat	4a. overstortingsfrequentie	4b. overstortingsfrequentie
2. duur van water op straat	5a. overstortingshoeveelheid	5b. overstortingshoeveelheid in korte tijd (uitloophydrogram) of lange tijd (seizoen, jaar)
3. hoeveelheid water op straat	6. overstortingsduur	7. hoeveelheid regen, die via de zuivering wordt geloosd
		8. hoeveelheid regen, die meer van stedelijk dan van landelijk gebied moet worden geloosd
Speciale grootheden:	9. inhoud van bergreservoirs	10. afmetingen van bergsloten

De grootheden 7 en 8 zullen hier verder buiten beschouwing blijven omdat deze niet met de hier te bespreken methoden zijn te bepalen.

3. Het mathematisch model

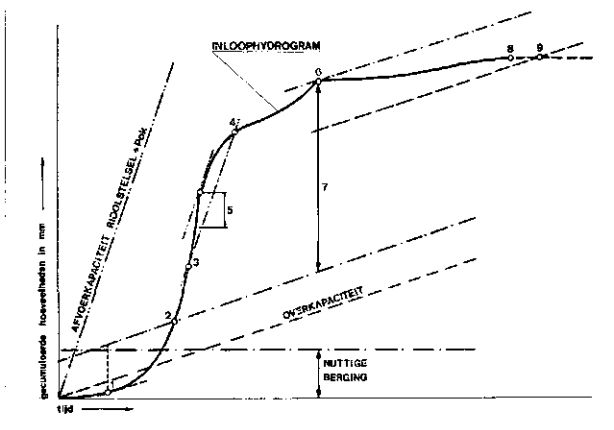
Het mathematisch model, dat zowel bij de gebruikelijke methoden als bij de recente onderzoeken wordt toegepast, is dat van een reservoir met een zekere inhoud, de berging, waaruit met een konstante capaciteit, de overkapaciteit, wordt gepompt zodra het reservoir zich begint te vullen, en waaruit water kan wegstromen via overstorten, die pas werken als het reservoir vol is. Dit model past zeer goed op rioolstelsels in vlakke gebieden, waar de rioolbuizen zich geheel onder de overstortdrempels bevinden. Hier mag inderdaad worden aangenomen dat het reservoir van de rioolbuizen bij regen geleidelijk wordt gevuld via de straatkolken, en als het reservoir vol is kan slechts water binnenstromen als er gelijktijdig evenveel water via de overstorten de riolering weer verlaat. De riolering reageert vrijwel onmiddellijk op elke verandering van de invoer. Dit biedt het voordeel, dat de riolering berekend kan worden met de formules voor permanente stromingen.

In het eerste begin van een regenbui wordt het verharde oppervlak bevochtigd en wordt een verhang van de waterspiegel opgebouwd om stroming van het regenwater naar de straatkolken mogelijk te maken. Een deel van de regen zal daarbij de riolering niet bereiken als gevolg van berging in lagere delen van het verharde oppervlak,

op daken en in goten. Dit geborgen water zal na de regen geleidelijk weer verdampen. De regen wordt gedurende dit proces vervormd van pluviogram tot inloophydrogram van het rioolstelsel. De kwantificering van deze vervorming is nog een vraagstuk, waarvan weinig bekend is, en meestal worden dan ook pluviogram en inlaathydrogram bij rioleringsberekeningen aan elkaar gelijk gesteld.

Als illustratie van hetgeen verder met de regen in de riolering geschiedt wordt verwezen naar afb. 1. Horizontaal is in dit diagram de tijd sinds het begin van de bui uitgezet, vertikaal de gesommeerde hoeveelheden binnenstromend water in mm over het gehele verharde oppervlak. Het verharde oppervlak is daarbij gedefinieerd als het deel van het totale stedelijke gebied, dat geheel op de riolering afwatert. In het diagram zijn ook aangegeven de berging, de inhoud van het rioolstelsel beneden de overstortdempels, eveneens in mm over het verharde oppervlak, en de overcapaciteit alsmede de afvoerkapaciteit van het stelsel in mm/uur, d.i. de grootste afvoer die de riolering zonder water op straat kan verwerken. Het begin van de vulling treedt op zodra de intensiteit van de aanvoer groter begint te worden dan de overcapaciteit (punt 1 in het diagram). Als de sinds dat moment aangevoerde hoeveelheid water gelijk is aan de berging vermeerderd met de verpompte hoeveelheid water is het reservoir vol en dan begint het overstorten (punt 2). Water op straat komt voor als de intensiteit van de regenaanvoer groter is dan de afvoerkapaciteit van de riolering, vermeerderd met de overcapaciteit. Dat begint in punt 3 en eindigt in punt 4. Gedurende het verschijnsel van water op straat zal het verhang vlakbij de overstorten veel groter kunnen zijn dan het berekende verhang. Daarbij kunnen gedurende korte tijd hogere afvoeren optreden dan overeenkomt met de bij de berekening van het stelsel gebruikte afvoerkapaciteit, vermeerderd met de overcapaciteit van de pompen (Pok.). Deze overcapaciteit wordt hierbij vaak verwaarloosd als klein zijnde in vergelijking met de afvoerkapaciteit. De grootste hoeveelheid water op straat treedt op daar waar de verticale afstand tussen de lijn 3-4 en het inloophydrogram het grootste is, in het diagram aangegeven door de verticale afstand 5. Het einde van de overstorting wordt aangegeven door het punt 6, waar de aanvoerintensiteit en de overcapaciteit aan elkaar gelijk zijn. Daar begint de lediging van het reservoir. In dat punt kan ook de totale hoeveelheid overgestort water worden gemeten

Afb. 1 - Het verband tussen regen, berging en overcapaciteit met de verschillende voor rioleringen belangrijke grootheden.



als het verschil van de aangevoerde hoeveelheid regenwater en de berging, tezamen met de sinds het begin van de vulling verpompte hoeveelheid water. Deze hoeveelheid overstortend water wordt aangegeven door de verticale afstand 7.

In punt 8 eindigt de aanvoer van regen. Het rioolstelsel is weer leeg als vanaf het begin van de lediging (punt 6) een hoeveelheid water is verpompt gelijk aan de berging vermeerderd met de aanvoer sinds het begin van de lediging (punt 9).

Voorts kan men in het diagram nog vinden de grootste intensiteit van het overstortende water, indien zich geen water op straat bevindt, als de grootste helling van de aanvoerlijn tussen begin (punt 2) en einde van de overstorting (punt 6).

De horizontale afstand tussen de punten 1 en 2 geeft de vullingstijd van de riolering, die tussen de punten 2 en 6 de overstortingsduur, die tussen de punten 3 en 4 de duur van water op straat, en de horizontale afstand tussen de punten 6 en 9 de ledigingstijd van de riolering.

4. Traditionele methoden

4.1. Theoretische regenkrommen

Het gaat hier om krommen, die het verband geven tussen de hoeveelheid regen en de tijd, waarin deze regen valt, voor een bepaalde waarde van de gemiddelde herhalings-tijd (ook wel periodiciteit genoemd). Dergelijke krommen geven niet de verdeling van de regenhoeveelheid binnen een bui. Naast elkaar liggende punten zullen in het algemeen ontleend zijn aan verschillende buien. De krommen zijn getrokken door punten, die ieder voor zich zijn bepaald uit de frekwentieverdeling van regens gedurende de bij dit punt behorende tijd. Bepaalt men de frekwentie van de hoeveelheden regen in een werkelijk gevallen regenbui, dan zal men bij verschillende regenduur ook zeer verschillende waarden van de gemiddelde herhalings-tijd vinden, en ergens zal men de grootste waarde van die tijd vinden. In dat punt zal de werkelijke regenkromme raken aan de theoretische regenkromme voor dezelfde waarde van de gemiddelde herhalings-tijd en in alle andere punten zal de werkelijke regen kleinere hoeveelheden geven dan de bijbehorende theoretische regenkromme. Deze theoretische regenkrommen zijn omhullenden van werkelijke buien.

Men kent drie typen van theoretische regenkrommen:

- die welke zijn gekonstrueerd uit de meest intensieve delen van de buien;
- die welke de regenhoeveelheid geven sinds het begin van de bui of buiencombinaties;
- een menging van de typen a en b.

De gedachte dergelijke krommen op te stellen is sterk verbonden met de rationele methode ter bepaling van de afvoer. Deze theorie gaat uit van de veronderstelling, dat de grootste afvoer in een bepaald punt van een afvoerstelsel zal worden veroorzaakt door de gemiddelde regenintensiteit in de concentratietijd, d.i. de tijd nodig voor een afvoergolf om van het meest bovenstroomse punt in het beschouwde punt te komen. Men vindt dan ook vaak in plaats van de regenhoeveelheid de gemiddelde intensiteit uitgezet. De rationele methode vindt ook in de riolerings-techniek nog toepassing, vooral in hellende gebieden. Later is men de theoretische regenkrommen ook voor andere vraagstukken gaan toepassen.

De regenkrommen, waarvan hier sprake is, worden gebruikt voor bepaling van overstortingshoeveelheden ge-

durende verschillende tijden, voor de vaststelling van de inhoud van bergreservoirs, en ook voor de bepaling van de afmetingen van bergsloten (de grootheden 5, 9 en 10 van tabel I).

Hier te lande wordt veel gebruik gemaakt van de krommen van Braak [1]. Deze krommen zijn van het gemengde type c.

Tot regenduren van 1 uur is gebruik gemaakt van het meest intensieve deel van de buien, tussen 1 uur en 1 dag zijn gehele buien of delen van buien gebruikt, voor één of meer dagen is met de dagregenvallen gerekend.

Veel worden ook de krommen van Reinhold [2] toegepast, die tot het type a behoren. Deze krommen zijn opgesteld voor tijden tot 90 minuten en geven voor langere tijden te lage regenhoeveelheden.

Minder bekend zijn de krommen van Levert [3] voor tijden tot 70 minuten van het type b.

Van recente datum zijn de krommen van het type a en b, gepubliceerd door Van den Herik en Kooistra [6].

Het gebruik van theoretische regenkrommen heeft nogal wat bezwaren. Grote afwijkingen zijn te verwachten als men de krommen als standaard regenbui beschouwt en daarmee via het besproken model het uitloopdiagram bepaalt ten einde daarmee open waterlopen of bergsloten te berekenen (vraagstuk 5b en 10 van tabel I). Dit zijn problemen, waarbij zowel berging als stroming in de open waterloop een rol spelen. Minder bezwaren zal men onder vinden als het alleen om berging gaat, zoals bij de vaststelling van overstortingshoeveelheden gedurende bepaalde tijd of van de berging in bergreservoirs (vraagstuk 5 en 9). In principe is het slechts geoorloofd bij toepassing van theoretische regenkrommen één punt tegelijk bij berekeningen te gebruiken. De combinatie van 2 punten zal een veel kleinere kans hebben dan overeenkomt met de gemiddelde herhalingstijd van de kromme. Men gebruikt bij genoemde vraagstukken echter behalve het punt van de kromme, dat de overstortingshoeveelheid of de berging oplevert, ook het punt waar de vulling van het reservoir begint. Dat punt is in wezen onbekend en men neemt daarom eenvoudigheidshalve maar aan, dat dit op het tijdstip 0 valt. Bij krommen van het type a komt dit neer op onbekendheid met het deel van de berging, dat op het tijdstip 0 al gebruikt is door voorgaande regen. Bij krommen van het type b kan het tijdstip van het begin van de vulling en van het met volle capaciteit aanslaan van de pompen naar een later tijdstip zijn verschoven. De gewenste hoeveelheid overstortingswater of de berging kunnen daardoor te klein zijn. De fouten, die men hierbij maakt zijn in vele gevallen vermoedelijk toelaatbaar. Welke fouten men maakt, kan slechts worden gekonstateerd door met werkelijk voorgekomen regenbuien te werken.

4.2. De stippengrafiek van Kuipers

Een ander hulpmiddel voor de bepaling van een aantal van de in tabel I opgesomde grootheden is de stippengrafiek van Kuipers [4] [7]. Vertikaal is de hoeveelheid regen van elke aaneengesloten bui uitgezet tegen horizontaal de duur van de bui. Dat is gedaan voor alle buien groter dan 4 mm gedurende de jaren 1926 - 1962. Bij het gebruik van deze grafiek wordt van de volgende vereenvoudigende veronderstellingen uitgegaan:

a. De intensiteit van de regen wordt konstant verondersteld. Dat betekent een lineair verloop van de hoeveelheid regen met de tijd.

b. De overcapaciteit komt direkt bij de aanvang van de bui in werking.

c. De riolering is leeg bij het begin van de regen.

Met behulp van deze stippengrafiek of daarvan afgeleide grafieken bepaalt men grootheden als overstortingsfrequentie, overstortingsduur en overstortingshoeveelheid (no. 4, 6 en 5 van tabel I).

De overstortingsfrequentie wordt gegeven in de vorm van het gemiddeld aantal overstortingen per jaar. In de werkelijkheid zal dit aantal groter zijn als gevolg van het verwaarlozen van de invloed van opeenvolgende buien, die ieder voor zich geen overstorting zouden geven, maar dat in combinatie wel doen. Bovendien kunnen door afwijking van het veronderstelde lineaire verloop van de regen meer overstortingen optreden, voorts kan dit aantal worden vergroot doordat het tijdstip waarop de volle overcapaciteit in werking treedt later ligt dan het begin van de bui. Als verlagende faktor van het aantal overstortingen moet genoemd worden de niet-konstante overcapaciteit.

De overstortingsduur per regenbui kan in de werkelijkheid zowel langer als korter zijn door de afwijking van de lineaire vorm. De overstortingshoeveelheid per bui kan volgens de stippengrafiek te laag zijn, de totale hoeveelheid overstortingswater per jaar echter des te meer, omdat ook nog overstortingen worden gemist.

Voor de bepaling van grootheden, die verband houden met water op straat (de grootheden 1, 2 en 3 van tabel I) lenen de beide hier genoemde traditionele methoden zich minder omdat het daarbij juist gaat om de vorm van de regenbui gedurende de periode van overstorting.

Evenals bij theoretische regenkrommen moet hier de conclusie zijn, dat de invloed van de gekonstateerde afwijkingen slechts is vast te stellen door de werkelijk voorgekomen buien in de berekeningen te betrekken.

5. Recente onderzoeken

Uit het voorgaande bleek, dat de bezwaren van de daar behandelde rekenmethoden slechts te vermijden zijn door uit te gaan van de werkelijke regenbuien. Dat is mogelijk sinds het KNMI de beschikking heeft over de analyse van pluviogrammen van het regenstation de Bilt over de jaren 1928, 1931 en 1951-1960, in totaal 12 jaar. Voor elk tijdvakje van 5 minuten met regen is een ponskaart gemaakt met de regenval in dat tijdvakje, in totaal ruim 75.000 ponskaarten. Het KNMI heeft frequentietabellen voor regens of delen van regens van verschillende duur gepubliceerd [5], die voor ons doel van minder belang zijn, omdat de volgorde van de opeenvolgende regenhoeveelheden daarbij verloren gaat. Daarom zijn deze ponskaarten opnieuw bewerkt door deze regens opnieuw door het reeds beschreven mathematische model te voeren.

Dit onderzoek werd verricht in samenwerking met ir. A. Talsma, indertijd student-assistent bij de vakgroep Gezondheidstechniek van de Technische Hogeschool te Delft. Een belangrijke bijdrage tot de resultaten werd geleverd door de heer Chr. Vree Ing., die een groot aandeel had in de opstelling van het benodigde computerprogramma en bij de uitwerking van de resultaten, daarbij bijgestaan door mevr. ir. I. D. van Hemert-Krbavac. Ook elders werd een dergelijk onderzoek verricht en gepubliceerd door Van den Herik en Kooistra in 1970 [6]. Bij beide onderzoeken werd uitgegaan van hetzelfde materiaal van de 5-minuten analyse. Er waren echter

verschillen in de wijze van uitwerking. Zo werd in [6] het gehele kaartenmateriaal door de computer gevoerd voor alle gewenste combinaties van berging en overkapaciteit. In ons onderzoek is getracht eerst van een groot aantal ponskaarten af te komen van regens of combinaties daarvan, die toch geen overstortingen zouden kunnen geven. Daartoe werden buien gekombineerd tot één buiencombinatie indien de droge tussentijd minder dan 20 uur bedraagt. Die tussentijd van 20 uur is gekozen omdat mag worden verwacht, dat de riolering in die tijd wel weer leeg zal komen en een volgende buiencombinatie daarna weer met een leeg reservoir kan beginnen. De buiencombinaties, die bij een kleinste berging van 4 mm en een overkapaciteit van 0,2 mm/uur geen overstorting geven, werden weggelaten. Zodoende bleven 317 buiencombinaties over.

Gesteld moet worden, dat door deze verschillende wijze van aanpak geen verschil in de resultaten kan optreden voor zover de riolering niet in langer tijd dan die 20 uur tussentijd van de buien leeg zou komen.

Voor deze buiencombinaties is een computer programma samengesteld, dat per buiencombinatie alle gewenste gegevens direkt uitvoert, waarbij bergingen van 4 tot 14 mm zijn gekombineerd met verhoudingen van berging tot overkapaciteit van 4 tot 20 uur.

De invoering van deze verhoudingen (en niet waarden van de overkapaciteit) geschiedde om automatisch bij grotere bergingen ook grotere waarden van de overkapaciteit te verkrijgen.

De korte periode van 12 jaar, waarop de konklusies moeten worden gebaseerd, stelt problemen. In [6] wordt aandacht aan dit vraagstuk besteed. Daarbij worden de gemiddelde aantallen overstortingen per jaar en de totale gemiddelde jaarlijkse overstortingshoeveelheid bepaald volgens de stippengrafiek van 37 jaar en vergeleken met de resultaten van de hiertoe samengestelde stippengrafiek voor dezelfde periode als de 5-minuten analyse. Men komt daarbij tot de konklusie, dat de periode van 12 jaar van de 5-minuten analyse redelijk representatief is voor het aantal overstortingen per jaar, maar dat de gemiddelde overstortingshoeveelheid per jaar iets aan de lage kant is.

In het volgende zullen een aantal resultaten van ons onderzoek worden gegeven. Overal waar dit mogelijk was, zijn deze resultaten vergeleken met die volgens de traditionele methoden en met die uit de publicatie [6].

6. Resultaten

6.1. Overstortingsfrequentie

Eerst zal de vraag moeten worden beantwoord, wat als overstorting moet worden beschouwd, m.a.w. de definitie van een overstorting zal moeten worden vastgesteld. In de stippengrafiek kan elke bui, d.i. een voortdurende en onafgebroken regen, wegens het veronderstelde lineaire verloop slechts één overstorting geven. In de werkelijkheid kan een aaneengeschaalde regen meerdere deeloverstortingen geven. Het totaal aantal overstortingen volgens de stippengrafiek gedeeld door het aantal waarnemingsjaren, thans 37, geeft het gemiddeld aantal overstortingen per jaar en dit getal wordt gehanteerd als norm.

Bij het onderzoek volgens [6] sluit men geheel aan bij het in de stippengrafiek toegepaste criterium van een overstorting. Deeloverstortingen binnen een bui worden bij elkaar getrokken tot één overstorting. Echter wordt wel rekening gehouden met de vorm van de regen

en met de invloed van opeenvolgende regens op het aantal overstortingen. Elke nieuwe regen kan weer een nieuwe overstorting geven. Aldus ontkomt men aan de bezwaren van de stippengrafiek en kan de invloed van de beperkingen van de stippengrafiek worden vastgesteld. Te verwachten is, dat daarmee het aantal overstortingen zal toenemen. Door ons is een ander criterium voor een overstorting gehanteerd.

Of een volgende overstorting gevaar voor vervuiling oplevert hangt af van de tussentijd tussen het begin van deze overstorting en het einde van de vorige. Daarom is eerst de invloed van het weglaten van overstortingen binnen x uur na het einde van de vorige onderzocht, evenals de daarop nog weer binnen x uur vallende overstortingen, met x waarden van 5 minuten, 2, 4, 6, 10, 15 en 20 uur. Kiest men een waarde van 5 minuten, dan worden alle overstortingen geteld. In tabel II vindt men het aantal overstortingen voor elk van de waarnemingsjaren, alsmede het gemiddeld aantal overstortingen voor verschillende waarden van x en in geval van een berging van 7 mm en een overkapaciteit van 0,7 mm/uur. Het blijkt dan, dat bij een tussentijd, waarbinnen de deeloverstortingen worden verwaarloosd van 10 uur voor het gekozen voorbeeld nauwelijks sprake is van nog enige vermindering bij een keuze van meer dan 10 uur, terwijl ook naar de andere kant bij keuze van een kortere tijd het aantal overstortingen eerst nog nauwelijks toeneemt. De invloed van de keuze van die tijd op het gemiddeld aantal overstortingen per jaar voor het geval van 7 mm berging en verschillende waarden van de overkapaciteit wordt getoond in tabel III. De gevoeligheid voor de keuze van die tussentijd blijkt bij kleine waarden van de overkapaciteit groter dan bij hoge waarden.

TABEL II - Invloed van verwaarlozing van deeloverstortingen op het aantal overstortingen per jaar bij een berging van 7 mm en een overkapaciteit van 0,7 mm/uur.

jaar	aantal overstortingen per jaar bij verwaarlozing van de deeloverstortingen binnen:						
	20 uur	15 uur	10 uur	6 uur	4 uur	2 uur	5 min.
1928	7	7	7	7	8	10	20
1933	3	3	3	4	5	5	8
1951	10	10	10	10	11	11	16
1952	10	10	10	10	10	10	17
1953	6	6	6	6	6	6	8
1954	8	9	9	9	9	13	25
1955	8	8	8	8	9	9	20
1956	14	14	15	15	16	17	24
1957	16	16	18	18	18	19	24
1958	14	14	14	14	15	15	19
1959	5	5	5	5	5	5	7
1960	13	13	13	15	16	18	33
totaal	114	115	118	121	128	138	221
gem. per jaar	9,50	9,58	9,83	10,09	10,67	11,50	18,40

TABEL III - Invloed van het weglaten van deeloverstortingen op het gemiddeld aantal overstortingen per jaar bij een berging van 7 mm en verschillende waarden van de overkapaciteit

overkapaciteit in mm/uur	gemiddeld aantal overstortingen per jaar bij verwaarlozing van de deeloverstortingen binnen						
	20 uur	15 uur	10 uur	6 uur	4 uur	2 uur	5 min.
0,35	14,66	15,25	16,60	17,18	17,91	20,50	49,40
0,438	12,82	13,00	13,82	14,10	14,66	16,65	34,60
0,583	10,69	10,75	11,10	11,41	12,00	13,18	22,50
0,70	9,50	9,58	9,83	10,09	10,67	11,50	18,40
0,875	7,75	7,75	7,91	8,25	8,50	8,92	13,15
1,167	6,08	6,08	6,08	6,34	6,50	6,67	8,84
1,75	3,58	3,58	3,58	3,67	3,67	3,67	4,75

Dit zal ook bij kleine waarden van de berging het geval zijn. De tussentijd van 10 uur, waarbinnen volgende overstortingen niet worden medegedeld, is hier bij de te geven resultaten van ons onderzoek voorlopig arbitrair als criterium van een overstorting gekozen. Nader onderzoek zal nodig zijn ter rechtvaardiging van die tussentijd van

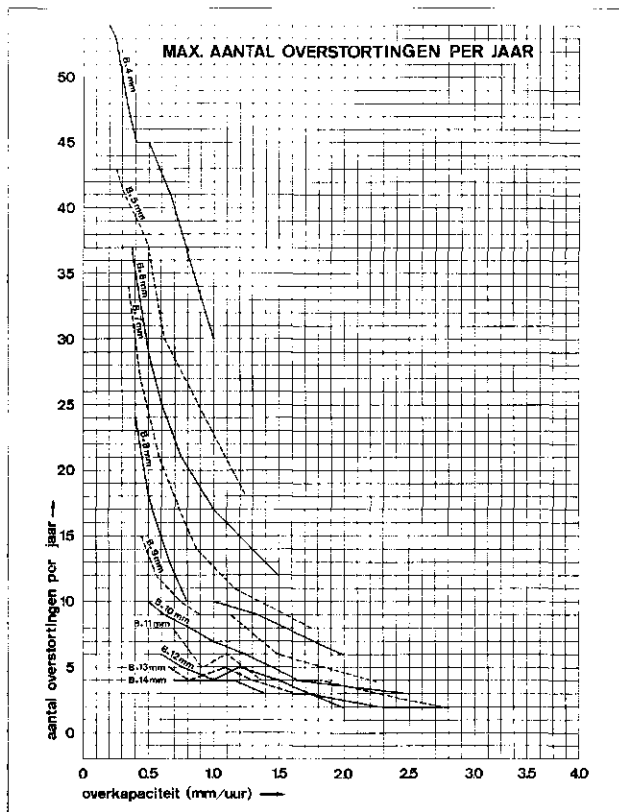
10 uur. Zo zal in het volgende steeds sprake zijn van dit 10-uur criterium bij het bepalen van het aantal overstortingen, tenzij dit uitdrukkelijk anders is vermeld.

In de afb. 2, 3 en 4 worden resp. het grootste, gemiddelde en kleinste aantal overstortingen per jaar over de beschouwde periode van 12 jaar gegeven voor verschillende waarden van de berging en overcapaciteit. Er is geen poging gedaan vloeiende krommen door de meetpunten te trekken.

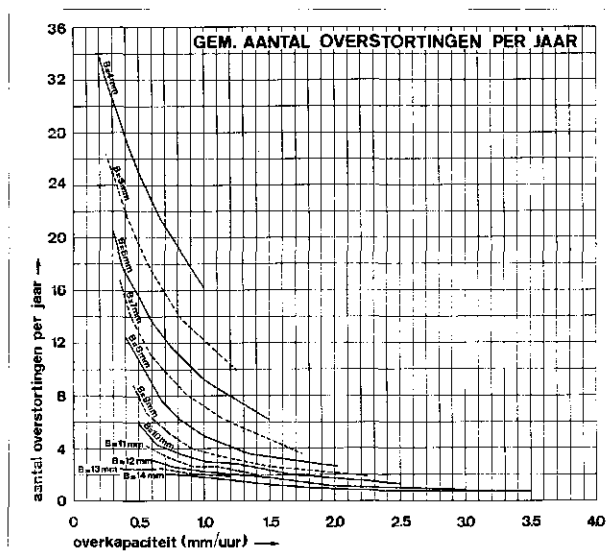
Het werkelijk voorkomende aantal overstortingen per jaar kan sterk afwijken van het gemiddeld aantal.

Vergelijken we nu het gemiddeld aantal overstortingen per jaar volgens de stippengrafiek met de resultaten volgens [6] en volgens ons onderzoek.

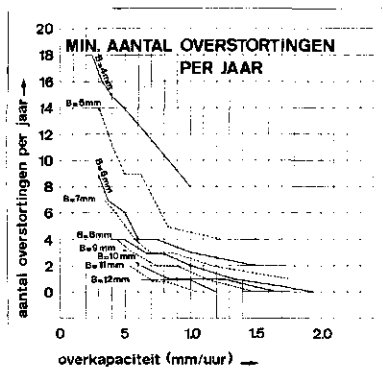
Afb. 5 geeft de vergelijking volgens stippengrafiek en



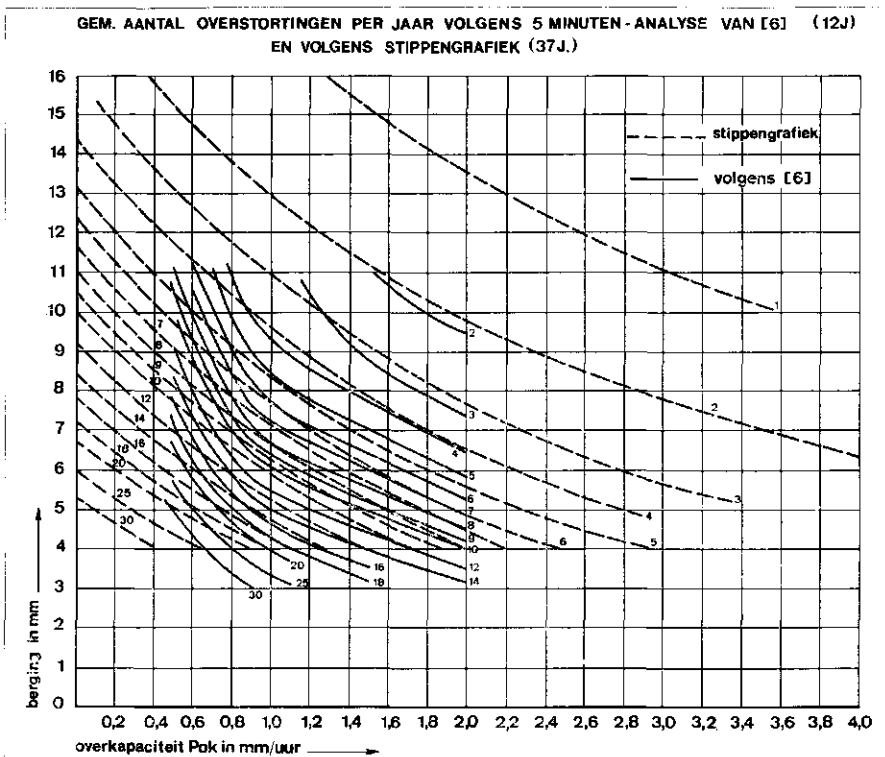
Afb. 2 - Grootste aantal overstortingen per jaar gedurende de beschouwde periode van 12 jaar.



Afb. 3 - Gemiddeld aantal overstortingen per jaar gedurende de beschouwde periode van 12 jaar.



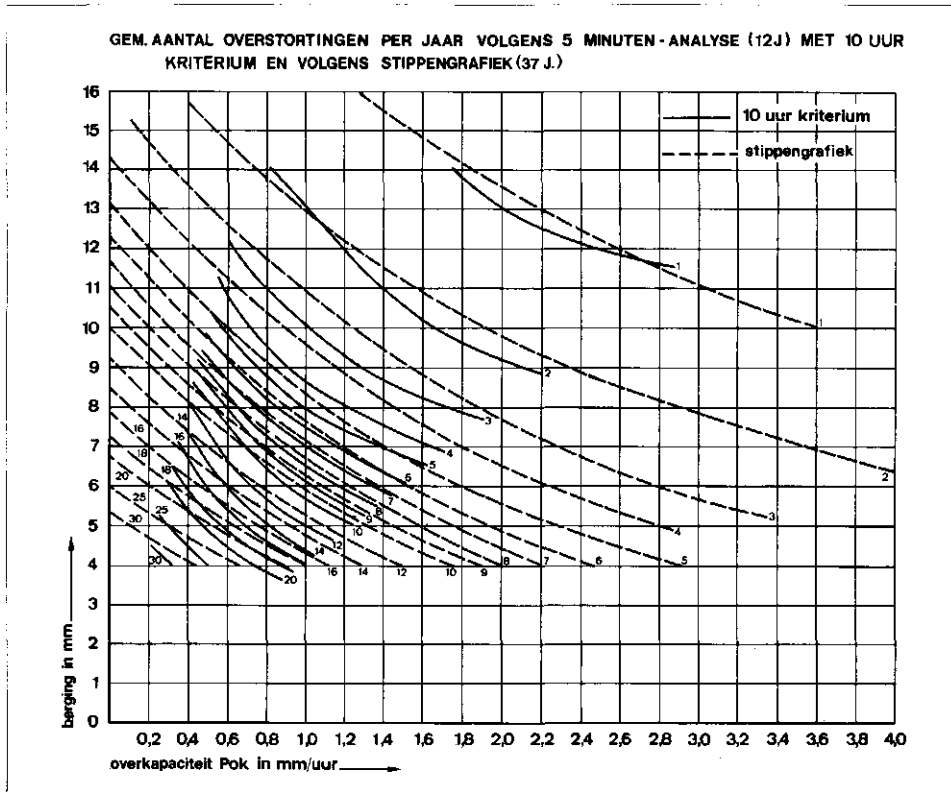
Afb. 4 - Kleinste aantal overstortingen per jaar gedurende de beschouwde periode van 12 jaar.



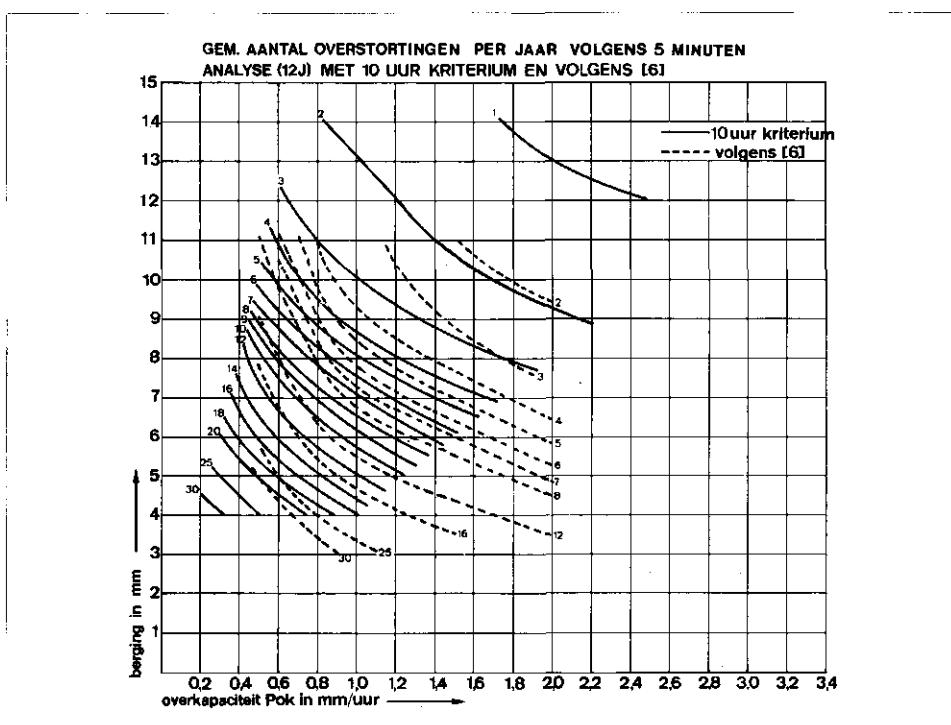
Afb. 5 - Vergelijking van het gemiddeld aantal overstortingen per jaar volgens stippengrafiek en volgens [6].

[6] in de vorm van lijnen van gelijk gemiddeld aantal overstortingen per jaar als functie van berging en overkapaciteit zoals die door Veldkamp is geïntroduceerd. Men zou bij [6] een groter aantal verwachten omdat zowel het in rekening brengen van de vorm van de buien als de invloed van gekombineerde buien meer overstortingen zullen geven. Dat dit voor 2 en 4 overstortingen per jaar en grote waarden van de overkapaciteit niet het geval is, moet worden toegeschreven aan de invloed van de beschikbare 12 jaar binnen de totale periode van

37 jaar. Vooral bij zeer kleine waarden van de overkapaciteit zijn de aantallen overstortingen groter dan volgens de stippengrafiek, wat te verwachten was, omdat dan de invloed van opeenvolgende buien groot is. In afb. 6 worden op dezelfde wijze onze resultaten met die van de stippengrafiek vergeleken. Door de door ons gekozen definitie van een overstorting zal het aantal overstortingen vergeleken bij [6] kleiner zijn geworden. Dat bij grote waarden van de overkapaciteit de verschillen met de stippengrafiek zo klein zouden zijn, was een



Afb. 6 - Vergelijking van het gemiddeld aantal overstortingen per jaar volgens 5-minuten analyse met 10 uur criterium en volgens de stippengrafiek.



Afb. 7 - Vergelijking van het gemiddeld aantal overstortingen per jaar volgens 10-uur criterium met dat volgens [6].

verrassing. Bij kleiner wordende waarden van de overkapaciteit stijgen onze lijnen ook vrij snel en stijgt het aantal overstortingen boven dat volgens de stippengrafiek. Ook hier kan de invloed van de verschillende waarnemingsperiode een rol spelen.

Tenslotte geeft afb. 7 een vergelijking tussen het gemiddeld aantal overstortingen per jaar volgens ons onderzoek met dat volgens [6]. Nu was de basis in beide gevallen dezelfde en was er alleen verschil in definitie van een overstorting. Het aantal overstortingen ligt dan ook hoger bij [6].

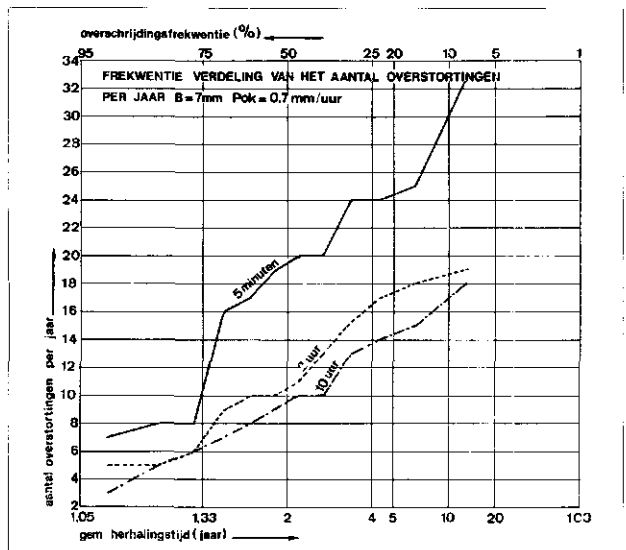
De spreiding van het aantal overstortingen per jaar blijkt uit de frekwentieverdeling van het aantal overstortingen per jaar van afb. 8. Hier is nog eens de tussentijd, waarbinnen de overstortingen tot de vorige worden gerekend gevarieerd van 5 minuten tot 10 uur. De lijnen van 6, 15 en 20 uur vallen zo goed als samen met die van 10 uur en zijn daarom weggelaten. De lijnen gelden voor een berging van 7 mm en een overkapaciteit van 0,7 mm/uur. De log-normale frekwentieverdeling blijkt hier zeer redelijk gevolgd te worden. Gemiddeld 1 x in 10 jaar is in dit voorbeeld een jaarlijks aantal overstortingen van 17 te verwachten. Hierbij moet worden aangetekend, dat de waarnemingsperiode van 12 jaar voor de bepaling van een dergelijke grootheid wel zeer kort is.

In afb. 9 worden de frekwentie-verdelingen voor het aantal overstortingen per seizoen en per jaar gegeven. Zoals te verwachten is komen de meeste overstortingen in de zomer (juni, juli en aug.) voor.

6.2. Overstortingshoeveelheden per jaar

De gemiddelde hoeveelheden overstortingswater per jaar zijn reeds gepubliceerd in [6]. Afb. 10 geeft de frekwentieverdeling van de hoeveelheden overstortingswater per jaar en per seizoen voor het geval van een berging van 7 mm en een overkapaciteit van 0,7 mm/uur. Evenals bij de overstortingsfrekwentie blijkt de grootste hoeveelheid overstortingswater in de zomer voor te komen. In 50% van de jaren (gemiddelde herhalingstijd 2 jaar, mediaan van de frekwentieverdeling) stroomt 45 mm regen per jaar over de overstorten. Volgens [6] bedraagt voor deze

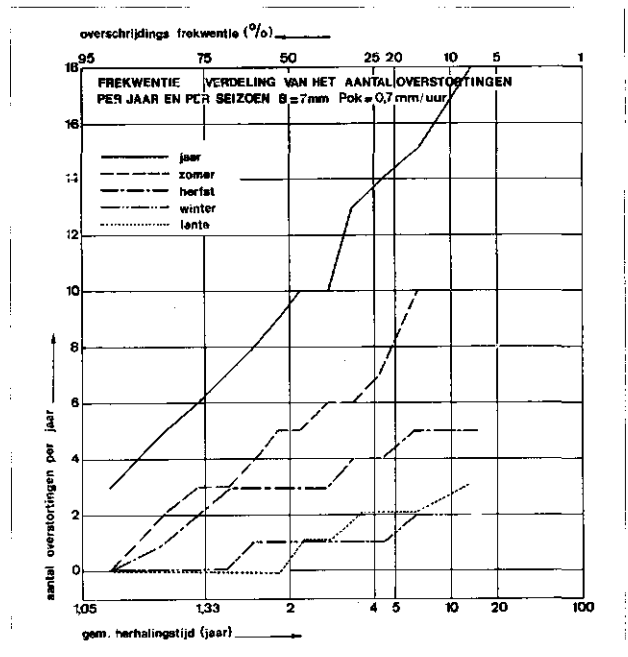
Afb. 8 - Frekwentie verdeling van het aantal overstortingen per jaar bij een berging van 7 mm en een overkapaciteit van 0,7 mm/uur met verwaarlozing van de overstortingen binnen 5 minuten, 2 en 10 uur.



kombinatie van berging en overkapaciteit de gemiddelde jaarlijkse overstortingshoeveelheid 50 mm.

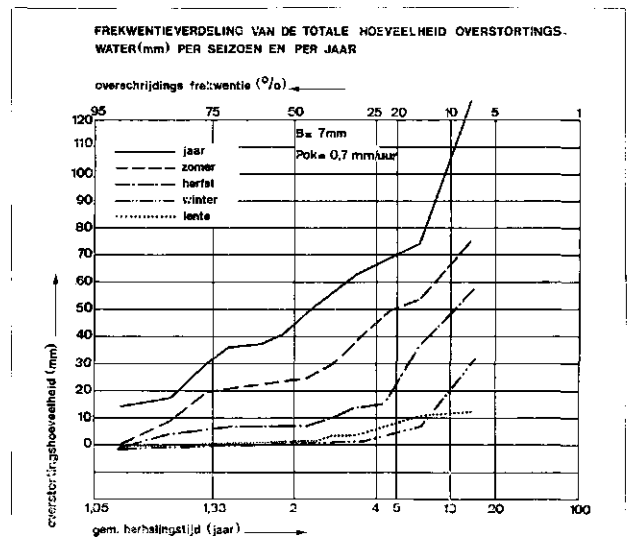
6.3. Overstortingsintensiteiten

In afb. 11 wordt de frekwentie verdeling gegeven van het aantal overstortingen met een overstortingsintensiteit groter dan 35 l/sec/ha gegeven voor een berging van 7 mm en een overkapaciteit van 0,7 mm/uur. De frekwentielijn is getekend zonder rekening te houden met de afvoerkapaciteit van de riolering. Heeft de regenaanvoer een intensiteit, die groter is dan de afvoerkapaciteit dan zal water op straat optreden. De afvoer via de overstorten kan hoger zijn dan overeenkomt met de capaciteit, waarop de riolering is berekend. Vanaf het punt waar de frekwentielijn de lijn van de afvoerkapaciteit van de

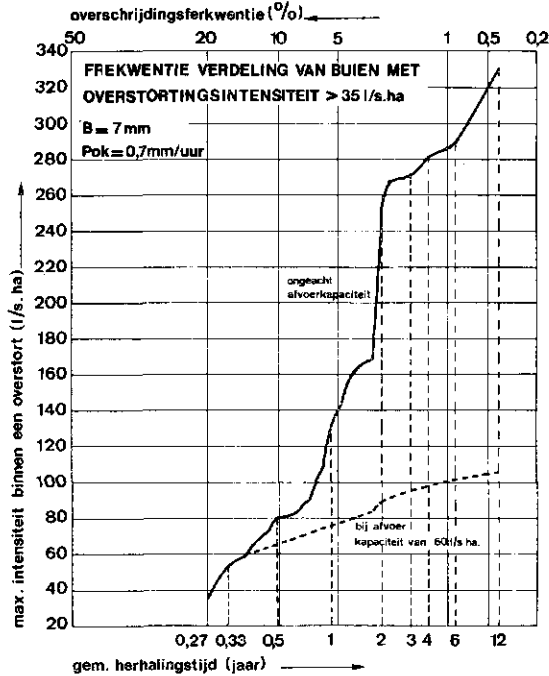


Afb. 9 - Frekwentie verdeling van het aantal overstortingen per jaar en per seizoen bij een berging van 7 mm en een overkapaciteit van 0,7 mm/uur.

Afb. 10 - Frekwentie verdeling van de hoeveelheid overstortingswater per jaar en per seizoen voor een berging van 7 mm en een overkapaciteit van 0,7 mm/uur.

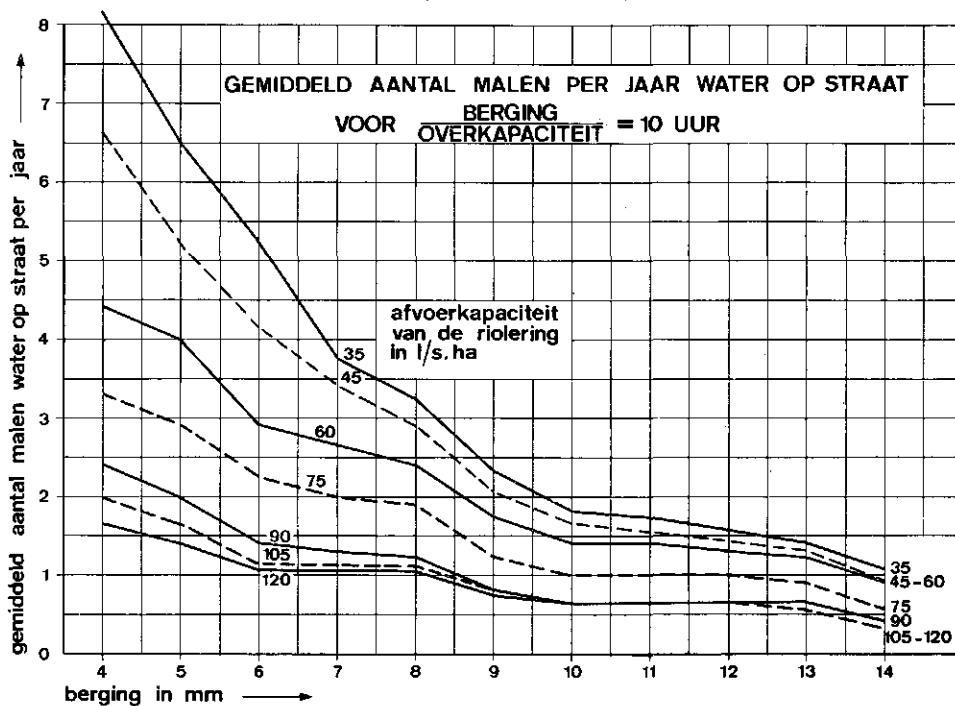


riolering snijdt, zal de frekwentieverdeling gaan afwijken van deze verdeling. Dat de lijn van dit punt af niet horizontaal loopt, wordt veroorzaakt door afwijkingen van het gebruikte model zodra er water op straat komt. Hierop wordt nog nader in 6.4 ingegaan. Met behulp van een sterk vereenvoudigde berekening is het verloop van de frekwentielijn bij een afvoerkapaciteit van de riolering van 60 l/sec/ha benaderd voor het geval van een zuiver horizontaal verhard oppervlak.



Afb. 11 - Frekwentie verdeling van overstortingen met intensiteiten groter dan 35 l/sec/ha voor een berging van 7 mm en een overkapaciteit van 0,7 mm/uur.

Afb. 12 - Gemiddeld aantal malen per jaar water op straat voor verschillende waarden van de berging bij afvoerkapaciteiten van 35 tot 120 l/sec/ha en bij een overkapaciteit in mm/uur gelijk aan 1/10 van de berging in mm.



6.4. Frekwentie van water op straat

Zoals reeds uiteengezet zal water op straat komen indien de intensiteit van de regenaanvoer gedurende het overstorten groter is dan de afvoerkapaciteit van de riolering. Aangezien het al of niet overstorten afhangt van de combinatie van berging en overkapaciteit, zal de frekwentie van water op straat ook van deze beide grootheden afhangen. In feite bepaalt de toelaatbaar geachte frekwentie van water op straat bij een bepaalde combinatie van berging en overkapaciteit de afvoerkapaciteit, waarop men de riolering moet dimensioneren.

Hier zal worden verondersteld, dat water op straat komt zodra de gemiddelde regenintensiteit gedurende 5 minuten, de kortste tijd waarover we over regengegevens beschikken, groter is dan de afvoerkapaciteit van de riolering.

Afb. 12 geeft het gemiddeld aantal malen water op straat per jaar als functie van de berging voor waarden van de afvoerkapaciteit van de riolering variërende van 35 tot 120 l/sec/ha bij een verhouding van berging tot overkapaciteit van 10 uur.

Aangezien het hier gaat om een zeldzamer voorkomend verschijnsel dan b.v. overstortingen, zal het nadeel van de korte periode van 12 jaar van de 5-minuten analyse hier nog sterker wegen.

Voor een berging van 7 mm, en derhalve een overkapaciteit van $7/10 = 0,7$ mm/uur, vindt men gemiddeld 2,7 maal per jaar water op straat, bij een berging van 8 mm en een overkapaciteit van 0,8 mm/uur wordt dat 2,4 maal. Men ziet ook, dat berging en overkapaciteit, tezamen met de afvoerkapaciteit van de riolering belangrijk moeten worden vergroot ten einde het gemiddeld aantal malen per jaar water op straat belangrijk te verminderen. Tabel IV geeft enige combinaties van berging en overkapaciteit, waarbij, afhankelijk van de afvoerkapaciteit van de riolering, gemiddeld éénmaal per jaar water op straat voorkomt.

TABEL IV - *Berging en overcapaciteit bij gemiddeld 1 x per jaar water op straat*

afvoerkapaciteit riolering in l/sec/ha	berging in mm	overcapaciteit in mm/uur
60	14	1,4
75	10	1,0
90	8,5	0,85
120	8	0,8

In het voorgaande is geen rekening gehouden met de duur of hoeveelheid van het water op straat. Of het water op straat als hinderlijk wordt ondervonden zal juist van die duur en hoeveelheid afhangen. Veel van de gevallen van water op straat komen slechts zeer kort voor en de hoeveelheid is gering. In afb. 13 is daarom de frekwentieverdeling gegeven van de duur en hoeveelheid van het water op straat voor een berging van 7 mm en een overcapaciteit van 0,7 mm/uur bij een afvoerkapaciteit van de riolering van 60 l/sec/ha. Opge-merkt moet worden dat beide verschijnselen, duur en hoeveelheid, onafhankelijk van elkaar zijn beschouwd en derhalve voor een bepaalde waarde van de gemiddelde herhalings-tijd geen waarden geven, die bij elkaar behoeven te horen.

Het blijkt dat in meer dan 50 % van de gevallen van water op straat de duur 5 minuten is of minder, terwijl in 50 % van de gevallen 4 mm of minder op straat staat. Bij die hoeveelheid moet in aanmerking genomen worden dat deze geldt voor het gehele verharde oppervlak, maar grotendeels op straat gekoncentreerd zal worden.

Bovendien komen er bij water op straat afwijkingen voor van het gebruikte mathematische model. Zodra er water op straat begint te komen, zal het verhang in de omgeving van de overstorten toenemen, de afvoer neemt eveneens toe en alleen de regen van het deel van het verharde oppervlak in de omgeving van de overstorten wordt afgevoerd. In dat deel komt geen water op straat voor. Over de rest van het verharde oppervlak stagneert de afvoer geheel. De grens tussen beide gebieden verschuift met de verandering van de regenintensiteit. Het verschijnsel is niet meer onafhankelijk van de tijd. Dit moet nog nader worden bestudeerd.

Bij kleine regenintensiteiten, d.w.z. niet veel verschillend van de afvoerkapaciteit van de riolering, zullen de afwijkingen gering zijn, zodat de bovengenoemde konklusies juist blijven.

De frekwentie van water op straat wordt door de afwijkingen van het model niet beïnvloed, de duur en vooral de hoeveelheid van water op straat wel, en des te meer naarmate de regenintensiteit toeneemt. De hoeveelheid water op straat wordt groter, de duur wordt langer. Ook is het verschijnsel afhankelijk van de vorm van het gebied van het verharde oppervlak.

7. Nabeschuiving

In het voorgaande zijn de eerste uitkomsten beschreven van de toepassing van de 5-minuten analyse van de regen in de Bilt op een mathematisch model van rioleringen in vlakke gebieden.

Een belangrijke beperking hierbij wordt gevormd door het gebrek aan kennis betreffende de vervorming van het regenpluviogram tot inlaathydrogram van de riolering. Deze vervorming wordt veroorzaakt door de combinatie van berging en stroming. Het is de vraag of deze beide invloeden wel in voldoende mate in rekening

kunnen worden gebracht door ze te vervangen door alleen berging. Deze berging kan dan bij die van de riolering worden opgeteld of, zoals dit in [6] geschiedt, apart in rekening worden gebracht.

Dat de regen van de Bilt is gebruikt vormt voor andere delen van Nederland een andere beperking. Voorts is aangenomen, dat de regen over het gehele oppervlak gelijkmatig verdeeld is.

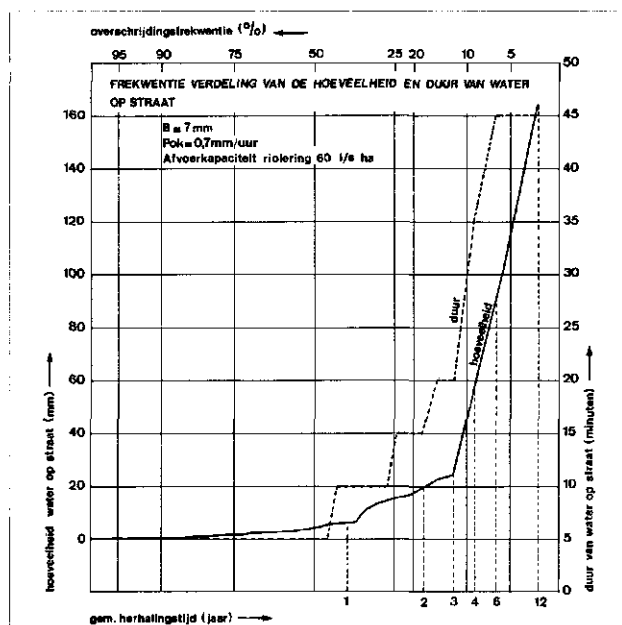
Beschouwen we nu nog eens de grootheden van tabel I. De frekwentie van water op straat (grootheid 1) wordt gegeven in de vorm van het gemiddeld aantal malen water op straat voor een groot aantal gevallen van berging en overcapaciteit in afb. 12. Duur en hoeveelheid van water op straat (grootheden 2 en 3) moeten nog nader worden bestudeerd, maar het blijkt uit afb. 13, dat in globaal de helft van de gevallen van water op straat duur en hoeveelheid zo gering zijn, dat deze gevallen wellicht buiten beschouwing kunnen blijven. Een verbetering zou kunnen worden aangebracht door de combinatie van aantal malen, duur en hoeveelheid te beschouwen, d.w.z. door water op straat alleen te tellen als dit b.v. langer dan 5 minuten en een zekere hoeveelheid overschrijdt.

De overstortingsfrekwentie (grootheid 4) wordt gegeven in de vorm van grootste, gemiddeld en kleinste aantallen overstortingen per jaar voor een groot aantal combinaties van berging en overcapaciteit in de afbeeldingen 2, 3 en 4.

Frekwentieverdelingen van het aantal overstortingen per jaar en per seizoen, maar nu slechts voor een berging van 7 mm en een overcapaciteit van 0,7 mm/uur, zijn gegeven in de afbeeldingen 8 en 9. Voor andere combinaties kunnen deze nog worden samengesteld. Overstortingen zijn gedefinieerd met behulp van het voorlopig arbitrair gekozen „10 uur” criterium.

Men kan zich afvragen of een betere definitie van een overstorting kan worden gevonden door niet alleen naar het voorkomen van een overstorting te kijken, maar ook naar de overstortingsintensiteit en naar de overstortings-

Afb. 13 - *Frekwentieverdeling van de duur en hoeveelheid van water op straat voor een afvoerkapaciteit van de riolering van 60 l/sec/ha bij een berging van 7 mm en een overcapaciteit van 0,7 mm/uur.*



duur. Of een overstorting vervuiling van het open water zal geven zal in hoge mate afhankelijk zijn van het feit of gedurende de overstorting reeds eerder afgezet rioolslib weer in beweging wordt gebracht. Dat geschiedt door het bereiken van een zekere schuifspanning langs de omtrek van de rioolbuis en deze schuifspanning kan voor elke riolering worden omgerekend tot een afvoerintensiteit in l/sec/ha. Bovendien wordt de mate van opwoeling bepaald door de duur van de overschrijding van deze grenstoestand. Zo zou de uitgebreider definitie van een overstorting de overschrijding van bepaalde waarden van de overstortingsintensiteit en de duur daarvan kunnen bevatten.

Een ander probleem is, dat het aantal overstortingen beïnvloed wordt door de variatie van de overcapaciteit gedurende het etmaal. Hiertoe zou het tijdstip van de overstortingen binnen het etmaal in de beschouwingen moeten worden betrokken.

De overstortingshoeveelheid (grootheid 5 van tabel I) wordt in afb. 10 gegeven in de vorm van de frekwentieverdeling per jaar en per seizoen, maar nog slechts voor de combinatie van 7 mm berging en een overcapaciteit van 0,7 mm/uur. Andere combinaties moeten nog worden onderzocht.

Overstortingshoeveelheden in korte tijden of gehele uitloophydrogrammen zijn nog niet bestudeerd. Uitloophydrogrammen zijn ook nodig voor de berekening van

bergsloten (grootheid 10). De vraag rijst hier of in plaats van dergelijke complete uitloophydrogrammen niet eenvoudigheidshalve omhullenden kunnen worden gebruikt zonder te grote onnauwkeurigheden te begaan bij de berekening van open waterlopen, waarop de overstorten lozen.

De duur van overstortingen (grootheid 6) is nog niet beschouwd. Dit kan echter zonder bezwaar geschieden als dit van belang is.

Literatuur

1. Braak, C.: *Het klimaat van Nederland*, A. Neerslag, Verhandeling KNMI no. 34a, 1933 (krommen van Braak).
2. Oostwoud Wijdenes, J. M., J. W.: *De specifieke regenintensiteit voor Nederland*. Publieke Werken no. 11, p. 145-147, 1941 (krommen van Reinhold).
3. Levert, C.: *Regens, een statistische studie*. Verhandeling KNMI no. 62 p. 135-136, 1954 (krommen van Levert).
4. Ribbius, F. J. en Kragt, G.: *Het verband tussen riolering en zuivering*. Publieke Werken no. 10 p. 120-123, 1954.
5. KNMI: *Detailanalyse van pluviogrammen*, A. Frequentieverdelingen van de hoeveelheden neerslag van 5 minuten tot 660 minuten, 1968.
6. Herik, A. G. van der en Kooistra, M.: *5-minuten regens*, H₂O, no. 21, p. 538-544, 1970.
7. Rapport van de Commissie Riolering en Waterverontreiniging van de afdeling voor Gezondheidstechniek van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs. H₂O no. 10 p. 199-214 en no. 12 p. 240-260, 1972.