Richtlijnen voor het berekenen van afwateringsstelsels in landelijke gebieden

werkgroep afvoerberekeningen

Harry Massop

Inhoud

		Blz.
	VOORWOORD	11
1.	INLEIDING	13
2.	DOELSTELLINGEN	15
2.1.	Doelstelling bij het maken of verbeteren van een waterbeheersingssysteem in een landelijk gebied	15
2.2.	Doelstelling bij het maken of verbeteren van een waterbeheersingssysteem in een stedelijk gebied	16
2.3.	Concretisering van de doelstellingen	16
3.	SYSTEEMBENADERING VAN DE WATERHUISHOUDING	19
3.1.	De hydrologische kringloop	19
3.2.	Beschrijving van deelsystemen	21
	3.2.1. Het ontwateringssysteem	22
	3.2.2. Het afwateringssysteem	22
	3.2.3. Het lozingssysteem	23
	3.2.4. Het waterconserveringssysteem	23
	3.2.5. Het wateraanvoersysteem	23
3.3.	Ruimtelijke beschrijving van de waterhuishouding in relatie tot open waterlopen	24
	3.3.1. Landelijke gebieden	24
	3.3.1.1. Hellende gebieden	24
	3.3.1.2. Vlakke gebieden	26
	3.3.2. Stedelijke gebieden	27
	3.3.3. Invloed van stedelijke op landelijke gebieden	28
4.	ONTWERPNORMEN EN TOETSINGSNORMEN	31
4.1.	Ontwatering	33
	4.1.1. Grootheden voor de ontwatering	33
	4.1.2. Normen voor de ontwatering	34
4.2.	Afwatering	36
	4.2.1. Grootheden voor de afwatering	36
	4.2.2. Normen voor de afwatering	38
5.	MODELLEN	39
5.1.	Ontwateringsmodellen	39
5.2.	Afwateringsmodellen	40
	5.2.1. Landelijke gebieden	40
	5.2.2. Stedelijke gebieden	40
5.3.	Lozingsmodellen	42
5.4.	Waterconserveringsmodellen	42
5.5.	Wateraanvoermodellen	42
5.6.	Modellen voor stroomgebieden	42

INHOUDSOPGAVE Blz.

6. METHODEN TER BEPALING VAN MAATGEVENDE AFVOEREN 47

6.1. Bepaling van de maatgevende afvoer aan de hand van ontwateringssystemen 48

6.1.1. Parameters ontwateringssysteem bekend 49
6.1.2. Parameters ontwateringssysteem onbekend, maar korte afvoerreeksen beschikbaar 52
6.1.3. Parameters ontwateringssysteem onbekend en geen afvoerreeksen beschikbaar 53
6.1.4. Maatgevende afvoer, samengesteld uit afvoer ontwateringssystemen 54
6.1.4.1. Homogene gebieden 54
6.1.4.2. Heterogene gebieden 54

6.2. Bepaling van de maatgevende afvoer aan de hand van afwateringssystemen voor een landelijk gebied 54

6.2.1. Lange (winter)afvoerreeksen beschikbaar (variant 1) 55
6.2.2. Korte (winter)afvoerreeksen beschikbaar (variant) 2) 55
6.2.2.1. Neerslagcijfers beschikbaar 55
6.2.2.2. Geen neerslagcijfers beschikbaar 57
6.2.3. Geen afvoerreeksen beschikbaar (variant 3) 57

6.3. Bepaling van de maatgevende afvoer afkomstig van stedelijke afwateringssystemen voor verharde oppervlakken 57

7. ENKELE TOEPASSINGEN VAN METHODEN TER BEPALING VAN MAATGEVENDE AFVOEREN 60

7.1. Bepaling van de maatgevende afvoer(dichtheid) in hellende gebieden 60
volgens de methode van De Jager 60

7.1.1. De afvoerkarakteristiek van een stroomgebied 61
7.1.2. Schatting van de tijdconstante en de basisafvoerdichtheid volgens de methode van Kusse 63
7.1.3. Het frequentiediagram van De Jager 64

7.2. Bepaling van de maatgevende afvoer(dichtheid) in vlakke gebieden en de bijbehorende grondwaterstanden volgens de methode De Zeeuw-Hellinga 66

7.3. Onderlinge afweging van beide methoden 70

8. DIMENSIONEREN VAN WATERLOPEN EN KUNSTWERKEN 71

8.1. Benodigde gegevens 71
8.2. Ontwerp 71
8.3. Berekening van de stationaire stromingstoestand 74

8.3.1. Waterlopen 74
8.3.2. Kunstwerken 76

8.4. Hulpmiddelen bij berekening 78
8.5. Berekening van de niet-stationaire stromingstoestand 78

INHOUDSOPGAVE

		Blz.
9.	EVALUATIE EN AANBEVELINGEN	83
9.1.	Evaluatie van de toegepaste modellen	83
	9.1.1. Huidige beperkingen bij de bepaling van de maatgevende afvoer(dichtheid)	83
	9.1.2. Huidige beperkingen bij de berekening van een waterlopenplan	84
9.2.	Aanbevelingen voor nader onderzoek	84
	9.2.1. Met betrekking tot de bepaling van de maatgevende afvoer (dichtheid)	84
	9.2.2. Met betrekking tot de berekening van waterlopenstelsels	86
10.	SAMENVATTING	87
11.	LITERATUUR	95

OVERZICHT VAN DE BIJLAGEN

1. Begrippen

2. Symbolen

3. Rioolstelsels

4. Theoretische beschouwingen ontwateringsmodellen

5. Voorbeeld van de bepaling van de maatgevende afvoerdichtheid van een hellend gebied met behulp van de methode De Jager

6. Voorbeeld van de bepaling van de maatgevende afvoerdichtheid van een vlak gebied met behulp van de methode De Zeeuw-Hellinga

7. Regenduurlijnen

8. Stromingsvormen en stromingstypen in open waterlopen

9. Kunstwerken

10. Gegevens over de computerprogramma's DIWA, GROND en TEKDIGRO

11. Resultaten van een niet-stationaire berekening van een afwateringsmodel

Voorwoord

De besturen van de Sectie en de Studiekring voor Cultuurtechniek besloten bij schrijven d.d. 18 juni 1976 de Werkgroep Afvloeiingsfactoren opnieuw te installeren.

De taakomschrijving van de Werkgroep luidde:

a. inventarisatie van de gangbare berekeningsfactoren en van de methoden die worden gebruikt bij de bepaling van deze factoren;
b. een evaluatie van deze factoren en methoden, gebaseerd op de ter beschikking staande gegevens en de huidige stand van het onderzoek, in het licht van een integraal waterbeheer;
c. het aangeven van tekortkomingen bij de huidige werkwijze;
d. zo nodig onderzoek te entameren naar gesignaleerde problemen.

De samenstelling van de Werkgroep was als volgt:

Prof. dr. ir. W.H. van der Molen (Landbouw Hogeschool), voorzitter
Ir. H. Ton (Landinrichtingsdienst), secretaris
Ir. J.W. van den Berg (Heidemij Nederland B.V.)
Ir. J.A. van Dort (Grontmij)
Ir. E. Schultz (Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders)

De Werkgroep, die zich voortaan noemt de Werkgroep Afvoerberekeningen, heeft getracht haar taakstelling te verwezenlijken door:

a. het analyseren van de wijze waarop in Nederland in het landelijke gebied neerslag tot afvoer komt, waarbij ook het stedelijke gebied in de beschouwing is betrokken;
b. het aan de hand van deze analyse beschrijven van het afvoerproces door middel van systemen;
c. het inventariseren van (reken)modellen die als min of meer geschematiseerde afbeeldingen van deze systemen kunnen worden beschouwd;
d. het aangeven van (de) factoren die de uitkomst van de (reken)modellen bepalen;
e. het waarderen van een aantal (reken)modellen zoals die in de huidige werkwijze worden toegepast;
f. het beschrijven van de praktische toepassing van enkele veel gebruikte rekenmodellen;
g. het formuleren van richtlijnen voor het berekenen van waterbeheersingsplannen in het landelijke gebied;
h. het aanbevelen van onderzoeken betreffende de gesignaleerde problemen.

Bij het verrichten van de werkzaamheden hebben personen van verschillende instellingen een bijdrage geleverd. Genoemd kunnen worden:

Drs. J.A. van den Berg (Rijksuniversiteit van Utrecht, voordien R.IJ.P.)
Dr. ir. T.A. Buishand (K.N.M.I., voordien L.H.)
Ing. A.J. Gelok (Landinrichtingsdienst)
Ing. B.M. Haaijer (Heidemij Nederland B.V.)
Ir. H.M.A. Kempen (Landinrichtingsdienst)
Ing. A.D. Kusse (Heidemij Nederland B.V.)
Ing. W. van der Meer (Landinrichtingsdienst)
Ir. J.H. van Ouwerkerk (Heidemij Nederland B.V.)

In de conceptfase is door een aantal deskundigen commentaar geleverd op de inhoud van het rapport. De werkgroep is hen hiervoor zeer erkentelijk en heeft dit commentaar zo goed mogelijk verwerkt. Genoemd kunnen worden:

Ir. H.J. Colenbrander (Commissie Hydrologisch Onderzoek - T.N.O.)
Prof. dr. ir. J.C. van Dam (Technische Hogeschool Delft)
Ir. C.H. de Jong (Rijkswaterstaat)
Dr. ir. Ph.Th. Stol (Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding)
Dr. ir. J. Wesseling (Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding)

De Werkgroep hoopt dat dit rapport zal bijdragen tot een verbetering van het inzicht in het afvoerproces en in de methoden die worden gebruikt bij het ontwerpen van waterbeheersingsplannen in het landelijke gebied. Tevens hoopt de Werkgroep dat de in de tekst opgenomen richtlijnen de ontwerper voldoende ondersteuning zullen geven bij het maken van een optimaal plan en dat de aanbevelingen voor nader onderzoek weerklank zullen vinden.

1. Inleiding

Bij het opstellen van waterbeheersingsplannen dienen de doelstellingen bekend te zijn. Op grond van de hieraan ontleende normen wordt het ontwerp gemaakt. Hierbij is het nodig, naast het verloop met de tijd van de neerslag en de verdamping, de gehele keten van systemen van het afvoerproces, zoals ontwateren en lozen, te kennen. Behalve inzicht in het gedrag van de afzonderlijke systemen is bovendien inzicht vereist in de wijze waarop de systemen elkaar in opeenvolgende stadia beïnvloeden. Tevens dient de beïnvloeding van het ene afwateringsgebied op het andere in de beschouwingen te worden betrokken.

Overwegingen van de Werkgroep

De Werkgroep is ervan uitgegaan dat het door haar op te stellen rapport richtlijnen dient te bevatten aan de hand waarvan waterbeheersingssystemen in landelijke gebieden kunnen worden ontworpen. Deze richtlijnen zijn dikwijls gebaseerd op ervaring die bij het ontwerpen van waterbeheersingsplannen is opgedaan. Bij het opstellen van dit rapport is daarbij getracht aan te sluiten bij het werk van eerdere werkgroepen (Werkgroep Afvloeiïngsfactoren, 1963; Werkgroep Afvoerfactoren Stedelijke Gebieden, 1973).

Om tot evaluatie van deze richtlijnen te komen heeft de Werkgroep allereerst die gegevens verzameld die nodig zijn om inzicht te verkrijgen in het afvoerproces. Tevens is getracht inzicht te krijgen in de variaties die in het proces bij de in ons land optredende hydrologische omstandigheden voorkomen. Daarbij is getracht vast te stellen in hoeverre de verschillende berekeningsmethoden bruikbaar zijn in relatie tot de eisen, zoals die momenteel aan de berekening van waterlopen worden gesteld.

De Werkgroep heeft zich beperkt tot beschouwingen over berekeningsmethoden, zoals die thans voor het ontwerpen van afwateringssystemen worden gebruikt. Op basis van de hierbij verkregen gegevens is van de meest gebruikte methoden de toepassing in het kort beschreven. Daar waar hiaten voorkwamen is volstaan met deze te signaleren. Zo mogelijk zijn op grond van deze hiaten aanbevelingen gedaan voor verder onderzoek.

Er bestaat op het door de Werkgroep bestreken terrein een grote verscheidenheid in begripsdefinities, notatie van symbolen en gebruik van dimensies. De Werkgroep heeft getracht hierin zoveel mogelijk lijn te brengen. Een aantal begrippen en symbolen zijn weergegeven in de bijlagen 1 en 2.

Indeling van het rapport

Ten einde de leesbaarheid te bevorderen is van de verzamelde informatie het deel dat op hoofdlijnen betrekking heeft in het rapport opgenomen en het overige deel, dat meer in detail gaat, in bijlagen. Om de problematiek zo goed mogelijk weer te geven worden in hoofdstuk 2 van het rapport allereerst de doelstellingen geformuleerd op grond waarvan een waterbeheersingssysteem wordt ontworpen. Daarna volgt in hoofdstuk 3 een algemene beschrijving van de hydrologische kringloop en een beschrijving van de deelsystemen die betrekking hebben op de ontwatering, de afwatering en de lozing. Hierbij wordt tevens ingegaan op de waterconservering en wateraanvoer en op de

aspecten die in de verschillende gebieden een rol spelen. Er is onderscheid gemaakt in landelijke en stedelijke gebieden. De landelijke gebieden zijn verdeeld in hellende en vlakke gebieden. Ook wordt ingegaan op de relatie tussen de landelijke gebieden en de stedelijke gebieden. Na deze beschrijvingen worden in hoofdstuk 4 de normen besproken
waarvan bij het ontwerpen van de verschillende onderdelen van het waterbeheersingssysteem gebruik wordt gemaakt. Vervolgens wordt in hoofdstuk 5 een overzicht gegeven van de modellen die bij de berekeningen van ontwateringsafwaterings- en lozingssystemen kunnen worden gebruikt. Volledigheidshalve zijn in dit overzicht ook modellen betrokken die kunnen worden gebruikt bij de berekening van waterconservering en wateraanvoer. Veel aandacht is in hoofdstuk 6 geschonken aan methoden ter bepaling van de maatgevende afvoer (dichtheid) en van enkele daarvan is in hoofdstuk 7 een toepassing beschreven. In hoofdstuk 8 worden (de) factoren besproken die bij het dimensioneren van waterlopen en kunstwerken een rol spelen. De bevindingen van de Werkgroep zijn neergelegd in Evaluatie en Aanbevelingen (hoofdstuk 9). Het rapport wordt met een uitgebreide literatuurlijst afgesloten.

2. Doelstellingen

Het beheersen van waterstanden in een gebied is geen doel op zich, maar maatschappelijke overwegingen liggen eraan ten grondslag. Deze overwegingen vloeien voort uit de functies die aan een gebied worden toegekend.
Een aantal te onderscheiden functies zijn het voortbrengen van voedsel, het produceren van hout, het behouden of verkrijgen van een aantrekkelijk landschap, het behouden of ontplooien van natuurlijke waarden en het scheppen van gelegenheid tot wonen, werken en recreëren.

Alvorens tot het ontwerpen van waterbeheersingssystemen wordt overgegaan moeten de belangen van deze functies worden gewogen. Een dergelijke afweging is niet in de eerste plaats de taak van de ontwerper van het waterbeheersingssysteem. Deze zal echter, voor een goed ontwerp, bij het maken van een juiste keuze van de ontwerpnormen de betekenis van deze maatschappelijke functies wel moeten onderkennen.

In het kader van dit rapport worden niet alle functies beschreven, omdat enerzijds van bepaalde functies, zoals die met betrekking tot landschap en natuur, vaak nog onvoldoende bekend is, terwijl hetgeen wel bekend is sterk aan veranderingen onderhevig is. Anderzijds leiden andere functies, zoals die met betrekking tot bosbouw en recreatie, vaak tot dezelfde ontwerpnormen. De nadruk zal worden gelegd op de functie van het voortbrengen van voedsel, waarbij aan de landschappelijke en natuurlijke functie en die van het scheppen van woon- en werkgelegenheid niet wordt voorbij gegaan. Als doelstellingen vloeien daaruit voort een doelstelling met betrekking tot het landelijke gebied en één met betrekking tot het stedelijke gebied.

2.1. Doelstelling bij het maken of verbeteren van een waterbeheersingssysteem in een landelijk gebied

Van ouds heeft de doelstelling in relatie tot de produktie van voedsel voorop gestaan. Een aantal factoren speelt hierbij een belangrijke rol, te weten:
- de kosten van aanleg of verbetering van het waterbeheersingssysteem, inclusief de onderhoudskosten;
- de daaruit te verwachten gemiddelde opbrengstvermeerdering van de gewassen en de daarmee samenhangende gemiddelde vermeerdering van inkomsten;
- het verkleinen van het risico op derving van inkomsten; derving als gevolg van opbrengstdepressies, die mede door de wisselvalligheid van de natuur worden veroorzaakt.

Het spreekt vanzelf dat de kosten van een waterbeheersingssysteem niet onbeperkt kunnen worden opgevoerd, om een maximale gemiddelde opbrengst te verkrijgen en het risico van opbrengstdepressies tot nul te reduceren. Voor de landbouw als meest voorkomende activiteit in landelijke gebieden wordt de doelstelling als volgt geformuleerd:

Het zodanig beïnvloeden van de bestaande waterhuishouding dat, eventueel mede door andere cultuurtechnische maatregelen, een gemiddelde reëele toename van de opbrengst (landbouwkundige baten) en een afname van het risico op derving wordt verkregen.

Als grootheid voor het beoordelen van de grootte van de investeringen wordt het investeringsrendement in de vorm van investeringseffect dan wel interne rentevoet gehanteerd, waarbij tevens met sociaal-economische factoren rekening wordt gehouden.

De doelstellingen ten aanzien van landschap en natuur zijn veelal in strijd met de landbouwkundige doelstelling. Een landbouwkundig optimaal waterbeheersingsplan kan bijvoorbeeld ongunstig zijn voor de functies natuur en landschap. Wanneer na afweging de functie landbouw volledig wordt gehonoreerd, is het van belang de schade aan natuur en landschap zoveel mogelijk te beperken. Dit betekent doorgaans dat de wijzigingen in de bestaande toestand zo klein mogelijk moeten zijn. Bij de keuze van de modellen en de voorgestelde richtlijnen wordt steeds van deze overweging uitgegaan. Ook wanneer andere doelstellingen in bepaalde gebieden belangrijker geacht worden is het van belang dat de gevolgen voor de landbouw zo goed mogelijk bekend zijn. Een goede keuze uit de beschikbare modellen kan hiertoe bijdragen.

2.2. Doelstelling bij het maken of verbeteren van een waterbeheersingssysteem in een stedelijk gebied

Hoewel dit rapport niet in de eerste plaats is geschreven voor het ontwerpen van waterbeheersingssystemen in een stedelijk gebied, is het voor het formuleren van de juiste ontwerpnormen toch belangrijk de doelstellingen geldend in een stedelijk gebied te kennen. In tegenstelling tot de voorgaande doelstelling speelt het risico-aspect een veel belangrijker rol. Immers door een niet optimaal werkend waterbeheersingssysteem kan schade aan goederen ontstaan en kan de veiligheid van bewoners in gevaar komen; dit gevaar moet tot een minimum worden gereduceerd. In het stedelijke gebied ligt de nadruk op het voorkomen van inundaties en eventueel van hoge waterstanden. Tevens dienen er in verband met de andere gebruiksvormen van water in stedelijke gebieden in toenemende mate eisen te worden gesteld aan de kwaliteit van het water. De doelstelling met betrekking tot een stedelijk gebied kan als volgt worden geformeerd:

Het zodanig beïnvloeden van de bestaande waterhuishouding dat, eventueel mede door andere civieltechnische maatregelen, het risico op inundaties dan wel hoge waterstanden zover wordt gereduceerd, dat dit risico een aanvaarde waarde niet te boven gaat.

Deze aanvaarde waarde ligt niet a priori vast maar kan door verandering van inzichten, als gevolg van maatschappelijke en/of technisch wetenschappelijke vooruitgang, worden gewijzigd.

2.3. Concretisering van de doelstellingen

De genoemde doelstellingen leiden niet zonder meer tot de juiste beslissingen omtrent de dimensies van waterlopen. Daartoe is het nodig de relaties te kennen tussen de hydrologische kenmerken van een gebied en de bij het gestelde doel omschreven factoren. Voor het landelijke gebied zijn deze relaties ingewikkeld omdat biologische processen een rol spelen. Hoewel reeds veel onderzoek naar het verband tussen de produktie in de landbouw en de waterhuishouding is verricht, zijn nog lang niet alle relaties bekend. Resultaten van de reeds verrichte onderzoeken zijn kort samengevat waarbij tevens een overzicht is gegeven van de factoren, die van invloed zijn op de netto-gewasproduktie. (De Laat e.a., 1975; Visser, 1971; Wind, 1976; Van Wijk en Feddes, 1975).

Het water in de bodem beïnvloedt de gewasproduktie voornamelijk via de verdamping, waarbij vooral bepalend zijn de meteorologische omstandigheden, de fysiologische eigenschappen van het gewas, de bodemtemperatuur, de bodemstructuur, de zuurstofvoorziening en de stikstofmineralisatie. Deze factoren komen bij diverse gewassen op verschillende manieren tot uitdrukking. Bij akkerbouwgewassen zijn, uitgaande van Nederlandse omstandigheden bijvoorbeeld belangrijk het tijdstip van zaaien of poten, de kwaliteit van het zaai- of pootbed, de vochtvoorziening via capillaire opstijging in het groeiseizoen en het tijdstip van oogsten. Voor grasland zijn daarnaast van betekenis de lengte van de groeiperiode, de gevoeligheid van de bodem voor het betreden en het bereiden en de vochtvoorziening in het groeiseizoen. Al deze factoren houden vooral verband met het bodemtype en de schommelingen van de grondwaterstand. Vooral de grondwaterstanden in het vroege voorjaar en het najaar zijn van belang. Daarnaast kunnen echter ook wintergrondwaterstanden kritisch zijn in verband met het uitrijden van mest (grasland) en het verslempen van de bouwvoor (bouwland) (Wind, 1976). Op gronden met geringe waterberging en een gering vermogen tot capillaire opstijging (b.v. zandgrond) is een niet te lage zomergrondwaterstand belangrijk voor een goede produktie. Een goede waterhuishouding is dus van belang voor zowel de produktie als de produktie-omstandigheden.

Voor een optimale waterbeheersing is niet slechts de waterafvoer, maar ook de waterconservering, of wateraanvoer soms essentieel. In dit rapport gaat het in de eerste plaats om het afvoeraspect. Bij de keuze van de ontwateringsbasis, van de dimensie van waterlopen, van overschrijdingsfrequenties van peilen, is steeds rekening gehouden met de aspecten waterconservering en -aanvoer.

In het stedelijke gebied is in verband met de aanleg of herstel van kabels en leidingen, met het gevaar voor opvriezen van wegen en met de aanwezigheid van kruipruimten onder gebouwen een bepaalde ontwateringsdiepte vereist. Hierbij dient het waterbeheersingsstelsel zodanig te worden ontworpen dat inundaties slechts met acceptabele frequenties voorkomen. Voor tuinen en plantsoenen tenslotte dient evenals voor de landbouw een goede vochtvoorziening aanwezig te zijn. (Schultz en Segeren, 1976)

3. Systeembenadering van de waterhuishouding

Een waterlopenstelsel fungeert als middel om bepaalde doelstellingen met betrekking tot het bodemgebruik te realiseren. In perioden met een neerslagoverschot moet het stelsel de overtollige hoeveelheid water afvoeren en in perioden met een verdampingsoverschot moet onder bepaalde omstandigheden aanvoer plaatsvinden. Het waterlopenstelsel dient dus om de aan- en afvoer van water zodanig te reguleren, dat er een op het bodemgebruik afgestemde optimale situatie ontstaat.

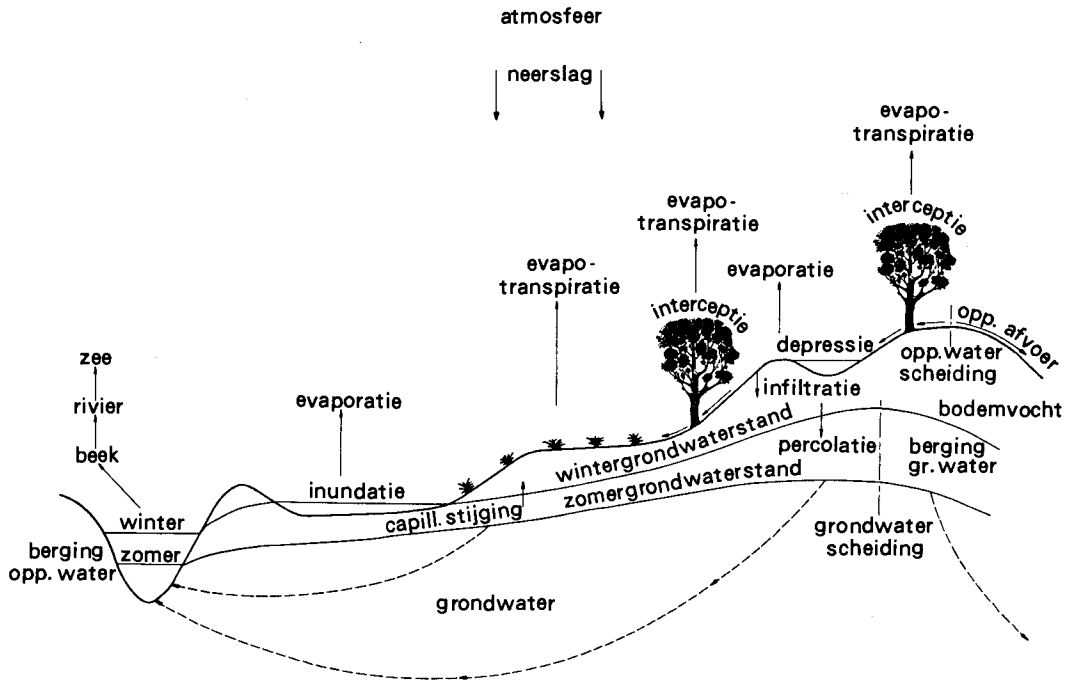
Om normen te kunnen formuleren, die voor het berekenen van ontwaterings- en wateraan- en afvoersystemen noodzakelijk zijn, is inzicht vereist in de hydrologische kringloop en meer in detail in de deelsystemen die een onderdeel vormen van deze kringloop.

3.1. De hydrologische kringloop

Het begin van de hydrologische kringloop wordt gekozen bij de neerslag. De neerslag gaat uiteindelijk op in verdamping. De verdamping vindt plaats aan het oppervlak van open wateren en aan dat van het land. In de verdamping van het landoppervlak wordt onderscheid gemaakt in evaporatie en transpiratie. Onder de evaporatie wordt de verdamping verstaan die buiten het inwendige van een plant om plaatsvindt en omvat een deel van het bodemvocht evenals het water dat na neerslag achter blijft op planten (interceptie) en op het landoppervlak (plasvorming). De transpiratie daarentegen is een bijdrage in de verdamping die door het inwendige van een plant plaatsvindt. Deze verdamping omvat uitsluitend het bodemvocht en wel in hoeveelheden die voor een optimale groei van de plant nodig zijn (potentiële hoeveelheden) of, indien de hoeveelheden bodemvocht daartoe niet toereikend zijn, in hoeveelheden (actuele hoeveelheden) die door de plant kunnen worden onttrokken.

Tussen de transporten in de vorm van neerslag en verdamping kunnen nog andere vormen van watertransport worden onderscheiden (figuur 1) (Van Dam, 1971). In de (poreuze) grond treden over het algemeen twee soorten van transport op namelijk, van boven naar beneden gaande, het transport door de zone waarin de poriën van de grond niet geheel met water zijn gevuld (onverzadigde zone) en door de daaraan grenzende zone met geheel met water gevulde poriën (verzadigde zone). Tussen de onverzadigde en de verzadigde zone is, als gevolg van verscheidenheid in grootte en geometrie van de poriën, geen scherp afgebakende overgang aanwezig. In verband met oudere berekeningsmethoden was een dergelijk grensvlak onmisbaar. Volgens afspraak is als grensvlak gedefineerd het vlak waarop de druk in het water gelijk is aan die van de atmosfeer; dit vlak (isobar) wordt aangeduid met freatisch vlak. Het transport van water beneden het freatisch vlak wordt de stroming door de verzadigde zone, of kortheidshalve, de grondwaterstroming genoemd en boven dit vlak de stroming door de onverzadigde zone of wel capillaire stroming. In beide typen stromingen speelt altijd de zwaartekracht een rol. Dat de stromingsrichting niet altijd verticaal naar beneden is gericht wordt in de verzadigde zone veroorzaakt door een drukveld (samengesteld uit het hydrostatische drukveld en een verstoring daarop) en in de onverzadigde zone door een oppervlaktespanningsveld (grotere adhesie tussen gronddeeltjes en water dan cohesie van het water).

Figuur 1. Natuurlijke hydrologische kringloop



Water kan, bij verwaarlozing van de compressibiliteit van de grond, alleen geborgen worden in poriën die niet geheel met water zijn gevuld, dus uitsluitend in de onverzadigde zone.

De bovengrondse transporten zijn eveneens in twee groepen te verdelen, namelijk de groep omvattende het transport van water over het maaiveld (oppervlakte-afvoer) en de groep omvattende het transport door insnijdingen in het maaiveld. Afhankelijk van de breedte van de insnijdingen wordt gesproken van greppels, sloten, beken of rivieren. Van de oppervlakte-afvoer onder Nederlandse omstandigheden is weinig bekend. Bij deze afvoer wordt gedacht aan de stroming van water in een dun laagje over een hellend landoppervlak (Boels, 1978-1979). Met uitzondering van enkele beperkte gebieden in het oosten en zuiden van ons land, zijn over het algemeen de hellingen in Nederland zo gering, dat het water eerder de nog niet verzadigde grond indringt (infiltratie) dan dat het over een relatief ruw landoppervlak naar een sloot, beek of rivier stroomt. In tegenstelling tot de transportfunctie kan de oppervlakte-afvoer wel belangrijk zijn bij het (tijdelijk) bergen van water in relatief kleine depressies in het maaiveld (plasvorming). Behalve deze vorm van berging is er altijd sprake van berging in de transportmiddelen als greppels, sloten, beken en rivieren. Alvorens het door deze middelen getransporteerde water volledig in verdamping opgaat zal in Nederland, omdat er over een jaar een neerslagoverschot bestaat, dit water buiten de grenzen (naar zee) moeten worden gebracht (De Vries, 1974).

Alle genoemde transporten zijn tijdsafhankelijk, evenals de daarmee samenhangende grootheden als waterpeil, freatisch vlak en geborgen dan wel te bergen hoeveelheden water. De mate waarin de verschillende transporten met de tijd veranderen kan sterk uiteenlopen en wordt mede bepaald door de eigenschappen van het water en door de afmetingen en eigenschappen van het bij het betreffende transport horende wrijvingsoppervlak tussen het water en het andere medium (grond, begroeiing, lucht).

De samenhang tussen eigenschappen, wetmatigheden en afmetingen wordt systeem genoemd. Op grond hiervan kan aan elke vorm van watertransport een systeem worden toegekend. Voor de wiskundige beschrijving van een systeem wordt gebruik gemaakt van één, of meerdere modellen. De karakteristieke eigenschappen van het systeem kunnen hierbij worden weergegeven met behulp van één, of meerdere parameters waarvan de waarde, op grond van beschikbare gegevens, hetzij direct, hetzij indirect wordt bepaald.

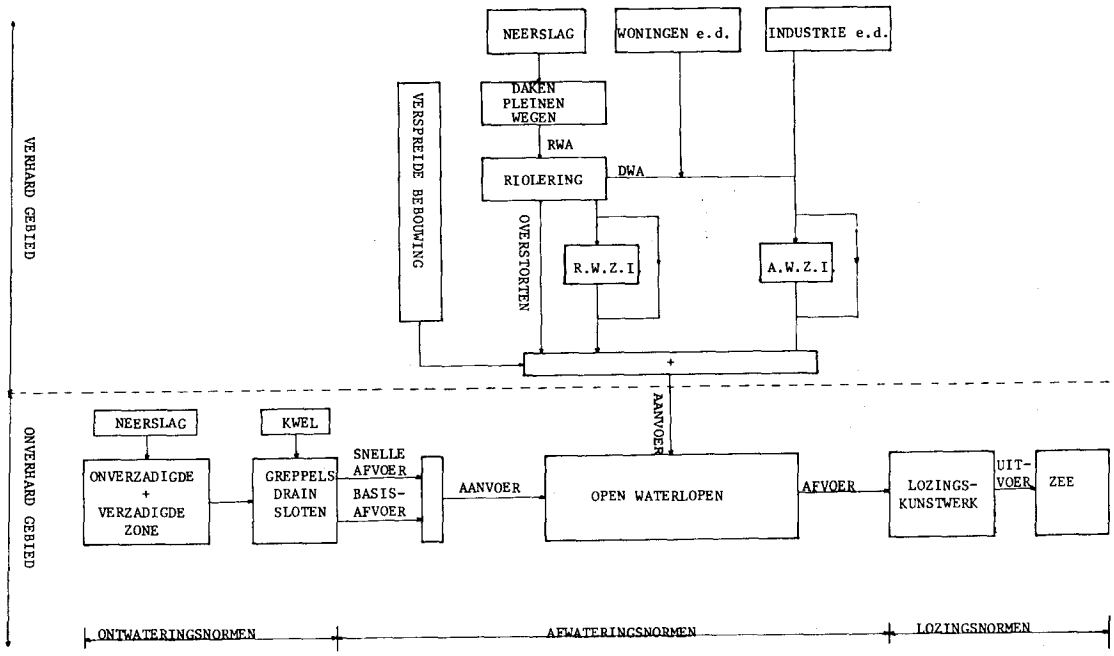
De hydrologische kringloop omvat het transport van water door verschillende systemen, die deel uitmaken van het totale systeem van de kringloop. Waterhuishoudkundige maatregelen resulteren altijd in wijzigingen in één of meer van deze deelsystemen. Deze wijzigingen dienen echter zodanig te zijn, dat optimaal aan de gestelde doelen wordt voldaan.

3.2. Beschrijving van deelsystemen

De maatregelen, die tot de geformuleerde doelstellingen moeten leiden kunnen liggen op het gebied van de ontwatering, de afwatering, de lozing en/of op het gebied van de waterconservering en de wateraanvoer. Bij de ontwatering gaat het in natte perioden om het verlagen van het freatisch vlak door middel van afvoer van water uit de grond naar de open waterlopen. De afwatering betreft het transport van dit water door het waterlopensysteem naar een lozingspunt. De lozing tenslotte verwijdert het water, op een al dan niet kunstmatige wijze, uit het afwateringsgebied. Waterconservering en wateraanvoer hebben daarentegen tot doel om in droge perioden watertekorten te voorkomen, respectievelijk te compenseren.

Ontwatering, afwatering en lozing komen in deze volgorde voor en beïnvloeden elkaar. De afvoer uit het ontwateringssysteem vormt de invoer voor het afwateringssysteem en de afvoer uit het afwateringssysteem vormt de invoer van het lozingssysteem. Met andere woorden de systemen zijn achter elkaar geschakeld. De onderlinge beïnvloeding komt duidelijk tot uiting wanneer bijvoorbeeld een knelpunt in de afwatering hoge waterstanden tot gevolg heeft. In zo'n geval zal de ontwatering worden belemmerd en verloopt het aanbod voor het lozingssysteem anders in de tijd dan wanneer het bewuste knelpunt niet aanwezig zou zijn. In figuur 2 is het hoofdschema van het

Figuur 2. Ketens van ontwatering - afwatering - lozing



neerslag-afvoersysteem met betrekking tot de termen ontwatering, afwatering en lozing schematisch weergegeven.

3.2.1. Het ontwateringssysteem

Van ontwatering is sprake, indien overtollig water aan de grond wordt onttrokken. De ontwateringsmiddelen die hiertoe, al dan niet in combinatie, kunnen worden toegepast zijn greppels, buisdrainages, perceel- en kavelsloten. De ontwatering heeft tot doel het afvoeren van overtollig water tot een, op het grondgebruik afgestemde, optimale hoeveelheid is overgebleven.

Tussen de hoeveelheid bodemwater en de grondwaterdiepte bestaat een relatie (Van Heesen e.a., 1973). Op grond hiervan wordt de optimale hoeveelheid bodemwater vertaald in een optimale diepte van de grondwaterspiegel.

Bij het ontwerpen van het ontwateringssysteem wordt een samengestelde ontwateringsnorm gebruikt waarbij de gemiddelde diepte van de grondwaterspiegel (ontwateringsdiepte) in combinatie met een stationaire afvoer wordt beschouwd (Hooghoudt, 1940). In de praktijk wisselt echter de grondwaterspiegel voortdurend tussen een laagste niveau bij nul-afvoer en hogere niveaus bij toenemende grootte van de afvoer. Bij toenemende hoogte zal doorgaans de tijdsduur waarover deze hoogte wordt bereikt of overschreden en de daarmee samenhangende frequentie van voorkomen, afnemen. Als ontwerpnorm wordt nu die combinatie gekozen waarbij het aantal overschrijdingen van de ontwateringsdiepte economisch verantwoord, of op andere gronden acceptabel is.

Een methode waarbij frequenties van overschrijding van een bepaalde grondwaterstand in de berekeningen worden betrokken is die van De Jager (De Jager, 1965). Afhankelijk van het grondgebruik en de mate van rijping van de bodem kunnen verschillende ontwateringsnormen worden aangehouden. Uit een recente studie blijkt, dat eventuele klimaatverschillen binnen Nederland geen significant verschillende afvoerpatronen te zien geven (Van Driel, 1976). Differentiatie van ontwateringsnormen naar deelgebieden is voor wat klimaatverschillen betreft dus niet noodzakelijk (zie ook 3.2.2.)

Voor een optimale normstelling is een gedetailleerde kennis vereist van de samenhang tussen gewasproduktie en bodemvocht, in relatie tot de geologische opbouw, het jaargetijde, de draagkracht van de bodem e.d. Ofschoon reeds veel onderzoek is gedaan, dient ten behoeve van de planoptimalisering met name naar de gewenste diepte van de ontwateringsbasis nog nadere studie te worden verricht.

3.2.2. Het afwateringssysteem

Van afwatering is sprake, indien overtollig water bovengronds door open leidingen of ondergronds door gesloten leidingen naar de grenzen van het gebied wordt afgevoerd. De afwateringsmiddelen bestaan uit waterlopen (sloten, leidingen, tochten, kreken, beken, boezems, enz.) en kunstwerken (stuwen, duikers, enz.) of rioleringen.

Bij een afvoer hoort een bepaald verhang van de waterspiegel; afwijkend van de horizontale richting, dat zich instelt in afhankelijkheid van de grootte van de afvoer in relatie tot het bodemverhang, de afmetingen en de wandruwheid van de waterloop. De diepte van de waterlijn onder het maaiveld wordt drooglegging genoemd.

Bij het ontwerpen van het afwateringssysteem wordt, evenals bij de ontwatering, gebruik gemaakt van een samengestelde norm, waarbij de combinatie van afvoer en drooglegging aan gestelde doelen moet voldoen. Ook voor het afwateringsstelsel geldt, dat in Nederland optredende klimaatsverschillen nauwelijks invloed uitoefenen op de te hanteren normen. Een uitzondering vormen wellicht de normen voor de capaciteit van rioleringen, omdat in de omgeving van industriële en stedelijke agglomeraties hogere neerslagen (vooral tijdens zomers buien) te verwachten zijn (Kraijenhoff van de Leur en Prak, 1979).

Bij de afwatering komen diverse doelstellingen aan de orde, die elk een eigen norm stellen. Ook de wijze van lozen, vrije lozing of bemaling, is hierbij van belang.

3.2.3. Het lozingssysteem

Van lozing is sprake, indien het af te voeren water op een zodanige wijze over de grens van het afwateringsgebied wordt gebracht, dat het niet in het gebied terugstroomt. Bij het lozen van water kan onderscheid worden gemaakt in vrije lozing, waarbij het water onder natuurlijk verval, eventueel over een stuw of via een suatiesluis, wordt afgevoerd en in kunstmatige lozing door middel van bemaling. In het laatste geval dient bij hoge buitenwaterstanden rekening te worden gehouden met een beperking van de capaciteit van het gemaal en bij een suatiesluis zelfs met tijdelijke stremming van de lozing.

De normen die bij het ontwerpen van het lozingssysteem worden gebruikt, houden nauw verband met die welke voor de afwatering gelden.

3.2.4. Het waterconserveringssysteem

Van waterconservering is sprake, indien het overtollige water niet volledig wordt afgevoerd doch een deel ervan in het gebied wordt bewaard.
Het waterbeheersingssysteem dient voor droogtegevoelige gronden niet uitsluitend afgestemd te zijn op de waterafvoer, maar ook op de waterconservering. In de regel vindt waterconservering plaats door middel van in de waterlopen geplaatste vaste, of beweegbare stuwen, waarbij de laatstgenoemde in het voorjaar worden opgezet. Op deze wijze wordt de waterafvoer gestremd en de grondwaterspiegel minder sterk verlaagd.

De normen die bij de waterconservering worden gehanteerd zijn vooral gebaseerd op de gewasopbrengsten. De belangen van het natuurbeheer, vooral bij van nature natte terreinen, worden echter in toenemende mate in de overwegingen betrokken.

3.2.5. Het wateraanvoersysteem

Van wateraanvoer is sprake, indien water van elders in het gebied wordt gebracht. Biedt bij droogtegevoelige gronden de waterconservering niet voldoende waarborgen tegen droogteschade, dan is wateraanvoer gewenst. In dit geval dient het waterbeheersingssysteem niet alleen afgestemd te zijn op waterafvoer en waterconservering, maar ook op wateraanvoer. Uit economische overwegingen wordt voor deze aanvoer doorgaans zoveel mogelijk van de afvoerwaterlopen gebruik gemaakt. In de regel is voor de dimensionering toch

de afvoersituatie maatgevend. Ten behoeve van de aanvoer behoeven meestal slechts enkele waterlopen en kunstwerken te worden verruimd of op andere wijze te worden aangepast. Naar analogie van het lozingssysteem bij wateraafvoer is bij wateraanvoer een waterinlaat vereist. Hierbij kan water via inlaten, onder natuurlijk verval, dan wel met behulp van pompen worden aangevoerd.

3.3. Ruimtelijke beschrijving van de waterhuishouding in relatie tot open waterlopen

Na de korte beschrijving van de onderdelen waaruit het waterbeheersingssysteem in de regel is opgebouwd, wordt in het hiernavolgende meer ingegaan op de kenmerken die per gebiedstype van toepassing zijn. Hierbij is onderscheid gemaakt in landelijke gebieden en stedelijke gebieden. De landelijke gebieden zijn op hun beurt weer onderverdeeld in hellende en vlakke gebieden.

3.3.1. Landelijke gebieden

De neerslag in het landelijke gebied dringt voor het grootste deel in de bodem; er vindt een aanvulling van het bodemwater plaats. Voor zover de aanvulling niet geheel via de wortels van de begroeiing of rechtstreeks verdampt, zal het deel, dat niet opgeslagen kan worden, zich geleidelijk bij het grondwater voegen en ondergronds afstromen. Het gevolg van een tijdelijke berging is dus dat, bij een bui die in korte tijd valt en tot afvoer aanleiding geeft, de afvoer over een veel langere periode wordt uitgesmeerd. Daardoor kan de benodigde capaciteit van het afvoersysteem aanmerkelijk worden verkleind ten opzichte van de neerslagintensiteit. Als gevolg van de berging van neerslag zal tevens de grondwaterspiegel stijgen. Op de hogere doorlatende gronden, waar de grondwaterspiegel nauwelijks of nooit tot aan de wortelzone reikt, is dit geen bezwaar. In gebieden echter waar de grondwaterspiegel het maaiveld nadert of zelfs bereikt kan het bodemgebruik aanzienlijk worden belemmerd. In deze gebieden kan de ontwatering worden verbeterd door het aanleggen van sloten en eventueel greppels c.q. drainage. De afvoer van het overtollige water wordt hierdoor ten opzichte van de oppervlakte afvoer, die in de oorspronkelijke toestand kan ontstaan bij inundatie weliswaar vertraagd maar ten opzichte van de ondergrondse afvoer versneld, waardoor het aantal hoge stijgingen van de grondwaterspiegel wordt beperkt. Om te komen tot een dergelijk waterbeheersingsplan moeten de gewenste normen worden vastgesteld. Deze zijn afhankelijk van de doelstelling en de hydrologische kenmerken.

3.3.1.1. Hellende gebieden

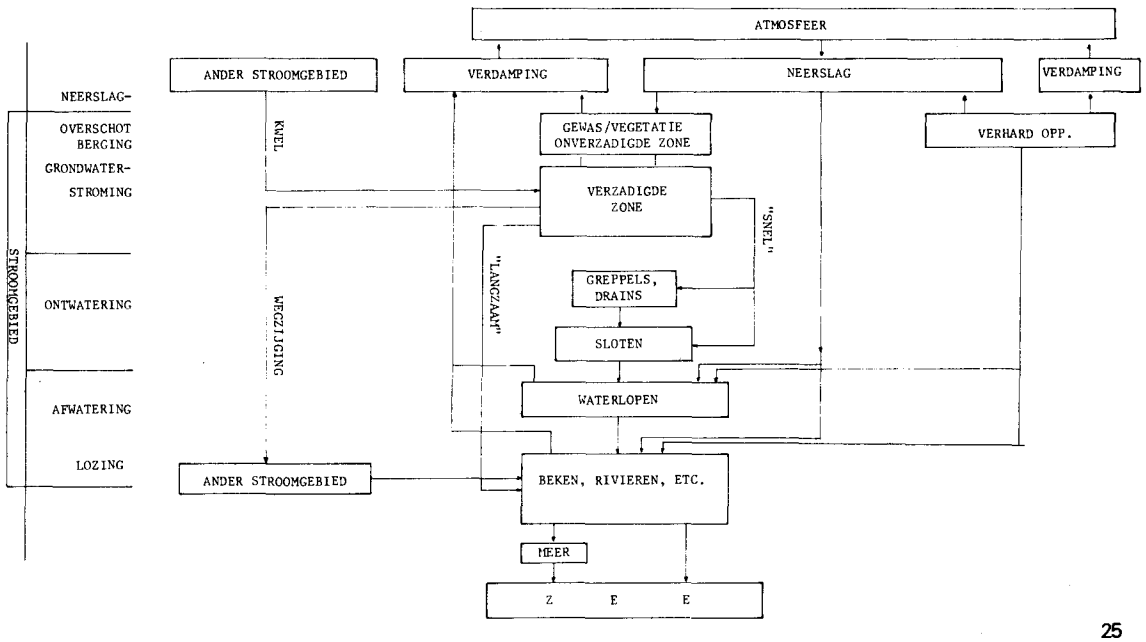
Door de in de hellende gebieden voorkomende grondwaterstandsverschillen is er een min of meer constante grondwaterstroming van de hoge gebiedsdelen naar de lage. Deze stroming ligt ten grondslag aan de basisafvoer in de lagere gebieden en is mede verantwoordelijk voor het diep wegzakken in de zomer van de grondwaterstanden in de hoge gebiedsdelen. In hoge delen met diepe grondwaterstanden (hoge GT-klasse) treft men weinig of geen sloten aan, terwijl in de lage delen met hoge grondwaterstanden (lage GT-klasse) relatief veel sloten, al dan niet gecombineerd met een detailontwatering, voorkomen. In een hellend gebied geldt in het algemeen en wel met name in de hogere delen, dat de grondwaterstanden op enige afstand van de waterlopen in beperkte mate door het peil in de waterlopen worden beïnvloed. Daarentegen wordt dit peil wel in sterke mate door de grondwaterstand bepaald

(een kwestie van grootte van elkaar beïnvloedende systemen: een groot systeem heeft wel invloed op een klein systeem, maar omgekeerd nauwelijks). De grondwaterstanden en dus ook de peilen in de waterlopen zijn in hellende gebieden meestal aan sterke seizoensfluctuaties onderhevig. In de zomer kan, vooral in de hogere delen van het gebied, de grondwaterstand zover dalen dat sloten en leidingen droogvallen, terwijl van nature inundaties in de winter in de lage delen als gevolg van hoge grondwaterstanden geen zeldzaamheid zijn.

Het beheersen van de grondwaterstanden in de hogere delen van de hellende gebieden is, gezien de diepe ondergrondse wegzijging, zonder een wateraanvoersysteem nagenoeg niet mogelijk. Door vroeg in het voorjaar plaatsen van stuwen in de waterlopen kan een zekere mate van waterconservering worden verkregen. Berging in open waterlopen is in vergelijking met vlakke gebieden zeer gering. De belangrijkste berging vindt plaats in de gronden met diepe waterstanden. De neerslag die voor het grootste deel in de grond dringt, zorgt voor aanvulling van de vochtvoorraad in de onverzadigde zone. Voor zover deze aanvulling niet geheel door evapotranspiratie wordt aangesproken zal er een stijging van de grondwaterstand plaats hebben. In de winter met een geringe evapotranspiratie zijn de stijgingen, in afhankelijkheid van de grootte van de neerslag, het grootst; zij nemen in de loop van het voorjaar bij toenemende evapotranspiratie geleidelijk af en slaan om in een daling. In de zomer, waarin de evapotranspiratie de neerslag overtreft, treden de grootste dalingen op waarna in het najaar weer een lichte stijging optreedt als gevolg van een geleidelijk toenemend neerslagoverschot.

Naarmate ondiepere grondwaterstanden voorkomen, zullen er steeds meer sloten op kortere afstanden van elkaar aan het afvoerproces deelnemen, waardoor de afvoeren sneller op neerslagen gaan reageren. Topafvoeren treden dan ook meestal op in natte periodem van wat langere duur. De dimensionering van de waterlopen op topafvoeren heeft soms het bezwaar dat de waterlopen nogal groot uitvallen. Indien dit om economische of landschappelijke redenen niet verantwoord is, kunnen retentiebekkens worden overwogen, teneinde de afvoeren meer over de tijd te spreiden en daarmee de topafvoeren af te vlakken. De hoofdstructuur van het neerslag-afvoersysteem is in figuur 3 weergegeven. In hellende gebieden kan tegelijk kwel en wegzijging

Figuur 3. Hoofdschema van het neerslag - afvoersysteem van een hellend gebied



optreden; wegzijging in de hoge delen en kwel in de lage delen van het afwateringsgebied. In figuur 3 zijn beide grootheden dan ook aangegeven.

De wijze van lozen is afhankelijk van het verschil in peilen tussen het binnen- en buitengebied. Over het algemeen is dit verschil zodanig dat te allen tijde met een vrij verval kan worden geloosd. Is dit niet het geval dan worden andere wijzen (onderleiders, suatiesluizen, onderbemalingen etc.) toegepast.

3.3.1.2. Vlakke gebieden

Een vlak gebied is een gebied waar geen grote verschillen in maaiveldshoogte en in de hoogte van het grondwater optreden. In tegenstelling tot hellende gebieden kunnen in vlakke gebieden, zeker indien het grondwaterpeil van de omgeving nagenoeg permanent hoger ligt dan die van het vlakke gebied, de grondwaterstanden wel met behulp van een drainagestelsel en een waterlopenstelsel worden beheerst. In de regel is bij vlakke gebieden sprake van poldergebieden, er kan echter ook sprake zijn van vlakke dalen in het Pleistoceen landschap.

Poldergebieden worden door kaden of dijken tegen het (hogere) buitenwater beschermd. Hier fungeert het waterlopenstelsel bij wateroverlast als afvoersysteem en bij een te kort aan water als aanvoersysteem. Met behulp van gemalen, suatiesluizen e.d. wordt het overtollige water geloosd en door middel van inlaten wordt het benodigde water in de zomer aangevoerd.
De grondwaterstanden zijn in poldergebieden vrij ondiep. In de zomer zakken ze meestal niet dieper dan 1,50 m beneden maaiveld, of vaak nog minder en in de winter niet dieper dan drainniveau. De grondwaterberging is dus geringer dan die in hellende gebieden en daardoor is de reactie van de afvoeren op de neerslag veelal sneller.

Het peil dat in de sloten - soms alleen in de grotere waterlopen - wordt gehandhaafd, wordt het polderpeil genoemd. Vaak heeft het polderpeil 's zomers en 's winters een verschillende stand; men spreekt dan van een zomerpeil respektievelijk een winterpeil. Een polder bestaat dikwijls uit meerdere peilvakken. Vanuit hoge peilvakken wordt het water over stuwen geloosd op lager gelegen peilvakken. Anderzijds kunnen geïsoleerde lage delen onderbemalen worden (Schothorst, 1970). Voor de afwatering wordt het overtollige water via zijleidingen naar de hoofdleiding getransporteerd die uitkomt bij het lozingspunt. Dit stelsel vertegenwoordigde in de oudere polders een aanzienlijke oppervlakte open water tot ca. 10% in oude veenpolders. In de nieuwe polders is slechts 1 à 2% open water aanwezig. Doordat tevens strakkere peileisen worden gehanteerd is de mogelijkheid tot berging in de waterlopen geringer geworden.

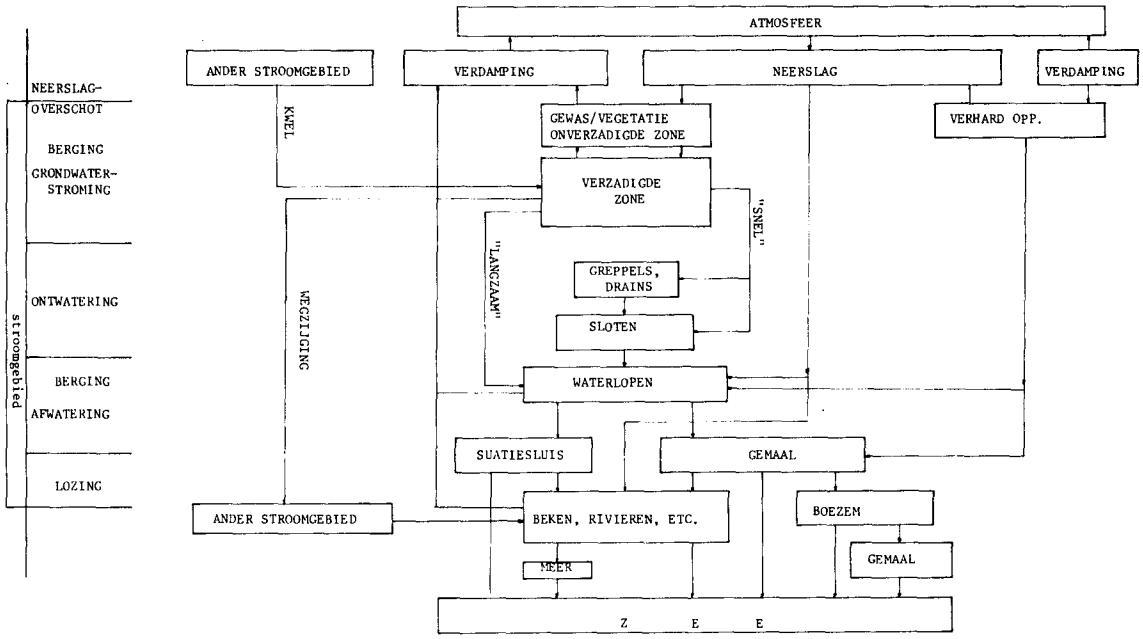
De waterlozing uit een polder is in principe op twee manieren mogelijk, te weten: door suatiesluizen, of door een gemaal. Suatiesluizen kunnen worden toegepast wanneer de buitenwaterstand gedurende bepaalde perioden lager is dan de binnenwaterstand in de polder (suatie komt nog slechts weinig voor door inklinking, hogere eisen van de landbouw en door afsluiting van zeegaten). Is afvoer onder natuurlijk verval niet mogelijk, dan moet de afvoer door een gemaal plaatsvinden. Het gemaal kan het water uitslaan op een rivier, een boezem of op zee.

Bij bemaling op een boezem zijn er in principe twee mogelijkheden:
- bemalen op een besloten boezem;
  Dit is een boezem waarvoor een maalpeil geldt, omdat de lozing uit de

boezem zelf soms stagneert. Zodra dit peil is bereikt mogen de polders niet langer op de boezem lozen wegens gevaar voor doorbraken van de boezemkaden en wateroverlast voor de rechtstreeks op de boezem afwaterende gebieden (boezemlanden);
- bemalen op een vrije boezem;
  In dit geval kunnen de polders te allen tijde op de boezem lozen.

De hoofdstructuur van het neerslag- afvoersysteem van een polder is weergegeven in figuur 4.

Figuur 4. Hoofdschema van het neerslag - afvoersysteem van een poldergebied



Bij kunstmatige lozing dient deze zodanig te worden geregeld dat peilfluctuaties binnen de polder tot een minimum worden beperkt. In geval van suatie via een sluis dient er rekening mee te worden gehouden dat als gevolg van hogere buitenwaterstanden de afvoer gedurende kortere of langere tijd kan zijn gestremd. Dit kan het geval zijn bij lozing op zee waar eb en vloed voorkomen, hetzij bij lozing op een rivier waar hoge rivierstanden voor kunnen komen. Daarom zal er een grotere waterberging in het gebied moeten zijn dan bij lozing via een gemaal. Ook de bemaling is geen continuproces. Eerst als het peil in de waterlopen tot een bepaalde waarde is gestegen wordt de bemaling gestart. Bij een capaciteit die zo veel mogelijk is afgestemd op de hoeveelheid toestromend water wordt bemalen tot een minimum peil. Dan stopt de bemaling tot het startniveau weer is bereikt; de cyclus wordt herhaald. Omvangrijke onderbemalingen in een polder kunnen het discontinue karakter van de waterafvoer versterken.

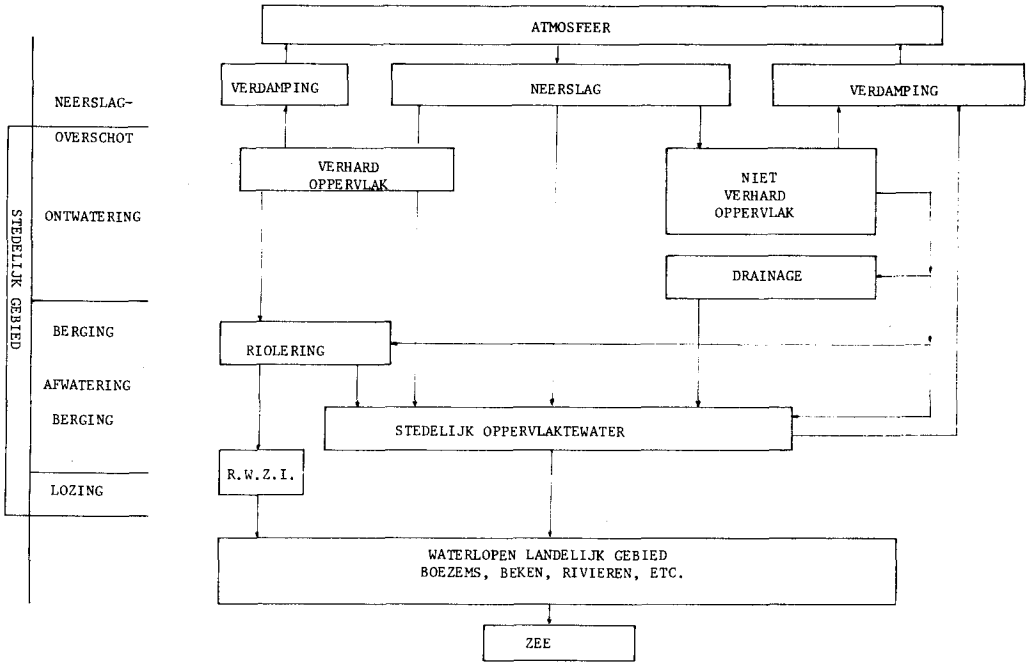
Wateraanvoer in poldergebieden is doorgaans eenvoudig te realiseren. Door de lage ligging kan inlaat, meestal onder vrij verval, plaatsvinden. Afhankelijk van het doel, doorspoeling ter verbetering van de kwaliteit of alleen wateraanvulling, kan met meer of minder ingrijpende aanpassingen van het afvoersysteem worden volstaan.

3.3.2. Stedelijke gebieden

Het neerslag-afvoerproces van bebouwde gebieden, waartoe in dit verband ook de glastuinbouw moet worden gerekend, vertoont belangrijke verschillen ten

opzichte van dat in een landelijk gebied. Dit verschil wordt veroorzaakt door de verharde oppervlakken, waardoor de neerslag slechts voor een klein gedeelte in de bodem kan wegzakken en voor het grootste deel naar de riolen c.q. direct naar het open water in de stad stroomt. In tegenstelling tot de afstroming door de bodem is bij de afstroming door de riolering geen of slechts een beperkte bergingscapaciteit in het riool aanwezig. Hevige neerslag wordt aldus, slechts beperkt door de eigen capaciteit van het rioolstelsel, vrijwel onmiddellijk geloosd op waterlopen of andere nabij gelegen wateren. Deze lozingen kunnen zo groot zijn, dat afhankelijk van de grootte van het bebouwde gebied, voor de ontvangende waterlopen afzonderlijke afvoerberekeningen moeten worden gemaakt. Daarbij is ook het type riolering, bijvoorbeeld gemengd of gescheiden stelsel, van belang. Deze en andere facetten van de riolering welke voor het ontwerp van de waterlopen van belang zijn worden behandeld in bijlage 3 (Van Dort, 1974). De hoofdstructuur van het neerslag-afvoersysteem van een stedelijk gebied is schematisch weergegeven in figuur 5.

Figuur 5. Hoofdschema van het neerslag - afvoersysteem van een stedelijk gebied



De neerslag die in een stedelijk gebied op de onverharde bodem valt wordt voor een deel opgenomen door de beplanting of verdwijnt rechtstreeks door verdamping; het resterende deel voegt zich bij het bodemwater.
In een gebied met hoge grondwaterstanden zal het overtollige bodemwater voornamelijk via buisdrainage en/of door infiltratie in de riolering, worden afgevoerd. Bij lagere grondwaterstanden zal het via de diepere ondergrond naar nabij of verderweg gelegen wateren tot afstroming komen.

3.3.3. Invloed van stedelijke op landelijke gebieden

De regenwaterafvoer uit de rioolstelsels heeft de vorm van een kort durende golf, waarin het debiet snel verandert met de tijd. Indien het open water ten opzichte van de te verwachten topafvoeren een grote bergings- of afvoercapaciteit heeft (zee, meer, rivier) zal dit geen moeilijkheden opleve-

ren. In vele gevallen echter zal de capaciteit van de aanwezige waterlopen voor de lozing van de "verharde" afvoeren te klein zijn. Er treden dan ontoelaatbare snelheden en peilstijgingen c.q. inundaties op (Bouwknegt, 1977). De invloed van de topafvoeren uit de rioolstelsels op de waterlopen van het landelijke gebied kan beperkt worden door de lozing over meerdere verspreid liggende punten te verdelen, indien dit wat betreft aanwezige waterlopen mogelijk is. In geval van een gemengd rioolstelsel worden de topafvoeren bovendien verminderd door het vergroten van de berging in het rioolstelsel of het vergroten van de regenpompovercapaciteit. Een andere mogelijkheid is om de afvoeren uit de overstortputten of het regenwaterriool op te vangen in bergingsvijvers of singels in het stedelijke gebied, van waaruit het water geleidelijk met een lager debiet en/of lagere snelheid, kan worden afgevoerd naar de waterlopen van het landelijke gebied. Door deze maatregelen, alsmede door gebruikmaking van aangepaste drooglegingseisen en het meenemen in de berekening van de daarbij behorende extra berging, kunnen maatregelen ter vergroting van de waterloop in het landelijk gebied doorgaans tot de directe omgeving van het lozingspunt van de stedelijke afvoer in het landelijke gebied beperkt blijven (zie hoofdstuk 8).

4. Ontwerpnormen en toetsingsnormen

Op grond van de doelstellingen worden eisen gesteld aan waterbeheersingssystemen. Deze eisen berusten op relaties, die bestaan tussen het gestelde doel en kwantificeerbare hydrologische kenmerken als ontwateringsdiepte, overschrijdingsfrequentie e.d. Omdat dergelijke relaties niet volledig op grond van theoretische overwegingen kunnen worden vastgesteld, wordt uitgegaan van eisen, die deels gegrond zijn op ervaring en deels op onderzoek. Leiden dergelijke eisen tot richtsnoeren (regels) die een min of meer algemene geldigheid hebben, dan wordt gesproken van regels, of normen. Normen kunnen op tweeërlei wijzen worden toegepast, namelijk bij het ontwerpen (ontwerpnormen) en bij de toetsing van het ontwerp (toetsingsnormen). De ontwerper dient steeds te beseffen, dat deze normen niet zonder meer overal en te allen tijde toepasbaar zijn, maar afhankelijk zijn van plaats (bijvoorbeeld a.g.v. verschillen in klimaat en/of bodemgesteldheid) en van tijd (bijvoorbeeld a.g.v. veranderingen in landbouwsystemen c.q. inzichten).

Toetsingsnormen worden gebruikt ter toetsing van een ontwerp op zijn bruikbaarheid. Een dergelijke toetsing kan plaatsvinden na uitvoering, met als grootheid bij voorbeeld het aantal en de aard van de klachten van landgebruikers, of het aantal overschrijdingen van een bepaalde waterstand. Het is echter ook mogelijk in een eerder stadium te toetsen (bij voorbeeld door simulatie met het later te bespreken programma DIWA), waarbij gecontroleerd wordt of de uitkomsten van berekeningen aan de toetsingsnorm voldoen. Ter illustratie is in figuur 6 een voorbeeld van een ontwerpprocedure gegeven.

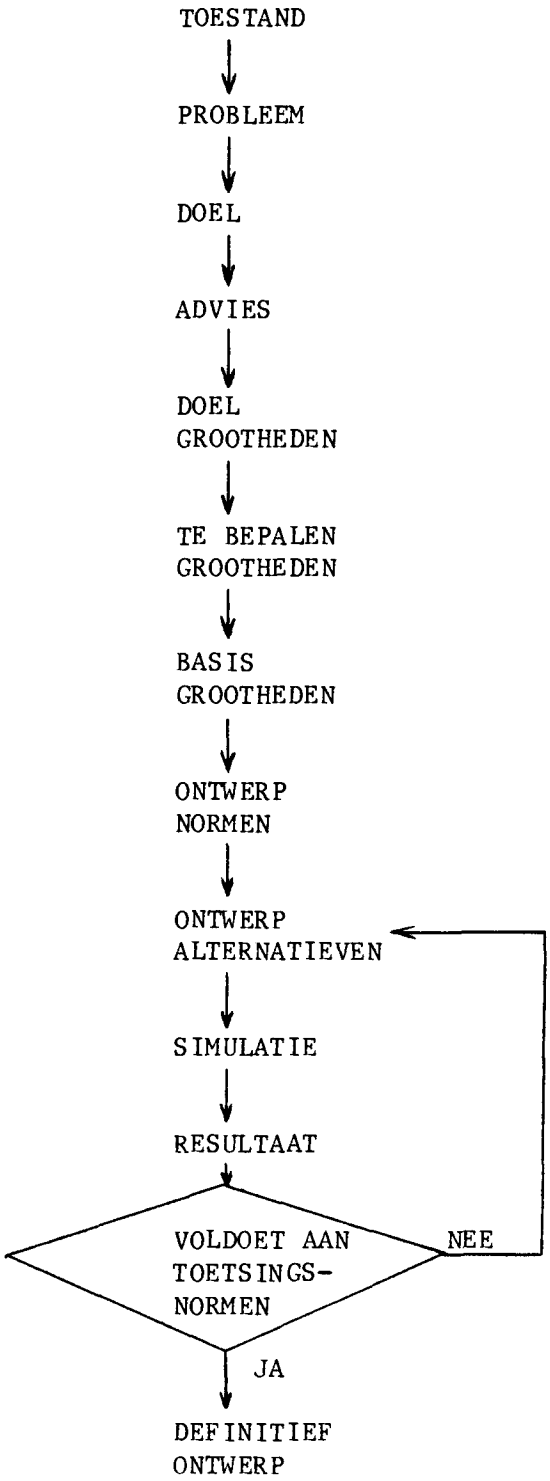
In het onderhavige rapport zal steeds worden gesproken van normen. De grootheid, die als norm wordt gebruikt wordt aangeduid met normgevende grootheid. Soms bestaat een norm uit een combinatie van normgevende grootheden; in die gevallen wordt gesproken van een samengestelde (meervoudige) norm.

Van normgevende grootheden, die betrekking hebben op verschijnselen die met de tijd veranderen, wordt de gekwantificeerde waarde dikwijls gegeven in combinatie met een kans (frequentie) van voorkomen of overschrijden. Hierbij moet worden opgemerkt dat de gebezigde frequenties op verschillende wijzen zijn gedefinieerd, namelijk als:
- het aantal al dan niet aaneengesloten dagen met overschrijding (gebruikelijk bij ont- en afwatering in landelijke gebieden);
- het aantal afzonderlijke perioden met overschrijding, ongeacht hun duur (gebruikelijk bij afwatering in stedelijke gebieden).

In de eerste definitie wordt afhankelijkheid tussen de gestelde gebeurtenissen (overschrijdingen), waarvan de duur niet altijd op één dag wordt gesteld, niet uitgesloten; aan vorming van klusters (groepen) wordt dus voorbijgegaan. In de tweede definitie daarentegen worden uitsluitend de klusters, waaraan a priori geen duur wordt toegekend, geteld. Het verschil komt tot uiting in de eenheid waarin de frequentie wordt uitgedrukt, namelijk:
. aantal dagen per jaar (landelijke gebieden);
. aantal keren per jaar (stedelijke gebieden).

Ook met betrekking tot landelijke gebieden zijn pogingen gedaan onafhankelijke gebeurtenissen te tellen door bijvoorbeeld uitsluitend maxima te beschouwen en deze te verwerken (Gumbel, 1958).

Figuur 6. Schematische voorstelling van een ontwerpprocedure



4.1. Ontwatering

4.1.1. Grootheden voor de ontwatering

Als een belangrijke grootheid voor de ontwateringstoestand van de grond wordt de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld gebruikt. Meer direct voor de landbouw van belang zijnde grootheden als aëratie, stabiliteit van de bodemstructuur, draagkracht en bewerkbaarheid zijn veel moeilijker te meten. Doordat zij echter nauw samenhangen met de grondwaterstand kan, voor praktische doeleinden, met een diepte van de grondwaterstand als normgevende grootheid worden volstaan, vooral indien men differentieert naar grondsoort en bodemgebruik. Het verloop in de tijd van bijvoorbeeld grondwaterstand of afvoer is grillig, vooral in natte perioden; soms komen zelfs binnen één dag aanzienlijke verschillen voor. Daarom worden deze tijdsafhankelijke verschijnselen samengevat tot karakteristieke grootheden, waarmee de hydrologische toestand wordt gekenschetst. Een karakteristieke grootheid, die een acceptabele of gewenste toestand representeert, kan tot norm worden verheven. Bij de verwerking van het grillige verloop van de meetgegevens tot één karakteristieke grootheid worden zowel deterministische als statistische methoden toegepast.

Voor het kenschetsen van de ontwateringstoestand van landbouwgronden wordt ondermeer een drietal karakteristieke grootheden gebruikt, terwijl invoering van een vierde door de Werkgroep wordt aanbevolen. Deze karakteristieke grootheden zijn:

a. Gemiddelde grondwaterstand

Deze grootheid is jarenlang gebruikt bij het vaststellen van de noodzaak tot ingrijpen in de ontwateringstoestand (C.O.L.N., 1958). De gemiddelde wintergrondwaterstand wordt vastgesteld met behulp van 14-daagse waarnemingen (in grondwaterstandsbuizen) gedurende een aantal winterhalfjaren.

b. Grondwatertrappen

Het begrip grondwatertrap wordt gehanteerd ter beschrijving van de waterhuishouding in de bodem (Van der Sluis en Van Egmond, 1976). Men onderscheidt de gemiddeld hoogste grondwaterstand (G.H.G.) en de gemiddeld laagste grondwaterstand (G.L.G.). Zij worden gedefinieerd als de over een lange periode (5 tot 10 jaar) gemiddelde waarde van telkens de 3 hoogste respectievelijk de 3 laagste standen in een jaar (bij 14-daagse waarnemingen). De grondwatertrappen (GT-klassen) worden samengesteld uit combinaties van bepaalde trajecten voor de G.L.G. en G.H.G.

c. Som van overschrijdingen van een kritische grondwaterstand (SO-waarde)

De som van overschrijdingen van een kritische grondwaterstand is voorgesteld, naar aanleiding van een onderzoek naar de ontwatering van de Noordoostpolder (Sieben, 1964). Indien deze som betrekking heeft op waarnemingen uit winterhalfjaren, wordt die som aangeduid met SOW. De diepte van de kritische wintergrondwaterstand (t.o.v. maaiveld) wordt aangegeven met een getal in cm's en als index onder of achter de afkorting SOW geplaatst.

d. Diepte van de ontwateringsbasis

De diepte van de ontwateringsbasis is het niveau waartoe de grondwaterstand nadert, indien na een periode van hoge standen er enkele dagen volgen zonder neerslag. Is er geen kwel of wegzijging aanwezig dan komt deze stand voor gedraineerde landbouwgronden veelal overeen met de diepte van de drains ten opzichte van het maaiveld. Bij niet gedraineerde gronden met de diepte van het slootpeil.

In stedelijke gebieden is ontwatering van betekenis zowel voor het onverharde als voor het verharde oppervlak. Als ontwateringsmiddelen worden naast singels e.d. meestal buisdrainages gebruikt. De normgevende grootheid voor de ontwatering is in het stedelijke gebied dezelfde als die in het landelijke gebied, namelijk de grondwaterstand ten opzichte van het maaiveld. Statistisch geformuleerd betekent dit, dat een kritische hoge grondwaterstand met een bepaalde frequentie mag worden bereikt of overschreden. Veelal wordt een frequentie van 1 à 2 x per 2 jaar aangehouden.

4.1.2. Normen voor de ontwatering

Het formuleren van normen met betrekking tot grondwaterstanden is niet eenvoudig vanwege het niet stationaire karakter van de grondwaterhuishouding. Daarom zijn voor de landbouw in Nederland normen ontwikkeld die gebaseerd zijn op stationaire situaties. Het gebruik daarvan zal, mogelijk onbewust, zijn bevorderd door het karakter van de neerslag in een winterseizoen, waarin de neerslag voornamelijk wordt veroorzaakt door frontpassages, die vaak langdurige regens veroorzaken. Voor deze als stationair te beschouwen toestand wordt als normgevende grootheid een constante afvoer bij een minimale ontwateringsdiepte vastgesteld (Hooghoudt, 1940). Deze samengestelde ontwateringsnorm is gedifferentieerd naar grondgebruik, zoals akkerbouw, weidebouw, tuinbouw, fruitteelt (Segeren en Visser, 1971) enz. Worden de normen uitgedrukt in de verhouding van de afvoer ten opzichte van de opbolling, dan blijkt een groot aantal normen gelijkwaardig te zijn (Wesseling, 1969).

Afvoer treedt op indien de grondwaterpotentiaal ter plaatse van het afvoerpunt c.q. afvoergebied een lagere waarde heeft dan de grondwaterpotentiaal in de omgeving ervan. In principe kan dit verschil op twee wijzen ontstaan, namelijk door het:
- verlagen van de potentiaal van het afvoerpunt c.q. afvoergebied zoals dat het geval is bij onder andere verlaging van het slootwaterpeil, drainage, bronnering en inpolderingen (aantrekken van kwel);
- verhogen van de omgevingspotentiaal bijvoorbeeld als gevolg van aanvoer van water (neerslag, beregening, bevloeiing).

De grootte van de afvoer is afhankelijk van het ontstane verhang, de doorlatendheid van de bodem en de geometrie van het stromingsgebied. Voor de landbouw is door Hooghoudt en vele anderen de stroming naar afvoersystemen bestudeerd. Uitgaande van de door Hooghoudt afgeleide (stationaire) drainageformule blijkt dat in de praktijk een economisch ontwerp van sloten en buisdrainage ontstaat wanneer de in tabel 1 weergegeven ontwateringsnormen worden gehanteerd.

Voor gronden met een niet of niet primair landbouwkundig gebruik gelden meestal andere normen. Hierover bestaan weinig gegevens en de gehanteerde normen variëren vaak met de aard van het gebied en de vegetatie. Voor bosbouw kunnen in veel gevallen dezelfde normen als in de landbouw worden aangehouden. Voor natuurgebieden leiden de genoemde ontwateringsnormen meestal tot een veel te diepe ontwatering. In het algemeen wordt in die gebieden zo weinig mogelijk van de ter plaatse aanwezige toestand afgeweken.

Tabel 1. Ontwateringsnormen in relatie tot het grondgebruik

Grondgebruik	Afvoerdichtheid in $m^3.s^{-1}.km^{-2}$ 1)	Grondwaterstand in m - maaiveld
Grasland	0,08	0,30
Bouwland (ongerijpt)	0,12	0,30
Bouwland	0,08	0,50
Tuinbouw open grond	0,08	0,50
	(0,12	(0,60
	(0,06	(0,70
	(0,01	(0,95
Bollen (zandgrond)	0,12	0,30
Bollen (kleigrond)	0,08	0,50
Bosbouw van	0,06	0,30
tot	0,08	0,50
Woonge- van	0,06	0,70
bieden tot	0,12	0,80
Sportvelden, speel- en ligweiden	0,18	0,50

1) 1 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$ = 86,4 $mm.d^{-1}$

Ook voor de diepte van de ontwateringsbasis zijn waarden gegeven (Van Wijk en Feddes, 1975). Deze zijn weergegeven in kolom 4 van tabel 2. Het bodemtype is in tabel 1 minder ver gedifferentieerd dan in tabel 2 omdat bij de berekening van drain- en slootafstanden het bodemtype nog wordt betrokken.

Tabel 2. Drooglegginsnormen en normen voor de ontwateringsbasis

Bodemgebruik bouwland bodemtype	Hoogwaterpeil H.W. in m - m.v.	Hoogwaterpeil H.W. in m - m.v.	Normaal waterpeil N.W. in m - m.v.	Winterpeil W.P. in m - m.v.	Ontwateringsbasis in m - m.v.
	kolom 1	kolom 2a	kolom 2b	kolom 3	kolom 4
Zware klei; 0,60 - 0,80 m klei op veen; leem- en keileemgronden	0,90	0,60	1,10	1,20	0,90
Lichte klei	1,00	0,60	1,20	1,30	1,00
Zware en lichte zavel; löss	1,10	0,60	1,30	1,40	1,10
Veraard veen; bezand veen 0,60 - 0,80 m veen op zand; 0,40 m klei op veen	0,90	0,60	1,00	1,10	0,90
0,60 - 0,80 m klei op zand 0,40 - 0,60 m klei op zand	1,00	0,60	1,10	1,20	0,90
lemig zand; 0,40 - 0,60 m klei op zand; 0,40 - 0,60 m veen op zand	0,80	0,50	1,00	1,10	0,85
fijn zand; 0,40 m klei op zand; 0,40 m veen op zand	0,75	0,50	0,90	1,00	0,75
Grof zand	0,70	0,50	0,80	0,90	geen drainage
Bodemgebruik grasland bodemtype					
Zavel- en kleigronden; löss; leem- en keileemgronden; 0,60 - 0,80 m klei op veen	0,90	0,60	1,00	1,10	0,80
lemig zand; 0,40 - 0,60 m klei op zand; 0,40 - 0,60 m klei op veen	0,80	0,50	0,90	1,00	0.80
0,40 m klei op veen	0,70	0,50	0,80	0,90	0,75
fijn zand; 0,40 - 0,60 m klei op zand	0,70	0,50	0,80	0,90	0,75
veen; 0,40 - 0,60 m veen op zand	0,60	0,50	0,75	0,80	0,70
grof zand; 0,40 m klei op zand; 0,40 m veen op zand	0,60	0,50	0,70	0,80	0,70

Ook voor de ontwatering van niet verharde oppervlakken in stedelijke gebieden is de norm gebaseerd op het gebruik van stationaire modellen. Bij een gestelde afvoernorm van 0,06 à 0,12 $m^3.s^{-1}.km^{-2}$ is de minimale ontwateringsdiepte gesteld op 0,70 à 0,80 m. Voor de diepte van de ontwateringsbasis worden soms normen gehanteerd in verband met de aan het rioleringsstelsel gestelde eisen.

4.2. Afwatering

4.2.1. Grootheden voor de afwatering

Een belangrijke grootheid voor de afwatering is het open waterpeil, gemeten ten opzichte van het maaiveld. Dit peil flucteert meestal nog sneller dan het grondwaterpeil. Een afwateringsstelsel reageert namelijk geheel anders dan een ontwateringsstelsel. In de eerste plaats, omdat de weerstand tegen stroming in de bodem aanzienlijk groter is dan in de open waterlopen. En in de tweede plaats, omdat de systeemconstanten bij open waterlopen sterker afhankelijk zijn van een toestandsgrootheid (b.v. waterpeil) dan bij grondwatersystemen. Deze verschillen komen dan ook tot uiting in de veel grotere fluctutaties in snelheden bij afwateringsstelsels dan bij ontwateringsstelsels. Er bestaan echter ook overeenkomsten tussen de ontwatering en de afwatering. Zo fungeert het afwateringsstelsel in zekere mate als ontwateringsmiddel (doordat grondwater rechtstreeks toestroomt naar dit stelsel) en het ontwateringsstelsel (drainbuizen, kavelsloten e.d.) tevens als transportmiddel.

Omdat het open waterpeil sterk fluctueert, wordt dit peil met behulp van een aantal karakteristieken gekenschetst en daartoe op statistische wijze gedefinieerd als het aantal dagen dat een nader te bepalen kritiek (hoog)-peil wordt bereikt of overschreden. In sommige gevallen bestaat er een bekende relatie tussen peilen en afvoeren (b.v. meetkunstwerken). In deze gevallen kan gewerkt worden met een afvoer als norm voor de afwatering. (De Jong, 1971). In het landelijke gebied worden voor het ontwerpen van afwateringsstelsels drie karakteristieke grootheden gehanteerd.

a. Normaal waterpeil (N.W.-peil)

Het N.W.-peil is het peil dat 10 à 20 dagen per jaar wordt bereikt of overschreden. Deze grootheid geeft aan welke afvoeren in de winter met vrij grote frequentie voorkomen en wordt tevens gebruikt ter beoordeling van de afwatering in het groeiseizoen. In dit seizoen moet de ontwatering optimaal kunnen functioneren, ook bij enige begroeiing in de waterlopen.

b. Hoog waterpeil (H.W.-peil)

Het H.W.-peil is het peil dat 1 à 2 dagen per jaar wordt bereikt of overschreden. In bemalen gebieden is de bij het H.W.-peil behorende afvoer bepalend voor de capaciteit van de bemaling;

c. Maximaal waterpeil (M.W.-peil)

Het M.W.-peil is het peil dat 1 à 2 dagen per 100 jaar wordt bereikt of overschreden. Dit peil moet zodanig zijn, dat ook bij deze zeldzame overschrijdingen geen kunstwerken worden beschadigd of dure gewassen en gebouwen in het water komen te staan.

Het toepassen van deze peilen bij het ontwerpen van afwateringsstelsels is afhankelijk van de wijze van lozen, namelijk ongestremd dan wel bemalen of via suatie.

Gebieden met ongestremde lozing

Tot nu toe wordt voor deze gebieden veelal gewerkt met een combinatie van N.W.-peil en H.W.-peil, waarbij een bepaalde relatie wordt verondersteld tussen H.W.-peil en M.W.-peil. Deze relatie is echter niet constant doch afhankelijk van de stroomsnelheid, het peilbeheer en de dwarsdoorsnede van de waterloop. De voorkeur van de Werkgroep gaat daarom uit naar een combinatie van N.W.-peil en M.W.-peil, waarbij beide apart worden berekend.

Gebieden met bemaling of suatie

Tot nu toe wordt in deze gebieden bijna uitsluitend het H.W.-peil gebruikt, waarbij de berekening van de bemalingscapaciteit wordt gebaseerd op de bij dit peil behorende afvoer, of een grotere. Het is echter gebleken dat het ook in deze situatie zeker zinvol is om het ontwerp te baseren op een combinatie van N.W.-peil en H.W.-peil. Vanwege de afvlakkende werking van de berging in deze gebieden is, indien aan de bovengenoemde uitgangspunten wordt voldaan, het M.W.-peil nagenoeg altijd zodanig dat geen inundaties of andere ernstige bezwaren optreden. Het gebruik van dit peil heeft daar dan ook weinig praktische betekenis. Daarnaast wordt in deze gebieden gedurende zomer en winter een streefpeil aangehouden op grond waarvan de bemaling of de situatie wordt geregeld.

Relaties tussen karakteristieke grootheden en afvoeren

In Nederland is in verschillende gebieden met ongestremde lozing onderzoek verricht naar het verband tussen de bovengenoemde karakteristieke grootheden en de bijbehorende debieten. Er bestaat een globale relatie, die in tabel 3 is weergegeven.

Tabel 3. Karakteristieke grootheden voor de afwatering met hun onderlinge relaties

Peil	Afvoer	Frequentie van overschrijding
N.W.	Q_n	10 à 20 dagen per jaar
H.W.	$Q_h \simeq 2 . Q_n$	1 à 2 dagen per jaar
M.W.	$Q_m \simeq 4 . Q_n$	1 à 2 dagen per 100 jaar

De karakteristieke grootheden in stedelijke gebieden zijn op dezelfde principes gebaseerd als die in de landelijke gebieden. Ook hier is het verloop van het open waterpeil in de tijd ten opzichte van het maaiveld bepalend. Voor het rioleringssysteem is de maatgevende grootheid de drukhoogte in het riool, die 1 à 2 x per 2 jaar wordt bereikt of overschreden. Hieraan ligt ten grondslag dat perioden met een grote neerslagdichtheid van betrekkelijk korte duur zijn. In geval van een neerslagdichtheid groter dan de ontwerp afvoerdichtheid, waarop de riolering is ontworpen, zal er gedurende korte tijd water op straat komen te staan. Hoewel dat, afhankelijk van de plaatselijke situatie, meer of minder belangrijke consequenties kan hebben, worden de extra investeringen voor de aanleg van een rioolstelsel met grotere afvoercapaciteit in het algemeen niet verantwoord geacht.

Voor open water in stedelijke gebieden wordt als karakteristieke grootheid doorgaans gehanteerd het waterpeil dat 1x per 10 jaar wordt bereikt of overschreden. Daarbij is het gewenst dat in het oppervlaktewater, waarop het rioolstelsel loost, niet zodanige peilstijgingen optreden, dat de afvoer uit het rioolstelsel wordt belemmerd. De hierbij aan dit peil te stellen waarde komt in feite voort uit een afweging van het risico dat wordt geaccepteerd ten opzichte van de benodigde investeringskosten. Het is wenselijk een extra karakteristieke grootheid te gebruiken, namelijk het waterpeil dat 1 à 2x per 100 jaar wordt bereikt of overschreden, om daarbij de niet te vermijden wateroverlast door relatief geringe ingrepen te beperken, bijvoorbeeld tot een overlast in een gedeelte van het gebied.

4.2.2. Normen voor de afwatering

Door het verschil in het gedrag van het ontwaterings- en van het afwateringssysteem is het niet eenvoudig eenduidige relaties te vinden tussen afwaterings- en ontwateringsnormen. Tot nu toe worden daarom afwaterings- en ontwateringsnormen onafhankelijk van elkaar beschouwd, met dien verstande dat aan de eis dat de afwatering geen belemmering mag vormen voor een goede ontwatering, wordt voldaan. Op grond van de karakteristieke grootheden kunnen normen worden opgesteld op basis waarvan waterbeheersingssystemen worden ontworpen. Het M.W.-peil kan eenvoudig gelijk aan maaiveld worden gesteld, omdat dan inundaties zelden voorkomen. In bepaalde gevallen, bijvoorbeeld in smalle beekdalen waar geringe economische belangen en geen kunstwerken aanwezig zijn, wordt genoegen genomen met een M.W.-peil dat iets boven het maaiveld ligt. Wordt slechts het H.W.-peil als norm gehanteerd dan kunnen de waarden worden gebruikt zoals die in kolom 1 van tabel 2 zijn weergegeven. Wordt uitgegaan van de combinatie van N.W.-peil en H.W.-peil, dan zijn de waarden van de N.W.- of de H.W.-norm te vinden in de kolommen 2a en 2b van tabel 2. In kolom 3 zijn de waarden voor het winterpeil(W.P.) weergegeven. De in tabel 2 vermelde waarden zijn niet absoluut en behoren te worden aangepast bij wijzigingen in de bedrijfsvoering. De weergegeven waarden worden gebruikt voor gebieden met een landbouwkundig optimale waterhuishouding.

Voor de riolering wordt gesteld dat bij een frequentie van 1 à 2x per 2 jaar het peil tot aan, of even boven straatniveau mag komen. Voor de bijbehorende afvoerdichtheden wordt verwezen naar de bestaande literatuur. (Van den Berg en Ven, 1977; Werkgroep Afvoerfactoren Stedelijke Gebieden, 1973; Wiggers, 1978). Omdat deze afvoerdichtheden in belangrijke mate worden bepaald door de intensiteit van de zomerse buien, verdient het overweging lokale en regionale verschillen in regendichtheid in de beschouwingen te betrekken (Kraijenhoff van de Leur en Prak, 1979).
Voor het afwateringsstelsel (incl. bergingsvijvers) worden peilstijgingen van 0,25 à 0,50 m toelaatbaar geacht bij een frequentie van 1x per 10 jaar (Van Dijk, Hengeveld en Overwater, 1978). Op deze wijze is een onbelemmerde afvoer van het rioolstelsel bij de hiervoor geldende frequentie in het algemeen voldoende gewaarborgd. Er zal echter ook steeds een controleberekening plaatsvinden voor de frequentie van 1x per 2 jaar. Deze laatste berekening is onder andere van belang voor de te kiezen oevervoorziening en voor het rioleringsontwerp. Tevens is het wenselijk dat een controleberekening plaatsvindt voor de frequentie van 1 à 2x per 100 jaar, om na te gaan in hoeverre de niet te vermijden wateroverlast door relatief geringe ingrepen kan worden beperkt.

5. Modellen

Nu de normen zijn geformuleerd waarop het waterbeheersingssysteem moet zijn afgestemd, dient te worden aangegeven welke modellen beschikbaar zijn en hoe deze modellen kunnen worden toegepast ten behoeve van het opstellen van waterbeheersingsplannen. In dit hoofdstuk zal een overzicht worden gegeven van een aantal modellen en voor welke toepassingen zij kunnen worden gebruikt. Met nadruk wordt gesteld dat het bij het met name noemen van een aantal modellen niet de bedoeling van de Werkgroep is geweest om een volledig overzicht samen te stellen.

Bij de modellen, zoals die aan de orde komen, kan onderscheid worden gemaakt in ontwateringsmodellen, afwateringsmodellen, lozingsmodellen en wateraanvoermodellen. Daarnaast zijn er modellen voor stroomgebieden - ook wel catchment modellen genoemd - waarin de verschillende onderdelen zijn geïntegreerd. Tevens kan onderscheid worden gemaakt in stationaire en niet-stationaire modellen. Van een aantal in Nederland toegepaste ontwateringsmodellen wordt in tabel 4 een overzicht gegeven en in tabel 5a van de afwateringsmodellen, gedifferentieerd naar de verschillende mogelijkheden van toepassing. In tabel 5b is een overzicht gegeven van de modellen voor het berekenen van rioolstelsels. Voor de niet in de tabellen genoemde modellen wordt naar de literatuur verwezen (Billib, 1968; Commissie Hydrologisch Onderzoek T.N.O., 1978 en 1966).

Een verschijnsel dat niet met de tijd verandert, wordt stationair genoemd. In een stationaire situatie treden geen bergingsveranderingen op; in stationaire modellen wordt de bergingscapaciteit dan ook niet ingebouwd. De invoer (b.v. neerslag, verdamping, wateraanvoer, waterpeil) en de uitvoer (b.v. drainafvoer, kwel, opbolling beekafvoer, waterpeil) van een dergelijk model hebben een éénduidige (constante) waarde. In een niet-stationair model moet de bergingscapaciteit wel worden ingebouwd en zijn de invoer en de uitvoer tijdsafhankelijk. Zij worden gegeven c.q. verkregen in de vorm van tijdreeksen. Het is mogelijk om met een niet-stationair model een stationaire situatie te benaderen door de invoer constant te laten en hiermee een lange tijd door te rekenen. Na elke tijdstap zal de constante (stationaire) eindsituatie dichter benaderd worden. In tegenstelling tot het voorgaande is het principieel onmogelijk om met een stationair model een niet-stationaire situatie te berekenen. Wel bestaan er quasi-stationaire modellen. Dit zijn echter in principe niet-stationaire modellen, zij het in vereenvoudigde vorm.

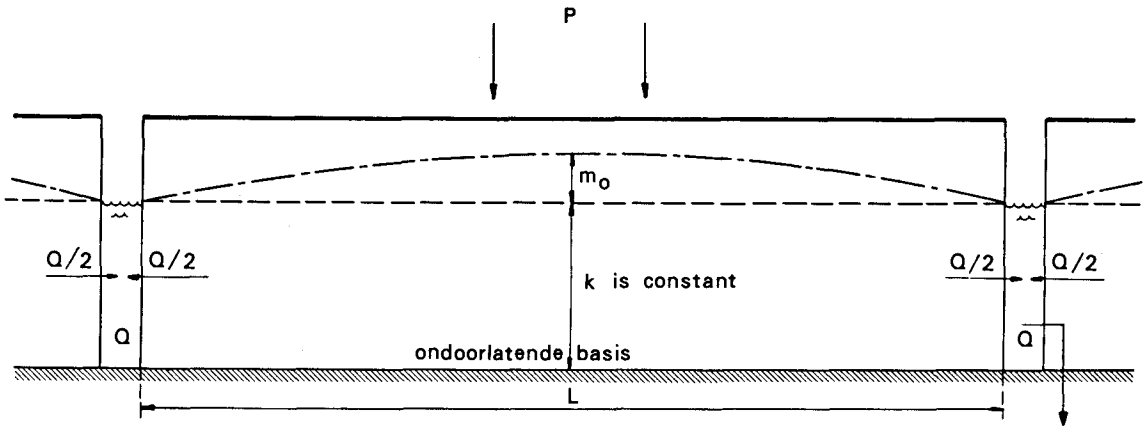
5.1. Ontwateringsmodellen

Er is geen wezenlijk verschil in ontwatering van het landelijke gebied en van het onverharde stedelijke gebied. Bij beide gaat het om het vaststellen van drain-, sloot- of singelafstanden en draindiepten, sloot- of singelpeilen ten einde de grondwaterstanden te kunnen beheersen. Voor de berekeningen wordt doorgaans gebruik gemaakt van stationaire modellen. Genoemd kunnen worden de drainageformules (Hooghoudt, 1940; Ernst, 1962). Deze formules behoren tot de groep van analytische oplossingen van het gestelde stromingsprobleem.

Indien in een gebied het tijdsafhankelijke verloop van de stroming naar de drains, sloten of singels van belang is, zal gebruik gemaakt moeten worden van niet-stationaire modellen.

Ook hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen modellen die gebaseerd zijn op een analytische oplossing van een differentiaalvergelijking (Ernst, 1962; Kraijenhoff van de Leur, 1962 en 1958; Van der Molen, 1972; De Zeeuw - Hellinga, 1958) en in modellen waarbij met behulp van de differentiaalvergelijking oplossingen op verschillende plaatsen kunnen worden gevonden, de zogenaamde numerieke modellen (Koopmans en Soer, 1975; Neuman, Feddes en Bresler, 1975). Van de eerstgenoemde modellen is een nadere beschrijving gegeven in bijlage 4. Deze modellen zijn eigenlijk alleen geschikt voor de simulatie van sterk vereenvoudigde (geschematiseerde) problemen, zoals weergegeven in figuur 7. Bij de numerieke modellen kan tevens de stroming in de onverzadigde zone in rekening worden gebracht, evenals de heterogeniteit van de bodem.

Figuur 7. Schematische voorstelling van de drainage van een kavel.



Daarnaast zijn er de fysische modellen. Ook bij deze modellen kan een onderscheid worden gemaakt in modellen die gebaseerd zijn op de differentiaalvergelijking en op een oplossing ervan. Onder de laatstgenoemde groep valt het Wageningenmodel (Kraijenhoff van de Leur, 1973).

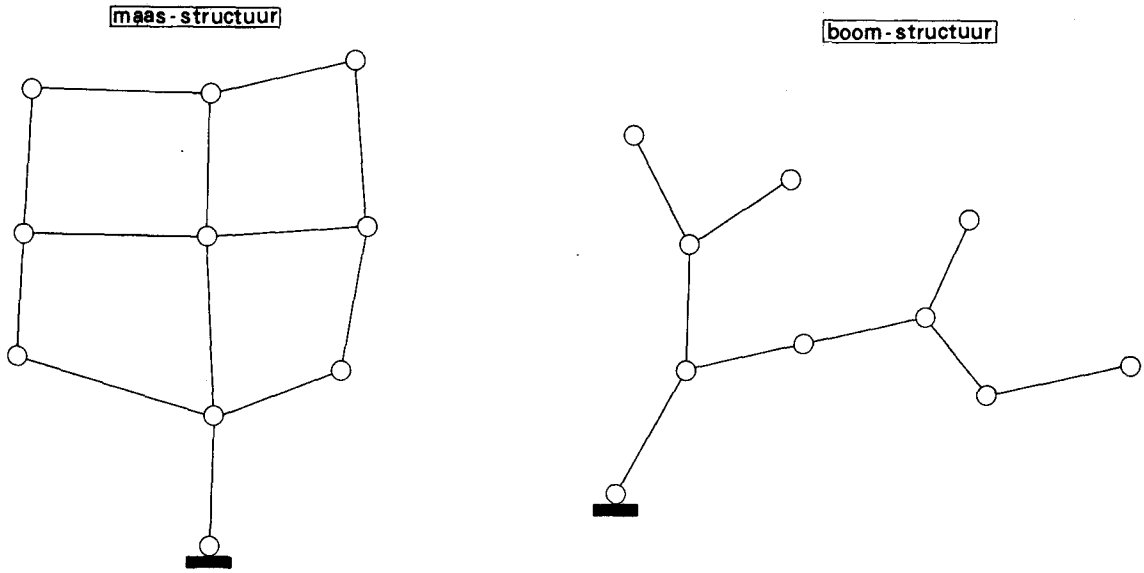
5.2. Afwateringsmodellen

Afwateringsmodellen worden gebruikt voor enerzijds de dimensionering van de afwateringsmiddelen (open waterlopen met kunstwerken, rioleringen) en anderzijds voor de berekening van het werkelijke verloop van afvoeren en peilen in de open waterlopen en rioleringen naar plaats en tijd. Voor de dimensionering wordt tot nu toe veelal gebruik gemaakt van stationaire modellen. Om het werkelijke verloop van afvoeren en peilen te kunnen berekenen moet gebruik worden gemaakt van een niet-stationair model. De afwateringsmodellen worden ook nog onderscheiden naar het type stroming, eenparig of niet-eenparig, waarmee gerekend wordt en naar de structuur van het waterlopenstelsel, namelijk boom- of maasstructuur. In hoofdstuk 8 wordt nader op deze begrippen ingegaan.

5.2.1. Landelijke gebieden

Voor de dimensionering van open waterlopen met bijbehorende kunstwerken wordt het stelsel in het model geschematiseerd tot knooppunten en takken, zie figuur 8.

Figuur 8. Principe van schematiseren van waterlopen



Doorgaans wordt bij de berekeningen van de te verwachten waterstanden en stroomsnelheden gebruik gemaakt van een stationaire maatgevende afvoer. Voor eventuele detailstudie betreffende bepaalde onderdelen binnen het stelsel worden dan niet-stationaire berekeningen uitgevoerd. Deze berekeningen, die nogal omvangrijk zijn, werden eertijds met de hand uitgevoerd maar thans wordt veelal gebruik gemaakt van computerprogramma's. Een programma waarmee berekeningen kunnen worden uitgevoerd voor stationaire situaties is het programma DIWA (bijlage 10) (Gelok, 1970). Er zijn diverse computerprogramma's beschikbaar waarmee zowel de stationaire als de niet-stationaire situatie kan worden doorgerekend, elk met zijn eigen specifieke kenmerken en mogelijkheden (Bouman en Schultz, 1978; Bouwknegt, 1978; Grijsen, 1978; Korving en Van der Woude, 1975/1976; Kraan, 1975; Meyer, Vreugdenhil en De Vries, 1965; Van de Nes, 1973). Een overzicht hiervan is gegeven in tabel 5a.

Andere typen modellen voor de berekening van een afvoergolf aan het einde van een open waterloop c.q. stroomgebied, als respons op een hevige neerslag, zijn het cascademodel van Nash (Nash, 1960), de methode gebaseerd op de eenheids-afvoergolf (Commissie Hydrologisch Onderzoek T.N.O., 1966) en de API-methode (Voetberg, 1967).

5.2.2. Stedelijke gebieden

Voor de dimensionering van een rioleringsstelsel wordt, evenals bij de open waterlopen in het landelijke gebied, veelal gebruik gemaakt van een stationaire berekeningsmethode. In dit geval spreekt men meestal over berekeningsregen in plaats van maatgevende afvoer. Ook hier gaat het om het opsporen van knelpunten in het netwerk. Daar het hier om stromingen door buizen gaat in plaats van open waterlopen en deze buizen al dan niet geheel gevuld kunnen zijn, zijn er speciale programma's voor dergelijke berekeningen (zie tabel 5b) (Kop, 1975). Om het aantal en de duur van de overstortingen in een bepaalde periode vast te stellen wordt een niet- stationaire berekeningsmethode gebruikt. Omdat vertragingsverschijnselen in het rioleringsstelsel in dit geval als niet evident worden beschouwd, wordt het netwerk buiten beschouwing gelaten en worden alleen de totale bergingscapa-

citeit en de regenpompovercapaciteit in het model gebracht; men spreekt in dit verband van een "bak"model (Van den Herik en Kooistra, 1970). Voor de dimensionering van open waterlopen in het stedelijke gebied wordt, gezien de korte duur van de buien die bij de gehanteerde frequentie maatgevend zijn in toenemende mate een niet-stationaire berekeningsmethode toegepast.

5.3. Lozingsmodellen

Lozing vindt vrijwel altijd plaats door, of over één of ander lozingskunstwerk. Het soort en de afmetingen van een dergelijk kunstwerk in relatie tot de functie ervan wordt doorgaans bepaald met de in de hydraulica bekende formules (Nortier en Van der Velde, 1963). Ook kan het lozingskunstwerk deel uitmaken van de afwateringsmodellen, waarmee dan tevens de afmetingen van het kunstwerk kunnen worden bepaald. Tenslotte is er de mogelijkheid om in het laboratorium door middel van fysische schaalmodellen de afmetingen van een kunstwerk te bepalen (WL Delft en de Voorst, TH-Delft, LH-Wageningen).

5.4. Waterconserveringsmodellen

Onder conserveren van water wordt verstaan het bergen van water hetzij door minder water dan gebruikelijk is door het waterlopenstelsel af te voeren, hetzij door infiltratie van water in de grond. Bestudering hiervan veronderstelt een model, waarin een koppeling bestaat tussen enerzijds het verzadigde en onverzadigde grondwatersysteem en anderzijds het open watersysteem. Een model dat aan deze eis tegemoet kan komen is dat van Provinciale Waterstaat Gelderland. (Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland, 1975).

5.5. Wateraanvoermodellen

Bij de wateraanvoer in droge perioden ten behoeve van de landbouw kunnen een tweetal aspecten worden onderscheiden, namelijk een beleidsaspect en een technisch aspect. Het beleidsaspect betreft de verdeling van het beschikbare water. Om te kunnen kwantificeren in hoeverre ingrepen in de waterhuishoudkundige hoofdinfrastructuur van Nederland kunnen leiden tot een gewenste verdeling van het beschikbare water is door Rijkswaterstaat een model ontwikkeld (WaMaMo) (Oudshoorn en Rutgers, 1973). De technische aspecten betreffen de stroming door een stelsel van open waterlopen, welke stroming veelal tegengesteld is aan die bij waterafvoer. Een aantal van de eerdergenoemde afvoermodellen zijn dan ook niet geschikt voor het berekenen van wateraanvoer.

5.6. Modellen voor stroomgebieden

Modellen voor stroomgebieden zijn modellen waarmee de totale waterhuishouding van een (stroom)gebied wordt beschreven, dus zowel de ontwatering, als de afwatering. Gezien de complexiteit van de berekeningen betreft het hier doorgaans uitsluitend computermodellen. Als voorbeelden te noemen het model van Van den Akker-De Laat (Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland, 1975) en dat van Visser-Bloemen (Bloemen, 1974) alsmede de Stanford-modellen (Crawford and Linsley, 1962; Linsley, Kohler and Paulhus, 1958).

Tabel 4. Overzicht modellen ontwateringsstelsels

Benaming Methode/Programma	Naam Instantie	Toepassing		Rekenwijze							Toegankelijkheid		
		Dimensionerend	Controlerend	Analytisch	Digitaal	Analoog	Stationair	Niet-stationair	Verzadigde stroming	Onverzadigde stroming	Handleiding aanwezig	Programma vrij ter beschikking	Onderhoud en onder-steuning gebruikers
Ernst	Diverse	-	+	+	-	-	+	+	+	-	n.v.t.		
Hooghoudt	Diverse	-	+	+	-	-	+	-	+	-	n.v.t		
Kraijenhoff van de Leur	L.H. Wageningen/ Heidemij.	-	+	+	-	-	-	+	+	-	n.v.t.		
Van der Molen	L.H. Wageningen	-	+	+	-	-	-	+	+	-	n.v.t.		
De Zeeuw-Hellinga	L.H. Wageningen	-	+	+	-	-	-	+	+	-	n.v.t.		
Van den Akker-De Laat	P.W. Gelderland/ Int. Course	-	+	-	+	-	+	+	+	+	-	-	-
Koopmans en Soer	L.H. Wageningen	-	+	-	+	-	-	+	+	+			
Neumann, Feddes Brester	I.C.W.	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+	-
Wageningen model	L.H. Wageningen	-	+	-	-	+							

Tabel 5a. Overzicht modellen waterlopenstelsels

Benaming Programma	Naam Instantie	Toepassing: Dimensionerend	Toepassing: Controlerend	Rekenwijze: Stationair	Rekenwijze: Niet-stationair	Toegankelijkheid: Handleiding aanwezig	Toegankelijkheid: Programma vrij ter beschikking	Toegankelijkheid: Onderhoud en ondersteuning gebruikers	Rapport Werkgroep Afvoerberekeningen: Opmerkingen en/of bijzonderheden
Diwa	L.D. Utrecht	-	+	+	-	+	+	+	Beschikbaar op computer L.D
Verhanglijn	Grontmij	-	+	+	-	+	-	-	
API									
Cherie	T.H. Delft	-	+	-	+	+	+	-	
Flows	T.H. Delft/W.L.	-	+	-	+	+	-	-	
Hydra	Heidemij	-	+	+	+	+	-	-	
Knota 6	R.IJ.P.	-	+	-	+	+	+	-	
Nash		-	+	-	+	-	-	-	
Nipest	Grontmij	-	+	+	+	+	-	-	Netstructuur
Stanford		-	+	-	+	-	+		
T.H.T.Sims	T.H. Twente	-	+	-	+	+	+	-	Aan particuliere bedrijven wordt vergoeding gevraagd
Visser-Bloemen	I.C.W.	-	+	-	+	-	-	-	
Waber	Hasko	-	+	-	+	+	-	-	

Tabel 5b. Overzicht modellen rioolstelsels

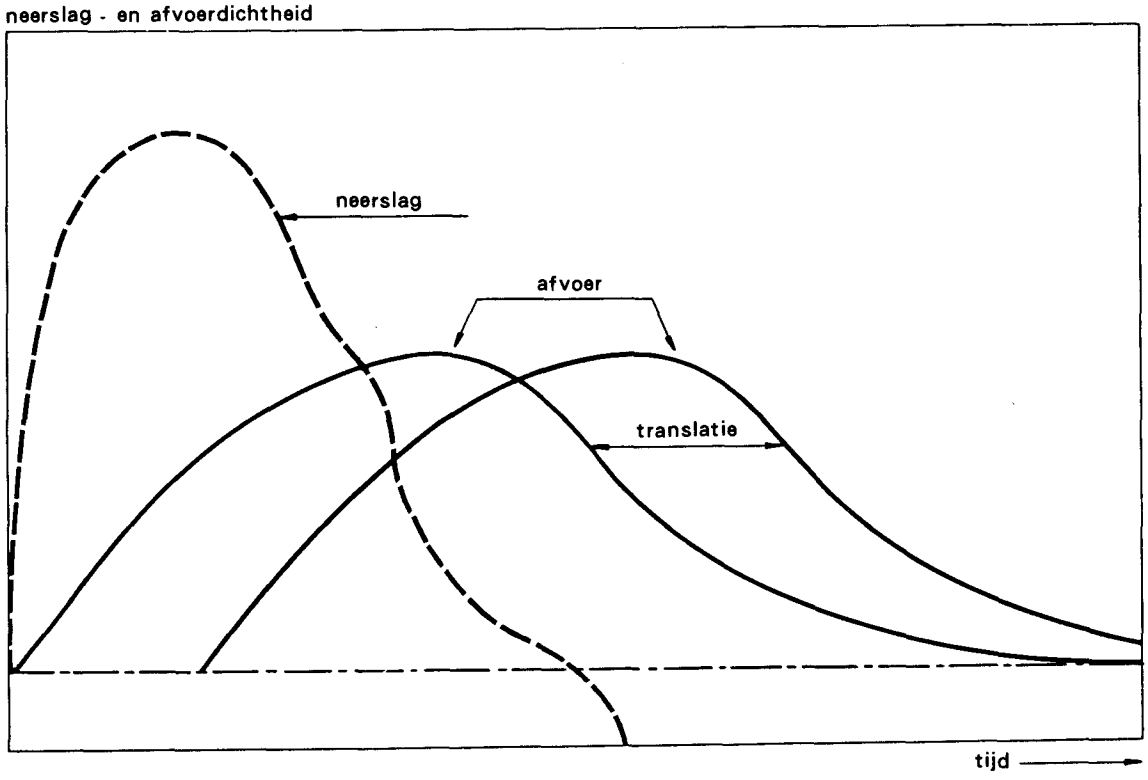
Benaming Programma	Naam Instantie	Toepassing: Dimensionerend	Toepassing: Controlerend	Vulling buizen: Geheel	Vulling buizen: Geleidelijk	Rekenwijze: Stationair	Rekenwijze: Niet-stationair	Toegankelijkheid: Handleiding aanwezig	Toegankelijkheid: Programma vrij ter beschikking	Toegankelijkheid: Onderhoud en ondersteuning gebruikers	Rapport Werkgroep Afvoerberekeningen: Opmerkingen en/of bijzonderheden
Cynas	T.A.U.W.	-	+	+	+	+	-	+		-	
Hydra	Heidemij	+	+	+	+	+	-	+	-	-	
T5300	Grontmij	+	+	+	+	+	+	+	-	-	Boomstruc. hellende gebied
T5310	"	+	+	+	+	+	-	+	-	-	Netstruc. vlakke gebied
Verhanglijn	"	-	+	+	+	+	-	+	-	-	

6. Methoden ter bepaling van maatgevende afvoeren

Onder de maatgevende afvoer wordt verstaan de hoeveelheid water die per eenheid van tijd uit een gebied moet worden afgevoerd om binnen dat gebied de gewenste beheersing van de waterstand te verkrijgen. In Nederland treden in de landelijke gebieden de hoge afvoeren vrijwel uitsluitend in het winterhalfjaar op, zodat de modellen, met behulp waarvan maatgevende afvoeren worden bepaald, slechts voor deze perioden bruikbaar hoeven te zijn. In stedelijke gebieden komen daarentegen de hoge afvoeren vooral in het zomerhalfjaar voor.

Kenmerkend voor het neerslag-afvoerproces is het verschil tussen het verloop met de tijd van de neerslag en dat van de afvoer (zie figuur 9), beide uitgedrukt in een dichtheid of wel betrokken op een eenheid van oppervlakte. Dit verschil bestaat enerzijds uit zowel een verschuiving in de tijd als een afvlakking in de tijd en anderzijds uit een nagenoeg constante verschuiving in de grootte (hoogte). De beide eerstgenoemde effecten tezamen worden aangeduid met het begrip transformatie. Het laatstgenoemde effect (verschuiving in de hoogte) is een bijzondere vorm van transformatie. Van translatie is sprake indien alleen een verschuiving in de tijd optreedt

Figuur 9. Transformatie van neerslag in afvoer



Voor de ontwerper van afwateringssystemen is de grootte van de invoer op verschillende punten van het systeem van belang. Deze grootte (uitgedrukt in volume per tijdseenheid ($m^3.s^{-1}$)) kan worden bepaald op grond van gemeten afvoeren van het ontwateringssysteem. Zijn deze niet beschikbaar, dan kan de grootte worden verkregen door een gekozen maatgevende afvoer-

dichtheid (uitgedrukt in volume per tijdseenheid per eenheid van oppervlakte($m^3.s^{-1}.km^{-2}$)te vermenigvuldigen met de aan de verschillende punten toegekende oppervlakte (in km^2) van het stroomgebied. Wordt van een neerslagdichtheid (uitgedrukt in laagdikte per tijdseenheid($m.d^{-1}$) gebruik gemaakt dan kan de afvoerdichtheid worden bepaald door de neerslagdichtheid per deelgebied te transformeren in een afvoerdichtheid. Hierbij moet worden opgemerkt, dat het ontwateringsstelsel en afwateringsstelsel twee achter elkaar geschakelde systemen zijn. De afvoer van het ontwateringsstelsel is de invoer voor het afwateringsstelsel en juist deze invoeren zijn maatgevend voor het laatstgenoemde stelsel.
Omdat de afvoer van een afwateringssysteem eenvoudiger is te meten dan de afzonderlijke afvoeren van de op dat afwateringssysteem lozende ontwateringssystemen en dikwijls de ontwaterende en afwaterende functie moeilijk te scheiden zijn, wordt de maatgevende afvoer tot nu toe hoofdzakelijk vastgesteld aan de hand van de afvoeren van het afwateringssysteem (Werkgroep Afvloeiïngsfactoren, 1963). In principe is dit onjuist. Immers tussen de afvoer van het ontwateringssysteem en de afvoer van het afwateringssysteem bevindt zich detransformatiefunctie van het afwateringssysteem. Voor Nederlandse omstandigheden blijkt echter, dat deze transformatiefunctie over het algemeen weinig invloed heeft. De transformatie is het gevolg van de berging en de weerstand die het water ondervindt, hetzij van neerslag op de weg naar de ontwateringsmiddelen, hetzij van de afvoer van het ontwateringssysteem naar de afvoer van het afwateringssysteem. Het produkt van weerstand en berging wordt de tijdconstante genoemd. De tijdconstante van het afwateringssysteem is dus over het algemeen klein in vergelijking tot de tijdconstante van het ontwateringssysteem.

De Werkgroep heeft gemeend dat het zinvol is een onderscheid te maken in methoden ter bepaling van maatgevende afvoeren die gebaseerd zijn op afvoeren van het ontwateringssyseem enerzijds en afvoeren van het afwateringssysteem anderzijds, hoewel de eerstgenoemde methode nog van geringe praktische betekenis is. Tevens zal worden aangegeven of de maatgevende afvoer is bepaald uit de invoer dan wel uit de afvoer van een systeem. Hierbij is stilzwijgend verondersteld dat neerslagcijfers, waar die nodig zijn, altijd in voldoende lange reeksen beschikbaar zijn.

6.1. Bepaling van de maatgevende afvoer aan de hand van ontwateringssystemen

Omdat de afvoer van het ontwateringssysteem fungeert als de invoer van het afwateringssysteem kan een maatgevende afvoer in principe bepaald worden aan de hand van het ontwateringssysteem. De afvoer van het ontwateringssysteem kan worden onderverdeeld in een langzame component, de basisafvoer en een snelle component de snelle afvoer. Indien een gebied op basis van het ontwateringssysteem wordt onderverdeeld in deelgebieden dan ontstaat er door een verschil in grondwaterstand tussen de deelgebieden een grondwaterstroming van het ene naar het andere deelgebied. Per deelgebiedis voor winterperioden de transformatie van neerslag naar (snelle) afvoer en grondwaterstand te formuleren.

Bij het berekenen van de maatgevende afvoer kan gebruik worden gemaakt van een stationair model dan wel van een niet-stationair model. Daar bij stationaire modellen geen sprake is van transformatie kan de maatgevende afvoer gelijk worden gesteld aan de maatgevende invoer, in dit geval aan de neerslag. Op grond van de verdeling van de neerslag kan dan de maatgevende afvoer worden bepaald. Bij niet-stationaire modellen mag bij de bepaling

van de maatgevende afvoer uitsluitend worden gewerkt met de verdeling van de afvoer. De maatgevende afvoeren van beide modellen zullen verschillend zijn, omdat bij niet-stationaire modellen transformatie optreedt die verantwoordelijk is voor het verschil tussen de verdeling van de neerslag en die van de afvoer van het ontwateringssysteem.

De mogelijkheid om de verschillende modellen toe te passen wordt bepaald door het beschikbaar zijn van gegevens betreffende bodemconstanten, eigenschappen van het ontwateringssysteem, afvoerreeksen en door de aard van het gebied. Op grond hiervan zal in het overzicht van de verschillende methoden een onderscheid worden gemaakt in het al dan niet bekend zijn van de parameters van het ontwateringssysteem zoals reservoircoëfficient, doorlatendheid, bergingscoëffient of afmetingen enerzijds en het al dan niet ter beschikking staan van waargenomen lange of korte reeksen afvoeren van het ontwateringssysteem anderzijds. Hierbij wordt onder lange reeksen verstaan reeksen continue gegevens over een groot aantal jaren. Korte reeksen kunnen bestaan uit enkele afvoercurven van één à twee jaar. Hierbij moet worden opgemerkt, dat maar betrekkelijk weinig waarnemingen aan afvoeren van het ontwateringssysteem zijn verricht, terwijl juist deze waarnemingen essentiële informatie kunnen verschaffen over te ontwerpen afwateringssystemen. De Werkgroep pleit dan ook voor meer aandacht aan dit facet.

Omdat in gebieden met een bemaling de afvoer van het ontwateringssysteem in sterke mate door de bemaling kan worden beïnvloed zal het ontwateringsmodel van bemalen gebieden waarin deze invloed is verantwoord, wezenlijk verschillen met het model van gebieden met een ongestremde lozing. Daarom is het overzicht van de mogelijke bepalingsmethoden in twee groepen verdeeld, zoals tot uiting is gebracht in tabel 6 en tabel 7. Een toelichting op de in de verschillende situaties te volgen werkwijze volgt hieronder. In deze toelichting wordt ervan uitgegaan dat de maatgevende afvoer is samengesteld uit twee componenten, waarvan de één wordt toegekend aan de basisafvoer en de ander aan de snelle afvoer. Beide moeten worden bepaald.

6.1.1. Parameters ontwateringssysteem bekend

Onder de parameters van een (ontwaterings)systeem worden de grootheden verstaan die als (karakteristieke) coëfficienten voorkomen in de modelmatige beschrijving van de reactie van het systeem op een al dan niet stationaire invoer. Voorbeelden zijn:

- de drainageweerstand W_{dr} in het stationaire ontwateringssysteem (Hooghoudt, 1940):
  Deze wordt gedefinieerd als de verhouding tussen de opbolling m_o en de afvoerdichtheid q, ofwel:

  $$W_{dr} = \frac{m_o}{q}$$

  Indien de waarde van deze weerstand niet uit metingen bekend is, kan deze als volgt worden benaderd:

  $$Wdr \approx W_h = \frac{L^2}{8.\ KD + 4.K.m_o}$$

- de reservoircoëfficient j in het niet-stationaire ontwateringssysteem (Kraayenhoff van de Leur, 1962 en 1958), ofwel in meer algemene termen uitgedrukt de tijdconstante τ, gedefinieerd als het tijdsverloop waarover de waarde van een (zuivere) uitputtingsgrootheid (bijvoorbeeld de afvoer Q van een drainagesysteem na een regen is gereduceerd met een factor 1/e ($\approx$ 0,37), ofwel:

  $$Q\ (t+\tau) = \frac{Q(t)}{e}$$

Indien de waarde van γ niet uit metingen bekend is, kan deze als volgt worden benaderd:

$$\tau = j = \frac{\mu \cdot L^2}{\pi^2 \cdot KD}$$

Een landelijk gebied dat onder een zekere helling ligt heeft in het algemeen een ongestremde lozing waarbij het peil in het gehele stroomgebied noch voor het open water noch voor het grondwater in tijd en plaats constant is. In het algemeen treedt een continue stroming van grondwater in de richting van de leidingen op die leidt tot een vrijwel constante basisafvoer. De basisafvoer is bijvoorbeeld te berekenen met behulp van een methode waarbij het stroomgebied wordt onderverdeeld in deelgebieden en waarbij vervolgens voor het bepalen van de stroming tussen de deelgebieden wordt uitgegaan van de vergelijkingen voor de stationaire grondwaterstroming en de continuïteitsvergelijking. (De Ridder, 1968). De snelle afvoer is te bepalen (zie tabel 6, eerste variant) door middel van:

- bepaling van de maatgevende neerslag, uitgaande van regenduurlijnen (Bloemer, 1972). Een variant hierop vormt het per periode bepalen van de hoogst waargenomen hoeveelheid neerslag (Wind, 1967). In dit laatste geval moet voor het bepalen van de maatgevende neerslag een reductie worden toegepast De snelle component van de maatgevende afvoer volgt dan uit de samengestelde ontwateringsnorm, toegepast op een stationair model, bijvoorbeeld op dat van Hooghoudt (Hooghoudt, 1940);
- bewerking van de afvoer van het ontwateringssysteem volgens ervaringsmethoden op grond waarvan een stationaire norm met bijbehorende maatgevende afvoer wordt afgeleid (Hooghoudt, 1940);
- uitgaande van een met behulp van de bekende parameters in een reeks afvoerdichtheden getransformeerde neerslagtijdreeks. Op grond van de reeks afvoerdichtheden kan een frequentiediagram worden opgesteld waaraan maatgevende afvoeren kunnen worden ontleend (De Jager, 1965).

Tenslotte is het ook mogelijk, indien een lange reeks afvoeren van het ontwateringssystemeen bekend is, om rechtstreeks hieruit de maatgevende afvoer te bepalen. Voorbeelden hiervan voor Nederlandse omstandigheden zijn bij de Werkgroep echter niet bekend.

Bij de methode van Hooghoudt is van de overschrijdingsfrequentie van de snelle afvoer een stationaire norm afgeleid, waaraan de ontwatering moet voldoen. In vergelijking met de methode van De Jager blijkt deze frequentie overeen te komen met 10 à 15 dagen per (winterhalf) jaar.

In tegenstelling tot een gebied met ongestremde lozing wordt een bemalen gebied c.q. poldergebied in het algemeen gekenmerkt doordat in het hele gebied nagenoeg een zelfde peil aanwezig is. Indien dit peil lager is dan van de omgeving, zal er een kwelstroming ontstaan naar de polder. Deze stroming vormt dan de (negatieve) basisafvoer van de polder; zij is analytisch te bepalen met bijvoorbeeld de formule van Mazure (Mazure, 1932; ILRI, 1972), of met numerieke methoden. Voor de bepaling van de snelle afvoer, (zie tabel 7, eerste variant), die door het bemalingsregiem kan worden beïnvloed, kan niet uitsluitend met het bepalen van de maatgevende neerslag worden volstaan. In de praktijk zijn bewerkingen uitgevoerd die op niet-stationaire situaties zijn gebaseerd (Van der Kley en Zuidweg, 1969). In feite berusten deze methoden op een, weliswaar op intuïtie gebaseerde, statistische bewerking van de afvoer. Een meer objectieve methode, analoog aan die van De Jager, zou wellicht met het Wageningen model of het model van De Zeeuw-Hellinga kunnen worden verkregen. Door simulatie met behulp van regencij-

Tabel 6. Mogelijke bepalingsmethoden van maatgevende afvoeren, gebaseerd op het ontwateringssysteem in gebieden met ongestremde lozing

	Gegevens			Methoden		
	Invoer	Model	Uitvoer			
	(ber.) neerslag	parameters	Ontwateringsafvoer	Invoer wordt statistisch bewerkt	Uitvoer wordt statistisch bewerkt	Zie Paragraaf
1	++	+	-	Methode Wind (snelle afvoer) + Polygoonmethode (basisafvoer); Methode Bloemen.	Basisafv.: Polygoonmethode. Snelle afvoer: Ervaring (Mooghoudt, Landinrichtingsdienst); Grafiek De Jager.	6.1.1.
2	++	-	+	Correleren met neerslag.	Correleren met neerslag tijdreeksen. Methode De Jager; alternatief Wageningen model (?) Vergelijken met bekende gebieden.	6.1.2.
3	++	-	-	Schatten van de parameters in methode Wind + schatten basisafvoer volgens methode Kusse.	Schatten (methode Kusse) van de parameters in methode De Jager. Blaauw of Dränanweisung.	6.1.3.

Verklaring: ++ lange reeksen beschikbaar
+ bekend of korte reeksen beschikbaar
- onbekend of geen reeksen beschikbaar
(?) suggestie

Tabel 7. Mogelijke bepalingsmethoden van maatgevende afvoeren, gebaseerd op het ontwateringssysteem in gebieden met bemaling (poldergebieden)

	Gegevens			Methoden		
	Invoer	Model	Uitvoer			
Variantief	(ber.) neerslag	parameters	Ontwateringsafvoer	Invoer wordt statistisch bewerkt	Uitvoer wordt statistisch bewerkt	Zie Paragraaf
1	++	+	-	Niet van toepassing.	Basisafvoer: Polygoonmethode. Snelle afvoer: Ervaring (NOP); "Grafiek" De Zeeuw of Wageningen	6.1.1.
2	++	-	+	Niet van toepassing	Methode de Zeeuw (?), Wageningen model (?) Vergelijken met bekende polders.	6.1.2.
3	++	-	+	Niet van toepassing	Schatten van de parameters in de methode De Zeeuw-Hellinga of Wageningen model	6.1.3.

Verklaring: ++ lange reeksen beschikbaar
+ bekend, of korte reeksen beschikbaar
- onbekend, of geen reeksen beschikbaar
(?) suggestie

fers en van in de praktijk toegepaste bemalingsstrategieën zou dan weer een "grafiek", betreffende de verdeling van de afvoer, geldend voor Nederlandse omstandigheden, kunnen worden samengesteld.

Opmerking

Permanente (bron)bemalingen of industriële lozingen geven een extra hoeveelheid af te voeren water. Deze hoeveelheid draagt bij in de basisafvoer van het landelijke gebied, indien niet via de riolering van een stedelijk gebied wordt geloosd. Niet-stationaire bemalingen en lozingen dragen in principe bij in de snelle afvoer. Als echter de snelheid van de fluctuaties ten opzichte van die van de totale afvoer relatief klein zijn, dan kan de lozing als nagenoeg stationair worden beschouwd met bijdrage in de basisafvoer. Tijdelijke lozingen blijven uiteraard voor de bepaling van de maatgevende afvoer buiten beschouwing.

6.1.2. Parameters ontwateringssysteem onbekend, maar korte afvoerreeksen beschikbaar

Voor een landelijk gebied met ongestremde lozing kan zowel de basisafvoer als de snelle afvoer worden bepaald uit correlatie-berekeningen (tabel 6, tweede variant). Hierbij wordt elke waarde van een gemeten afvoer van het ontwateringssysteem (b.v. in $m^3.s^{-1}$) gecorreleerd met een daaraan toegekende gemiddelde waarde van de neerslag ($m.d^{-1}$). Deze gemiddelde waarde wordt verkregen uit een middeling van neerslagen over een in de tijd opschuivende periode p. Deze periode eindigt altijd op een tijdstip dat een een tijdvak T voor het tijdstip van de betreffende afvoer ligt.
Door zowel de lengte als het einde van de periode te variëren wordt een correlatiefunctie verkregen, waaruit de meest geschikte (hoogste correlatie-coëfficient) periodelengte p en verschuiving (translatie) T is af te leiden. Uit voor het winterhalfjaar geldende regenduurlijnen kan een maatgevende neerslagdichtheid ($m.d^{-1}$) worden afgeleid voor de betreffende periodelengte als de daarbij horende neerslaghoogte door deze lengte wordt gedeeld Met behulp van de regressievergelijking $Q = a + m.N$ (waarin de constante a de basisafvoer voorstelt) kan dan de maatgevende neerslagdichtheid worden omgezet in de maatgevende afvoerdichtheid. Indien behalve afvoergegevens ook grondwaterstanden bekend zijn, kan de basisafvoer met behulp van een polygoonmethode worden vastgesteld (De Ridder, 1968) terwijl voor het bepalen van de snelle afvoer volgens de methode van Wind (Wind, 1965) de parameters kunnen worden bepaald.

Voor een statistische bewerking van de afvoer van het ontwateringssysteem kan in principe uit verschillende methoden worden gekozen, te weten:
- de methode waarbij de gemeten afvoeren worden gecorreleerd met een neerslagtijdreeks. Indien hiermee de regressie-coëfficienten die het verband tussen neerslag en afvoer aangeven bepaald zijn, kan uitgaande van de neerslagtijdreeks een lange reeks afvoeren gesimuleerd worden. Uit deze reeks kan vervolgens de maatgevende afvoer worden bepaald.
- de methode (curvefitting) die berust op het vaststellen van parameters van een te keizen ontwateringsmodel aan de hand van het correleren van gemeten en met het model berekende afvoeren.Dit kan in principe op twee manieren gebeuren, te weten door verschillende combinaties uit te proberen, of door het bepalen van de parameters met een optimaliseringsmethode (Clarke, 1973). Vervolgens kan uitgaande van de neerslagtijdreeks met behulp van het ontwateringsmodel, een lange afvoerreeks gesimuleerd worden.

Deze lange afvoerreeks wordt statistisch bewerkt ter bepaling van de maatgevende afvoer. Deze methode is onder andere toegepast door De Jager. (De Jager , 1965).

- de methode die berust op het vergelijken van de afvoerreeks met die van andere gebieden met overeenkomstige afvoerpatronen, waarvan de parameters van het ontwateringsmodel dan wel de regressie-coëffienten van de afvoerreeks met de neerslagtijdreeks wel bekend zijn. Indien de maatgevende afvoer van de vergelijkingsgebieden niet bekend is, is met deze derde methode de bepaling van de maatgevende afvoer in het betreffende gebied in feite herleid tot één van de voorgaande methoden (Werkgroep Afvloeiïngsfactoren, 1963).

Voor landelijke gebieden met bemaling is de methode, gebaseerd op het bepalen van de maatgevende neerslag, niet mogelijk (zie tabel 7, tweede variant). De afvoer kan hier namelijk worden beïnvloed door de bemalingsstrategie en daarmee door het open waterpeil. Bepaling van de maatgevende afvoer zou wellicht kunnen worden uitgevoerd door eerst met het model De Zeeuw-Hellinga of het Wageningen model, de transformatie van neerslag in afvoer te bepalen. Het vergelijken met polders waarvan de afvoer van het ontwateringssysteem wel bekend is, biedt eveneens een mogelijkheid ter bepaling van de maatgevende afvoer.

6.1.3. Parameters ontwateringssysteem onbekend en geen afvoerreeksen beschikbaar

Indien noch de parameters van ontwateringssytemen noch hun afvoeren bekend zijn - en in de praktijk zal dit in de regel het geval zijn - dan zal de maatgevende afvoer moeten worden geschat op grond van ervaring opgedaan in vergelijkbare gebieden. In principe kan deze schatting op twee wijzen worden gedaan:
- hetzij indirect, door het schatten van parameters van een (gekozen) ontwateringsmodel;
- hetzij direct.

Voor landelijke gebieden met een ongestremde lozing (tabel 6, derde variant) kunnen de parameters min of meer nauwkeurig worden geschat. (Wind, 1967, De Jager, 1965) Geënt op de methode van De Jager zijn voor het schatten van de parameters richtlijnen opgesteld, die in 7.1.2. staan vermeld. Hoewel minder expliciet geformuleerd kunnen ook de parameters in de methode van Wind (zie bijlage 6) aan de hand van gebiedskenmerken en GT-klassen worden geschat. Voor het schatten van de bergingscoëfficiënt is een door Stiboka ontwikkelde formule goed bruikbaar (Van Heesen, Van der Sluis en Krabbenborg, 1973). Richtlijnen voor het direct schatten van de maatgevende afvoeren zijn door Blaauw opgesteld (Blaauw, 1962). Ook in de Duitse Dränanweisung staan richtlijnen vermeld (Dränanweisung, 1959).

Voor bemalen gebieden zijn richtlijnen, overeenkomstig die voor gebieden met ongestremde lozing, ter bepaling van maatgevende afvoeren van het ontwateringssysteem niet bekend. In tabel 7, derde variant, zijn een aantal suggesties gedaan waarvan de waarde uit een nog uit te voeren onderzoek zal moeten blijken.

6.1.4. Maatgevende afvoer, samengesteld uit afvoer ontwateringssystemen

6.1.4.1. Homogene gebieden

Voor stroomgebieden, samengesteld uit een aantal deelgebieden die op dezelfde wijze op de neerslag reageren, is de maatgevende afvoerdichtheid eenvoudig te bepalen door het over het oppervlak van de deelgebieden gewogen gemiddelde van de maatgevende afvoerdichtheid van de deelgebieden te nemen. Voor dergelijke stroomgebieden wordt dan verondersteld dat de topafvoeren van alle deelgebieden samenvallen, er geen beduidende transformatie door de open waterlopen optreedt en dat voor alle deelgebieden de translatie dezelfde is.

6.1.4.2. Heterogene gebieden

Indien de deelgebieden niet op dezelfde manier op de neerslag reageren is de maatgevende afvoer van het totale gebied in principe niet te bepalen uit de afzonderlijke maatgevende afvoeren van de deelgebieden. In dit geval zal uitgegaan moeten worden van gemeten of gesimuleerde afvoerreeksen ten einde het al dan niet samenvallen van afvoertoppen in rekening te kunnen brengen. Bij het zonder meer sommeren van de maatgevende afvoeren wordt de totale maatgevende afvoer overschat en worden de leidingen overgedimensioneerd.

6.2. Bepaling van de maatgevende afvoer aan de hand van afwateringssystemen voor een landelijk gebied

Veel vaker dan afvoergegevens van ontwateringssystemen zullen gegevens beschikbaar zijn van afvoeren op bepaalde punten in het afwateringssysteem. De methoden, welke hierna worden beschreven zullen dus in de praktijk veelvuldiger toepassing vinden dan de onder 6.1. genoemde. Daar het afwateringssysteem uit een vertakt en/of vermaasd strangenstelsel bestaat is de invoer van dit systeem niet op alle punten gelijk. Achteraf zullen de gevonden resultaten naar deelgebied c.q. leidingvak moeten worden gedifferentieerd, in tegenstelling tot de in 6.1. beschreven methode waarbij van een zekere differentiatie wordt uitgegaan.

Bij het toelichten van het overzicht van methoden ter bepaling van maatgevende afvoeren is met uitzondering van stedelijke gebieden een andere indeling (zie tabel 8) aangehouden dan die in paragraaf 6.1. Bovendien is niet meer zo sterk de nadruk gelegd op het verschil tussen gebieden met ongestremde lozing en bemalen gebieden. Voor het bepalen van de maatgevende afvoer gelden de volgende overwegingen:

- "de" tijdconstante van het afwateringssysteem is vele malen kleiner dan die van het ontwateringssysteem; er mag dus vanuit worden gegaan dat alleen translatie in het afwateringssyteem plaatsvindt en alleen transformatie in het ontwateringssysteem;
- de invoer heeft op elk invoerpunt van het afwateringssysteem dezelfde tijdfunctie; er is slechts een verschil in absolute waarde, zodat als tijdfunctie het verloop van de neerslag als functie van de tijd kan worden aangenomen;
- een maatgevende afvoer kan slechts worden bepaald aan de hand van een bestaand afwateringssysteem;
- de berekende maatgevende afvoeren, die in feite afkomstig zijn van het ontwateringssysteem, zijn slechts geldig voor het bestaande ontwateringssysteem.

Een toelichting op de afhankelijk van de beschikbare gegevens te volgen werkwijze volgt hieronder.

6.2.1. Lange (winter)afvoerreeksen beschikbaar (variant 1)

Wellicht is voor gebieden met ongestremde lozing door toepassing van frequentie-analyse op de lange afvoerreeks onderscheid te maken in basisafvoer en snelle afvoer. Dit onderscheid is van belang voor een differentiatie van de maatgevende afvoerdichtheid naar deelgebieden. De differentiatie kan gewenst zijn voor een eventuele vergelijking met een reeks gesimuleerde afvoeren, uitgaande van neerslagcijfers, zoals die bijvoorbeeld met behulp van de methode van De Jager kan worden verkregen. In deze gesimuleerde afvoeren is namelijk de basisafvoer niet begrepen. Om een vergelijking op grond van statistische eigenschappen mogelijk te maken tussen gemeten en gesimuleerde afvoeren dient de statistische bewerkingsmethode uiteraard wel dezelfde te zijn. Het zou aanbeveling verdienen een zodanige methode toe te passen, dat ook de duur van de overschrijdingen tot uitdrukking komt. Opdat de (maatgevende) afvoer uitgedrukt kan worden in een afvoerdichtheid moet de herkomst ervan bekend zijn, dat wil zeggen dat de stroomgebiedsgrenzen en de maatgevende afvoer per leidingvak bekend moeten zijn.

Voor bemalen gebieden wordt de afvoerreeks gevormd door de maalcijfers. De wijze van bemaling komt hierin vaak duidelijk tot uiting.Deze maalcijfers zijn veelal beschikbaar en uitgaande hiervan kan de maatgevende afvoer worden bepaald (Stol, 1971).

6.2.2. Korte (winter)afvoerreeksen beschikbaar (variant 2)

6.2.2.1. Neerslagcijfers beschikbaar

Statistische bewerking neerslag.

Indien de parameters van het ontwaterings- en afwateringssysteem onbekend zijn, maar wel grondwaterstandgegevens beschikbaar zijn, kan een relatie tussen een representatieve grondwaterstand en de gemeten afvoer worden bepaald (Visscher, 1967). Uit het verloop van de afvoer en bovengenoemde relatie wordt bijvoorbeeld een bergingscoëfficiënt en een weerstand berekend (Commissie Hydrologisch Onderzoek T.N.O., 1963; Wesseling, 1957). Hiermee zijn de parameters bekend om de methode Wind toe te kunnen passen. (Wind, 1967). Voor Nederlandse omstandigheden kan daarbij ook van regenduurlijnen gebruik worden gemaakt (Bloemen, 1972).

Statistische bewerking afvoer.

Indien de parameters van het ontwaterings- en afwateringssysteem onbekend zijn, kunnen de parameters van een overall-model volgens het principe van het bepalen van de overdrachtsfunctie tussen neerslag en afvoer worden bepaald op grond van:

- empirische relaties, zoals gebruikelijk bij de Black-box methoden, te weten de methode van de eenheids-afvoergolf en de API-methode (C.H.O.-T.N.O., 1966; Voetberg, 1967);
- fysische relaties zoals die ten grondslag liggen aan de methode De Jager, methode De Zeeuw-Hellinga, methoden gebaseerd op het Nash-model en de Synthetische eenheids-afvoergolf. (resp. De Jager, 1965; De Zeeuw, 1966; Nash, 1960; C.H.O.-T.N.O., 1966).

Tabel 8. Mogelijke bepalingsmethoden maatgevende afvoeren afkomstig van stedelijke afwateringssystemen van verharde oppervlakken

Gegevens				Methoden		
	Invoer	Model	Uitvoer			
Variant	(ber.) neerslag	parameters	Riool-afvoer	Invoer wordt statistisch bewerkt	Uitvoer wordt statistisch bewerkt	Zie Paragraaf
1	++	+	-	7 methoden (zie Kempees). Variant Kuipers. Variant Braak.	v.d. Herik en Kooistra. v.d. Berg en Ven Zondervan	6.3.
2	++	-	+	Geen metingen van overstort (zie Slijkoord).	Geen metingen van overstort Slijkoord	6.3.
3	++	-	-	Schatten van parameters in formule van Rheinhold.	Niet bekend.	6.3.

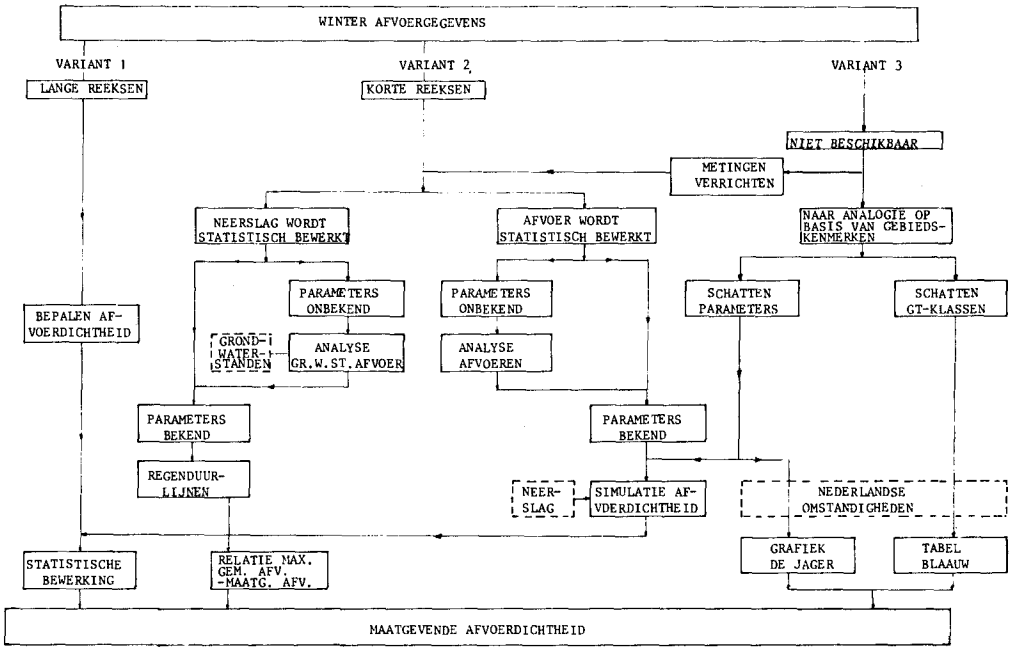
Verklaring: ++ lange reeksen beschikbaar
+ bekend, of korte reeksen beschikbaar
- onbekend, of geen reeksen beschikbaar

Uit deze overdrachtsfunctie kunnen met behulp van neerslagreeksen afvoeren worden gesimuleerd (zie 6.1.2.), die dan statistisch worden bewerkt tot een maatgevende afvoerdichtheid.

6.2.2.2. Geen neerslagcijfers beschikbaar

De enige mogelijkheid die in dit geval ter bepaling van de maatgevende afvoer overblijft, is een vergelijking van de korte beschikbare afvoerreeks met een lange reeks van een ander overeenkomstig gebied. Deze methode is o.a. toegepast voor het gebied Salland (Brouwn, 1971; Werkgroep Afvloeiïngsfactoren, 1963).

Figuur 10. Gebruik van afvoerreeksen van landelijke afwateringssystemen voor het bepalen van maatgevende afvoeren. (transformatie afwateringssysteem te verwaarlozen).



6.2.3. Geen afvoerreeksen beschikbaar (variant 3)

Indien geen afvoermetingen beschikbaar zijn kan de maatgevende afvoer geschat worden aan de hand van gebiedskenmerken (zie 6.1.3.). Hierbij kan onderscheid worden gemaakt in het direct schatten van de maatgevende afvoer (b.v. volgens de methode van Blaauw uit GT-klassen en uit reductiefatoren) en het indirect schatten. In dit laatste geval worden de parameters van het simulatiemodel geschat uit GT-klassen en andere gebiedskenmerken. Voor het schatten van de parameters uit de methode van De Jager worden enige richtlijnen gegeven in 7.1.2.; op grond van deze geschatte parameters is uit het frequentiediagram van De Jager de maatgevende afvoerdichtheid te bepalen.

6.3. Bepaling van de maatgevende afvoer afkomstig van stedelijke afwateringssystemen voor verharde oppervlakken

De wijze waarop in dit kader de stedelijk afwateringssystemen worden beschouwd, is analoog aan die van de (landelijke) ontwateringssystemen; het schematisch overzicht (tabel 8) verschilt dan ook niet van de in de tabel-

len 6 en 7 weergegeven overzichten. Gezien de aard van dit rapport beperkt de tekst zich tot het belang van deze informatie voor de landelijke afwateringssystemen. Wel pleit de Werkgroep voor meer onderzoek naar de transformatie van neerslag in afvoer uit het stedelijke gebied. Hierbij zou gebruik kunnen worden gemaakt van onderzoek naar de neerslag afvoerrelaties van verharde oppervlakken (Zondervan, 1978). Hieronder volgt een toelichting op de afhankelijk van de beschikbare gegevens te volgen werkwijze.

Bij gemengde rioolstelsels is de som van basisafvoer (dwa) en snelle afvoer (rwa) te bepalen uit de grootte van het bebouwde gebied, de inwonersdichtheid en het waterverbruik per hoofd per dag. Meestal is de pompovercapaciteit voor regenwaterafvoer drie keer zo groot als de droogweerafvoer (dwa) De genoemde som is dan dus 4 dwa. Bij overschrijding van deze som vindt overstorting naar het open water plaats. Bij een gescheiden rioolstelsel is deze som gelijk aan de dwa, omdat dan alle neerslag als snelle afvoer wordt geloosd op het open water.

Voor de bepaling van de snelle afvoer (overstorten), of rwa-afvoer is weer onderscheid te maken in (zie tabel 8, eerste variant):

statistische bewerking van de neerslag, volgens:

- 7 verschillende methoden (Kempees, 1966);
- analyse overstorthoeveelheid en overstortduur af te leiden uit stippengrafiek van Kuipers (Ribbius en Kragt, 1954) waarbij moet worden opgemerkt dat de frequentie van overstorten volgens Kuipers niet dezelfde is als de frequentie van de uit Kuipers afgeleide overstortintensiteiten;
- een dergelijke analyse maar dan gebaseerd op de regenkrommen van Braak (Braak, 1933).

statistische bewerking van het aantal uitgaande van een neerslagtijdreeks berekende overstorten, volgens: Van den Herik en Kooistra met gebruikmaking van

- een bakmodel (met één overstortpunt) en 5-minutenregens als invoer (Van den Herik en Kooistra, 1970);
- Van den Berg en Ven, waarbij ten opzichte van de voorgaande methode een verbetering is verkregen door van de neerslag eerst het verlies in rekening te brengen en vervolgens de netto neerslag te transformeren en als invoer te gebruiken voor een bakmodel (Van de Berg en Ven, 1977);
- een meer geavanceerde methode van neerslag transformatie, zoals die beschreven wordt door Zondervan (Zondervan, 1978).

Indien (zie tabel 8, tweede variant) geen afvoermetingen bekend zijn van overstorten van rioleringssystemen en evenmin van de parameters van het rioleringsstelsel, kan de maatgevende afvoer slechts door schatting vastgesteld worden (Slijkoord, 1977).

Een schattingsmethode (zie tabel 8, derde variant) waarbij de neerslag statistisch wordt bewerkt, is die waarbij de formule van Rheinhold wordt toegepast (Rheinhold,1941). De hierin voorkomende parameters moeten dan geschat worden op grond van ervaring in andere stedelijke gebieden. Een methode waarbij de overstort statistisch wordt bewerkt is niet bekend.

Indien in stedelijke gebieden het stadswater niet in open verbinding staat met de waterlopen in het landelijke gebied, maar de aansluiting plaatsvindt via een gemaal of een stuw, dan is de gemaalcapaciteit, respectievelijk de afvoer over de stuw maatgevend voor de belasting van het landelijke gebied. In het laatste geval kan een goede benadering voor de maatgevende afvoer uit het stedelijk gebied worden verkregen door het stadswater door middel van een bakmodel te simuleren.

Opmerking

Bepalingsmethoden van maatgevende afvoeren ten behoeve van stedelijke afwateringssystemen van onverharde oppervlakken worden op dezelfde wijze beschouwd als de wijze waarop dat is gedaan voor de landelijke systemen (zie 6.1. en 6.2.). Ook hier wordt onderscheid gemaakt in de bewerking van de invoer dan wel van de afvoer van het systeem.

7. Enkele toepassingen van methoden ter bepaling van maatgevende afvoeren

Na het overzicht van de methoden die er zijn ter bepaling van de maatgevende afvoer, zal in dit hoofdstuk nader op een tweetal methoden worden ingegaan. De eerste methode, de methode van De Jager, wordt vooral toegepast bij de bepaling van de maatgevende afvoer in hellende gebieden met ongestremde lozing. De tweede methode, de methode De Zeeuw - Hellinga wordt toegepast in vlakke gebieden.

7.1. Bepaling van de maatgevende afvoer(dichtheid) in hellende gebieden volgens de methode van De Jager

De methode van De Jager heeft het simuleren van lange reeksen hoge (winter) afvoeren tot doel ten einde daaruit een maatgevende afvoer te destilleren. De methode berust op het bepalen van een drietal voor een stroomgebied karakteristieke grootheden (parameters) (De Jager, 1965). De combinatie van deze drie parameters wordt dikwijls aangeduid met "de afvoerkarakteristiek van het stroomgebied". De drie parameters zijn:

- de tijdconstante, τ die als een overall grootheid geldt voor alle ontwateringssystemen die in de winterperioden bijdragen tot de snelle afvoer uit het betreffende stroomgebied;
  Met de tijdconstante kan met gebruikmaking van het ontwateringsmodel van Kraijenhoff van de Leur (zie bijlage 4) een voldoende lange reeks van afvoerdichtheden uit (winter) neerslagreeksen worden verkregen. Uit een statistische bewerking van deze reeks afvoerdichtheden is dan de snelle component van de maatgevende afvoerdichtheid voor het snel reagerende gebied te bepalen.
- reductiefactor die toegepast wordt op de totale oppervlakte van het betreffende stroomgebied, teneinde de bijdrage van de snelle afvoercomponent in de totale afvoer te verklaren;
- de basisafvoerdichtheid die, vermenigvuldigd met het totale oppervlak van het betreffende stroomgebied, te beschouwen is als een nagenoeg in de tijd constante bijdrage (langzame component) in de totale afvoer.

Opgemerkt zij, dat het introduceren van een fysisch model zoals dat van Kraijenhoff van de Leur niet inhoudt, dat daarmee alle voorkomende afvoeren kunnen worden beschreven. Bij de bepaling van maatgevende afvoeren voor Nederlandse stroomgebieden gaat het bij de methode van De Jager primair om het uit neerslag simuleren van lange reeksen hoge (winter) afvoeren waarbij de (actuele) verdamping een te verwaarlozen rol speelt.

Bij het vaststellen van de drie parameters wordt ervan uitgegaan, dat:

- het afwateringssysteem een te verwaarlozen invloed heeft op het dynamische gedrag van het grondwaterregime (hellende gebieden);
- het dynamische gedrag van de gehele ontwatering van een stroomgebied zich laat beschrijven met het model van Kraijenhoff van de Leur;
- een voldoende lange (winter) neerslagreeks voorhanden is;
- een korte reeks van hoge (winter) afvoeren uit het afwateringssysteem beschikbaar is c.q. komt, waarmee de gesimuleerde afvoerreeks wordt gecorreleerd ter bepaling van de tijdconstante en de basisafvoer;
- een aantal gebiedskenmerken zoals COLN-wintergrondwaterstanden of GT-klassen, slotenpatroon, maaiveldverhang en -hoogten bekend zijn ten einde de waarde van de reductiefactor te bepalen.

Hoewel de methode van De Jager eventueel aanwezige verschillen in (snelle)

ontwateringssystemen "uitmiddelt", heeft deze methode het voordeel dat aan de bepaling van de maatgevende afvoer een fysisch model ten grondslag ligt. Bovendien is het model duidelijk geënt op de snel op de neerslag reagerende ontwateringssystemen in een stroomgebied. Met het oog op de dimensionering daarvan zijn voor verschillende tijdconstanten van het model, met de in De Bilt gemeten dagneerslagsommen afvoerreeksen van winterhalfjaren (1913 t/m 1962) gesimuleerd. Voor een aantal gekozen waarden van de afvoer is het aantal dagen waarin deze waarde wordt overschreden in relatie tot eveneens een aantal gekozen waarden van de tijdconstante geteld. De aldus verkregen resultaten zijn in een frequentiediagram (zie figuur11) weergegeven. Behalve op afvoeren is deze procedure ook toegepast op opbollingen midden tussen de ontwateringsmiddelen. Deze uitkomsten tezamen met die van de afvoeren zijn in de zogenoemde "Grafiek van De Jager" samengevat. Deze grafiek kan ook dienen voor het bepalen van de bij de ontwateringsnorm horende bijdrage van de snelle afvoercomponent in de maatgevende afvoer. De ervaring die is opgedaan met het hanteren van de "Grafiek van De Jager" in combinatie met een groot aantal metingen in zeer uiteenlopende stroomgebieden heeft tot een redelijke schattingsmethode geleid (Kusse). Richtlijnen hiervoor worden in subparagraaf 7.1.2. besproken.

7.1.1. De afvoerkarakteristiek van een stroomgebied

Zoals in het voorgaande is gesteld bestaat de afvoerkarakteristiek uit een drietal parameters waarmee het neerslag-afvoerproces wordt gekarakteriseerd.

Voor een ontwateringssysteem met te verwaarlozen radiale- en intreeweerstand (model Kraijenhoff van de Leur) geldt, dat:

$$\tau = j = \frac{\mu . L^2}{\pi^2 . kD} \qquad (d)$$

waarin:

μ = de bergingscoëfficiënt; (-)
L = de afstand tussen de ontwateringsmiddelen; (m)
kD = het doorlaatvermogen ($m^2.d^{-1}$)

De afvoer kan worden beschouwd als afkomstig van twee naast elkaar geschakelde systemen met sterk verschillende tijdconstanten (τ-waarden), te weten:

- een kleine τ-waarde (de snelle afvoer), gekenmerkt door een kleine berging in verhouding tot de afvoer en weinig transformatie;
- een grote τ-waarde (de basisafvoer), gekenmerkt door een grote berging in verhouding tot de afvoer en veel transformatie en mogelijk nog een afzonderlijke translatie.

In de methode van De Jager wordt de basisafvoer binnen het tijdvak van de reconstructie van de snelle afvoer als een constante afvoercomponent beschouwd en als parameter in de afvoerkarakteristiek opgenomen. Het accent wordt daardoor gelegd op het bepalen van de grootte van de tijdconstante die karakteristiek is voor de snelle afvoercomponent.

In het model van Kraijenhoff van de Leur (voor de verklaring van de snelle afvoer) komt een grootheid voor die een oppervlak vertegenwoordigt. Het

ligt voor de hand hierbij aan de grootte van het (totale) oppervlak van het stroomgebied te denken. Bij het opstellen van een waterbalans blijkt echter, dat met betrekking tot de snelle afvoer slechts een deel van het totale oppervlak van het stroomgebied in rekening moet worden gebracht. Uit opeenvolgende reconstructies van de snelle afvoer blijkt, dat in de loop van het winterhalfjaar dit deel toeneemt tot een maximale waarde (< 100%). Als regel wordt aangehouden dat de reductiefactor gelijk is aan de verhouding van het grootste deeloppervlak, dat de bij een reconstructie van de snelle afvoer is bepaald, tot het totale oppervlak van het stroomgebied. De reductiefactor wordt uitgedrukt in procenten. Deze waarde kan dus kleiner zijn dan de voor een winterhalfjaar geldende maximale waarde.
De afvoerkarakteristiek wordt nu als volgt weergegeven:

F%, τ dagen en B $m^3.s^{-1}.km^{-2}$

waarin: F = het percentage waarmee na deling door 100 de totale oppervlakte van een stroomgebied moet worden vermenigvuldigd om, ten tijde van de reconstructie van het gemeten afvoerverloop, het oppervlak van het gebied te verkrijgen dat de neerslag volledig afvoert via het snelle systeem;
τ = de tijdconstante van het snelle systeem dat in het bij F omschreven gebied ligt;
B = de basisafvoerdichtheid, die toegekend wordt aan (een constante) kwel vanuit de hogere gronden naar het onder F genoemde gebied en als gemiddelde over de totale oppervlakte van het stroomgebied wordt uitgedrukt.

De reductiefactor F heeft dus alleen te maken met de snelle afvoercomponent. De basisafvoer B wordt daarentegen verkregen door de uit metingen afgeleide basisafvoer te delen door het totale oppervlak van het stroomgebied. De reden hiervan is, dat de herkomst van de basisafvoer niet voor alle stroomgebieden eenduidig is vast te stellen, zodat de mogelijkheid op bovengenoemde wijze een reductiefactor te berekenen ontbreekt.

Praktisch in alle onderzochte stroomgebieden bleek het mogelijk het snelle en langzame afvoersysteem in het stroomgebied te onderscheiden door het gebied in te delen naar de grondwaterstandsfluctuaties ten opzichte van het maaiveld, het voorkomen van afvoerleidingen en het (vroegere) grondgebruik, zoals grasland, bouwland en bos. Eveneens kon worden vastgesteld, dat de oppervlakte van dat deel van het stroomgebied waaraan het snelle systeem wordt toegekend, niet verandert wanneer het gebied zijn ontwateringsbasis heeft bereikt. Daar de grootte van deze oppervlakte goed overeenkwam met de grootte die verkregen werd door de totale oppervlakte van het stroomgebied met de reductiefactor te vermenigvuldigen, kon een relatie worden gelegd tussen deze waarde en gebiedskenmerken. Hierdoor werd het mogelijk aan de hand van gebiedskenmerken de grootte van de reductiefactor te bepalen. Hiertoe wordt het gebied volgens twee methoden onderverdeeld in een snel en langzaam reagerend gebied.

<u>Methode 1</u>: Op grond van ontwateringsmiddelen, hoogteligging, terreinverhang (topografische kaart, schaal 1:25000) en (vroeger) grondgebruik.

De oppervlakte wordt ingedeeld naar:
- lage gronden met veel sloten - grasland)
- middelhoge gronden met sloten - grasland en bouwland) snelle systeem

- middelhoge gronden zonder sloten)langzame
- hoge gronden zonder sloten)systeem

Methode 2: op grond van grondwaterstanden c.q grondwatertrappen (COLN-kaart c.q. GT-kaart)

De oppervlakte wordt ingedeeld naar:
- trajecten van grondwaterstandfluctuaties ten opzichte van het maaiveld.
In tabel 9 is een overzicht gegeven van de verschillende wijzen waarop deze trajecten kunnen worden geklassificeerd.

Tabel 9. Indeling van een stroomgebied in snel en langzaam op de neerslag reagerende gebieden op grond van grondwaterstandkarakteristieken.

Systeem	COLN - wintergrondwater-standsklasse in cm - mv	GT-klasse	GHG in cm - mv
snel (snelle afvoer)	0 - 20	I, II	20
	20 - 40	III, V	40
	40 - 70[1)]	IV, VIa	40 - 60
langzaam (basisaf-voer)	40 - 70[1]		
	70 - 100	VI b	60 - 80
	100	VII	80

1) Het gebied in de klasse 40 - 70 wordt voor de helft toegekend aan het snelle systeem en voor de andere helft aan het langzame systeem.

De grootte van de reductiefactor wordt nu verkregen door de grootte van het gebied dat volgens bovengenoemde criteria snel reageert, te delen door de grootte van het totale stroomgebied en het resultaat met honderd te vermenigvuldigen.

Indien geen gemeten (winter) afvoeren beschikbaar zijn, zal een schatting van τ en B moeten worden gemaakt. Een methode van schatten die gebaseerd is op ervaringen, opgedaan zowel bij het meten van afvoeren in een groot aantal stroomgebieden in Nederland als bij het interpreteren van de afvoermetingen, is door Kusse uitgewerkt. De belangrijkste richtlijnen worden in onderstaande subparagraaf (7.1.2.) omschreven.

7.1.2. Schatting van de tijdconstante en de basisafvoerdichtheid volgens de methode van Kusse

Voor de grootte van de tijdconstante τ kunnen de volgende waarden worden worden aangehouden (τ in dagen):

$\tau \leq 0,5$ Zeer sterk hellende gebieden met op geringe diepte een slecht of niet doorlatende laag (bijv. keileem) en vlakke gebieden, die intensief gedraineerd of ontwaterd zijn;

$0,5 < \tau \leq 1,0$ Sterk hellende goed doorlatende gebieden (bijv. Geuldal) en hellende leemhoudende zandgebieden met een goede afwateringsmogelijkheid;

$1 < \tau \leqq 2$	Flauw hellende zandgebieden of madelandgebieden met goede afwateringsmogelijkheden;
$2 < \tau \leqq 3$	Vlakke zandgebieden met beperkte afwateringsmogelijkheden.

Opmerkingen:

- De meeste stroomgebieden bestaan in feite uit verschillende deelgebieden, elk met hun eigen tijdconstante;
- In enkele stroomgebieden kan bij extreem hoge afvoeren een gedeelte van het gebied met een kleinere tijdconstante gaan reageren (Borger, Oude Diep);
- Wanneer de detailontwatering slecht is onderhouden en het gebied vlak ligt, kan zich water op het maaiveld verzamelen, waardoor een extra berging optreedt die tot uitdrukking komt in een grotere tijdconstante.

Voor het schatten van de grootte van de basisafvoerdichtheid B bieden de volgende richtlijnen enig houvast (B in $m^3.s^{-1}.km^{-2}$). Uiteraard zijn het zeer globale cijfers, die nauwkeuriger kunnen worden, naarmate er meer gemeten wordt.

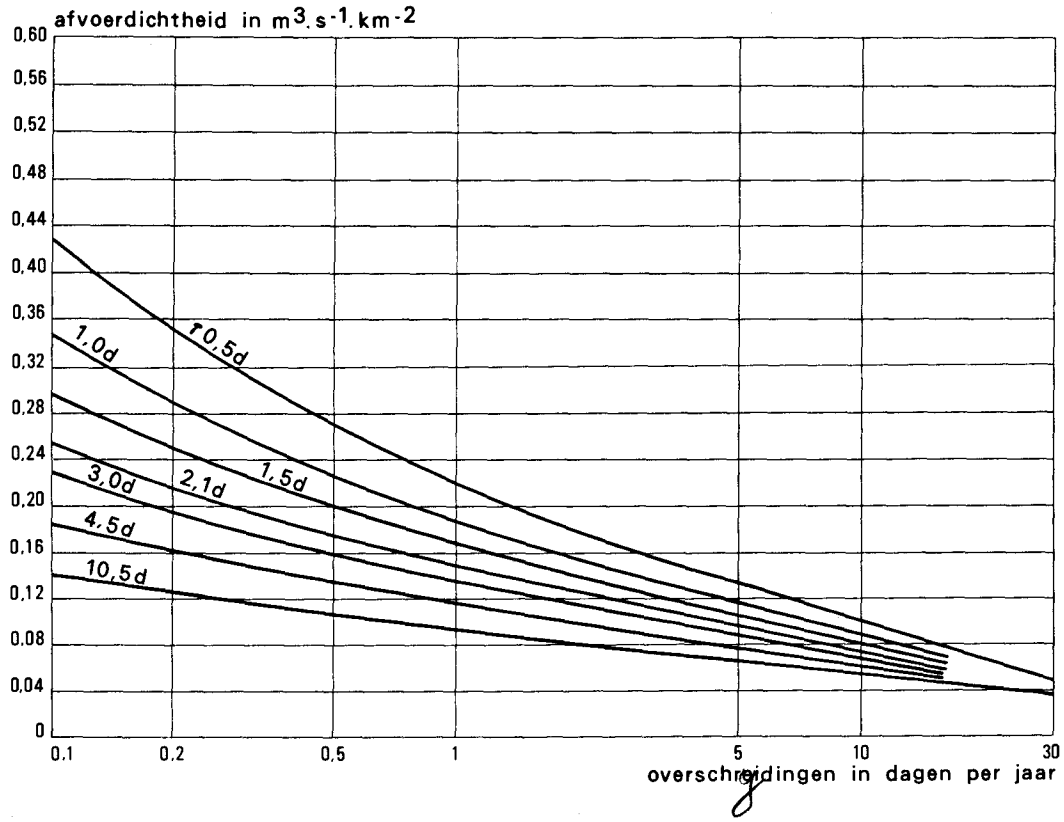
$0{,}01 < B \leqq 0{,}02$	Gebieden waaruit water onttrokken wordt en/of wegzijging optreedt en/of waarvan grote delen door b.v. storende lagen nagenoeg geen afvoer hebben.
$0{,}02 < B \leqq 0{,}035$	Gebieden die homogeen zijn opgebouwd; basisafvoer wordt veroorzaakt door kwel vanuit de hoge delen van het stroomgebied met nagenoeg geen sloten.
$0{,}035 < B \leqq 0{,}05$	Gebieden waarvan de werkelijke begrenzing van de hogere gronden buiten de aangegeven begrenzing ligt;
$0{,}05 < B \leqq 0{,}15$	Gebieden waar kwel optreedt vanuit andere stroom gebieden.

Met de bepaling van de maximale waarde van de reductiefactor F uit hetzij gebiedskenmerken, hetzij grondwaterstanden, zoals beschreven in 7.1.1. (zie o.a. tabel 9), zijn met de geschatte waarden van de tijdconstante τ en van de basisafvoerdichtheid B alle parameters uit de afvoerkarakteristiek van een stroomgebied bekend. Met behulp van het frequentiediagram van De Jager (figuur11) is voor de geschatte τ de snelle component van de maatgevende afvoerdichtheid te bepalen, terwijl voor de langzame component de geschatte waarde van B geldt. Met gebruikmaking van de reductiefactor F kan nu de maatgevende afvoer worden vastgesteld.

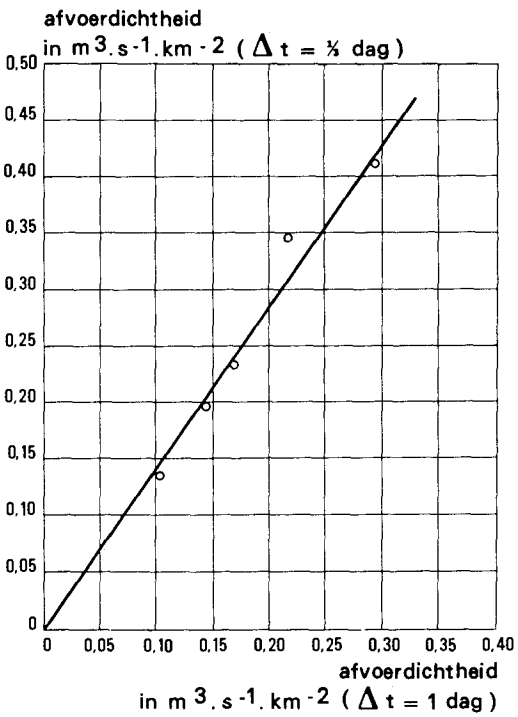
7.1.3. Het frequentiediagram van De Jager

Op basis van een lange reeks neerslaggegevens zijn met behulp van het model van Kraijenhoff van de Leur voor verschillende τ-waarden lange reeksen afvoergegevens gesimuleerd. Van elke reeks is de frequentie van overschrijding van een afvoer bepaald. Voor een aantal τ-waarden zijn deze bewerkingen uitgevoerd door De Jager. Deze heeft de neerslagsommen per dag van de maanden oktober t/m maart over de jaren 1913 t/m 1962 van het station Utrecht (De Bilt) getransformeerd met de τ-waarden 0,5; 1; 1,5; 2,1; 3; 4,5; 9; 10,5 dag(en) zonder rekening te houden met sneeuwval en verdamping.

Figuur 11. Frequentiediagram overeenkomstig het diagram van De Jager



Figuur 12. Relatie tussen maatgevende afvoerdichtheden (frequentie 1 dag per jaar) berekend met Δt = 1 dag en Δt = 1/3 dag bij τ = 1 dag



De aldus verkregen afvoerdichtheden op het eind van iedere dag zijn naar grootte gerangschikt en daarna in een frequentie van voorkomen uitgedrukt. In figuur 11 is de grootte van de afvoerdichtheid weergegeven, die bij een frequentie van gemiddeld 0,1; 0,2; 0,5; 1; 5; 10 en 30 dag(en) per winterhalfjaar wordt bereikt of overschreden, met γ als parameter.

Keuze neerslagstations

Het station Utrecht (De Bilt) is representatief voor Nederland voor wat betreft de neerslagverdeling en de neerslaghoeveelheid (Buishand, 1977; Levert, 1954; Oostwoud Wijdeness, 1941). Zelfs voor stroomgebieden die ten dele buiten Nederland liggen, zoals Berkel, Dinkel, Slinge en Dommel kan dit station worden gebruikt. Een uitzondering hierop is het stroomgebied van de Geul bovenstrooms van Wijlre en Gulpen, waar de neerslaghoeveelheden aanzienlijk hoger zijn dan die te De Bilt.

Voor het bepalen van de maatgevende afvoer in een stroomgebied kan dan ook de frequentieverdeling volgens De Jager worden aangehouden. Bij het bepalen van de afvoerkarakteristiek van een stroomgebied wordt echter wel gebruik gemaakt van de neerslagstations in en rond dat stroomgebied.

Keuze tijdsintervallen neerslagsommen

Bij het bepalen van de afvoerkarakteristiek van een stroomgebied is het noodzakelijk de tijdsintervallen van de neerslag, waaruit afvoeren berekend worden, aan te passen aan de τ-waarde. Als vuistregel kan gelden dat het tijdsinterval ca. 1/3 tot 1/4 is van de τ-waarde van het systeem. Wordt het tijdsinterval veel kleiner genomen, dan ontstaan er fluctuaties in de berekende afvoer, die in de werkelijke afvoer niet voorkomen (De Jager, 1965). Is het tijdsinterval groter dan 1/3 van de τ-waarde dan zullen bepaalde gemeten afvoerfluctuaties niet in de uit neerslag berekende afvoeren tot uitdrukking komen. Bovenstaande houdt in dat voor de frequentiebepaling alleen bij een τ-waarde van 3 à 4 dagen neerslagsommen per dag gebruikt mogen worden. Uit berekeningen met tijdsintervallen van 1/3 dag is gebleken, dat bij een τ-waarde van 1 dag en een frequentie van 1 dag per jaar de maatgevende afvoerdichtheid aanzienlijk hoger is dan die volgens De Jager (figuur 12). Voor het gebruik in de praktijk blijft echter de door De Jager voor dagneerslagsommen berekende afvoer gehandhaafd en wel om de volgende elkaar compenserende redenen

- bij de neerslagsommen per dag zijn de bij kleine τ-waarden berekende afvoertoppen afgevlakt, zodat dan bij een bepaalde frequentie te lage afvoeren worden afgelezen;
- bij het bepalen van de maatgevende afvoer is uitgegaan van een volledig "verzadigd" stroomgebied; in werkelijkheid is dit niet altijd het geval, zodat dan bij een bepaalde frequentie te hoge afvoeren worden afgelezen.

7.2. Bepaling van de maatgevende afvoer(dichtheid) in vlakke gebieden en de bijbehorende grondwaterstanden volgens de methode de Zeeuw - Hellinga

De methode De Zeeuw - Hellinga karakteriseert een stroomgebied door een reactiefactor α, die op analoge wijze als bij de methode De Jager uit de analyse van afvoergolven wordt bepaald (De Zeeuw, 1966). Ook hier kan een stroomgebied worden onderscheiden in twee of meer onderdelen, die ieder een eigen reactiefactor bezitten en die daardoor verschillend snel op de neer-

slag reageren. Een verschil ten opzichte van de methode De Jager is, dat de oppervlakte van deze deelgebieden kan variëren en afhankelijk gesteld kan worden van de voorraad afvoerbaar water die in het stroomgebied (of in een onderdeel daarvan) aanwezig is. Daardoor kunnen bepaalde overgangsgebieden in natte tijden behoren tot een snel reagerend deelgebied, terwijl dit in droge tijden niet het geval is. Op deze wijze is het mogelijk gebieden te karakteriseren waar de sloten of greppels - die een snelle afvoer mogelijk maken - alleen in natte tijden watervoerend zijn.

De methode wordt toegepast in vlakke gebieden met bemaling en op afvoeren met bijbehorende grondwaterstanden van het ontwateringssysteem. Voor een berekeningsvoorbeeld zie bijlage 6.
Het model De Zeeuw - Hellinga (bijlage 4) gaat ervan uit dat de afvoerdichtheid q evenredig is met de hoogte h van het grondwater boven de ontwateringsbasis. Dit verband wordt weergegeven als:

$$q = \alpha \cdot \mu \cdot h$$

waarin	q =	afvoerdichtheid	$m.d^{-1}$
	α =	reactiefactor	d-1
	μ =	bergingscoëfficiënt	-
	h =	hoogte grondwaterstand boven de ontwateringsbasis	m

Indien op het tijdstip t=o een neerslag begint met dichtheid p zal de grondwaterstand daardoor oplopen. Daarbij geldt, dat:

$$h(t) = h(o).e^{-\alpha t} + \frac{P}{\alpha\mu} (1 - e^{-\alpha t})$$

en

$$q(t) = q(o).e^{-\alpha t} + P.(1 - e^{\alpha t})$$

waarin	P =	neerslagdichtheid op tijd t=o	$m.d^{-1}$
	q(t) =	afvoerdichtheid op tijd t	$m.d^{-1}$
	g(o) =	afvoerdichtheid op tijd t=o	
	t =	tijd	d

Bepaling van α

De reactiefactor α kan dus zowel uit afvoermetingen als uit metingen van de grondwaterstanden worden bepaald en wel het eenvoudigst in perioden zonder neerslag en met een geringe verdamping (P = o).
In Nederland lenen zich daarvoor neerslagloze en vorstvrije perioden in de maanden oktober t/m maart. Omdat grondwaterstanden eenvoudiger te meten en te registeren zijn dan afvoeren wordt de reactiefactor in dergelijke droge winterperioden bij voorkeur bepaald uit:

$$\alpha = \frac{\log h(o) - \log h(t)}{M.t}$$

met $M = 0,4343 = \log e$

De bepaling van α geschiedt het eenvoudigst door h op half-logarithmisch

papier uit te zetten tegen de tijd t. Indien aan de voorwaarden van het model is voldaan, liggen deze punten op een rechte (bijlage 6).
Opgemerkt moet worden dat ook het model van Kraijenhoff van de Leur tot overeenkomstige resultaten leidt, mits de meting eerst enige tijd na het einde van de voorafgaande neerslag wordt aangevangen. Indien deze wachttijd t_1 niet te klein is ten opzichte van de karakteristieke tijd j of τ van het systeem, is j te bepalen uit:

$$\frac{1}{j} = \frac{\log h(2) - \log h(1)}{M.(t_2 - t_1)}$$

Met deze analyse van het grondwaterstandsverloop in een droge, vorstvrije winterperiode kan dus hetzij α , hetzij j op eenvoudige wijze worden bepaald. Evenals bij stroomgebieden zal ook bij landbouwpercelen het gedrag van het systeem dikwijls de invoering van meer dan één α-waarde vereisen. Een voorbeeld daarvan is vermeld in bijlage 6.

Bepaling van μ

De bergingscoëfficiënt μ is te vinden uit de volgende waterbalansvergelijking:

$$P - E - q = \mu . \frac{dh}{dt}$$

waarin:

P =	neerslagdichtheid	m.d -1
E =	verdampingsdichtheid	m.d -1
q =	afvoerdichtheid	m.d -1
μ =	bergingscoëfficiënt	-
h =	grondwaterstand	m
t =	tijd	d

In de praktijk wordt μ bepaald gedurende neerslagperioden in het winterhalfjaar. De neerslagdichtheid P wordt gemeten met een pluviograaf, h met een registrerende grondwaterstandsmeter, terwijl E wordt geschat met behulp van de door het KNMI berekende (en in de winter geringe) verdamping van een vrij wateroppervlak.
Bij het model De Zeeuw - Hellinga is

$$q = \alpha . \mu . h$$

zodat de bergingscoëfficiënt volgt uit:

$$\mu . \left(\frac{dh}{dt} + \alpha . h\right) = P - E$$

Door perioden met hevige, kortdurende neerslag te kiezen, waardoor $\frac{dh}{dt}$

groot is ten opzichte van $\alpha.h$, zullen fouten in de relatie tussen neerslag en afvoer (bijvoorbeeld in α) slechts weinig invloed op de berekening van μ kunnen uitoefenen.

Voor toepassing van de besproken modellen is het noodzakelijk dat μ een constante is. Er moet dus in verschillende regenperioden worden nagegaan of dit inderdaad het geval is en in het bijzonder of μ onafhankelijk is van de grondwaterstand.
Opgemerkt dient te worden dat bovenstaande theorie slechts strikt geldig is indien alle weerstand tegen de waterbeweging nabij de ontwateringsmiddelen is geconcentreerd. In dat geval is de grondwaterstand tussen de ontwateringsmiddelen horizontaal en is er dus geen verschil tussen de gemiddelde en de maximalehoogte boven de ontwateringsbasis. In het veld treedt echter vrijwel steeds een opbolling op. Als nu de maximale waarde daarvan als maatstaf wordt gebruikt, dan treden vormfactoren op (voor een elliptische vorm $\frac{\pi}{4}$, voor een parabolische $\frac{2}{3}$), die hetzij in de waarde van μ kunnen worden opgenomen, hetzij expliciet in de formules tot uitdrukking worden gebracht. In het berekeningsmodel van bijlage 6 is een correctiefactor $\frac{\pi}{4}$ gebruikt.

Overige bepalingen

De hydrologische constanten van het systeem kunnen uit α en μ worden afgeleid.

a. Indien de radiale- en intreedweerstanden overwegen ten opzichte van de horizontale weerstand moet het model De Zeeuw - Hellinga worden toegepast, waarbij geldt, dat:

$$W_{rad} + W_{int} = \frac{1}{\alpha.\mu.L}$$

waarin W_{rad} = radiale weerstand $d.m^{-1}$

W_{int} = intreeweerstand $d.m^{-1}$

L = afstand ontwateringsmiddelen m

b. Indien daarentegen deze weerstanden te verwaarlozen zijn ten opzichte van horizontale weerstand, dient de methode De Jager te worden gevolgd (zie 7.1.). Daarbij wordt het doorlaatvermogen kD gevonden uit:

$$kD = \frac{\mu.L.^2}{\pi^2} \cdot \frac{1}{j}$$

c. In tussenliggende gevallen kan men - bij wijze van benadering - gebruik maken van de formule van Hooghoudt voor een stationaire stroming beneden het vlak door de drains. De analogie van deze stationaire stroming met die van een niet-stationaire stroming - welke bij een zeer langdurige, constante neerslag P tot deze stationaire stroming nadert - leidt tot de volgende uitdrukking voor kd:

$$kD = \frac{\mu.L^2}{8}.\alpha$$

Hierin is k de doorlatendheid van de grond en D de dikte van de equivalentlaag volgens Hooghoudt. Deze laatste verschilt van de werkelijke dikte D van de watervoerende laag omdat in de "equivalentlaag" ook de invloed van de radiale weerstand nabij de ontwateringsmiddelen is opge-

nomen. Een voorbeeld geeft bijlage 6. Omdat echter D een rekengrootheid is, die alleen voor stationaire stromingen betekenis heeft, terwijl α uit een niet-stationaire stroming wordt afgeleid, is deze benadering niet zeer nauwkeuring.
Het gebruik van de onder a of b genoemde rekenwijzen verdient daarom de voorkeur.

Frequentiediagram

Een frequentiediagram van de optredende grondwaterstanden en afvoerdichtheden kan bij bovengenoemde methode worden verkregen op overeenkomstige wijze als in 7.1.3. is beschreven. Daarbij wordt een lange reeks neerslaggegevens het model ingevoerd, waarna de frequentieverdeling van de optredende grondwaterstanden en afvoerdichtheden kan worden bepaald.

7.3. Onderlinge afweging van beide methoden

De beide in dit hoofdstuk genoemde methoden gaan weliswaar uit van twee in beginsel verschillende typen van stroming, maar anderzijds zijn bij praktische toepassingen de verschillen gering. Dit is te meer het geval, omdat in de verdere uitwerking van het model door De Zeeuw (De Zeeuw, 1966) een volledige identiteit tussen beide methoden wordt bereikt. Naar het oordeel van de Werkgroep verdient dan ook de keuze tussen één van beide methoden de voorkeur boven een parallel gebruik. De Werkgroep geeft in dit opzicht de voorkeur aan de methode De Jager, omdat deze in de praktijk vooral bij hellende gebieden meer ingang heeft gevonden. Slechts in gevallen van zeer sterk overwegende radiale- en intreeweerstanden is toepassing van het oorspronkelijke model De Zeeuw - Hellinga het meest gewenst. Voor poldergebieden is, niet zozeer ten behoeve van het ontwerp als wel ten behoeve van het beheer, een nadere studie gewenst van het afvoerproces.

8. Dimensioneren van waterlopen en kunstwerken

Het proces van het afvoeren van neerslag uit een stroomgebied is een dynamisch gebeuren, dat in de waterlopen tot uiting komt in veranderingen van peilen en stroomsnelheden. Omdat de snelheden waarmee deze veranderingen optreden in het landelijke gebied in Nederland meestal veel kleiner zijn dan de snelheid waarmee veranderingen zich in de waterlopen voortplanten, mag worden aangenomen dat er nauwelijks tijdsverschillen ontstaan in afvoergolven die afkomstig zijn van een boven- en van een benedenstroomsgebied. Tijdsafhankelijkheid als gevolg van geografische verschillen binnen een stroomgebied kunnen in deze gevallen buiten beschouwing worden gelaten.

In de keuze van een maatgevende afvoerdichtheid (frequentie) als stationaire grootheid, maar die ontleend is aan niet-stationaire afvoeren, wordt in feite de niet-stationaire situatie vertaald naar een stationaire situatie. Hierdoor kan voor het dimensioneren van waterlopen met stationaire berekeningen worden volstaan.

Indien de tijdsafhankelijkheid als gevolg van de aanwezigheid van zeer snel reagerende onderdelen echter zo groot is, dat deze niet goed in de keuze van de maatgevende afvoer kan worden verantwoord, zal van niet-stationaire berekeningsmethoden moeten worden gebruik gemaakt.

8.1 Benodigde gegevens

Alvorens met het ontwerp van een waterbeheersingsplan te beginnen, dienen een aantal gegevens van het gebied bekend te zijn. De volgende gegevens kunnen worden onderscheiden

- basisgegevens
  topografische kaart; bodemkaart; geologische kaart; hoogtekaart; grasland -vegetatiekaart; kadastrale kaart; cultuurkaart; nutsleidingenkaart.
- hydrologische gegevens
  grondwaterkaart; verdrogings- en verziltingskaart; afvoernormenkaart; kaart met aanvoernormen en plaats inlaat-kunstwerken; kaart met gegevens over oppervlakten; afvoernormen en waterpeilen waarop aangesloten moet worden van gebieden die op het te berekenen gebied lozen of waarop geloosd wordt.
- waterstaatkundige gegevens
  waterstaatskaart; terreinkaart met trace's waterlopen en wegen, plaats kunstwerken, plaats opgenomen dwarsprofielen; stroomgebiedenkaart; peilenkaart; kaart met waterlopen, die in bestaande toestand gehandhaafd moeten blijven vanwege landschap, natuur, bebouwing e.d.; kaart met gegevens van stedelijk gebied, rioolwaterzuiveringen, riooloverstorten, fabriekslozingen; dwarsprofielen en lengteprofielen van bestaande waterlopen; gegevens van bestaande kunstwerken; hydraulische grootheden, nodig voor de berekening van waterlopen en kunstwerken.

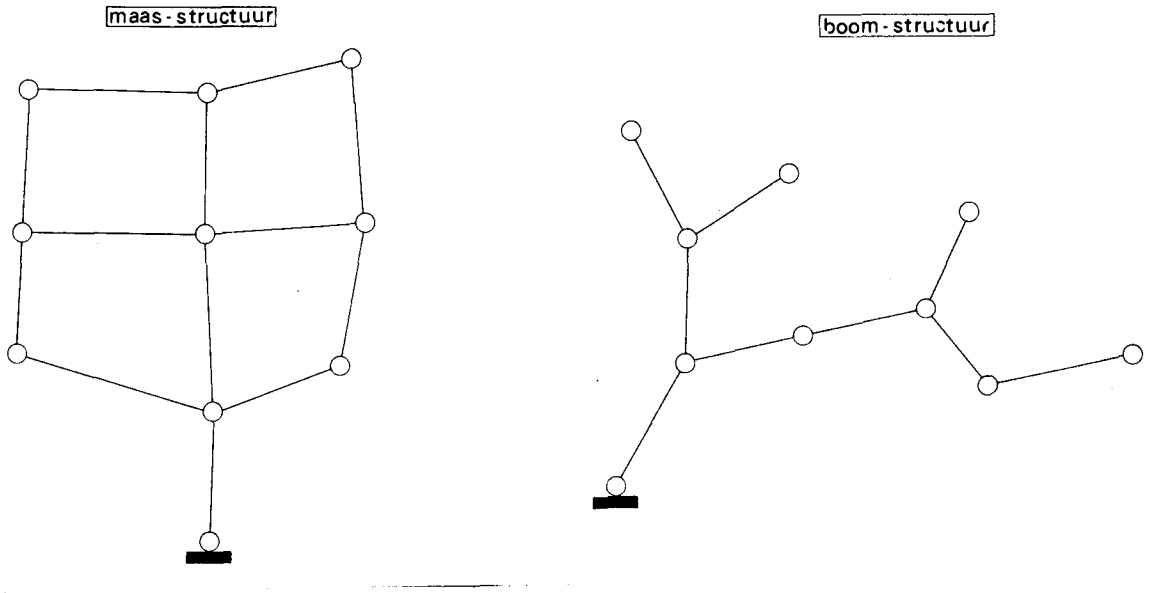
Uitvoerige behandeling van bovengenoemde gegevens is onder andere te vinden in bestaande literatuur (Bijkerk, 1969; Landinrichtingsdienst Noord-Brabant, 1969; Smit 1974, 1967, en 1964; Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding, 1968; Werkgroep Waterlopen, 1958).

8.2. Ontwerp

Aan de hand van de in 8.1. genoemde gegevens worden de trace's van de wa-

terlopen en de plaats van de belangrijkste kunstwerken in het landelijke gebied aangegeven in een lijnenplan. De in te stellen peilen worden aangegeven in een peilenplan. Op basis van het lijnenplan worden, uitgaande van de gewenste peilen, de maatgevende afvoerdichtheden en overige noodzakelijke gegevens, de bij dit lijnenplan behorende dwarsprofielen berekend. Indien nodig wordt ook een berekening van de wateraanvoer uitgevoerd en wel zodanig dat het afvoerplan hierop wordt aangepast. Het ontwerp wordt op grond van de berekeningsuitkomsten zo nodig gewijzigd en herberekend. Dit proces van wijzigen en herberekenen gaat door, totdat een definitief waterbeheersingsplan ontworpen is.

Figuur 13. Hoofdstructuren waterlopenplan



Bij het ontwerpen van het lijnenplan kan voor de hoofdstructuur van het waterlopenplan worden gekozen uit een boom- of een maasstructuur (figuur 13) of uit een combinatie van beide. In Nederland hebben de meeste waterlopenplannen een boomstructuur. Deze vorm is rekentechnisch verreweg de eenvoudigste doordat debiet en stroomrichting in alle waterlopen bekend zijn. De maasstructuur zal echter gekozen worden in situaties waar deze bij voorbeeld in de bestaande toestand reeds in grote waterlopen aanwezig is, of waar dwarsverbindingen in verband met waterinlaat, doorspoelen van leidingen in stedelijke gebieden, ontlasten van te handhaven beken of scheepvaart nodig zijn.

Op het peilenplan worden de waterpeilen aangegeven, die in de waterlopen moeten kunnen worden gehandhaafd gedurende de periode dat de maatgevende afvoer plaatsvindt. In principe wordt het gewenste peil in de waterlopen gevonden door de maaiveldshoogte te verminderen met de vereiste drooglegging op dat moment, rekening houdend met een eventuele maaiveldsdaling als gevolg van klink, grondbewerking e.d. In de praktijk is het echter onrendabel, zo niet onmogelijk op elk punt de gewenste drooglegging te realiseren.

Als basis voor het ontwerp wordt dan ook een peilenkaart opgesteld, waarop de gewenste peilen staan aangegeven voor gebiedsdelen van een zekere omvang. Bij het berekenen van het plan, zal naar nog groter aaneengesloten gebiedsdelen worden gezocht, waarvoor een acceptabel peil met één doorgaan-

de waterlijn kan worden gerealiseerd. Er dient dus een marge te worden aangegeven, waarbinnen een afwijking van de gewenste drooglegging acceptabel is. Daarnaast wordt op grond van afweging van kosten en baten meestal geaccepteerd dat niet de gehele oppervlakte aan deze drooglegging eis voldoet. Een marge van 10% van de oppervlakte is in dit verband gebruikelijk. Opgemerkt wordt dat er ook voor aan- en afvoersituaties en voor de verschillende frequenties van voorkomen, aparte drooglegging seisen kunnen worden gesteld. Het uiteindelijke peilenplan komt dan ook tot stand als het resultaat van een optimaliseringsproces, waarbij tevens de kosten zo goed mogelijk tegen de baten worden afgewogen. In de praktijk worden bij deze afweging vuistregels gehanteerd, gebaseerd op bovengenoemde overwegingen.

Vuistregels voor de peilvakken zijn:
- peilvakken in vlakke gebieden minimaal 400 ha groot;
- peilvakken in hellende gebieden minimaal 150 ha groot;
- gewenste drooglegging voor 90% van het peilvak gerealiseerd.

In een poldergebied maakt de relatief vlakke ligging het in principe mogelijk een peilenplan te ontwerpen, dat weinig afwijking van de gestelde normen te zien geeft. De vlakke ligging betekent echter ook een klein beschikbaar verhang, dat grote afmetingen van de waterlopen tot gevolg heeft. Dit maakt het nodig een toelaatbare overschrijding van het waterpeil bovenstrooms in het gebied en een toelaatbare onderschrijding bij het lozingspunt aan te geven. Bij afwijkende hoogteligging van grotere onderdelen zullen stuwen of onderbemalingen rendabel zijn.

In hellende gebieden zullen voor de peilbeheersing meer stuwen nodig zijn dan in een poldergebied. Doordat de peilvakken meestal kleiner zijn, worden uit kostenoverwegingen hier doorgaans grotere peilverschillen aangehouden. Daarnaast kunnen ter beperking van de stroomsnelheid zogenaamde technische stuwen of bodemvallen nodig zijn.

Vuistregels voor de peilverschillen zijn:
- in poldergebieden minimaal 0,25 m verschil tussen peilvakken;
- in hellende gebieden minimaal 0,40 m verschil tussen peilvakken.

Indien bij de waterpeilen die door stuwen gereguleerd worden een aanzienlijke variatie tussen zomer en winter gewenst is, is het noodzakelijk om beweegbare in plaats van vaste stuwen te bouwen. Dient bovendien het handhaven van een bepaalde waterstand erg nauwkeurig te geschieden en onafhankelijk van het af te voeren debiet te zijn, dan kan de beweegbare stuw worden geautomatiseerd. Deze eis doet zich soms voor nabij bebouwde gebieden of in bepaalde landbouwkundige wateraanvoerplannen. Doorgaans zal het echter landbouweconomisch niet verantwoord zijn om een beweegbare stuw voor een kleine profiterende oppervlakte (b.v. $<$ 100 ha) te automatiseren (Ton, 1976). Een goedkoper alternatief voor automatisering kan soms een hevelstuw zijn (Waterloopkundig Laboratorium, 1978).

Een vuistregel voor automatisering is:
- minimaal 2,50 m klepbreedte en 250 ha stroomgebied achter de stuw.

Moet het waterlopenplan ook de afvoer van stedelijke gebieden verwerken, dan kunnen de betreffende oppervlakten op de plankaarten worden aangegeven. Bij berekening volgens stationaire modellen wordt in die gevallen een hogere maatgevende afvoerdichtheid aangehouden dan voor het omringende landelijke gebied. Deze dichtheid varieert afhankelijk van de aard van de be-

bouwing en volgt uit de ontwerpberekeningen van het rioleringssysteem. Voorts wordt ook het effluent van rioolwaterzuiveringsinstallaties als stationaire afvoer in de berekening verwerkt.

Voor de overige aspecten van het ontwerp wordt verwezen naar bestaande literatuur (Bijkerk, 1969; Landinrichtingsdienst Noord-Brabant, 1969; Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding, 1968).

8.3. Berekening van de stationaire stromingstoestand

Bij het ontwerpen van een waterlopenplan op grond van een stationaire toestand kan de stroming van het water eenparig of niet-eenparig berekend worden (waterlijn evenwijdig aan de bodem, respectievelijk met stuw- en valkrommen, zie bijlage 8). In de praktijk worden de dimensies van waterlopen en kunstwerken in eerste instantie bij eenparige stroming met de hand berekend, waarna het ontworpen plan niet-eenparig met de computer wordt doorgerekend (André en Gelok, 1976; Gelok, 1970). Blijkt daaruit dat het plan qua waterstanden, stroomsnelheden, of andere te toetsen grootheden niet aan de normen voldoet, dan wordt het gecorrigeerd en opnieuw niet-eenparig berekend. Dit herhaalt zich, totdat het plan waterloopkundig goed is. De bij het ontwerpen van een waterlopenplan gebruikte formules worden per onderdeel in de volgende subparagrafen besproken.

8.3.1. Waterlopen

Zowel bij eenparige (Werkgroep Waterlopen, 1958) als bij niet-eenparige stroming (Bos, 1964/1965), wordt voor de berekening van het natte profiel, gebruik gemaakt van de formule van Manning (Ven te Chow, 1959):

$$Q = A.R^{2/3}.k_M.S^{1/2}$$

Een toelichting op de symbolen volgt hieronder.

Het debiet Q

Het debiet Q wordt verkregen door sommatie van de produkten van alle oppervlakten van afwaterende onderdelen en de betreffende maatgevende afvoerdichtheid. Hierbij wordt geen gebiedsgrootte effect toegepast. Wel worden eventuele gebiedsonafhankelijke afvoeren (b.v. effluent van rioolwaterzuiveringen) bij het debiet geteld.

De ruwheidsfactor k_M

De stroming in een open waterloop wordt in bepaalde mate geremd door de ruwheid van bodem en taluds, welke toeneemt naarmate meer plantengroei aanwezig is. Deze remmende invloed wordt tot uitdrukking gebracht in de ruwheidsfactor k_M en is daarmee omgekeerd evenredig. Bij het ontwerpen dient de waarde van k_M te worden gekozen met inachtneming van de vraag of de berekening geldt voor de zomer- of wintersituatie met de daarbij te verwachten gemiddelde begroeiings- c.q. onderhoudstoestand. Aangezien het effect van de wandruwheid relatief vermindert bij toenemende natte doorsnede, wordt de k_M tevens bepaald als een functie van de waterdiepte

$$k_M = \gamma . h^{\delta}$$

Als regel wordt voor δ de waarde 1/3 genomen en voor γ de waarde 34 in de

winter- en 23 in de zomersituatie. Uitvoeriger beschouwingen over de wandruwheidsfactor worden onder andere gegeven in de bestaande literatuur (Bon, 1967; Bijkerk, 1969; Flach, 1968; Flach en Pieters, 1966; Fraanje, 1972; De Jager, 1968; Landinrichtingsdienst Noord-Brabant, 1969; Van der Molen, 1971; Smit, 1974, 1964 en 1963; Ven te Chow, 1959; Werkgroep Onderhoudstechnieken open waterlopen, 1976; Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding, 1968; Werkgroep Waterlopen, 1958; Wesseling, 1965).

Het verhang S

Het verhang S van de waterspiegel is bij eenparige stroming gelijk aan het bodemverhang. Aangezien de snelheid evenredig is met de wortel uit het verhang, is het om economische redenen gewenst een zo groot mogelijk verhang te kiezen. Het toelaatbare verhang is echter begrensd, doordat de stroomsnelheid niet zodanig mag oplopen dat materiaaltransport van enige betekenis in de waterloop op kan treden. Deze eis geeft in hellende gebieden vaak aanleiding tot de bouw van technische stuwen of bodemvallen, of tot het bekleden van de waterlopen. Anderzijds is in vlakke gebieden het verhang vaak beperkt. Daar kan het beschikbare verhang eventueel vergroot worden door het accepteren van onderschrijdingen van de gewenste drooglegging in het bovenstroomse gebied gedurende korte perioden. Als algemene richtlijn wordt bovendien aangehouden dat het beschikbare verhang zo economisch mogelijk verdeeld moet worden tussen de waterlopen en de kunstwerken. Als toelaatbare ontwerpsnelheden worden in zand- en veengebieden voor kleine leidingen 0,30 m/s aangehouden en voor grote leidingen (h > 1,00 m) 0,50 m/s. Uiteraard zijn meerdere factoren bepalend voor het vaststellen van de ontwerpsnelheden (Bijkerk, 1969; Smit, 1964; Ven te Chow, 1959; Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding, 1968; Werkgroep Waterlopen, 1958).

De natte oppervlakte A en de hydraulische straal R

De natte oppervlakte A en de hydraulische straal R zijn in de formule van Manning op voorhand onbekende grootheden. Deze grootheden worden bepaald door het te ontwerpen profiel, dat doorgaans trapeziumvormig is en waarbij de taludhelling en de verhouding tussen bodembreedte en waterdiepte gekozen moeten worden. Deze keuze is afhankelijk van factoren als grondsoort, begroeiing, kwel en diepte van de waterloop (Bijkerk, 1969; Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding, 1968; Werkgroep Waterlopen, 1958). Veel voorkomende taludhellingen zijn 1 : 1,5 (bij waterdiepte kleiner dan 1,00 m) en 1 : 2 (bij waterdiepte groter dan 1,00 m). Indien de keus gemaakt moet worden tussen een flauwe taludhelling of een steile met betuining, wordt meestal de voorkeur gegeven aan een flauwe taludhelling, voor zover deze nog redelijk te maken is. Gangbare verhoudingen van bodembreedte en waterdiepte zijn 2 : 1 tot 3 : 1. Speelt het creëren van veel berging in een plan een belangrijke rol, dan zullen de waterlopen naar verhouding breder worden gemaakt.

De hydraulische straal is de verhouding tussen natte oppervlakte en natte omtrek en dus afhankelijk van de te bepalen bodembreedte en waterdiepte. Het komt er dus op neer dat via een iteratieproces een profiel wordt bepaald, dat aan de gevonden waarde van $A.R^{2/3}$ voldoet. Op deze manier wordt een profiel van een waterloop gevonden dat aan de ontwerpnormen voldoet.

In het algemeen wordt het ontwerp van een waterloop met betrekking tot drooglegging en stroomsnelheid aan één of meerdere van de volgende nor-

waarde 0,95 aangehouden en bij rechthoekige duikers 0,50 (Idelcik, 1960; Straub and Morris, 1950).

De coëfficiënt voor het wrijvingsverlies (ξ_w) wordt berekend met de formule:

$$\xi_w = \frac{2.g.l}{C^2.R}$$

waarin: $C = k_M.R^{1/6}$

Enkele waarden voor de ruwheidsfactor van Manning (k_M) voor betonnen en gegolfd plaatstalen duikers zijn gegeven in bijlage 9 (Gelok, 1975; Ven te Chow, 1959).

De coëfficiënt voor het uittreeverlies (ξ_u) wordt weergegeven door de formule:

$$\xi_u = (1 - a.\alpha)^2.k$$

waarin: a = het aantal naast elkaar gelegen kunstwerken
α = natte oppervlakte duikerprofiel gedeeld door natte oppervlakte benedenstroomse waterlaag.

Bij k = 1 gaat de totale resterende kinetische energie verloren en bij k = 0 niet. Indien geen speciale voorzieningen voor het stroomlijnen van de uitstroomopening worden genomen, wordt bij de berekening van waterlopenplannen meestal k = 1 aangenomen.

Bij de berekening van onderleiders en hevels moet rekening gehouden worden met bochtverliezen. Voor waarden van de bochtverliezen (ξ_b) wordt verwezen naar de literatuur (Huisman, 1969; Idelcik, 1960).

Voor het berekenen van de natte oppervlakte A en de hydraulische straal R van de verschillende duikertypen wordt verwezen naar de bestaande literatuur (Gelok, 1973). Voor verdere gegevens over de berekening van duikers wordt eveneens verwezen naar de literatuur (André en Gelok, 1976; Bijkerk, 1969; Gelok, 1969; Huisman, 1969; Landinrichtingsdienst Noord-Brabant, 1969; Nortier en Van der Velde, 1963; Van Rossum en De Vries, 1967; Smit, 1967 en 1964; Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding, 1968; Werkgroep Waterlopen, 1958).

Stuwen

In bijlage 9 is een overzicht gegeven van de typen stuwen, die in waterlopenplannen kunnen voorkomen. Voor rechthoekige overlaten en klepstuwen wordt de volgende formule gebruikt:

$$Q = 1,7.m.b.h^{3/2}$$

Deze formule geldt alleen voor afvoeren bij beluchte straal, die niet beinvloed worden door de benedenwaterstand (volkomen overlaat). Voor vaste (schotbalk)stuwen met korte overlaat wil dit zeggen dat de benedenwaterstand niet boven de stuwkruinen mag stijgen. Bij klepstuwen wordt dezelfde grens aangehouden waarbij de geringe invloed van de klephelling wordt verwaarloosd. Voor de coëfficiënt m wordt als regel 1,1 aangehouden. Ook deze

waarde is niet exact doordat naast de vorm van de kruin ook de aanstroomsituatie, de constructie van de stuw en bij klepstuwen de klepstand van invloed zijn.

Voor die situaties, waarbij de benedenwaterstand wel de afvoer beïnvloedt, wordt als benadering weleens de duikerformule gehanteerd (onvolkomen overlaat). Meerdere gegevens over stuwen zijn te vinden in de literatuur (Bijkerk, 1969; Landinrichtingsdienst Noord-Brabant, 1969; Nortier en Van der Velde, 1963; Van Rossum en De Vries, 1967; Smit, 1974,1967 en 1964; Waterloopkundig Laboratorium, 1964; Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding, 1968; Werkgroep Waterlopen, 1958).

Gemalen

Voor de berekening van de capaciteit van gemalen wordt uitgegaan van de in het waterbeheersingsplan berekende hoeveelheid af te voeren water. Meestal krijgt het gemaal een zekere overcapaciteit (ca. 10%) in verband met:
- speruren in de elektriciteitsvoorziening;
- teruglopende capaciteit als gevolg van slijtage;
- grotere opvoerhoogte bij toekomstige verlaging binnenpeil;
- herstelwerkzaamheden aan één van de pompen.

De capaciteit wordt bepaald in relatie tot de in het bemalingsgebied aanwezige open waterberging Voor verdere gegevens over gemalen wordt verwezen naar de literatuur (Oud, 1967; Van Rossum en De Vries, 1967; Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding, 1968).

8.4. Hulpmiddelen bij de berekening

Voor het uitvoeren van de berekeningen met de hierboven beschreven formules worden grafieken, rekenlinialen, (programmeerbare) rekenmachines en computerprogramma's gebruikt. De grafieken, rekenlinialen en (zak)rekenmachines worden doorgaans gebruikt voor het berekenen van stationaire eenparige stromingssituaties, terwijl met de programmeerbare rekenmachines en de computerprogramma's doorgaans niet-eenparige stromingssituaties berekend worden. Door de Werkgroep Waterlopen zijn indertijd grafieken ontworpen voor de berekening van de afmetingen van waterlopen en kunstwerken (Smit, 1963; Werkgroep Waterlopen, 1958). Met ditzelfde doel is door Blaauw een rekenliniaal ontworpen (Blaauw, 1961 en 1959).
Het door De Bos en Bijkerk ontwikkelde nomogram geeft de samenhang tussen de k_M en de waterdiepte (DeBos en Bijkerk, 1963). In de plaats van grafieken en rekenliniaal wordt momenteel veel gebruik gemaakt van kleine programmeerbare rekenmachines.

Een aantal instellingen hebben voor de berekening van waterlopenplannen computerprogramma's ontwikkeld (tabel 5a). In bijlage 10 wordt meer informatie gegeven over de bij de Landinrichtingsdienst in gebruik zijnde programma's DIWA, GROND en TEKDIGRO (André en Gelok, 1976).

8.5. Berekening van de niet-stationaire stromingstoestand

Voor het uitvoeren van berekeningen betreffende de niet-stationaire stromingstoestand wordt evenals bij de berekening van de stationaire stromingen begonnen met het verzamelen van de benodigde gegevens. Sommige gegevens, zoals af te voeren hoeveelheden water en buitenwaterstanden zullen nu tijdsafhankelijk bekend moeten zijn. Voor de berekening zal doorgaans gebruik

moeten worden gemaakt van computerprogramma's. In hoofdstuk 5 is een overzicht gegeven van deze programma's. De meeste rekenen met de niet- stationaire eenparige stroming met langzame veranderingen in de tijd (bijlage 8). In eerste instantie wordt met de niet-stationaire eenparige berekening de ongunstigste stromingstoestand bepaald welke in een waterlopenplan kan optreden. Uitgaande van deze stromingstoestand kan indien gewenst met de niet-stationaire, niet-eenparige berekening een nauwkeuriger uitkomst worden bepaald.

Berekening van waterlopen met niet-stationaire stroming zal slechts toegepast worden, indien de veranderingen in afvoer, waterstanden en stroomsnelheden in een kort tijdsbestek plaatsvinden. Hierbij zal deze methode doorgaans tot een economischer oplossing leiden. Dit komt doordat bij stationaire stroming geen rekening wordt gehouden met traagheid en berging. Bovendien is het in verband met de korte duur van de top van golfvormige afvoeren dikwijls mogelijk een kortdurende onderschrijding van de gewenste drooglegging te accepteren.

Naast de afvoerberekeningen zijn er nog tal van problemen waarvan de oplossing met een niet-stationair model kan worden verkregen. Enkele voorbeelden daarvan zijn:
- het bepalen van de invloed van de afvoer van een groot areaal glastuinbouw of van verharde oppervlakten van stedelijke gebieden, riooloverstorten, bergingsvijvers e.d. en van de zeer snel op de neerslag reagerende gebieden (b.v. tengevolge van oppervlakte afvoer of smeltende sneeuw). Sommige waterlopen of beken kunnen daarbij kortdurende topafvoeren te verwerken krijgen;
- het vaststellen van de optimale plaats, capaciteit en bediening van een gemaal of uitwateringssluis. De capaciteit van een gemaal of sluis hangt nauw samen met de bergingscapaciteit in de waterlopen. Tevens kan er een goed inzicht verkregen worden in het afmalen en in het af- en aanslaan van een gemaal;
- het berekenen van een waterlopen- of kanalenstelsel wanneer een verandering in de open bergingscapaciteit wordt voorzien;
- het opzetten van een beheersmodel voor de waterhuishouding van een gebied. Met zo'n beheersmodel kunnen bij voorbeeld optimale besturingsprogramma's voor automatische stuwen worden opgesteld. Ook kunnen snel de consequenties van eventuele wijzigingen (b.v. door aanleg van nieuwe duikers en waterlopen) in het systeem worden bepaald;
- het onderzoeken van de te verwachten gevolgen bij een kadebreuk;
- het kwantificeren van kwaliteitsproblemen, met name die het gevolg zijn van afvalwater- of koelwaterlozingen, zoals het bepalen van het verloop van de concentratie van in het water opgeloste stoffen of van het temperatuurverloop.

Evenals bij de stationaire stroming worden de waterlopen geschematiseerd tot een stelsel van takken en knooppunten (figuur 1). Knooppunten worden gelegd op plaatsen waar waterlopen samenkomen, waar het dwarsprofiel sterk verandert, en waar wateronttrekking of watertoevoer plaatsvindt (overstorten, gemalen e.d.). Daarnaast kan het voor de rekennauwkeurigheid nodig zijn om een waterloop door middel van knooppunten in een aantal tussenliggende takken te verdelen. In de knooppunten wordt de berging van de waterlopen geconcentreerd gedacht; aan de takken worden de overige eigenschappen van de waterlopen toegekend (hydraulische weerstand e d.); een uitzondering hierop vormen de computerprogramma's, die gebaseerd zijn op de methode van de karakteristieken. De waterbeweging in de waterlopen wordt

berekend met behulp van de bewegingsvergelijking en de continuïteitsvergelijking van het water. Hierin spelen behalve de hydraulische weerstand en het verhang van de leidingen, nu ook de berging, alsmede de traagheid van het water een rol. Eveneens wordt aangenomen, dat het bodemverhang van de waterlopen klein is (<5%) en dat de drukverdeling in de dwarsdoorsnede van de waterloop constant is (één dimensionaal).

De gegevens voor het model moeten zowel tijdsafhankelijk als waterstandsafhankelijk ingevoerd worden. Het laatste is van belang omdat bij toenemede waterstand de hydraulische weerstand van een waterloop afneemt en in het algemeen het bergend vermogen toeneemt (grotere waterspiegelbreedte, onderlopen van bermen of uiterwaarden).

De in een waterloop voorkomende kunstwerken worden, voor zover ze de stroming beïnvloeden, voorgesteld door een extra weerstand (ξ_2). Deze weerstand wordt in sommige computerprogramma's opgeteld bij de wrijvingsweerstand (ξ_1) van de betreffende tak van de waterloop; in andere computerprogramma's wordt de extra weerstand afzonderlijk in rekening gebracht.

Samenvattend moeten de volgende gegevens worden ingevoerd:

Voor de takken

- afmetingen van de waterloop die door de tak wordt voorgesteld;
- hydraulische weerstandsfactor ξ_1 van de tak, waarbij:

$$\xi_1 = \frac{2.g.L}{k_M^2 \cdot R^{4/3}}$$

- hydraulische weerstandsfactoren ξ_2 van de kunstwerken. Voor een duiker of syphon wordt de weerstand ξ_2 berekend met de formule:

$$\xi_2 = \frac{1}{\mu^2}$$

Voor de knooppunten

- bergend oppervlak;
- bodemhoogte waterloop.

Verder moeten voor de berekeningen eveneens randvoorwaarden meegegeven worden. Afhankelijk van de wijze van lozing kunnen dit al of niet met de tijd variabele waterstanden zijn, eventueel te combineren met overstorten, uitwateringssluizen of gemalen, waarvoor de betreffende karakteristieke eigenschappen worden ingevoerd (b.v. de relatie tussen opvoerhoogte en debiet van een gemaal). Evenzo kunnen de aan- of af te voeren hoeveelheden water al of niet tijdsafhankelijk in het model worden ingevoerd. Dit kan bijvoorbeeld plaatsvinden als gevolg van neerslag rechtstreeks op de waterlopen, door afstroming van boezemland, lozing via poldergemalen, of plaatselijke belasting door regenwateroverstorten van rioleringen. Deze belasting wordt in de knooppunten als uitwendig debiet ingevoerd.

Uitkomsten van de berekening zijn onder andere de debieten en stroomsnelheden in de takken en waterpeilen in de knooppunten per tijdstap. Het resultaat van een niet-stationaire berekening wordt beschreven in bijlage 11.

Uit het voorgaande blijkt dat bij de berekening met een niet-stationair model veel gegevens moeten worden verzameld, die op een geordende wijze moeten worden verwerkt. Daar noodzakelijkerwijze schematiserend te werk moet worden gegaan, verdient het vaak aanbeveling indien het mogelijk is het model te toetsen aan een werkelijk voorgekomen situatie, waarvan voldoende gegevens bekend zijn.

9. Evaluatie en aanbevelingen

De Werkgroep hoopt dat met dit rapport allen die betrokken zijn bij het ontwerpen van waterbeheersingsstelsels zullen worden bereikt en dat de door de Werkgroep Afvloeiingsfactoren aangedragen theoretische kennis met dit rapport een verder toepassingsveld zal krijgen (Werkgroep Afvloeiingsfactoren, 1963).

Er bestaat op het door de Werkgroep bestreken terrein een grote verscheidenheid in begripsdefinities, notaties van symbolen en gebruikte dimensies. De Werkgroep rekent het tot haar taak hierin zoveel mogelijk lijn te brengen. Zij hoopt dat het voorgestelde gebruik van definities en notaties, die berusten op het sinds 1 januari 1978 voorgeschreven internationaal stelsel (S.I.), bij de bij afvoerberekeningen betrokken bedrijven, diensten en instellingen navolging zal vinden.

9.1. Evaluatie van de toegepaste modellen

In het rapport is ingegaan op de modellen die in de praktijk worden gehanteerd bij het bepalen van de maatgevende afvoerdichtheid en bij het ontwerpen van waterlopenplannen. In het navolgende zal worden ingegaan op de beperkingen die de huidige werkwijze met zich meebrengt.

9.1.1. Huidige beperkingen bij de bepaling van de maatgevende afvoer(dichtheid)

De modellen die worden gehanteerd bij de bepaling van de maatgevende afvoer(dichtheid) zijn doorgaans alleen goed toepasbaar voor winterperioden. Bovendien worden de parameters van de modellen bepaald, of gekozen op grond van de toestand waarin het stroomgebied zich ten tijde van de metingen bevond. Inundaties, die tijdelijk bij hoge afvoeren optreden, worden voor het bepalen van de maatgevende afvoerdichtheid buiten beschouwing gelaten. Bovendien wordt verondersteld dat verbetering van de hoofdafwatering geen wezenlijke verandering van de afvoerkarakteristiek tot gevolg heeft, voor zover er geen sprake was van een remmende invloed op de detailontwatering. Tevens is de invloed van een meer gedetailleerde ontwatering en van een verlaging van de totale ontwateringsbasis niet te berekenen. Een onderzoek naar de afvoerkarakteristiek van de Sleenerstroom in Drenthe (Schoolkate, 1976) gaf hieromtrent wel enige aanwijzingen. Dit gebied is in onverbeterde toestand onderzocht (De Jager, 1965). Na de ingrijpende verbeteringen van de ontwatering en de verlaging van de ontwateringsbasis is de afvoer gemeten. Op grond hiervan is een tendens van veranderde tijdconstanten en kleinere percentages snel reagerend gebied gevonden. Helaas is de waargenomen reeks, gemeten in een regenarme winter, te kort om na te gaan of deze veranderingen ook nog blijven bestaan bij hogere neerslagintensiteiten.

Over de frequentie waarmede zomerafvoeren worden bereikt of overschreden is eveneens nog te weinig bekend. Weliswaar bestaan er voor de hellende, maar vooral ook voor de poldergebieden gegevens over de zomerafvoeren van het afwateringssysteem en is het bekend dat 's zomers maar een klein gedeelte van de neerslag via open waterlopen wordt afgevoerd. Deze afvoeren zijn met de thans in gebruik zijnde modellen echter niet goed in relatie te brengen met de neerslag. Het bepalen van een frequentiediagram, dat ook voor zomerafvoeren geldt, is dus nog niet mogelijk.

Met betrekking tot het model van De Jager kan nog worden opgemerkt dat bij kleine τ -waarden de maatgevende afvoerdichtheid hoger zou moeten zijn dan de uit het frequentiediagram van De Jager afgelezen waarde; over de grootte van deze verhoging is echter nog te weinig bekend. Ook de mate van persistentie zou bekeken moeten worden door andere statistische methoden toe te passen.

9.1.2. Huidige beperkingen bij de berekening van een waterlopenplan

De berekening van waterbeheersingssystemen beperkt zich in de meeste gevallen tot het bepalen van de afmetingen van de waterlopen en kunstwerken gebaseerd op een stationaire afvoer. Het bepalen van de afvoer, welke hierbij als maatgevend voor de dimensionering van de waterlopen en kunstwerken beschouwd wordt is veelal gebaseerd op ervaringscijfers in het betreffende gebied of in vergelijkbare gebieden. De maatgevende afvoer wordt per onderdeel vastgesteld aan de hand van bodemsoort, hoogteligging, grondwaterstanden en ervaring in vergelijkbare gebieden. Het neerslag-afvoerproces wordt hier nauwelijks bij betrokken, waardoor mogelijke tijdsverschillen tussen afvoerpieken uit de verschillende deelgebieden niet in de berekeningen tot uiting komen. Deze rekenwijze wordt veelal gehanteerd omdat enerzijds de uit onderzoeken verkregen verbeterde inzichten in het neerslag-afvoerproces onvoldoende verbreid zijn en anderzijds de aan niet stationaire situaties verbonden berekeningen gecompliceerd zijn. Zowel ten aanzien van bepaalde onderdelen van het proces als ten aanzien van de bij de berekeningen benodigde invoergegevens en randvoorwaarden zijn de inzichten dus nog voor verbetering vatbaar. Door de toenemende verstedelijking die, met name ook in de poldergebieden plaatsvindt, zal bij het berekenen van het waterlopenplan de invloed van de afvoer van de steden een steeds groter plaats gaan innemen. In de stationaire berekeningsmethoden kan het verwerken van deze invloed snel leiden tot overdimensionering.

9.2. Aanbevelingen voor nader onderzoek

In de relatie tussen het sociaal-economisch nut van ingrepen in de waterhuishouding en de bij afvoerberekeningen gehanteerde normen, bestaan nog tal van onduidelijkheden. Onderzoek naar deze relatie dient gestimuleerd te worden.

De schade die ingrepen in de waterhuishouding aan natuur en landschap kunnen berokkenen is slechts bij benadering te omschrijven. Het vertalen van deze schade in bij berekeningen hanteerbare normen is een onderwerp dat, meer dan nu het geval is, de aandacht verdient. Daarnaast zal het in toenemende mate van belang zijn om te komen tot ontwateringsnormen voor natuurgebieden.

Gebleken is dat normen voor afwatering en ontwatering vrijwel onafhankelijk van elkaar zijn ontwikkeld. In het rapport is getracht de verbanden aan te geven en de normen op elkaar af te stemmen. Een betere onderbouwing hiervan is echter gewenst. Mogelijk kan nader onderzoek, met behulp van met name simulatiemodellen, hierin voorzien.

9.2.1. Met betrekking tot de bepaling van de maatgevende afvoer(dichtheid)

De voorbereiding tot de inrichting van het landelijke gebied gebeurt de laatste jaren steeds zorgvuldiger. De belangenafweging tussen onder andere landbouw, natuur en landschap en grondwateronttrekking levert steeds meer

problemen op, zodat de basis waarop deze afweging plaatsvindt betrouwbaar en duidelijk moet zijn. Een belangrijke basisgrootheid voor een waterlopenplan in het kader van de landinrichting is de maatgevende afvoer. De Werkgroep is van mening dat het bepalen van deze afvoer nauwkeuriger moet geschieden dan doorgaans gebeurt. In hellende gebieden zou ten minste de vereenvoudigde oplossing van het type Kusse-De Jager gebruikt moeten.
In poldergebieden waar door middel van bemalingsinstallaties de afvoer bekend is en door de reeds jarenlange ervaring de frequentie van bepaalde peiloverschrijdingen c.q. schaden kunnen worden bepaald zijn, kan de maatgevende afvoer bepaald worden op economische gronden, dat wil zeggen door afweging van de benodigde investeringen tegen de te verwachten schaden. Daarnaast zal de maatgevende afvoerdichtheid van de deelgebieden met uiteenlopende bestemmingen moeten worden bepaald. In dit verband beveelt de Werkgroep tevens nader onderzoek aan naar de transformatie van neerslag in afvoer vanuit het stedelijke gebied.

Voor het bepalen van de maatgevende afvoer(dichtheid) zal in de toekomst meer rekening moeten worden gehouden met de relatie tot de grondwaterstand, wateronttrekking, verdamping en afvoer c.q. lozing stedelijk gebied. Daartoe zal de fysische relatie tussen neerslag en afvoer verder moeten worden uitgediept. Dit is niet alleen van belang voor het bepalen van de maatgevende afvoer zelf, maar zal in de toekomst in toenemende mate van belang zijn wanneer naast de kwantitatieve aspecten ook steeds meer de kwalitatieve aspecten een rol gaan spelen.

Er zal in dit verband onder andere moeten worden nagegaan:
- of de relatie tussen neerslag en afvoer te bepalen is uit de fysische grootheden van het gebied zodat onder andere uit sloot- en drainafstanden de tijdconstanten berekend kunnen worden;
- welke relatie er bestaat tussen grondwaterstand, neerslag, verzadigingsgraad en de oppervlakte snel reagerend gebied;
- of de invloed van de diepte van een ontwateringsbasis op de grootte van de tijdconstante wel voldoende tot uitdrukking wordt gebracht met behulp van de formule van Stiboka ;
- welke invloed de grootte van het tijdsinterval van neerslagperiode en van afvoer heeft op de berekende verdeling van maatgevende afvoerdichtheden;
- of met meer kennis van het fysische gebeuren in de stroomgebieden, de gemeten zomerafvoeren in relatie tot stroomgebiedskenmerken kunnen worden gebracht;
- of situaties met opdooi en smelten van sneeuw in Nederland met zodanige frequentie voorkomen, of tot zulke hoge afvoeren kunnen leiden dat met hun optreden rekening moet worden gehouden.

De thans gehanterde modellen ter bepaling van de maatgevende afvoerdichtheid zijn doorgaans alleen goed toepasbaar voor winterperioden. Bovendien worden de parameters van de modellen bepaald of gekozen op grond van de toestand waarin het stroomgebied zich ten tijde van de metingen bevond. Vooral in verband met het beheer van het waterbeheersingssysteem, alsmede voor een zo goed mogelijke weergave van kwalitatieve aspecten verdient het aanbeveling modellen toe te passen waarmee ook de zomersituatie kan worden gesimuleerd. Om de invloed van wijzigingen in een gebied op de grootte van de gehanteerde parameters te kunnen bepalen zou een onderzoek zoals dat in de Sleenerstroom in Drente is uitgevoerd (Schoolkate, 1976) over een langere periode moeten worden herhaald. In dit verband moet ook worden opgemerkt dat maar betrekkelijk weinig waarnemingen aan afvoeren van het ontwateringssysteem zijn verricht, terwijl juist deze waarnemingen essentiële in-

formatie kunnen verschaffen over te ontwerpen afwateringssystemen. De Werkgroep pleit dan ook voor meer aandacht aan dit facet.

Voor een optimale normstelling tenslotte is een gedetailleerde kennis vereist van de samenhang tussen gewasproduktie en bodemvocht, in relatie tot de geologische opbouw, het jaargetijde, de draagkracht van de bodem e.d. Ofschoon reeds veel onderzoek is gedaan, dient ten behoeve van de planoptimalisering met name naar de gewenste diepte van de ontwateringsbasis nog nadere studie te worden verricht. Naar de mening van de Werkgroep zou deze situatie moeten leiden tot het invoeren van normen ten aanzien van de ontwateringsbasis, naast de bestaande drainagenormen. De Werkgroep acht het invoeren van een dergelijke norm van essentieel belang voor toekomstige ontwerpen van waterbeheersingsprojecten.

9.2.2. Met betrekking tot de berekening van waterlopenstelsels

De berekening van het waterbeheersingssysteem beperkt zich in de meeste gevallen tot het bepalen van de afmetingen van waterlopen en kunstwerken gebaseerd op een stationaire afvoer. Daar de op computer gebruik gebaseerde rekenmodellen inmiddels ook voor praktische doeleinden geschikt zijn, pleit de Werkgroep voor een ruimere toepassing ervan. De invloed van de verschillende gebiedskenmerken, alsmede van een niet-stationaire invoer op het verloop van de afvoer kan dan beter worden nagegaan, wat tot een beter optimaal ontwerp van een waterbeheersingssysteem leidt. Hierbij zouden de specifieke toepassingsgebieden van de verschillende in omloop zijnde computerprogramma's nader moeten worden uitgewerkt, teneinde een goede afstemming te krijgen tussen omvang probleem en omvang programma. Daarnaast is het van belang dat bestaande optimaliseringstechnieken verder worden ontwikkeld, teneinde een beter inzicht te verkrijgen in de gevolgen van voorgestelde maatregelen.

Voor wat de invoer van de modellen betreft is nader onderzoek wenselijk naar de te verwachten afvoer van een stedelijk gebied tijdens perioden van maatgevende afvoer van het landelijke gebied. Voor wat de invloed van afvoeren vanuit het stedelijke gebied betreft is tevens van belang dat wordt onderzocht welke invloedssfeer regenbuien met een grote intensiteit hebben.

Uit oogpunt van toepasbaarheid is het tenslotte van belang dat de gevoeligheid voor veranderingen wordt bepaald van de in een model voorkomende parameters. Dit teneinde de mate van nauwkeurigheid waarmee de parameters bepaald moeten worden te kunnen omschrijven.

10. Samenvatting

Bij het opstellen van waterbeheersingsplannen dienen de doelstellingen bekend te zijn. Op grond van de hierbij geformuleerde normen wordt het ontwerp gemaakt. Daarbij is het nodig, naast het verloop met de tijd van de neerslag en de verdamping, de gehele keten van systemen van het afvoerproces te kennen. Behalve inzicht in het gedrag van de afzonderlijke systemen is bovendien inzicht vereist in de wijze waarop de systemen elkaar in opeenvolgende stadia beïnvloeden. Tevens dient de beïnvloeding van het ene afwateringsgebied op het andere in de beschouwingen te worden betrokken.

De Werkgroep is ervan uitgegaan dat het door haar op te stellen rapport richtlijnen dient te bevatten aan de hand waarvan waterbeheersingssystemen in landelijke gebieden kunnen worden ontworpen. Hierbij heeft de Werkgroep zich beperkt tot beschouwingen over berekeningsmethoden zoals die thans voor het ontwerpen van afwateringssystemen worden gebruikt.

Doelstellingen

Het beheersen van waterstanden in een gebied is geen doel op zich, maar maatschappelijke overwegingen liggen eraan ten grondslag. Deze overwegingen vloeien voort uit de functies die aan een gebied worden toegekend. Alvorens tot het ontwerpen van waterbeheersingssystemen wordt overgegaan moeten de belangen van deze functies worden gewogen. In dit rapport zijn niet alle functies beschreven. De nadruk is gelegd op de functie van het voortbrengen van voedsel, waarbij aan de landschappelijke en natuurlijke functie en die van het scheppen van woon- en werkgelegenheid niet is voorbij gegaan.
Voor de landbouw is de doelstelling bij het maken of verbeteren van een waterbeheersingssysteem als volgt geformuleerd:

Het zodanig beïnvloeden van de bestaande waterhuishouding dat, eventueel mede door andere civieltechnische maatregelen, het risico op inundaties dan wel hoge waterstanden zover gereduceerd wordt, dat het risico een aanvaarde waarde niet te boven gaat.

De genoemde doelstelling leidt niet zonder meer tot de juiste beslissing omtrent de dimensies van waterlopen. Daartoe is het nodigde relaties te kennen tussen de hydrologische kenmerken van een gebied en de bij het gestelde doel omschreven factoren.

Systeembenadering van de waterhuishouding

Een waterlopenstelsel fungeert als middel om bepaalde doelstellingen met betrekking tot het bodemgebruik te realiseren. In perioden met neerslagoverschot moet het stelsel de overtollige hoeveelheid water afvoeren en in perioden met een verdampingsoverschot moet aanvoer, zo nodig, plaatsvinden.Het waterlopenstelsel dient dus om de aan- en afvoer van water zodanig te reguleren, dat er een op het bodemgebruik afgestemde optimale situatie ontstaat.

Het begin van de hydrologische kringloop wordt gekozen bij de neerslag. De neerslag gaat uiteindelijk op in verdamping. Tussen de transporten in de vorm van neerslag en verdamping kunnen nog andere vormen van watertransport worden onderscheiden. In de grond treden over het algemeen twee soorten van transport op namelijk het transport door de zone waarin de poriën van de

grond niet geheel met water zijn gevuld en door de daaraan grenzende zone met geheel met water gevulde poriën. Tussen de onverzadigde en de verzadigde zone is geen scherp afgebakende overgang aanwezig. De bovengrondse transporten zijn eveneens in twee groepen te verdelen, namelijk transport van water over het maaiveld en het transport door insnijdingen in het maaiveld. Van de oppervlakte-afvoer is onder Nederlandse omstandigheden weinig bekend. Alle genoemde transporten zijn tijdsafhankelijk, evenals de daarmee samenhangende grootheden als waterpeil, freatisch vlak en geborgen, dan wel te bergen hoeveelheden water.

De samenhang tussen eigenschappen, wetmatigheden en afmetingen wordt systeem genoemd. Op grond hiervan kan aan elke vorm van watertransport een systeem worden toegekend. Voor de wiskundige beschrijving van een systeem wordt gebruik gemaakt van één, of meerdere modellen. De karakteristieke eigenschappen van het systeem kunnen hierbij worden weergegeven met behulp van één, of meerdere parameters waarvan de waarde, op grond van beschikbare gegevens hetzij uit metingen, hetzij met behulp van modellen wordt bepaald. De hydrologische kringloop omvat het transport van water door verschillende systemen, die deel uitmaken van het totale systeem van de kringloop. Waterhuishoudkundige maatregelen resulteren altijd in wijzigingen in één of meer van deze deelsystemen. Deze wijzigingen dienen echter zodanig te zijn, dat optimaal aan de gestelde doelen wordt voldaan. De maatregelen kunnen liggen op het gebied van de ontwatering, de afwatering, de lozing en/of op het gebied van de waterconservering en de wateraanvoer. Van ontwatering is sprake indien overtollig water aan de grond wordt onttrokken. De ontwateringsmiddelen die hiertoe, al dan niet in combinatie, kunnen worden toegepast zijn greppels, buisdrainages, perceel- en kavelsloten. De ontwatering heeft tot doel het afvoeren van overtollig water tot een optimale hoeveelheid is overgebleven. Van afwatering is sprake, indien overtollig water bovengronds door open leidingen of ondergronds door gesloten leidingen naar de grenzen van het gebied wordt afgevoerd. De afwateringsmiddelen bestaan uit waterlopen (sloten, leidingen, tochten, kreken, beken, boezems, enz.) en kunstwerken (stuwen, duikers, enz.) of rioleringen. Van lozing is sprake, indien het af te voeren water op een zodanige wijze over de grens van het afwateringsgebied wordt gebracht, dat het niet in het gebied terugstroomt. Van waterconservering is sprake indien het overtollige water niet volledig wordt afgevoerd, doch een deel ervan in het gebied wordt bewaard. Bij wateraanvoer tenslotte wordthet water van elders in het gebied gebracht.

De neerslag in het landelijke gebied zakt voor het grootste deel in de bodem weg en wordt voor een deel tijdelijk geborgen. Het gevolg is, dat bij een bui die in korte tijd valt en tot afvoer aanleiding geeft, de afvoer over een veel langere periode wordt uitgesmeerd. Door de in de hellende gebieden voorkomende grondwaterstandsverschillen is er een min of meer constante grondwaterstroming van de hoge gebiedsdelen naar de lage. Het beheersen van de grondwaterstanden in de hogere delen van de hellende gebieden is, gezien de diepe ondergrondse wegzijging, zonder een wateraanvoersysteem nagenoeg niet mogelijk.
De wijze van lozen is afhankelijk van het verschil in peilen tussen het binnen- en buitengebied. Over het algemeen is dit verschil zodanig dat te allen tijde met een vrij verval kan worden geloosd. In vlakke gebieden kunnen, zeker indien het grondwaterpeil van de omgeving nagenoeg permanent hoger ligt, de grondwaterstanden wel met behulp van een drainagestelsel en een waterlopenstelsel worden beheerst. In de regel is bij vlakke gebieden sprake van poldergebieden. De waterlozing is hier in principe op twee manieren mogelijk, te weten: door suatiesluizen, of door een gemaal.

Het neerslag- afvoerproces van bebouwde gebieden vertoont belangrijke verschillen ten opzichte van dat in een landelijk gebied. Dit verschil wordt veroorzaakt door de verharde oppervlakken, waardoor de neerslag slechts voor een klein gedeelte in de bodem kan wegzakken en voor het grootste deel naar de riolen c.q. direkt naar het open water in de stad stroomt. Indien het open water ten opzichte van de te verwachten topafvoeren een grote bergings- of afvoercapaciteit heeft zal dit geen moeilijkheden opleveren. In vele gevallen echter zal de capaciteit van de aanwezige waterlopen voor de lozing van de "verharde" afvoeren te klein zijn.

Ontwerpnormen en toetsingsnormen

Op grond van de doelstellingen worden eisen gesteld aan waterbeheersingssystemen. Deze eisen berusten op relaties, die bestaan tussen het gestelde doel en kwantificeerbare hydrologische kenmerken. Leiden dergelijke eisen tot richtsnoeren die een min of meer algemene geldigheid hebben, dan wordt gesproken van normen. Normen kunnen op tweeerlei wijzen worden toegepast, namelijk bij het ontwerpen (ontwerpnormen) en bij de toetsing van het ontwerp (toetsingsnormen).

Als een belangrijke grootheid voor de ontwateringstoestand van de grond wordt de grondwaterstand ten opzichte van maaiveld gebruikt. Voor het kenschetsen van de ontwateringstoestand van landbouwgronden wordt onder meer een drietal karakteristieke grootheden gebruikt, terwijl invoering van een vierde door de Werkgroep is aanbevolen.
Deze karakteristieke grootheden zijn:
- gemiddelde wintergrondwaterstand;
- grondwatertrappen;
- som van overschrijdingen van een kritische grondwaterstand;
- diepte van de ontwateringsbasis.

Het formuleren van normen met betrekking tot grondwaterstanden is niet eenvoudig vanwege het niet stationaire karakter van de grondwaterhuishouding. Daarom zijn voor de landbouw in Nederland normen ontwikkeld die gebaseerd zijn op stationaire situaties. Voor deze als stationair te beschouwen toestand wordt als normgevende grootheid een constante afvoer bij een minimale ontwateringsdiepte vastgesteld. Deze samengestelde ontwateringsnorm is gedifferentieerd naar grondgebruik, zoals akkerbouw, weidebouw, tuinbouw, fruitteelt.

Een belangrijke grootheid voor de afwatering is het open waterpeil, gemeten ten opzichte van het maaiveld. Omdat het open waterpeil sterk fluctueert, wordt dit peil met behulp van een aantal karakteristieken gekenschetst en daartoe op statistische wijze gedefinieerd als het peil dat in een nader te bepalen aantal dagen wordt bereikt of overschreden. In het gebied worden voor het ontwerpen van afwateringsstelsels drie karakteristieke grootheden gehanteerd, te weten:
- Normaal waterpeil;
- Hoog waterpeil;
- Maximum waterpeil.

Voor gebieden met ongestremde lozing gaat de voorkeur van de Werkgroep uit naar een combinatie van N.W.-peil en M.W.-peil, waarbij beide apart worden berekend. Voor gebieden met bemaling of suatie is het zinvol om het ontwerp te baseren op een combinatie van N.W.-peil en H.W.-peil. Door het verschil in het gedrag van het ontwaterings- en van het afwateringssysteem is het

niet eenvoudig eenduidige relaties te vinden tussen afwaterings- en ontwateringsnormen. Tot nu toe worden daarom afwaterings- en ontwateringsnormen onafhankelijk van elkaar beschouwd, met dien verstande dat aan de eis dat de afwatering geen belemmering mag vormen voor een goede ontwatering, wordt voldaan. Op grond van de karakteristieke grootheden zijn normen opgesteld op basis waarvan waterbeheersingssystemen worden ontworpen (tabel 2).

Modellen

In het rapport is een overzicht gegeven van een aantal modellen en van hun toepassingen. Bij de modellen kan onderscheid gemaakt worden in ontwateringsmodellen, afwateringsmodellen, lozingsmodellen en wateraanvoermodellen. Daarnaast zijn er modellen voor stroomgebieden, ook wel catchment modellen genoemd.

Ontwateringsmodellen worden gebruikt ter bepaling van de maatgevende afvoerdichtheid, alsmede voor het vaststellen van drain-, sloot- of singelafstanden en draindiepten, sloot- of singelpeilen.
Afwateringsmodellen worden gebruikt voor enerzijds de dimensionering van de afwateringsmiddelen en anderzijds voor de berekening van het werkelijke verloop van afvoeren en peilen in de open waterlopen en rioleringen naar plaats en tijd. Lozing vindt vrijwel altijd plaats door, of over één of ander lozingskunstwerk. Het soort en de afmetingen van een dergelijk kunstwerk in relatie tot de functie ervan wordt doorgaans bepaald met de in de hydraulica bekende formules of schaalmodellen.

Methoden ter bepaling van maatgevende afvoeren.

Onder de maatgevende afvoer wordt verstaan de hoeveelheid water die per eenheid van tijd uit een gebied moet worden afgevoerd om binnen dat gebied de gewenste beheersing van de waterstand te verkrijgen. In Nederland treden in de landelijke gebieden de hoge afvoeren vrijwel uitsluitend in het winterhalfjaar op, zodat de modellen met behulp waarvan de maatgevende afvoeren worden bepaald, slechts voor deze perioden bruikbaar hoeven te zijn. In stedelijke gebieden komen daarentegen de hoge afvoeren vooral voor in het zomerhalfjaar.

Voor de ontwerper van afwateringssystemen is de grootte van de aanvoer op verschillende punten van het systeem van belang. Hierbij moet worden opgemerkt, dat het ontwateringssysteem en het afwateringssysteem in beginsel twee achter elkaar geschakelde systemen zijn. De afvoer van het ontwateringssysteem is de aanvoer voor het afwateringssysteem en juist deze aanvoeren zijn maatgevend voor het laatste.

In principe bevindt zich tussen de afvoer van het ontwateringssysteem en de afvoer van het afwateringssysteem de transformatiefunktie van het afwateringssysteem.Voor Nederlandse omstandigheden blijkt echter, dat deze transformatiefunktie over het algemeen weinig invloed heeft op het verloop in de tijd van de afvoer.

De Werkgroep heeft gemeend dat het zinvol is een onderscheid te maken in methoden ter bepaling van maatgevende afvoeren en wel in methoden die gebaseerd zijn op afvoeren van het ontwateringssysteem enerzijds en op afvoeren van het afwateringssysteem anderzijds, hoewel de eerstgenoemde groep van methoden nog van geringe praktische betekenis is. Tevens is aangegeven maatgevende situatie is bepaald uit de invoer, dan wel uit de afvoer van een systeem. Hierbij is stilzwijgend verondersteld dat neerslagcijfers altijd in voldoende lange reeksen beschikbaar zijn.

Omdat de afvoer van het ontwateringssysteem fungeert als de invoer van het afwateringssysteem kan een maatgevende afvoer in principe bepaald worden aan de hand van een ontwateringssysteem. De afvoer van het ontwaterings systeem kan worden onderverdeeld in een langzame component, de basisafvoer en een snelle component, de snelle afvoer.

Bij het berekenen van de maatgevende afvoer kan gebruik worden gemaakt van een stationair model dan wel van een niet-stationair model. Bij een stationair model kan de maatgevende afvoer gelijk worden gesteld aan de maatgevende invoer. De mogelijkheid om de verschillende modellen toe te passen wordt bepaald door het beschikbaar zijn van gegevens als bodemconstanten en eigenschappen van het ontwateringssysteem en door de aard van het gebied. Op grond hiervan is in het overzicht van de verschillende methoden een onderscheid gemaakt in het al dan niet bekend zijn van de parameters van het ontwateringssysteem en in het al dan niet ter beschikking staan van waargenomen reeksen afvoeren van het ontwateringssysteem.

Veel vaker dan afvoergegevens van ontwateringssystemen zullen gegevens beschikbaar zijn van afvoeren op bepaalde punten in het afwateringssysteem. De methoden die zijn beschreven zullen dus in de praktijk veelvuldiger toepassing vinden dan de eerder genoemde. Ook hier is onderscheid gemaakt in het beschikbaar zijn van waarnemingsreeksen.

De stedelijke afwateringssystemen zijn in het rapport beschouwd, voor zover zij van belang zijn voor de landelijke afwateringssystemen.

Enkele toepassingen van methoden ter bepaling van maatgevende afvoeren.

Na het overzicht van de methoden die er zijn ter bepaling van de maatgevende afvoer is nader op een tweetal methoden ingegaan. De eerste methode, de methode van De Jager, wordt vooral toegepast bij de bepaling van de maatgevende afvoer in hellende gebieden met ongestremde lozing. De tweede methode, de methode De Zeeuw-Helling wordt toegepast in vlakke gebieden.

Dimensionering van waterlopen en kunstwerken

Het proces van het afvoeren van neerslag uit een stroomgebied is een dynamisch gebeuren, dat in de waterlopen tot uiting komt in veranderingen van peilen en stroomsnelheden. Omdat de snelheden waarmee deze veranderingen optreden in het landelijk gebied in Nederland meestal veel kleiner zijn dan de snelheid waarmee veranderingen zich in de waterlopen voortplanten, mag worden aangenomen dat er nauwelijks tijdsverschillen ontstaan in afvoergolven die afkomstig zijn van een boven- en van een benedenstrooms gebied. Tijdsafhankelijkheid als gevolg van geografische verschillen binnen een stroomgebied kunnen in deze gevallen buiten beschouwing worden gelaten.

In de keuze van een maatgevende afvoerdichtheid als stationaire grootheid, wordt in feite de niet-stationaire situatie vertaald naar een stationaire situatie. Hierdoor kan voor het dimensioneren van waterlopen met stationaire berekeningen worden volstaan. Indien de tijdsafhankelijkheid als gevolg van de aanwezigheid van zeer snel reagerende onderdelen echter zo groot is, dat deze niet goed in de keuze van de maatgevende afvoer kan worden verantwoord, zal van niet-stationaire berekeningsmethoden gebruik moeten worden gemaakt.

Alvorens met het ontwerp van een waterbeheersingsplan kan worden begonnen,

dienen een aantal gegevens van het gebied bekend te zijn. De gegevens kunnen worden onderverdeeld in basisgegevens, hydrologische gegevens en waterstaatkundige gegevens. Aan de hand van deze gegevens worden de tracé's van de waterlopen en de plaats van de belangrijkste kunstwerken in het landelijke gebied aangegeven in een lijnenplan, de in te stellen peilen in een peilenplan. Op basis hiervan, de maatgevende afvoerdichtheden en de overige noodzakelijke gegevens worden de dwarsprofielen berekend. Deze berekening wordt zonodig een aantal malen herhaald totdat een definitief waterbeheersingsplan is ontworpen.

Bij het ontwerpen van een waterbeheersingsplan op grond van een stationaire toestand kan de stroming van het water eenparig of niet-eenparig berekend worden. In de praktijk worden de dimensies van waterlopen en kunstwerken in eerste instantie bij eenparige stroming berekend, waarna het ontworpen plan niet-eenparig wordt doorgerekend. De bij het ontwerpen van een waterbeheersingsplan gebruikte formules worden in de tekst besproken.

Voor het uitvoeren van berekeningen betreffende de niet-stationaire stromingstoestand wordt evenals bij de berekening van de stationaire stroming begonnen met het verzamelen van de benodigde gegevens. Sommige gegevens zullen nu tijdsafhankelijk bekend moeten zijn. Berekening van waterlopen met niet-stationaire stroming zal slechts toegepast worden, indien de veranderingen in afvoer, waterstanden en stroomsnelheden in een kort tijdsbestek plaatsvinden. Hierbij zal deze methode doorgaans tot een economischer oplossing leiden. Dit komt doordat bij stationaire stroming geen rekening wordt gehouden met traagheid en berging. Bovendien is het in verband met de korte duur van de top van golfvormige afvoeren dikwijls mogelijk een kortdurende onderschrijding van de gewenste drooglegging te accepteren.

Evaluatie en aanbevelingen

Er bestaat op het door de werkgroep bestreken terrein een grote verscheidenheid in begripsdefinities, notaties van symbolen en gebruikte dimensies. De Werkgroep heeft het tot haar taak gerekend hierin zoveel mogelijk lijn te brengen. Zij hoopt dat het voorgestelde gebruik van definities en notaties, die berusten op het sinds 1 januari 1978 voorgeschreven internationaal stelsel (S.I.) navolging zal vinden.

In het rapport is ingegaan op de modellen die in de praktijk worden gehanteerd bij de bepaling van de maatgevende afvoerdichtheid. Aan deze modellen kleven een aantal beperkingen. Veelal zijn zij slechts toepasbaar voor perioden zonder verdamping en voor de toestand waarin het stroomgebied zich ten tijde van de metingen bevond.

De berekening van waterbeheersingssystemen beperkt zich in de meeste gevallen tot het bepalen van de afmetingen van de waterlopen en kunstwerken gebaseerd op een stationaire afvoer. Deze rekenwijze wordt gehanteerd omdat bij het gebruik van niet-stationaire modellen er enerzijds onvoldoende inzicht is in het neerslag-afvoerproces en anderzijds de daarvoor verbonden gecompliceerde berekeningen veel te tijdrovend zijn.

De schade die ingrepen in de waterhuishouding aan natuur en landschap kunnen berokkenen is slechts bij benadering te omschrijven. Het vertalen van deze schade in bij berekeningen hanteerbare normen is een onderwerp dat nog meer dan nu het geval is, de aandacht verdient. Daarnaast zal het in toene-

mende mate van belang zijn om te komen tot ontwateringsnormen voor natuurgebieden.

De voorbereiding tot de inrichting van het landelijke gebied gebeurt de laatste jaren steeds zorgvuldiger. De belangenafweging tussen onder andere landbouw, natuur en landschap en grondwateronttrekking levert steeds meer problemen op, zodat de basis waarop deze afweging plaatsvindt betrouwbaar en duidelijk moet zijn. Een belangrijke basisgrootheid voor een waterlopenplan in het kader van de landinrichting is de maatgevende afvoer. De Werkgroep is van mening dat het bepalen van deze afvoer nauwkeuriger moet geschieden dan doorgaans gebeurt. Daartoe zal de fysische relatie tussen neerslag en afvoer verder moeten worden uitgediept.

Vooral in verband met het beheer van het waterbeheersingssysteem, alsmede voor een zo goed mogelijke weergave van kwalitatieve aspecten verdient het aanbeveling modellen toe te passen waarmee ook de zomersituatie kan worden gesimuleerd.

Met name naar de gewenste diepte van de ontwateringsbasis zal nog nadere studie moeten worden verricht. Naar de mening van de Werkgroep zou deze studie moeten leiden tot het invoeren van normen ten aanzien van de ontwateringsbasis.

Daar de op computer gebruik gebaseerde rekenmodellen ter berekening van de stroming door open waterlopen inmiddels ook voor praktische doeleinden geschikt zijn, pleit de Werkgroep voor een ruimere toepassing ervan.

11. Literatuur

1. André, D. en A.J. Gelok
   Voorbeeld van de berekening van een waterbeheersingsplan, waarbij gebruik gemaakt is van de computerprogramma's
   CORLIST, DIWA, GROND en TEKDIGRO.
   Cultuurtechnische Dienst, Utrecht, 1976

2. Berg, J.A. van den en G.A. Ven
   Kwantitatieve aspecten van de afvoer van regenwater in stedelijke gebieden.
   H_2O, jaargang 10, no. 9, 1977

3. Billib, H.
   Mitteilungen Institut für Wasserwirtschaft und Landwirschaftlichen Wasserbau.
   Technische Universität Hannover, H12
   Hannover, 1968.

4. Blaauw, H.
   Afvoernormen.
   Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 2, no. 3, 1962.

5. Blaauw, H.
   De berekening van waterlopen en kunstwerken.
   Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 1, no. 3, 1961.

6. Blaauw, H.
   Een rekenliniaal voor het bepalen van het doorstromingsprofiel van waterlopen, rechthoekige-, cirkelvormige-, ellipsvormige-, samengestelde duikers en overlaten.
   Cultuurtechnische Dienst, Noord-Brabant, november 1959.

7. Bloemen, G.W.
   On the evaluation of parameter values in water balance models.
   Technical bulletin of the Institute for Land and Water Management Research, no. 92.
   Wageningen, 1974.

8. Bloemen, G.W.
   Berekening van maatgevende afvoeren, onafhankelijk van gemeten afvoeren.
   Polytechnisch Tijdschrift, jaargang 27, no. 19, 1972.

9. Boels, D.
   Bovengrondse afstroming op kruinige zavelpercelen.
   Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 18, no. 4, 1978-1979.

10. Bon, J.
    Bepaling van de k_M voor het ontwerpen van leidingen.
    Waterschapsbelangen no. 21, 1967.

11. Bos. R.J.
    De berekening van verhanglijnen met behulp van de computer.
    Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 4, no.4, 1964/1965.

12. Bos, W.P. de, en C. Bijkerk
Een nieuw nomogram voor het berekenen van waterlopen.
Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 3, no. 4, 1963.

13. Bouman, J.E.G. en E. Schultz
Berekening van de niet-stationaire stroming in waterlopen in stedelijk en landelijk gebied.
Flevobericht no. 127.
Rijksdienst IJsselmeerpolders, Lelystad, 1978.

14. Bouwknegt, J.
Hydra, een computerprogramma voor het berekenen van hydraulische netwerken.
Waterschapsdagen 1978 t.g.v. 90 jaar Heidemij.

15. Bouwknegt, J.
Flood waves from impervious areas.
Symposium on effects of urbanization and industrialization on the hydrological regime and on water quality.
Amsterdam, October 1977.

16. Braak, C.
Het klimaat van Nederland, A: Neerslag
Koninklijke Nederlands Metheorologisch Instituut, Verhandeling no. 34a, De Bilt, 1933.

17. Brouwn, A.E.
Afvoer- en frequentieverdeling.
Discussienota.
Rijkswaterstaat, Den Haag, 1971.

18. Buishand, T.A.
De variantie van de gebiedsneerslag als functie van puntneerslagen en hun onderlinge samenhang.
Mededeling no. 10.
Landbouw Hogeschool Wageningen, 1977.

19. Bijkerk, C.
Ontwerptechniek Waterbeheersingsplannen.
Syllabus Ingenieurscollege Cultuurtechniek,
Technische Hogeschool Delft, 1969

20. Clarke, R.T.
Mathematical models in hydrology
Irrigation and drainage paper nr. 19
Food and Agriculture Organization
Rome, 1973

21. Commissie Bestudering Waterhuishouding Gelderland.
Modelonderzoek 1971-1974.
Provinciale Waterstaat Gelderland, Arnhem, 1975.

22. Verslag van de T.N.O. ad hoc groep Grondwatermodellen en Computerprogrammatuur.
Rapporten en Nota's no. 2.
Commissie Hydrologisch Onderzoek T.N.O., Den Haag, 1978.

23. Recent Trends in Hydrograph Synthesis.
Verslagen en Mededelingen no. 13.
Commissie Hydrologisch Onderzoek T.N.O., Den Haag, 1966.

24. Wateroverlast.
Verslagen en Mededelingen no. 9.
Commissie Hydrologisch Onderzoek T.N.O., Den Haag, 1963.

25. Commissie Onderzoek Landbouwwaterhuishouding Nederland T.N.O.
De Landbouwwaterhuishouding van Nederland.
Rapport no. 1, 1958.

26. Crawford, N.H. and R.K. Linsley
The synthesis of continuous streamflow hydrographs on a digital computer.
Technical Report no. 12.
Stanford University Department of Civil Engineering
Stanford, 1962.

27. Dam, J.C. van
Waterhuishouding:
1. Hydrologische grondslagen.
Collegedictaat.
Technische Hogeschool Delft, 1971

28. Deutscher Normenausschuss DNA Din 1185 "Dränanweisung".
Beuth-Vertrieb, 8. Aufl.
Berlin, 1959.

29. Dort, J.A. van
Waterbeheersing in stedelijke gebieden.
Polytechnisch Tijdschrift, jaargang 29, no. 16, 1974.

30. Driel, P. van
Onderzoek naar verschillen in frequentieverdeling van hoge grondwaterstanden ten gevolge van verschillen in neerslag.
Nota 936.
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, 1976.

31. Ernst, L.F.
Grondwaterstromingen in de verzadigde zone en hun berekening bij aanwezigheid van horizontale evenwijdige open leidingen.
Verslagen Landbouwkundig Onderzoek 67 (15), 1962.

32. Flach, A.J.
Invloed van de begroeiing op de stromingsweerstand in open waterlopen.
Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 8, no. 5, 1968.

33. Flach, A.J. en J. Pieters
Veranderingen in de wandruwheidsfactor van open waterlopen tijdens het groeiseizoen.
Waterschapsbelangen, jaargang 51, no. 18, 1966.

34. Fraanje, M.J.
Vloeistofmechanica, deel 1, 2 en 3.
Agon Elsevier, 1972.
Amsterdam/Brussel, 1972.

35. Gelok, A.J.
Wrijvingsverliezen van gegolfd plaatstalen duikers.
Cultuurtechnische Dienst, Utrecht, 1975.

36. Gelok, A.J.
Natom-tabellen, natte oppervlakte, natte omtrek, hydraulische straal en natte bovenbreedte van verschillende typen rioolbuizen en duikerprofielen.
Cultuurtechnische Dienst, Utrecht, 1973.

37. Gelok, A.J.
Beschrijving computerprogramma DIWA.
Mededelingen no. 88.
Cultuurtechnische Dienst, Utrecht, 1970.

38. Gelok, A.J.
Berekening opstuwing duikers.
Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 9, no. 3, 1969.

39. Grijsen, J.G.
Wiskundige modellen van open leidingsystemen.
Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 18, no. 4, 1978.

40. Gumbel, E.J.
Statistics of extremes.
Columbia University Press.
New York and London, 1958.

41. Heesen, H.C. van, P. van der Sluis en A. Krabbenborg
Het bergendvermogen van zandgrond.
Interne mededeling no. 24.
Stichting voor Bodemkartering, Wageningen, 1973.

42. Herik A.G. van den, en M.T. Kooistra
5-minuten regens.
H_2O, jaargang 3, no. 21, 1970.

43. Hooghoudt, S.B.
Bijdragen tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond.
Verslagen Landbouwkundig Onderzoek 46 (14), 1940.

44. Huisman, L.
Stromingsweerstanden in leidingen.
Mededeling no. 14.
Keuringsinstituut voor waterleidingsartikelen, 1969.

45. Idelcik, J.E.
Memento des pertes de charge.
Eyrolles, editeur Paris, 1960.

46. Veldboek voor land- en waterdeskundigen
International Institute for Land Reclamation and Improvement,
Wageningen, 1972.

47. Jager, A.W. de
Betekenis van het onderhoud voor het ontwerp van open waterlopen.
Waterschapsbelangen 53, jaargang no. 16, 1968.

48. Jager, A.W. de
Hoge afvoeren van enige Nederlandse stroomgebieden.
Dissertatie.
Pudoc, Wageningen, 1965 (dissertatie).

49. Jong, B. de
The main drainage system of Southern Flevoland.
Eight congres, question 27.
International commission on irrigation and drainage.
New Delhi, 1971.

50. Kempees, A.J.
Samenvatting berekeningen van de afvoer naar het ontvangende water bij regenval te Tuindorp-Oostzaan te Amsterdam.
Werkgroep Afvoerfactoren Stedelijke Gebieden, 1966.

51. Kley, J. van der en H.J. Zuidweg
Polders en dijken
Agon Elsevier.
Amsterdam/Brussel, 1969.

52. Koopmans, R.W.R. en G.J.R. Soer
Numerieke oplossingen voor niet-stationaire tweedimensionale grondwaterstromingen met een vrije waterspiegel.
Mededeling afd. Cultuurtechniek no. 14.
Landbouw Hogeschool Wageningen, 1975.

53. Kop, J.H.
Beknopt overzicht van computerprogramma's voor de berekening van rioolstelsels.
Postacademie Cursus Gezondheidstechniek - Rioleringen.
Delft, 1975.

54. Korving, L. en E. van der Woude
Berekening niet-permanente stromingen in stedelijke en agrarische afwateringsstelsel volgens het programma WABER.
Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 15, no. 4, 1975/1976.

55. Kraan, R.A.
Gebruikshandleiding THTSIM, versie V20-1.
kenmerk 2141.2045.
Technische Hogeschool Twente, 1975.

56. Kraijenhoff van de Leur, D.A. en H. Prak
Verstedelijking, industrie en zware zomerregens:
en verkende studie.
H_2O, jaargang 12, no 4, 1979.

57. Kraijenhoff van de Leur, D.A.
Een elektrisch analogon voor het neerslag - afvoermodel "Wageningen" en enkele toepassingen.
Afd. Hydraulica - Afvoerhydrologie, nota 25 en 31.
Landbouw Hogeschool Wageningen, 1972, resp. 1973.

58. Kraijenhoff van de Leur, D.A.
A. study of non-steady grondwater flow II.
Computation methods for flow to drains.
De Ingenieur, Bouw- en waterbouwkunde, 1962.

59. Kraijenhoff van de Leur, D.A.
A study of non-steady groundwater flow with special reference to a reservoircoefficient.
De Ingenieur, Bouw- en waterbouwkunde, 1958.

60. Laat, P.J.M. de, C. van den Akker en Th. J. van de Nes
Consequences of groundwater extraction on evaporation and saturated - unsaturated flow.
International Symposium Application Mathematical Models in Hydrology and Waterresources Systems.
Bratislava, 1975.

61 Provinciale handleiding voor waterbeheersingsobjecten.
Rapport no. 69-39, 1969.
Cultuurtechnische Dienst, Noord-Brabant, 1969.

62. Levert, C.
Regens, een statistische studie.
Verhandelingen no. 62
Koninklijk Nederlands Methoerologisch Instituut, De Bilt, 1954.

63. Linsley, R.K., M.A. Kohler and J. Paulhus
Hydrology for Engineers.
Mc. Graw-Hill Book Comp.
New York, 1958.

64. Mazure, J.P.
Invloed van een weinig doorlaatbare afdekkende bovenlaag op de kwel onder een dijk.
De Ingenieur no. 13, 1932.

65. Meijer, Th.J.G.P., C.B. Vreugdenhil and M. de Vries
A method of computation for non-stationary flow in open-channel networks.
Publication no. 35.
Hydraulics Laboratory Delft, 1965.

66. Molen, W.H. van der
Waterbeheersing.
Collegedictaat afd. Cultuurtechniek.
Landbouw Hogeschool, Wageningen, 1971.

67. Nash, J.E.
A unit hydrograph study, with particular reference to British catchments.
Proceedings Institute of Civil Engineers Volume 17, 1960.

68. Nes, Th.J. van de
Linear analysis of a physically based model of a distributed surface runoff system.
Agricultural Research Report no. 799.
Pudoc, Wageningen, 1973.

69. Neuman, S.P., R.A. Feddes and F. Bresler
Finite element analysis of two-dimensional flow in soils condisering water uptake by roots.
Proceedings no. 2
Soil Science Society of America, 1975.

70. Nortier, J.W. en H. van der Velde
Hydraulica voor waterbouwkundigen.
Stam, 1963.

71. Oostwoud Wijdenes, J.M.J.W.
De specifieke regenintensiteit voor Nederland.
Publieke Werken no. 11, 1941.

72. Oud, G.A.
Polderbemaling.
Waterschapsbelangen, jaargang 52, no. 14, 1967.

73. Oudshoorn, H.M. en F. Rutgers
De ordening van het gebruik en de loop van het water.
Symposium Waterloopkunde in dienst van industrie en milieu.
Publikatie no. 110.
Waterloopkundig Laboratorium, Delft, 1973.

74. Rheinhold, F.
Gesundheits Ingenieur no. 16 en 17, 1941.

75. Ribbius, F.J. en C. Kragt
Het verband tussen riolering en zuivering.
Publieke Werken no. 10, 1954.

76. Ridder, N.A. de
Simulation of the Varamin Groundwater Basin, Iran, on a digital computer
Food and Agriculture Organization
Rome, 1968

77. Rossum, H. van, Tj. de Vries e.a.
Waterkering Waterhuishouding.
Stam, 1967.

78. Schoolkate, J.H.
Analyse van het afvoerverloop en berekening gebiedsverdamping voor het stroomgebied van de Sleenerstroom
Scriptie Afd. Hydraulica en Afvoerhydrologie,
Landbouw Hogeschool Wageningen, 1976.

79. Schothorst, C.
Het polderpeil voor veenweidegronden in de Lopikerwaard.
Nota 592.
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, 1970.

80. Schultz, E. en W.A. Segeren
Cultuurtechnische aspecten van het bouwrijpmaken van terreinen.
Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 16, no. 1, 1976.

81. Segeren, W.A. en J. Visser
Nieuwe normen voor de ontwatering van appelboomgaarden.
Van zee tot land no. 49.
Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad, 1971.

82. Sieben, W.H.
Verband tussen ontwatering en opbrengst bij de jonge zavelgronden in de Noordoostpolder.
Van zee tot land no. 40.
Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Lelystad, 1964.

83. Sluis, P. van der, en Th. van Egmond
De grondwatertrappen op de bodemkaart van Nederland.
Polytechnisch Tijdschrift - Bouw, jaargang 31, no. 10, 1976.

84. Slijkoord, F.
Gevolgen van de verstedelijking met betrekking tot de kwantitatieve aspecten van de afwatering.
H_2O, jaargang 10, no. 17, 1977.

85. Smit, W.J.
Ontwikkelingen in de ontwerptechniek van open waterlopenstelsels.
Cultuurtechnisch Tijdschrift,jaargang 14, no. 1, 1974.

86. Smit, W.J.
Het bepalen van de afmetingen van waterlopen en kunstwerken.
Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 6, no. 5, 1967.

87. Smit, W.J.
Het ontwerpen van een Waterbeheersingsplan.
Cultuurtechnisch Tijdschrift, jaargang 4, no. 2, 1964.

88. Smit, W.J.
Berekening waterlopen en kunstwerken met behulp van grafieken.
Polytecnisch Tijdschrift - Bouw, jaargang 18, no. 8, 1963.

89. Stam, H.
Keuze van het afwateringscriterium voor het ontwerpen van een waterbeheersingsplan.
Doctoraalscriptie afd. Cultuurtechniek.
Landbouw Hogeschool Wageningen, 1977.

90. Stol, Ph. Th.
Het vaststellen van afvoercoëfficienten van poldergemalen met behulp van maalstaatgegevens.
Waterschapsbelangen, jaargang 56, nr. 21 en 22, 1971.

91. Straub, L.G. and H.M. Morris
Hydraulic Data Comparison of Concrete and Corrugated Metal Culvert Pipes.
Technical Paper no. 3, series B.
St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, 1950.

92. Structuurschema Landinrichting.
Bijlage Waterhuishouding (concept), 1978.

93. Ton, H.
Stuwenplan De Monden.
Landinrichtingsdienst, Utrecht, 1976.

94. Ven te Chow
Open-Channel Hydraulics.
New York, 1959, Mc. Graw-Hill Book Compani, Inc.

95. Visscher, W.
A brief study to evaluate the optimal groundwater withdrawal in a relatively large river basis in the Netherlands.
IAHS, Publication 77.
Bern, 1967

96. Visser, W.C.
Waterbeheersing, watertoedeling en rekentechnieken als grondslag daar toe.
nota's 599, 600 en 601.
Instituut Voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, 1971.

97. Voetberg, K.S.
De grafische coaxiale methode ter bepaling van de afvoerbare neerslag in een klein stroomgebied met hoofdzakelijk grondwaterafvoer.
Landbouw Hogeschool Wageningen, 1967.

98. Vries, J.J. de
Groundwater Flow Systems and Stream Nets in the Netherlands
Dissertatie.
Vrije Universiteit, Amsterdam, 1974.

99. Hevelstuw Cultuurtechnische dienst.
Verslag modelonderzoek M 1526.
Waterloopkundig Laboratorium, Delft, 1978.

100. Plaatselijke energieverliezen t.g.v. profielveranderingen.
Rapport no. V 16.
Waterloopkundig Laboratorium, Delft, 1964.

101. Werkgroep Afvloeiingsfactoren.
Tweede interimrapport.
Rapport 1972.

102. Werkgroep Afvoerfactoren Stedelijke Gebieden
Kwantitatieve aspecten van de afvoer van stedelijke gebieden.
Koninklijk Instituut van Ingenieurs - Koninklijk Genootschap van Landbouwwetenschap, augustus 1973.

103. Werkgroep Onderhoudstechnieken Open Waterlopen.
Onderhoud en Beheer van Open Waterlopen.
Rapport 1976.

104. Werkgroep Ontwerptechniek in de waterhuishouding
Ontwerptechnische Aspecten van Waterbeheersingsplannen.
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, 1968.

105. Werkgroep Waterlopen
Richtlijnen voor het ontwerpen van open waterlopen en sommige bijbehorende kunstwerken.
Van Gorcum.
Assen, 1958.

106. Wesseling, J.
Enkele opmerkingen over de bepaling van ruwheidsfactoren in open leidingen.
Nota 298.
Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen, 1968.

107. Wesseling, J.
Bergingsfactor en drainagecriterium.
Tijdschrift Koninklijke Nederlandse Heide Maatschappij,
Jaargang 1969, no. 4, 1967.

108. Wesseling, J.
Enige aspecten van de waterbeheersing in landbouwgronden.
Verslagen Landbouwkundig Onderzoek no. 63.5, 1957.

109. Wiggers, J.B.M.
In what way is water pollution inflienced bij sewerage systems
Verslagen en mededelingen no. 24.
Commissie voor hydrologisch onderzoek - TNO.

110. Wind, G.P.
Application of analog and numerical models to investigate the influence of drainage on workability in spring.
Netherlands Journal Agricultural Sciences (24), 1976.

111. Wind, G.P.
Een eenvoudige relatie tussen afvoer, berging en neerslagintensiteit.
Landbouwkundig Tijdschrift no. 4, 1967.

112. Working Group on Small Hydraulic Structures, The Editor: M.G. Bos
Discharge Measurements Structures
Rapport 4.
Landbouwhogeschool Wageningen, 1976.

113. Wijk, A.L.M. van en R.A. Feddes
Invloed van de waterhuishouding op de opbrengst van landbouwgewassen.
Nota 867.

114. Zeeuw, J.W. de
Analyse van het afvoerverloop van gebieden met hoofdzakelijk grondwaterafvoer.
Dissertatie.
Landbouw Hogeschool Wageningen, 1966.

115. Zeeuw, J.W. de en F. Hellinga.
Neerslag en afvoer.
Landbouwkundig Tijdschrift 70, 1958.

116. Zondervan, J.G.
Modeling Urban Runoff, a quasilinear approach.
Dissertatie.
Landbouw Hogeschool Wageningen, 1978.

BEGRIPPEN

Afvoerdichtheid:	De stroomdichtheid van de afvoer, berekend als afvoer per eenheid afwaterend oppervlak.
Afvoerverlooplijn:	De kromme die het verband aangeeft tussen de afvoerintensiteit en de tijd.
Afwatering:	De afvoer van water via een stelsel van open waterlopen naar een lozingspunt van het afwateringsgebied.
Basisafvoer:	Verloop van de afvoer in de regenloze periode.
Catchment model:	Model waarmee de totale waterhuishouding van een gebied beschreven wordt.
Drooglegging:	De diepte van de waterlijn onder het maaiveld.
Droogweerafvoer (dwa):	Verloop van de rioolafvoer in de regenloze periode.
Evaporatie:	Verdamping van open water. Deze omvat ook de neerslag die achterblijft op het plantendek en landoppervlak en de verdamping van kale grond.
Gemiddeld hoogste grondwaterstand:	Het gemiddelde van de drie hoogste veertiendaagse waarnemingen per jaar gemeten over een lange periode.
Hydraulische straal:	De verhouding tussen natte oppervlakte en natte omtrek.
Hoog waterpeil:	Het peil dat 1 à 2 dagen per jaar wordt bereikt of overschreden.
Infiltratie:	De overgang van water van de oppervlakte in de bodem.
Lozing:	wateringsgebied.
Maatgevende afvoer:	De hoeveelheid water die per eenheid van tijd minstens uit een gebied moet worden afgevoerd om binnen dat gebied de gewenste bebeheersing van de waterstand te verkrijgen.

Maatgevende afvoerdichtheid:	De hoeveelheid water die per eenheid van oppervlakte en per eenheid van tijd minstens uit een gebied moet worden afgevoerd om binnen dat gebied de gewenste beheersing van de waterstand te verkrijgen.
Maximaal waterpeil:	Het peil dat 1 à 2 dagen per 100 jaar wordt bereikt of overschreden.
Minimum drooglegging:	De afstand tussen maaiveld en de waterlijn onder maatgevende omstandigheden.
Model:	Een groep van formulering en (c.q. nabootsingen) van een proces, waarbij een onderscheid kan worden gemaakt in een passieve groep van formuleringen (relaties gebaseerd op wetmatigheden) en een actieve groep (randen tijdvoorwaarden).
Neerslagdichtheid:	De hoeveelheid neerslag die per eenheid van oppervlakte en per eenheid van tijd valt.
Norm:	Eis met een min of meer algemene geldigheid die gebruik wordt bij het opstellen van een ontwerp.
Normaal waterpeil:	Het peil dat 10 à 20 dagen per jaar wordt bereikt of overschreden.
Normgevende grootheid:	De grootheid die als norm wordt gebruikt.
Ontwatering:	De afvoer van water uit de percelen naar een stelsel van waterlopen. Drains, greppels en sloten worden gerekend tot het ontwateringssysteem.
Ontwateringsbasis:	Het laagste niveau dat door het grondwater wordt bereikt.
Ontwateringsdiepte:	De diepte van de grondwaterspiegel tijdens maatgevende omstandigheden.
Ontwerp norm:	Vooraf opgestelde eis die wordt gebruikt als uitgangspunt voor een ontwerp.

Perkolatie:	Het wegzakken van water uit, of door het bodemvocht tot het grondwater.
Polder:	Een gebied waarin de waterstand kan worden beheerst, onafhankelijk van de omgeving.
Polderpeil:	Het peil dat in de sloten in een polder wordt gehandhaafd om de grondwaterstand te beïnvloeden.
Regenduurlijn:	Een regenduurlijn is de omhullende van de maxima van de neerslag voor verschillende perioden, welke met gelijke frequentie kunnen voorkomen.
Regenwaterafvoer (rwa):	Verloop van de rioolafvoer tijdens neerslag eventueel verminderd met de droogweerafvoer.
Samengestelde norm:	Combinatie van normgevende grootheden die als norm wordt gebruikt.
Snelle afvoer:	Afvoer rechtstreeks ten gevolge van neerslag.
Staartverloop:	Afvoer na een afvoertop als er geen neerslag meer is.
Stroomgebied:	Gebied dat bijdraagt tot de afvoer van een rivier.
Tijdconstante:	Het tijdsverloop waarover de waarde van een (zuivere) uitputtingsgrootheid is gereduceerd met een factor 1/e.
Toetsings norm:	Eis die wordt gebruikt ter toetsing van een ontwerp.
Transformatie:	Verschuiving en afvlakking in de tijd.
Translatie:	Verschuiving in de tijd.
Transpiratie:	Het vocht dat door de begroeiing aan de atmosfeer wordt afgestaan.
Wateraanvoer:	Het (kunstmatig) aanvoeren van water ten einde in droge perioden te voorkomen dat watertekorten optreden.
Waterconservering:	Het beperken of voorkomen van waterafvoer ten einde in droge perioden water tekorten te beperken of te voorkomen.

SYMBOLEN		Eenheden
A_t	= de in een tijdvak afgevoerde hoeveelheden water	$m^3.d^{-1}$
A	= natte oppervlakte	m^2
B	= breedte reservoir	m
B	= basisafvoerdichtheid	$m^3.s^{-1}.km^{-2}$
b	= breedte van de stuw	m
c	= hydraulische weerstand tegen vertikale stroming	d
C	= bergingscapaciteit	m^2
C	= coëfficiënt van De Chezy	$m^{\frac{1}{2}}.s^{-1}$
D	= dikte van de doorlatende laag	m
d	= diepte van de ondoorlatende basis onder drainniveau	m
E	= de per tijdvak verdampte hoeveelheid water	$m.s^{-1}$
F	= getal van de Froude	$m.s^{-2}$
F	= dat deel van de oppervlakte van het stroomgebied, dat de bijbehorende neerslag afvoert via het snelle systeem	
g	= versnelling van de zwaartekracht	$m.s^{-2}$
h	= overstort hoogte	m
h	= waterhoogte	m
h	= hoogte grondwaterstand boven de ontwateringsbasis	m
j	= reservoircoëfficiënt	d
k	= doorlaatfactor	m^{-1}
kD	= doorlaatvermogen	$m^2.s^{-1}$
k_M	= ruwheidsfactor van Manning	$m^{1/3}.s^{-1}$
L_M	= afstand tussen ontwateringsmiddelen	m
L	= lengte van een tak	m
l	= lengte van de duiker	m
m_o	= opbolling	m
N	= de per tijdvak gevallen hoeveelheid neerslag	m
P	= neerslagdichtheid	$m.d^{-1}$
Q	= afvoer, debiet	$m^3.s^{-1}$
q	= afvoerdichtheid	$m.d^{-1}$ of $m^3.s^{-1}.km^{-2}$
R_b	= de aanwezige watervoorraad	
R	= hydraulische straal	m
Re	= getal van Reynolds	
S	= verhang van de waterspiegel	m
T	= natte bovenbreedte	$m.s^{-1}$
t	= tijd	s
V	= gemiddelde snelheid	
V	= geborgen hoeveelheid afvoerbaar water	m^3
W	= weerstand	$d.m^{-2}$
W_{dr}	= drainage weerstand	$d.m^{-1}$
W_h	= horizontale weerstand	$d.m^{-1}$
W_{in}	= intree weerstand	$d.m^{-1}$
W_{rad}	= radiale weerstand	$d.m^{-1}$
$W^*=W_{kl}$	= horizontale weerstand, in het model Kraijenhoff van de Leur, van de neerslagstroming naar een drain of sloot	$d.m^{-1}$
$W^*=W_{hz}$	= de som van de radiale- en intreeweerstand	$d.m^{-1}$
z	= opstuwing	m
α	= som van de afwaterende onderdelen vermenigvuldigd met de betreffende afvoercoëfficiënten	
α	= reactiefactor	d^{-1}

		Eenheden
β	= reductiefactor	
Δh	= niveau verschil grondwaterstand en ontwateringspeil	m
$\Delta \Phi$	= peil van het water boven de uitstroomopening (m)	m
ξ_1	= hydraulische weerstandsfactor van een tak	
ξ_2	= hydraulische weerstandsfactor van kunstwerken	
ξ_i	= coëfficiënt voor het intreeverlies	
ξ_w	= coëfficiënt voor het wrijvingsverlies	
ξ_u	= coëfficiënt voor het uittreeverlies	
ξ_b	= coëfficiënt voor bochtverliezen	
μ	= bergingscoëfficiënt, of effectieve porositeit	
μ	= weerstandscoëfficiënt	
τ	= tijdconstante	d
γ	= kinematische viscositeit	d

RIOOLSTELSELS

Bij de riolering van een stedelijk gebied worden verschillende systemen toegepast. Van de meest gebruikte systemen worden hier alleen die facetten behandeld, die van belang zijn in verband met de regenwaterlozingen op het open water.

Bij een gescheiden rioolstelsel wordt een apart stelsel aangelegd voor de vuilwater c.q. droogweer afvoer (dwa) en een apart stelsel voor de regenwaterafvoer (rwa). Het dwa rioolstelsel loost via een zuiveringsinstallatie op een buiten het stedelijk gebied gelegen waterloop. Wat betreft het open water is hier alleen het rwa-rioolstelsel van belang. Het geeft praktisch een directe afvoer van de op het verhard oppervlak gevallen neerslag. De rwa-riolering heeft zelf, indien het niet geheel beneden het peil van het open water is gelegen een bepaalde berging tijdens afvoer, de dynamische berging die echter in het algemeen slechts een geringe afvlakking en een korte vertraging van de afvoer van de op het verhard oppervlak gevallen neerslag tot gevolg zal hebben.

Bij een gemengd rioolstelsel worden zowel de dwa als de rwa gezamenlijk door één systeem afgevoerd. Zolang de gezamenlijke afvoer beneden een bepaalde waarde blijft wordt deze afvoer door de riolering gevoerd naar een centraal punt, waar het via een gemaal naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie wordt gepompt. De capaciteit van een rioolgemaal wordt in het algemeen bepaald door de capaciteit voor afvoer van de dwa met daarbij een bepaalde (overcapaciteit)voor afvoer van rwa. Dit laatste gedeelte van de capaciteit van het rioolgemaal wordt (regen)pompovercapaciteit genoemd. Bij grote neerslag kan het rioolgemaal niet alles verwerken; een gedeelte wordt dan via overlaatdrempels direct geloosd op een waterloop en/of op het open water. Voordat het waterechtergaat overstorten zal het rioolstelsel eerst gevuld moeten zijn tot de hoogte van de overlaatdrempels (statische berging). De hoeveelheid welke beneden de overlaatdrempels wordt geborgen, komt niet op het open water maar wordt na de regenbui door het rioolgemaal naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie gepompt,welke in de regel loost op een waterloop in het landelijk gebied. Daarnaast wordt ook tijdens de afvoer over de overlaten een hoeveelheid water door het rioolgemaal uit het rioolstelsel gepompt. Het rioolgemaal moet echter ook de vuilwaterafvoer uit het rioolstelsel verwerken, zodat niet de totale rioolgemaalcapaciteit beschikbaar is om regenwater uit de riolering te pompen. Alleen de regenpompovercapaciteit mag in mindering worden gebracht op de neerslag-afvoer van het verhard oppervlak, naar het open water.

Bij het verbeterd gescheiden stelsel wordt bij geringe neerslag de dan relatief sterk door straatvuil vervuilde afvoer van de regenriolering al of niet via een gemaal naar het dwa rioolstelsel gevoerd. Eerst bij zwaardere neerslag zal de regenriolering het dan minder vervuilde regenwater rechtstreeks op het oppervlakte water lozen.

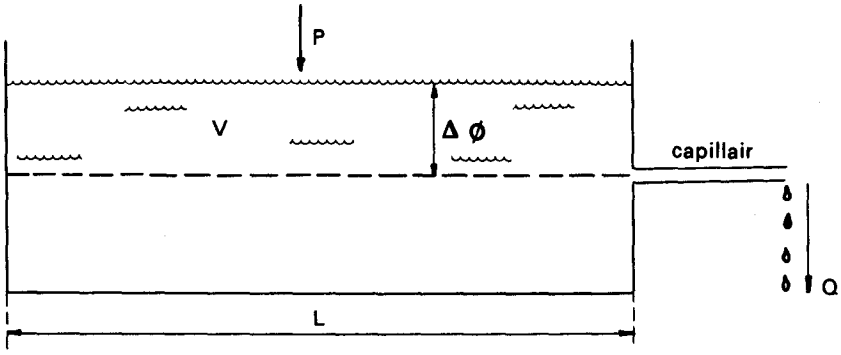
Bij een verbeterd gemengd stelsel wordt de overstortfrequentie beperkt door vergroting van de statische berging (eventueel door middel van bezinktanks) en de regenpompovercapaciteit.

THEORETISCHE BESCHOUWINGEN ONTWATERINGSMODELLEN

Het vat-model

Het eenvoudigst denkbare ontwateringsmodel is een vat met rechthoekige bodem (lengte L, breedte Br) en vertikale wanden. In één van de zijwanden in een horizontale capillair aangebracht, die als uitstroom-opening dient (figuur 4.1).

Figuur 4.1. Vat-model



In dat geval is op elk tijdstip de geborgen hoeveelheid afvoerbaar water V (m^3) gelijk aan:

$$V = Br.L.\Delta\Phi \qquad (1)$$

waarin $\Delta\Phi$ (m) het peil van het water boven de uitstroomopening is. Indien in de afvoerbuis de stroming laminair is, is de afvoer Q ($m^3.d^{-1}$) evenredig met $\Delta\Phi$ en dus ook met V.
Wij definiëren bij dit systeem:

- de weerstand: $W = \Delta\Phi/Q$ ($d.m^{-2}$) (2)
- de bergingscapaciteit: $C = V/\Delta\Phi$ (m^2) (3)
- de karakteristieke tijd: $\tau = C.W$ (d) (4)

Met behulp van (1) is (3) te schrijven als:

$$C = Br.L \qquad (5)$$

terwijl met behulp van (1), (2) en (3) uit (4) volgt, dat de karakteristieke tijd ook geschreven kan worden als:

$$\tau = V/Q \qquad (6)$$

Is het vat gevuld met grind of zeer grof zand, waardoor slechts een fractie van het totale volume voor berging beschikbaar is, dan geldt (algemeen) voor de geborgen voorraad afvoerbaar water:

$$V = \mu.Br.L.\Delta\Phi \qquad (7)$$

en voor de bergingscapaciteit:

$$C = \mu\ Br.L \qquad (8)$$

De oorspronkelijke definities (2 t/m 4) blijven dezelfde.
Een voorwaarde daarbij is, dat de weerstand tegen uitstroming (vrijwel) volledig door de capillaire afvoerbuis wordt veroorzaakt. De grond in het vat dient dus zeer doorlatend te zijn, zodat de grondwaterspiegel steeds een (nagenoeg)horizontale positie blijft innemen. Opgemerkt moet worden, dat volgens (3) altijd geldt, dat:

$$V = C.\ \Delta\ \Phi$$

Als dit systeem tot op een tijdstip t = o in rust was ($\Delta\Phi$ = 0; V = o) terwijl op dit tijdstip plotseling een constante neerslag met een dichtheid P ($m.d^{-1}$) begint te vallen, dan geldt voor de afvoerdichtheid q (m.d-1):

$$q = \frac{Q}{Br.L} = p\ (1 - e^{-t/\tau}) \qquad (9)$$

Waaruit met behulp van (2) voor het peil $\Delta\Phi$ (m) van het water (frequentische vlak) boven de uitstroomopening volgt, dat:

$$\Delta\Phi = W\ Q = W.\ Br.L.P.(1 - e^{-t/\tau}) \qquad (10)$$

waarin q =	afvoerdichtheid	$m.d^{-1}$
Q =	afvoer	$m^3.d^{-1}$
Br=	breedte reservoir	m
L =	lengte reservoir	m
$\Delta\Phi$=	hoogte freatisch vlak	m
P =	neerslagdichtheid	$m.d^{-1}$
t =	tijd	d
τ =	karakteristieke tijd	d

Vaak wordt $1/\tau$ geschreven als de "reactie-factor" α (d^{-1})

Het model De Zeeuw - Hellinga

Het in figuur 4.1 weergegeven model is door De Zeeuw - Hellinga gebruikt als grondslag voor de analyse van afvoerprocessen in Nederlandse stroomgebieden. (De Zeeuw en Hellinga, 1958). Aanvankelijk werd uitsluitend gedacht aan gebieden waar deze afvoer door de grond plaatsvindt; later bleek het model ook bij bovengrondse afvoer bruikbaar te zijn. Wij zullen ons in deze bijlage echter beperken tot stromingen die via de grond de open waterlopen bereiken. Bij afvoer door de grond treedt tussen de ontwateringsmiddelen (sloten of drains) een opbolling op. Dit leidt ertoe, dat in het stroomgebied de hoogte $\Delta\Phi$ boven de ontwateringsbasis niet overal dezelfde is. Meet men $\Delta\Phi$ op het punt, waar de opbolling het grootst is (bijvoorbeeld in vlak terrein midden tussen de sloten of drains) dan moet een reductiefactor β worden ingevoerd. De afvoerbare voorraad grondwater wordt dan:

$$V = \beta.\mu.\ Br.L.\ \Delta\Phi \qquad (11)$$

De factor β bedraagt theoretisch $2/\Pi$ voor een sinusvormig (le helft) verloop, 2/3 voor een parabolisch verloop en $\Pi/4$ voor een elliptisch verloop van het freatisch vlak tussen twee evenwijdige sloten of drains. Het invoeren van deze factor is eigenlijk in tegenspraak met de uitgangspunten van het model. Immers, dit veronderstelt dat de weerstand is geconcentreerd bij het afvoerpunt, terwijl anderszijds de "opbolling" tot stand komt door weerstanden, die optreden tussen de afvoersystemen in. De overeenkomst is het beste, wanneer de weerstanden sterk zijn geconcentreerd nabij de ontwateringsmiddelen dat wil zeggen indien de radiale- en intreeweerstanden sterk domineren. In dat geval verloopt het vlak nagenoeg horizontaal en is dus:

$$\beta \simeq 1 \qquad (12)$$

Dan geldt volgens het voorgaande, dat:

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{\mu.Br.L.\Delta\Phi}{\Delta\Phi \;/W} = \mu.Br.L.W \qquad (13a)$$

of wat op hetzelfde neerkomt:

$$\tau = C.W = \mu.Br.L.W \qquad (13b)$$

Bij evenwijdige ontwateringsmiddelen is het gebruikelijk de weerstand te betrekken op een strekkende meter lengte van de sloten of drains.
Indien deze lengte met Br overeenkomt en de afstand tussen de sloten of drains met L, geldt dat:

$$W_* = Br.W \qquad (d.m^{-1}) \qquad (14)$$

zodat:

$$\tau = \mu.L.W \qquad (15)$$

waarbij in De Zeeuw - Hellinga (hz) W_* gelijk is aan de som (W_{hz}) van de radiale- en intreeweerstand:

$$W_* = W_{hz} = W_{rad} + W_{intree} \qquad (16)$$

Tevens geldt voor de afvoer:

$$Q_* = Q/Br \qquad (17)$$

en voor de hoeveelheid geborgen afvoerbaar water:

$$V_* = V/Br = \mu.L.\ \Delta\Phi \qquad (18)$$

Om het formalisme te handhaven wordt de bergingscapaciteit als volgt gedefinieerd:

$$C_* = C/Br = \mu.L \qquad (19)$$

De relaties, geformuleerd in (2), (3) en (4), worden hiermee:

$$W_* = \Delta\phi / Q_* \qquad (20)$$

$$C_* = V_* / \Delta\phi \qquad (21)$$

$$\tau = C.W = C_* \cdot W_* \qquad (22)$$

Uit 22 blijkt, dat de karakteristieke tijd τ ongevoelig is voor die dimensie, die niet essentieel is voor de beschrijving van de stroming.

In bovenstaande tweedimensionale stroming van neerslag naar een serie evenwijdige drainsof sloten heeft de lengte Br van de drains of sloten dus geen invloed op de grootte van τ en derhalve ook niet op de grootte van de reciprokewaarde van τ, aangeduid met α in het model De Zeeuw - Hellinga. Als verband tussen α en τ geldt, dat

$$\alpha = \frac{1,032}{\tau}$$

Zonder verder op de methode van toepassen in te gaan, gelden in principe voor de afvoerdichtheid $q\ (m \cdot d^{-1})$ en de opbolling m_o (m) de volgende formules:

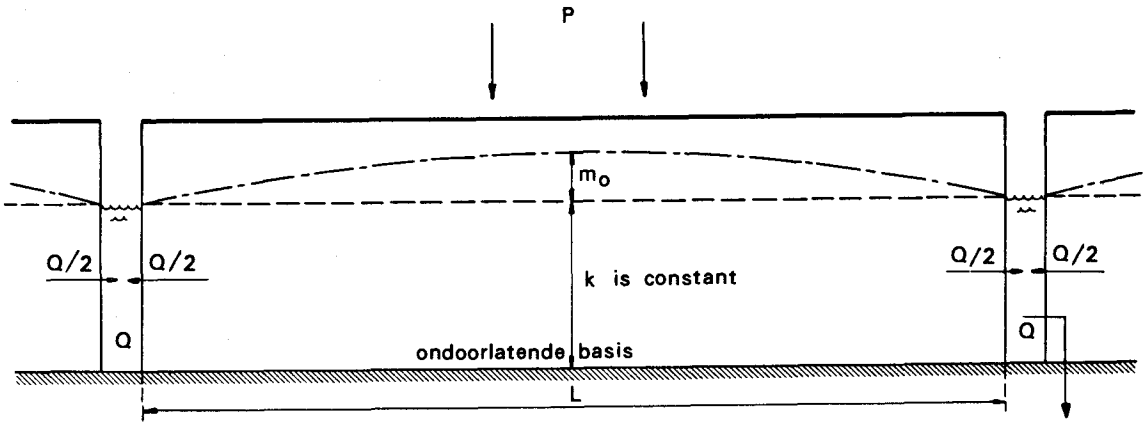
$$q = P\ (1 - e^{-\alpha t}) \qquad (23)$$

$$m_o = P.\ W_{hz}\ (1 - e^{\alpha t}) \qquad (24)$$

Het model Kraijenhoff van de Leur

Heeft men een kavel, begrensd door vers gegraven sloten, die tot op een ondoorlatende laag reiken (figuur 4.2) dan zijn de radiale en intreeweerstanden te verwaarlozen.

Figuur 4.2. Model Kraaijenhoff van de Leur



Is bovendien de opbolling tussen de sloten klein ten opzichte van de dikte D (m) van de doorlatende laag, dan gedraagt deze kavel zich als een lineair systeem. Het beginsel van superpositie is dan toepasbaar.

Door Kraijenhoff van de Leur zijn voor dit systeem oplossingen geformuleerd voor de reactie van een constante neerslagdichtheid P ($m.d^{-1}$), beginnend op tijdstip t = o. Door toepassing van het beginsel van superpositie kan daaruit de reactie op elke gegeven neerslagvolgorde worden afgeleid.
Voor de afvoerdichtheid q ($m.d^{-1}$) en de opbolling m_o (m) midden tussen de sloten geldt dat:

$$q = P \sum_{n=1}^{\infty} a_n \left(1 - e^{-t/j_n}\right) \qquad (25)$$

$$m_o = P.L.W_{kl} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left(1 - e^{-t/j_n}\right) \qquad (26)$$

waarin:

$$a_n = \frac{8}{\Pi^2} \cdot \frac{1}{(2n-1)^2} \qquad (27)$$

$$b_n = \frac{32}{\Pi^3} \cdot \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^3} \qquad (28)$$

$$j_n = \frac{1}{(2n-1)^2} \cdot j \qquad (29)$$

terwijl:

voor de reservoir-coefficiënt j geldt: (30)

$$j = \frac{\mu.L^2}{\Pi^2.kD} = \frac{8}{\Pi^2} \cdot \mu.L \cdot \frac{L}{8.kD} = C_{kl} \cdot W_{kl}$$

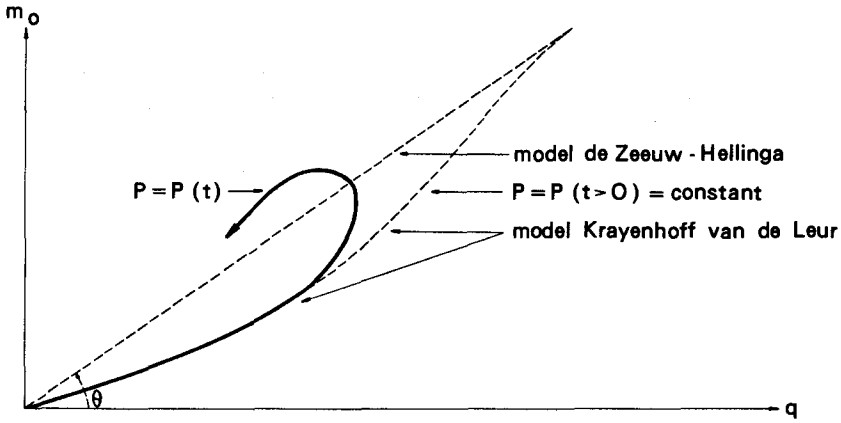
waarin bij Kraijenhoff van de Leur (kl) de weerstand W_* gelijk is aan de horizontale weerstand (W_{kl}) van de neerslagstroming naar een drain of sloot:

$$W_x = W_{kl} = \frac{L}{8.kD} \qquad (31)$$

en voor β: $\beta = \frac{8}{x^2}$ (32)

Omdat j dezelfde funtie heeft als de tijdconstante τ van het vat-model, kan j dus eveneens als de "karakteristieke tijd" worden opgevat. Uit het vergelijken van (25) en (26) met de overeenkomstige formuleringen (9) en (10) van het vat-model volgt, dat het model van Kraijenhoff van de Leur is samengesteld uit een som van vat-modellen met, volgens (29), verschillende tijdconstanten. Er bestaat nu geen éénduidig verband meer tussen q en m_o, maar in deze relatie treden lussen op (figuur 4.3)

Figuur 4.3. Reactie van beide modellen op een regenperiode



Indien de regen met dezelfde intensiteit blijft aanhouden is door deling van (25) op (26) af te leiden dat:

$$tg\theta = \frac{P.L.W_{kl} \sum_{n=1}^{\infty} b_n}{P. \sum_{n=1}^{\infty} a_n} = L.W_{kl} \qquad (33)$$

Bij het begin van een neerslagperiode is de afvoerdichtheid q relatief groot, de opbolling m_o (en dus ook de afvoerbare voorraad V) nog betrekkelijk klein, terwijl na afloop van de regen het omgekeerde het geval is. Voor een stroomgebied zal het model Kraijenhoff van de Leur het beste voldoen indien de radiale- en intreeweerstanden van de ontwateringsmiddelen gering zijn in vergelijking met de horizontale weerstand van een neerslagstroming naar een sloot of drain.

Het model voor tussenliggende gevallen (Van de Molen)

Voor gevallen waarin zowel de kD-waarde van de doorlatende laag als de radiale- en intreeweerstanden van betekenis zijn, kunnen langs analytische weg, weliswaar zeer gecompliceerde, uitdrukkingen worden verkregen. Voor bijvoorbeeld q en m geldt dat:

$$q = P . \sum_{n=1}^{\infty} A_n .(1 - e^{-t/\tau n}) \qquad (34)$$

$$m_o = PL.W_{kl} \sum_{n=1}^{\infty} B_n.(1 - e^{-t/\tau_n}) \qquad (35)$$

waarin:

$$A_n = 2 . \frac{\sin^2\beta_n}{\beta_n.(\beta_n + \sin\beta_n .\cos\beta_n)} \qquad (36)$$

$$B_n = 4 . \frac{\sin\beta_n}{\beta_n.(\beta_n + \sin\beta_n .\cos\beta_n)} \qquad (37)$$

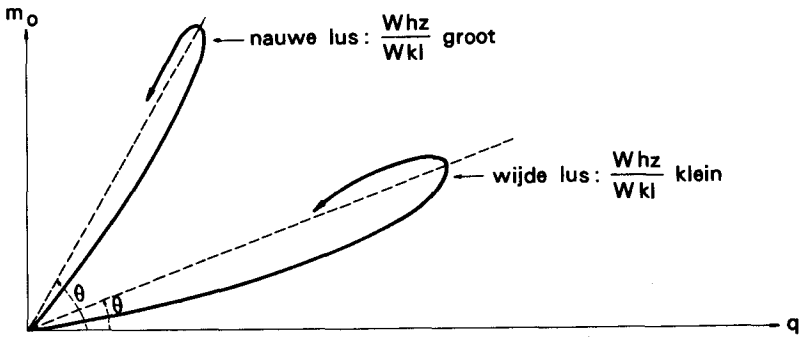
$$\tau_n = (\frac{\pi}{2\beta_n})^2 .j \qquad (38)$$

waarin β_n de n^{de} positieve wortel is van de vergelijking:

$$\beta . tg\beta = 2 . \frac{W_{kl}}{W_{hz}} \qquad (39)$$

Bij voorkeur gebruikt men in deze gevallen analoge of numerieke modellen. De laatste vergen minder computertijd dan de berekening van q en m_o met behulp van de formules (34) t/m (39). Als uitkomst blijkt dat de eerder beschreven "lussen" in de relatie tussen q en m_o bij toenemende radiale- en intreeweerstanden smaller worden en tenslotte overgaan in het éénduidige verband van het vat-model (figuur 4.4).

Figuur 4.4. Invloed van de verhouding $\frac{Whz}{Wkl}$ op de ligging en breedte van de lussen



Indien ook hierbij wordt verondersteld dat de regen met dezelfde intensiteit blijft aanhouden, is door deling van (34) op (35) af te leiden, dat:

$$tg\theta = L.W_{kl} . \frac{\sum_{n=1}^{\infty} B_n (\beta_n)}{\sum_{n=1}^{\infty} A_n (\beta_n)} = L.W_{kl} . (1 + \frac{W_{hz}}{W_{kl}}) \qquad (40)$$

Uit het vergelijken van de formules (34) en (35) met resp. (9) en (10) blijkt, dat de eerste twee genoemde formules zijn verkregen door het superponeren van (9) resp. (10).

Het cascade model van Nash

Een aantal afvoerprocessen kan niet uitsluitend uit een superpositie van ontwateringssystemen worden verklaard, maar wel door een reeks van n achter elkaar geschakelde identieke vat-modellen (cascade van Nash). Evenals het Kraijenhoff van de Leur-model verschilt de wijze van reageren van het Nash-model van die van het vat-model.

De reactie van het vat-model op een plotselinge invoer (stortregen van zeer korte duur) verloopt volgens een exponentiële functie, waarvan het maximum onmiddelijk na deze regen optreedt. In vele stroomgebieden geeft deze invoer een eenheids-afvoergolf, die eerst na enige tijd een maximum bereikt. Een dergelijk verloop kan zeer goed door een cascade worden verklaard waarvan de mathematische formulering als volgt is:

$$q(t) = \frac{P}{(n-1)!} \cdot \int_{o}^{t/\tau} e^{-x} \cdot x^{n-1} \cdot dx \qquad (41)$$

Daar in een cascade schakeling geen eenduidig niveau is gedefinieerd, ontbreekt een formulering voor m_o.
Door invoering van de gammafunctie in de cascade formules is een wiskundige uitbreiding van het model ook mogelijk voor niet gehele waarden van n.

VOORBEELD VAN DE BEPALING VAN DE MAATGEVENDE AFVOERDICHTHEID VAN EEN HELLEND GEBIED MET BEHULP VAN DE METHODE DE JAGER

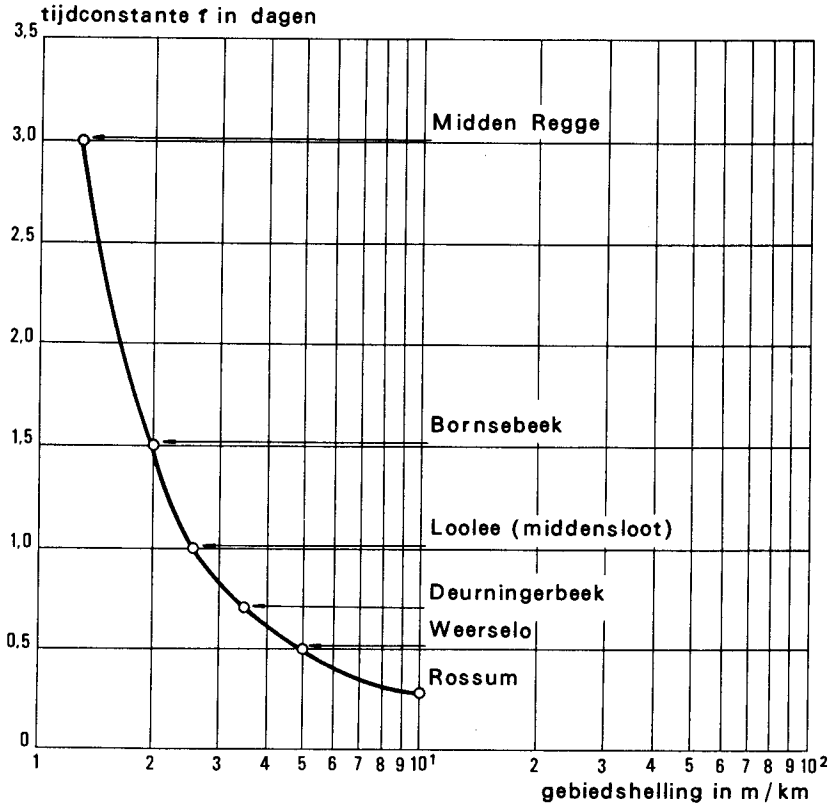
Als voorbeeld voor het gebruik van de methode De Jager is gekozen voor het stroomgebied van de Voorste Beek, gelegen in de gemeente Laren (Gld.), ten noorden van het Twentekanaal. Geologisch behoort het stroomgebied van de Voorste Beek tot het dekzandlandschap. In dit dekzand zijn dalen uitgeschuurd waardoor het gebied min of meer golvend is en er op korte afstand meer of minder grote hoogteverschillen voorkomen. In de erosiedalen heeft op vrij grote schaal veenafzetting plaatsgevonden. In het dekzand zijn te onderscheiden:
- humuspodzoden;
- eerdgronden;
- vaaggronden.

In het in deze bijlage doorgevoerde rekenvoorbeeld zijn de oppervlakten van de verschillende onderdelen van het stroomgebied van de Voorste Beek gemakshalve aangepast. In het onderstaande wordt het daardoor min of meer gefingeerde stroomgebied echter wel aangeduid als "Voorste Beek".

De grootte van de tijdconstante zou in principe moeten kunnen worden bepaald uit:
- de gemiddelde slootafstand L (opp. stroomgebied gedeeld door lengtesloten);
- het gemiddelde doorlaatvermogen kD;
- de gemiddelde bergingscoëfficiënt α die, op grond van de formule van Stiboka (Van Heesen e a., 1973), mede bepaald wordt door
- de gemiddelde diepte van de ontwateringsbasis;

Het is echter niet mogelijk gebleken deze afhankelijkheid in de praktijk te verifiëren, daar de in de praktijk optredende ontwateringsmogelijkheden niet gedefinieerd zijn. Uit metingen in verschillende stroomgebieden is wel een relatie gevonden tussen de maaiveldshelling en de tijdconstante van het snelle ontwateringssysteem (figuur 5.1), waarvoor de verklaring vooralsnog ontbreekt.

Figuur 5.1. Relatie tussen tijdconstante en gebiedshelling.



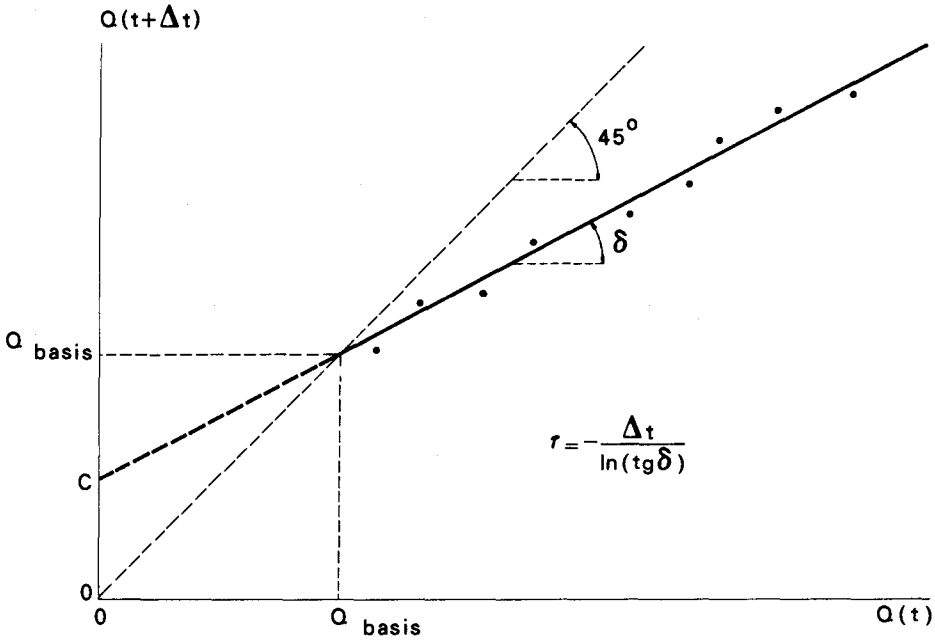
Berekeningsmethode ter bepaling van de parameters van de afvoerkarakteristiek uit afvoergolven.

Als basismateriaal voor de berekening van de parameters moet kunnen worden beschikt over:
- een aantal (winter)afvoergolven uit het stroomgebied;
- de bij deze afvoergolven horende neerslagen;
- de grootte van het stroomgebied.

De verwerkingsprocedure verloopt als volgt:

Het staartverloop (het traject zonder neerslag) na iedere afvoergolf wordt in gelijke tijdintervallen Δt verdeeld. Van ieder staartverloop wordt voor opklimmende waarden van de tijd t de afvoer op tijdstip $t + \Delta t$ uitgezet tegen de afvoer op tijdstip t. Door de van uitschieters ontdane band van punten, afkomstig van één staart-verloop, wordt met een regressiemethode (organische) een rechte bepaald (zie figuur 5.2).

Figuur 5.2. Bepaling van de tijdconstante τ uit een staartverloop van een gemeten afvoercurve



De rechte (dik getrokken lijn) voldoet aan de vergelijking van een eersteorde systeem waarin de aanvankelijk tijdafhankelijke invoer constant is, namelijk:

$$Q(t+\Delta t) = Q(t).\ e^{-\Delta t/\tau} + c$$

Uit de hellingshoek δ van deze rechte volgt, dat:

$$\tau = -\frac{\Delta t}{\ln(tg\,\delta)}$$

Terzijde moet worden opgemerkt, dat ook bij ieder staartverloop een basisafvoer kan worden bepaald door in dezelfde grafiek een rechte onder een hoek van 45° te tekenen. Het snijpunt van beide rechten geeft aan, dat:

$$Q(t+\Delta t) = Q(t)$$

Dit is in het onderhavige geval alleen mogelijk indien:

$$t = \infty$$

ofwel $\qquad Q(\infty) = Q_{basis}$

Voor de bepaling van de parameters van de afvoerkarakteristiek is de uit een staartverloop berekende basisafvoer niet relevant.

Uit ieder staartverloop wordt op boven omschreven wijze een τ-waarde berekend. Met behulp van de grootste en kleinste waarde wordt een range van

τ -waarden samengesteld. Met deze τ-waarden worden met het model van Kraaijenhoff van de Leur de neerslagen uit de betreffende afvoerperiode en een daaraan voorafgaande periode ter lengte van ca. vier maal de betreffende waarde van τ, getransformeerd. De bij een τ-waarde verkregen reeks van waarden wordt, vanaf het tijdstip waarop ook de afvoerreeks begon, in het vervolg genoemd de "getransformeerde neerslagreeks" en aangeduid met N_T. De eenheid waarin de getallen van deze reeks zijn uitgedrukt komt overeen met die van een neerslagdichtheid. Uit de grootste correlatiecoëfficiënt, verkregen door het correleren van de al dan niet over een tijdvak ΔT (=n. Δt) verschoven getransformeerde neerslagreeksen $N_t(t+\Delta T;\delta)$ met de afvoerreeks Q(t), volgen de optimale τ-waarde en de optimale ΔT-waarde, respectievelijk aangeduid met τ_o en ΔT_o.
Met behulp van een regressieberekening worden voor deze optimale waarden het intercept a en de regressiecoëfficiënt (richtingscoëfficiënt) m van de volgende relatie bepaald:

$$Q(t) = a + m.N_T(t+\Delta T_o;\tau_o)$$

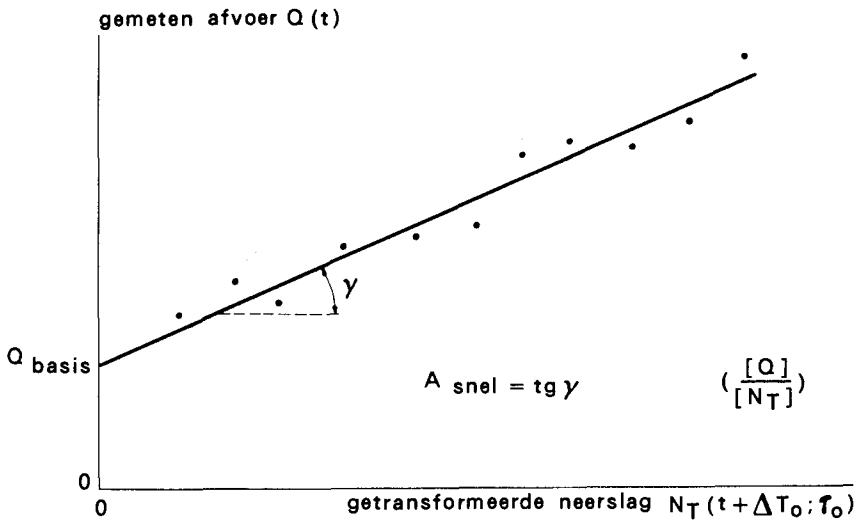
waarin:

$$a = Q_{basis}$$

$$m = A_{snel}$$

Een meetkundige voorstelling van bovengenoemde relatie is in figuur 5.3 weergegeven.

Figuur 5.3. Bepaling van Q_{basis} en A_{snel} uit Q(t) en $N_T(t+\Delta T_o;\tau_o)$



Met behulp van de opgegeven grootte van het stroomgebied volgt uit A_{snel} het percentage F (eerste parameter) en uit de basisafvoer Q_{basis} de basisafvoerdichtheid B (derde parameter). De tweede in de afvoerkarakteristiek voorkomende parameter τ komt overeen met de reeds eerder gevonden optimale waarde τ_o. Hiermee zijn in de afvoerkarakteristiek voorkomende parameters dus bepaald.

Opmerkingen:
- voor de berekening van de maatgevende afvoer wordt de basisafvoer verondersteld afkomstig te zijn uit dat deel van het stroomgebied dat behoort tot de middelhoge en hoge gronden (GT VI^b en GT VII). Daarom moet voor het bepalen van de maatgevende afvoer uit dat deel van het gebied de basisafvoerdichtheid B vermenigvuldigd worden met factor $\frac{100}{100-F}$
- De in een bepaald jaar voor een stroomgebied uit metingen berekende reductiefactor F behoeft niet overeen te komen met de maximale waarde van F. Demaximale waarde volgt namelijk uit de kenmerken van het stroomgebied.

Bepaling afvoerkarakteristiek voor het stroomgebied van de "Voorste Beek"

Beschikbare gegevens:

a. Registraties van de neerslag in het gebied en van de beekpeilen op de twee meetpunten M1 en M2, gedurende de winter 1965-1966.
b. Het Q-H verband
c. De grootte van het totale stroomgebied, zijnde 100 km^2

Afvoerkarakteristieken:

Uitgaande van het van uitschieters ontdane verband tussen punten van een staartverloop, waarvan in figuur 5.4 een voorbeeld is gegeven, is een range van τ-waarden bepaald. Hieruit zijn, op grond van de grootste correlatiecoëfficient tussen een getransformeerde neerslagreeks en de gemeten afvoerreeks, de optimale waarden van de tijdconstante τ en de translatietijd ΔT berekend. Daar de correlatiecoëfficiënt slechts informatie geeft over de dynamische gelijkvormigheid van twee reeksen, is voor het vaststellen van de basisafvoerdichtheid B en de oppervlakte A_{snel} van het snel reagerende gebied bovendien een regressieberekening uitgevoerd. De visuele voorstelling hiervan is in figuur 5-5 gegeven. Voor de meetpunten M1 en M2 werden aldus de volgende afvoerkarakteristieken gevonden:

mpt. M1 (42 $\pm$ 2)% : (1,1 $\pm$ 0,1) dag en (1,6 $\pm$ 0,1).10^{-2} $m^3.s^{-1}.km^{-2}$
mpt. M2 (57,5 $\pm$ 5,5)% (1,4 $\pm$ 0,25) dag en (1,2 $\pm$ 0,35).$10^{-2} m^3.s^{-1}.km^{-2}$

Uit de correlatieberekeningen is gebleken, dat er voor het onderhavige stroomgebied geen translatie (ΔT) in rekening gebracht hoeft te worden. In de figuren 5.6 en 5.7 is voor beide meetpunten het gemeten afvoerverloop en het met bovengenoemde afvoerkarakteristieken gereconstrueerde afvoerverloop weergegeven. Gemakshalve is de band om een gereconstrueerd verloop als gevolg van de onnauwkeurigheden in de parameters niet aangegeven.

Bepaling maatgevende afvoer:

Beschikbare gegevens:
a. De in 5.3. bepaalde afvoerkarakteristieken;
b. De indeling van het stroomgebied naar grondwatertrappen:

GT klasse	GHG in cm - mv	Bovenstroomse oppervlakte in km² mpt. M1		mpt. M2		Systeem
I, II	< 20	4		14		
III, V	< 40	6	20	26	70	Snel
IV, VIa	40-60	10		30		
VIb	60-80	2	20	6	30	Langzaam
VII	> 80	18		24		

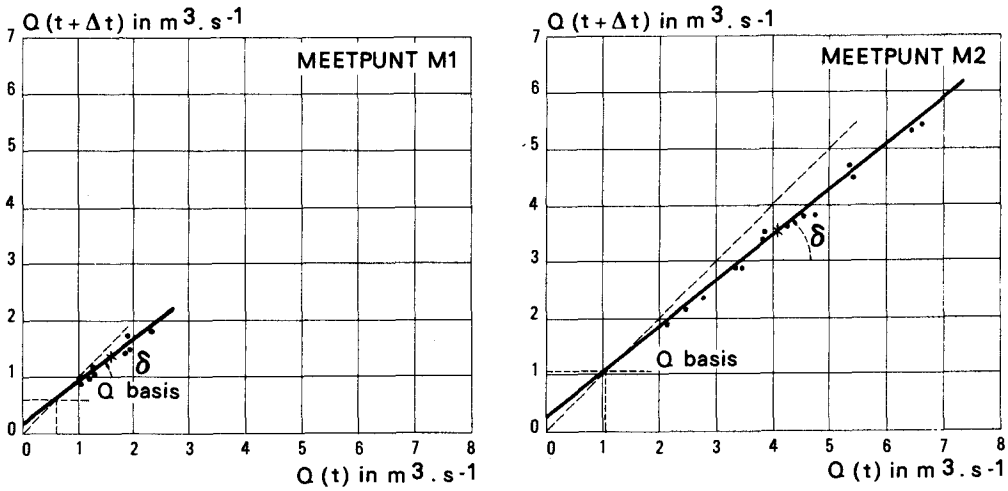
$$Q\ (t+\Delta^t)=Q(t).e - \frac{\Delta t}{\tau} + B.(1-e^{-\frac{\Delta t}{\tau}})$$

$$e - \frac{\Delta t}{\tau} = tg\delta$$

Δt = 1/3 dag
tg δ = 0.76
τ = 1.21 dag

Δt = 1/3 dag
tg δ = 0,81
τ = 1,58 dag

Figuur 5.4. Bepaling van tijdconstanten (τ-waarde) uit staartverlopen.



Figuur 5.5. Bepaling percentage snel reagerend gebied en basisafvoer

$Q(t)=A\ snel.N_T(t) + B$

$A\ snel=tg\gamma \quad \frac{m^3.s^{-1}}{mm.d^{-1}}$

$tg\gamma= \frac{4,52-0,64}{20} =0.194 \frac{m^3.s^{-1}}{mm.d^{-1}}$

$A\ snel=0.194. \frac{86400.10^{-9}}{10^{-6}} km^2$

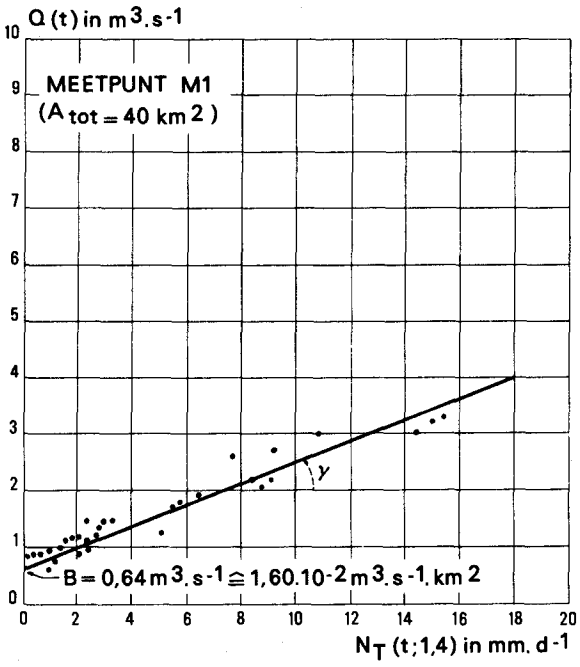
$F = \frac{16,8x100}{40} =42\%$

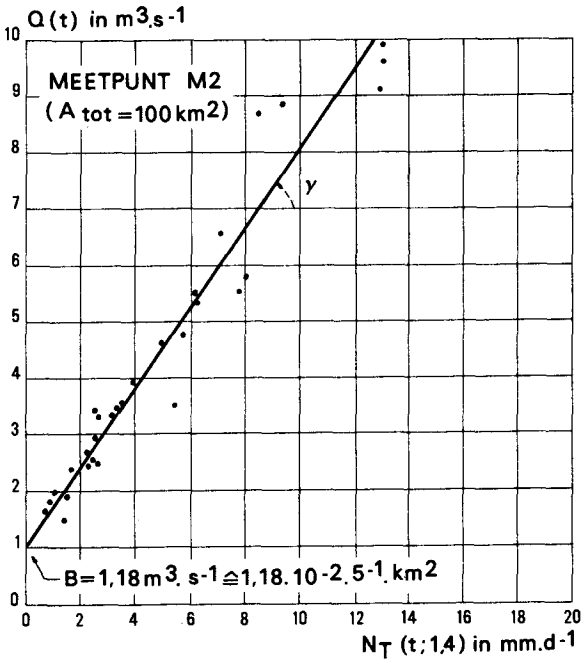
$tg\gamma= \frac{7.84-1.18}{10} =0.666 \frac{m^3.s^{-1}}{mm.d^{-1}}$

$A\ snel=0.666. \frac{86400.10^{-9}}{10^{-6}} km^2$

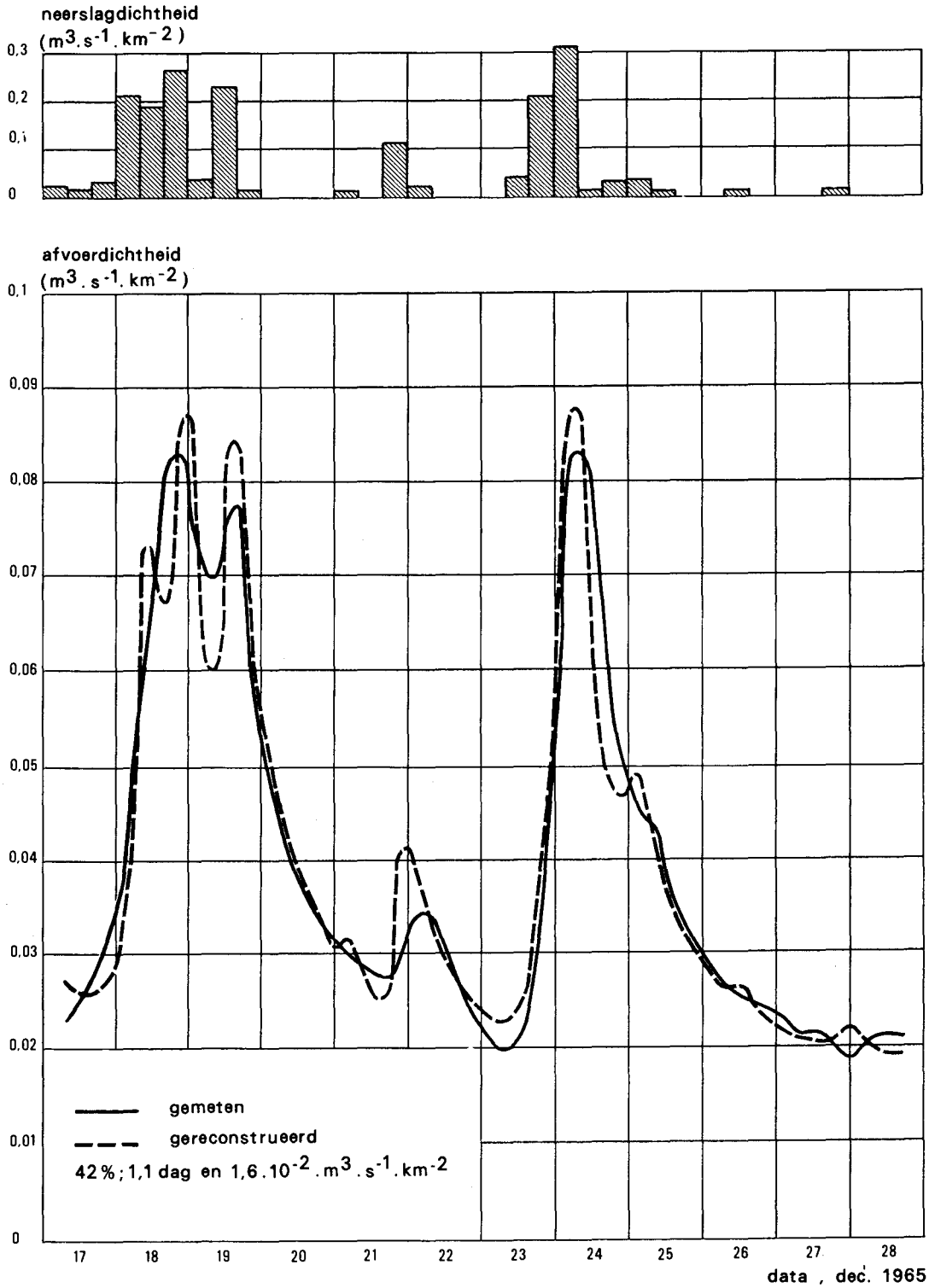
$A\ snel=57.5\ km^2$

$F= \frac{57,5x100}{100} =57,5\%$

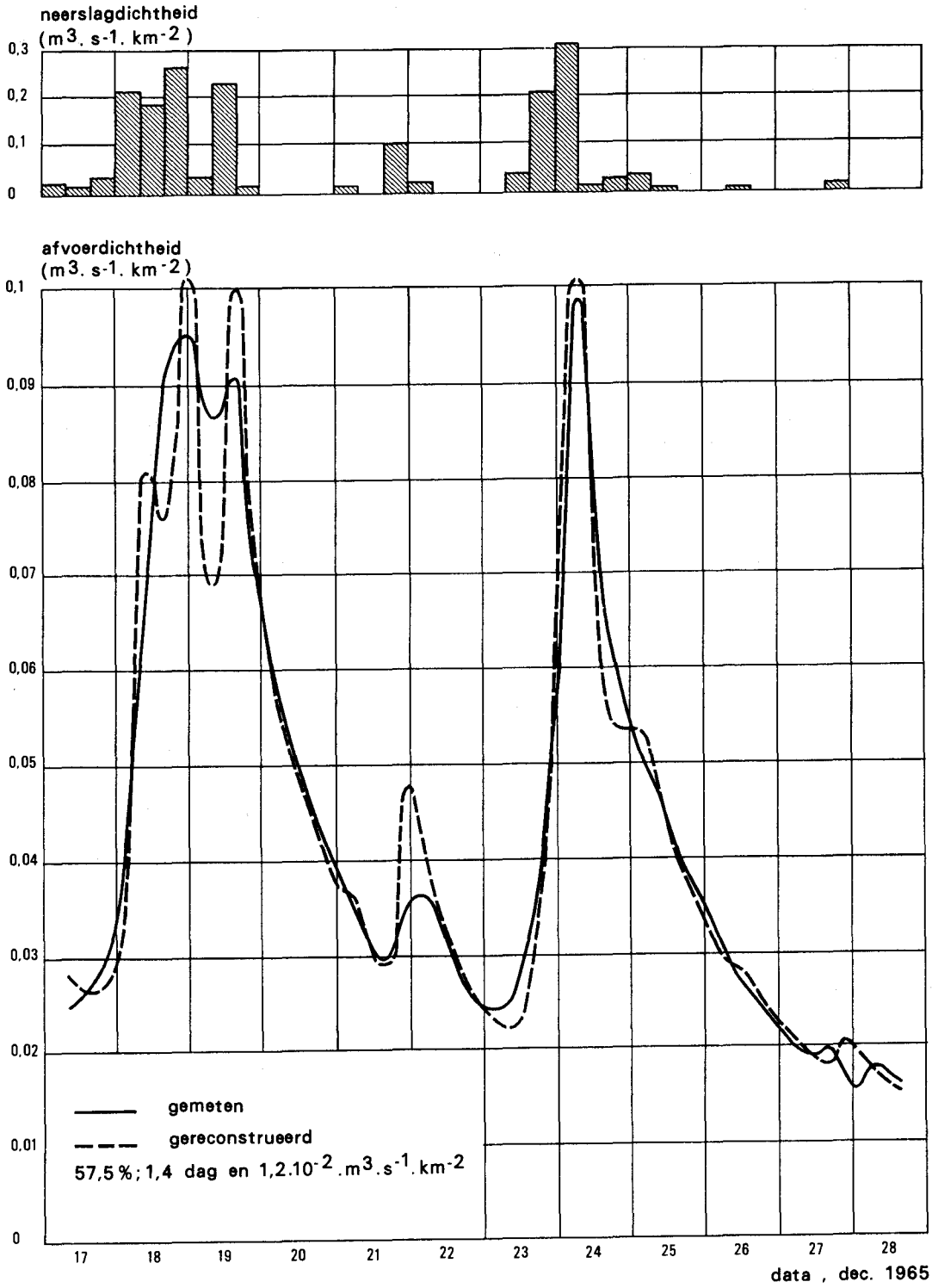




Figuur 5.6. Afvoerverloop bij meetpunt M1



Figuur 5.7. Afvoerverloop bij meetpunt M2



Uit de indeling naar grondwatertrappen volgt dat de percentages voor het snelle systeem 50 en 70 moeten zijn voor respectievelijk de meetpunten M_1 en M_2. Tevens zijn de tijdconstanten binnen de onnauwkeurigheidsgrenzen zodanig afgerond dat deze aansluiten op de tijdconstanten in het frequentiediagram van De Jager. Voor de bepaling van de maatgevende afvoer wordt de afvoerkarakteristiek derhalve gewijzigd in:

mpt.M_1 :A=50%, τ =1 dag en B=$1,6.10^{-2}$ $m^3.s^{-1}.km^{-2}$

mpt.M_2 :A=70%, τ = 1,5 dag en B=$1,2.10^{-2}$ $m^3.s^{-1}.km^{-2}$

Uit het frequentiediagram van De Jager is af te lezen dat de maatgevende afvoerdichtheid van het snelle systeem met tijdconstanten van resp. 1 en 1,5 dag als volgt is:

frequentie: (dagen per jaar)	afvoerdichtheid ($m^3.s^{-1}.km^{-2}$) mpt. M_1 (τ=1,0 dag)	mpt. M_2 (τ=1,5 dag)
1/10	$34,5.10^{-2}$	$29,0.10^{-2}$
1	$19,0.10^{-2}$	$17,0.10^{-2}$
5	$12,0.10^{-2}$	$10,5.10^{-2}$

Afhankelijk van de te kiezen frequentie is de maatgevende afvoer nu als volgt te berekenen:

mpt.M_1 (oppervlakte 40 km^2; 50% reageert snel)

1/10 dag per jaar: $0,5 \times 40 \times 34,5.10^{-2} + 40 \times 1,6.10^{-2} = 7,54\ m^3.s^{-1}$

1 dag per jaar: $0,5 \times 40 \times 19,0.10^{-2} + 40 \times 1,6.10^{-2} = 4,44\ m^3.s^{-1}$

5 dagen per jaar: $0,5 \times 40 \times 12,0.10^{-2} + 40 \times 1,6.10^{-2} = 3,04\ m^3.s^{-1}$

mpt. M_2 (oppervlakte 100 km^2; 70% reageert snel)

1/10 dag per jaar: $0,7 \times 100 \times 29,0.10^{-2} + 100 \times 1,2.10^{-2} = 21,50\ m^3.\ s^{-1}$.

1 dag per jaar: $0,7 \times 100 \times 17,0.10^{-2} + 100 \times 1,0.10^{-2} = 13,10\ m^3.s^{-1}$

5 dagen per jaar: $0,7 \times 100 \times 10,5.10^{-2} + 100 \times 1,2.10^{-2} = 8,25\ m^3.\ s^{-1}$

Besloten werd om voor het waterbeheersingsplan uit te gaan van de afvoer die 1 dag per jaar wordt bereikt of overschreden. De maatgevende afvoer is dan als volgt:

mpt. M_1 : $4,44\ m^3.s^{-1}$

mpt. M_2 : $13,10\ m^3.s^{-1}$

Voor het dimensioneren van de leidingvakken worden de maatgevende afvoeren berekend uit de afvoerdichtheden van het snelle en langzame systeem. Aan de hand van figuur 5.8, waarop een viertal plaatsen is aangegeven waarin de maatgevende afvoer berekend moet worden, gaat dit als volgt:

De basisafvoerdichtheid betrokken op het gebied met langzame afvoer bovenstrooms-van mpt. M_1 bedraagt:

$\frac{100}{50} \times 1,6.10^{-2} = 3,2.10^{-2}\ m^3.s^{-1}.km^{-2}$

De oppervlakte langzaam-gebied tussen mpt. M_1 en M_2 zijnde 10 km^2 (30% van 100 km^2 - 50% van 40 km^2) heeft een basisafvoer van:

$100 \times 1,2.10^{-2} - 40 \times 1,6.10^{-2} = 0,56\ m^3.s^{-1}$, hetgeen overeenkomt met een basisafvoerdichtheid van: $5,6.10^{-2}\ m^3.s^{-1}.km^{-2}$

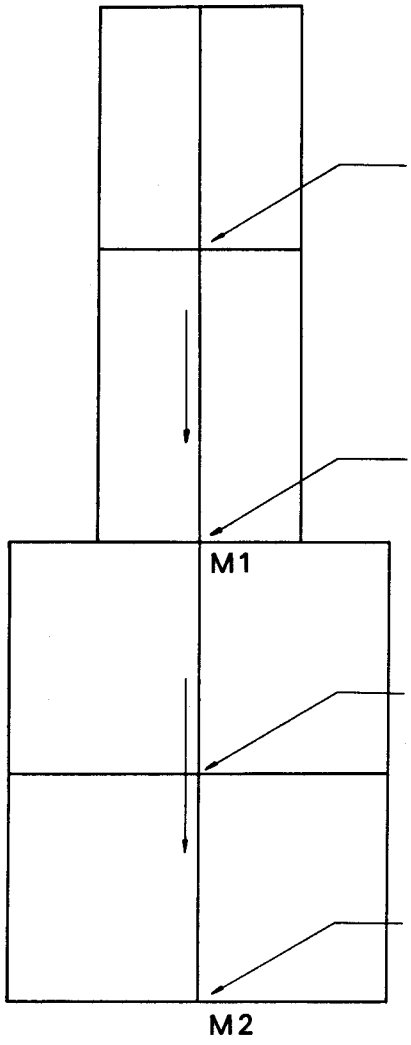
De oppervlakte snel-gebied tussen mpt. M_1 en M_2 zijnde 50 km^2 (70% van 100 km^2 - 50% van 40 km^2) heeft een afvoer van:

$0,7 \times 100 \times 17,0.10^{-2} - 0\ 5 \times 40 \times 19\ 0.10^{-2} = 8,1\ m^3.s^{-1}$, hetgeen

overeenkomt met een afvoerdichtheid van $16,2.10^{-2}\ m^3.s^{-1}.km^{-2}$

Hiermee kunnen thans de maatgevende afvoeren in de vier punten van het waterlopenstelsel worden berekend. De wijze waarop deze afvoeren worden berekend is terwille van de duidelijkheid naast de schets van het stroomgebied (figuur 5.8) weergegeven.

Figuur 5.8. Voorbeeld van een berekening van maatgevende afvoeren uit maatgevende afvoerdichtheden ten behoeve van de dimensionering van leidingvakken



8 km^2 snel : 8 x 19.10^{-2} = 1,52 $m^3.s^{-1}$
10 km^2 langz: 10 x $3,4.10^{-2}$ = 0,34 "
1,86 $m^3.s^{-1}$

20 km^2 snel : 20 x 19.10^{-2} = 3,80 $m^3.s^{-1}$
20 km^2 langz: 20 x $3,4.10^{-2}$ = 0,68 "
4,48 $m^3.s^{-1}$

40 km^2 van M1: 4,48 $m^3.s^{-1}$
25 km^2 snel : 25 x $16,2.10^{-2}$ = 4,05 "
5 km^2 langz: 5 x $3,2.10^{-2}$ = 0,16 "
8,96 $m^3.s^{-1}$

40 km^2 van M1: 4,48 $m^3.s^{-1}$
50 km^2 snel : 50 x $16,2.10^{-2}$ = 8,10 "
10 km^2 langz: 10 x $3,2.10^{-2}$ = 0,32 "
12,90 $m^3.s^{-1}$

VOORBEELD VAN DE BEPALING VAN DE MAATGEVENDE AFVOERDICHTHEID VAN EEN VLAK GEBIED MET BEHULP VAN DE METHODE DE ZEEUW-HELLINGA

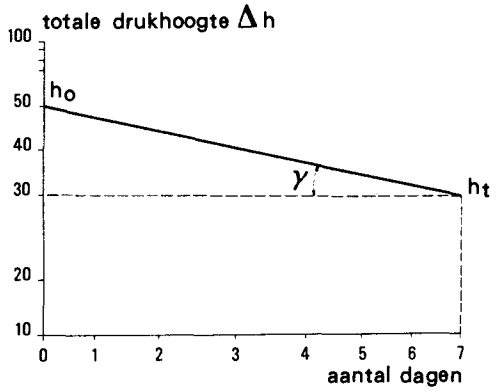
Deze methode is door de Landinrichtingsdienst in Groningen toegepast om de maatgevende afvoerdichtheid voor een aantal drainageproefvelden te bepalen. Met behulp hiervan zijn drainagestelsels in de ruilverkaveling Vlagtwedder Essen gedimensioneerd. Ook in het Noord-Groningse zeekleigebied is gebruik gemaakt van deze methode.
De bepalingen zijn gedaan op de proefobjecten Lokstreek, Smeerling en Leemdobben, onderverdeeld in een tiental proefpercelen.

Bepaling van de reactiefactoren.

Schematisering afvoersituatie

De reactiefactor (α) is een constante, die betrekking heeft op de snelheid waarmee het grondwater wordt afgevoerd en is een funktie van onder meer doorlatendheid, dikte van het stromingspakket en afstand tot het ontwateringsmedium. De reactiefactor kan het best bepaald worden bij een dalende grondwaterstand die tenminste 7 dagen voortduurt (droge periode) en van een zo'n groot mogelijke omvang is. Dit laatste betekent, dat de begingrondwaterstand zo hoog mogelijk dient te zijn. In figuur 6.1. is een voorbeeld van de bepaling gegeven, waarbij Δh (niveau verschil grondwaterstand en ontwateringspeil) op de vertikale as (logaritmische schaal) is weergegeven en de tijd (in dagen) op de horizontale as.

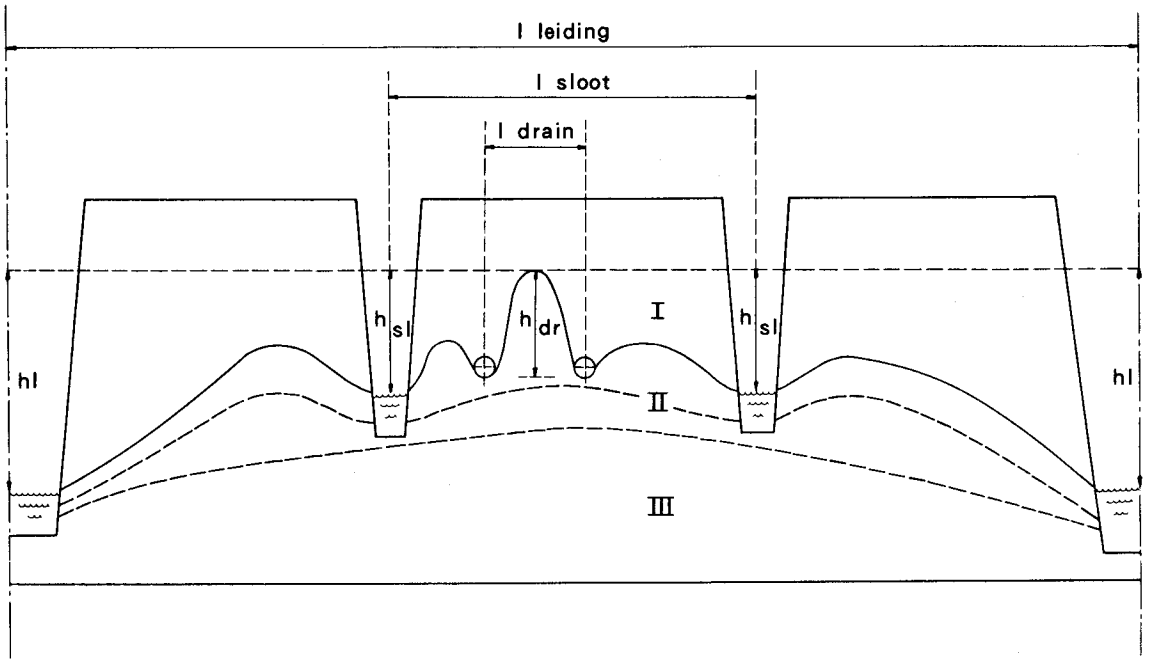
Figuur 6.1. Verloop in de tijd van het niveau verschil tussen grondwaterstand en ontwateringspeil



$$\alpha = \frac{\log h_o - \log h_t}{\log e.t} = \frac{\log 50 - \log 30}{7 \times \log.e} = \frac{0,22185}{3,038} = 0,073\ (T^{-1})$$

De aanvankelijke berekeningen gaven, vooral voor de percelen op de Lokstreek, zeer uiteenlopende resultaten, hetgeen wordt veroorzaakt door een gecompliceerd afstromingspatroon. Het object Lokstreek is aan 3 zijden omgeven door een leiding met een laag peil, bovendien is hierin nog een stuw geplaatst. De percelen zijn gescheiden door sloten van ongelijke diepte en waterpeil; tevens zijn nog 3 percelen gedeeltelijk gedraineerd op 80 m. Het meest gecompliccerde patroon is in figuur 6.2 weergegeven (fiktief).

Figuur 6.2. Schematische weergave van een gecompliceerd ontwateringssysteem in de Lokstreek



In het schema zijn de drains onjuist getekend, in werkelijkheid lopen deze naar de sloot. Een vierde een 4e component, namelijk de leiding met diep peil loodrecht op de doorsnede is van minder belang en is daarom uit het schema weggelaten. Het proefveld Smeerling kent een eenvoudiger en regelmatiger stromingspatroon, n.l. naar de drains en naar de omringende sloot. Bij het proefveld de Leemdobben ontbreekt bodendien de drainage zodat een enkelvoudige afstroming voorkomt. Op dit proefveld is de mogelijke invloed (kwel) van het hoge peil van het naastliggende Ruiten Aa-kanaal niet in beschouwing genomen.

Analyse van het afvoerpatroon naar leiding, sloot en drain

Indien er sprake is van een gelijktijdige afstroming naar leiding, sloot en drains (situatie I, figuur 6.2) bestaat de totale zakking van de grondwaterstand per dag uit drie componenten. Deze componenten, t.w. α_l, α_{sl} en α_{dr} kunnen slechts afzonderlijk bepaald worden als metingen beschikbaar zijn van situaties waarbij één, twee of alle drie de ontwateringsonderdelen functioneren. α_l volgt uit situatie III (fig. 6.2.). Met behulp van α_l volgt α_{sl} uit situatie II. Tenslotte volgt α_{dr} met behulp van α_l en α_{sl} uit situatie I.
Allereerst dient α_l te worden bepaald; bij lage grondwaterstanden (beneden de slootbodem, zoals in situatie III is weergegeven) is er een enkelvoudige afstroming waaruit de α_l afgeleid kan worden met behulp van de eerdergenoemde formule. Voor de 5 percelen van de Lokstreek zijn de berekende reactiefactoren van de leiding in tabel 6.1. weergegeven.

Tabel 6.1. α_l voor de percelen van de Lokstreek

Perceel	α_l in d^{-1}	Perceel	α_l in d^{-1}
Alting Noord	0,025	Potze Noord	0,03
Alting Zuid	0,02	Potze Zuid	0,01
Schoenmaker	0,015		

Nu α_l bekend is, kan bij elke grondwaterstand de zakking als gevolg van stroming naar de leiding worden berekend, namelijk:

$$h_{t,l} = h_{t-1,l} - h_{t,l}$$

$$= h_{t-1,l} - h_{t-1,l} \cdot e^{-\alpha_l \cdot t}$$

$$= h_{t-1,l} \; (1 - e^{-\alpha_l \cdot t})$$

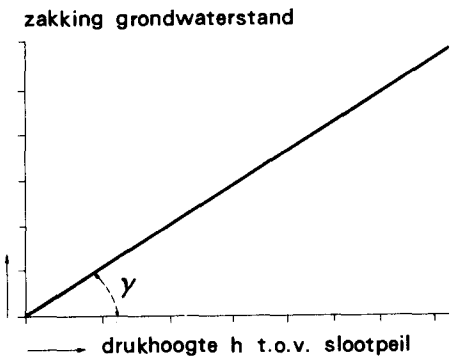
Is $\Delta h_{t,l}$ berekend, dan kan in situatie II (figuur 6.2) de grondwaterstandszakking als gevolg van stroming naar de sloot worden berekend door de totale zakking te verminderen met de zakking als gevolg van stroming naar de leiding, namelijk:

$$\Delta h_{t,sl} = \Delta h_{t,tot} - \Delta h_{t,l}$$

De α (sloot) wordt nu bepaald door op lineaire schaal de zakking van het grondwater (steeds het gemiddelde per etmaal) als gevolg van stroming naar de sloot op de verticale as uit te zetten, terwijl op de horizontale as de bijbehorende drukhoogte ten opzichte van de slootwaterstand per dag wordt weergegeven (figuur 6.3.). Uit de tangens van de hellingshoek γ kan de α_{sl} worden berekend.

Figuur 6.3. Zakking van het grondwater als gevolg van stroming naar de sloot

$\Delta h_{t,sl}$ zakking van de grondwaterstand als gevolg van stroming naar de sloot h



$$tg\gamma = \frac{\Delta h_{t,sl}}{h_{(t-1),sl}}$$

$$h_{t,sl} = h_{t-1,sl}(1-e^{-\alpha_{sl} \cdot t})$$

$$= 1 - e^{-\gamma_{sl} \cdot t}$$

$$\alpha_{sl} \cdot t = - \frac{\log(1-tg\,\gamma)}{\log e}$$

Rekenend met absolute waarden en aannemend dat per stap t = 1 dag wordt ingevoerd, wordt de formule:

$$\alpha_{sl} = \frac{\log(1-tg\,\gamma)}{\log e}$$

Bij een bepaalde drukhoogte wordt de afstroming naar de sloot tot nul gereduceerd. Deze basisdrukhoogte, waarbij geen afstroming meer plaatsvindt, is afhankelijk van de afstand tot het ontwateringsmedium.
De horizontale as in fig. 6.3. start dus met een bepaalde minimumwaarde.

Tabel 6.2. α(sloot) per perceel

Perceel	α_{sl} in d^{-1}	Perceel	α_{sl} in d^{-1}
Alting Noord	0,18	Paas Noord	0,065
Alting Zuid	0,165	Paas Zuid	0,09
Schoenmaker	0,12		
Potze Noord	0,115	Luth	0,075
Potze Zuid	0,15	Haverman	0,035

In situatie I(figuur 6.2) kan nu op identieke wijze de α(drain) bepaald worden. Door eerst de totale grondwaterstandszakking te verminderen met de zakking tengevolge van afstroming naar leiding en/of sloot wordt de zakking onder invloed van de drainage berekend. Door deze zakking uit te zetten tegen de drukhoogte (t.o.v. onderkant drain) kan de reactiefactor voor de drains berekend worden Voor Potze Noord is deze als derde trap berekend op 0,017; voor Paas Noord en Zuid is de α_{dr} als tweede trap bepaald op resp. 0,15 en 0,20 en voor Haverman op 0,28.

Berekening van de afvoerdichtheid

Voor de berekening van de afstroming naar leiding, sloot en drains kan worden uitgegaan van een tweetal relaties uit de formule van de Zeeuw en Hellinga, n.l.

a. de hoeveelheid water in de grond betrokken op een eenheid van oppervlakte is gelijk aan het produkt van drukhoogte h en bergingscoefficient met een correctiefactor $\frac{\pi}{4}$ indien de grondwaterspiegel een ellipsvormig verloop heeft ofwel: $R = \mu . h . \Pi$;
b. de afvoerdichtheid is evenredig met bovengenoemde hoeveelheid water R in de grond ofwel: $= \alpha . R$;

Uit a en b volgt, dan de afvoerdichtheid $q = \alpha \cdot \mu \cdot L\frac{\Pi}{4}$
Om de afvoerdichtheid te bepalen moet de bergingsfactor μ bekend zijn/ Deze bergingsfactor is geschat uit het effect van korte buien op de grondwaterstand en enkele hydrologische kenmerken van het bodemprofiel. Correctie van de bergingsfactor vindt in een later stadium plaats.

Relatie drukhoogte en afvoer

Door nu bij verschillende grondwaterstanden (in feite drukhoogten ten opzichte van het betreffende ontwateringsniveau) de berekende μ en α in te voeren, is het mogelijk q-h lijnen te construeren. Voor de 9 percelen zijn deze afvoerdrukhoogtelijnen omgewerkt als afvoerontwateringsdieptelijnen en

weergegeven op figuur 6.4. Uit deze figuur blijkt duidelijk de invloed van de verschillende ontwateringsmedia op de afstroming; de knikpunten geven dit weer. Tevens blijkt, dat in de huidige toestand de percelen Luth en Schoenmaker en Haveman onvoldoende ontwaterd zijn, indien wordt uitgegaan van het ontwerpcriterium 0,50 m ontwateringsdiepte bij een afvoer van 7 mm/d ($0{,}08 m^3 s^{-1} km^{-2}$). Hiertegenover staat, dat het perceel Potze-Noord, in de huidige toestand gedraineerd op 80 m, zonder drainage ook bijna aan deze norm zou voldoen. Potze-Zuid en Alting-Zuid danken hun grote ontwateringsdiepte aan hun hoge ligging (alleen ter plaatse van de grondwaterstandsmeters).

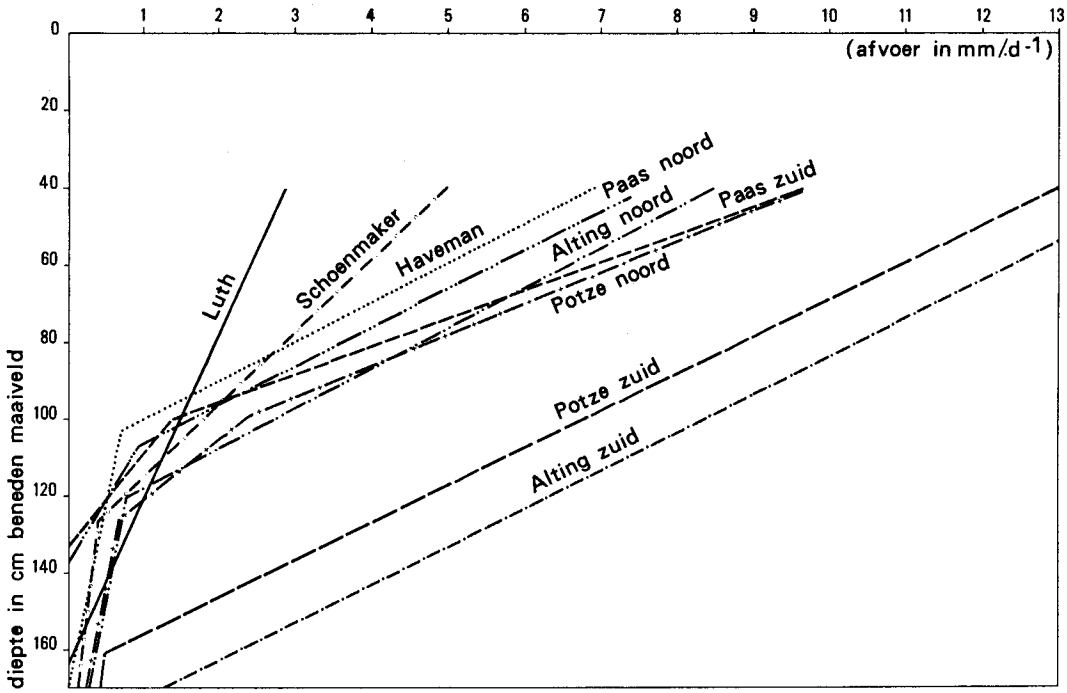
Correctie van de bergingsfactor

Nu de afvoer vrij exact kan worden bepaald, dienen de globale afvoercijfers,die gebruikt zijn bij de berekening van de bergingscoëffient, te worden gecorrigeerd. In een aantal gevallen heeft dit consequenties voor de berekende bergingscoëfficient (tabel 6.3).

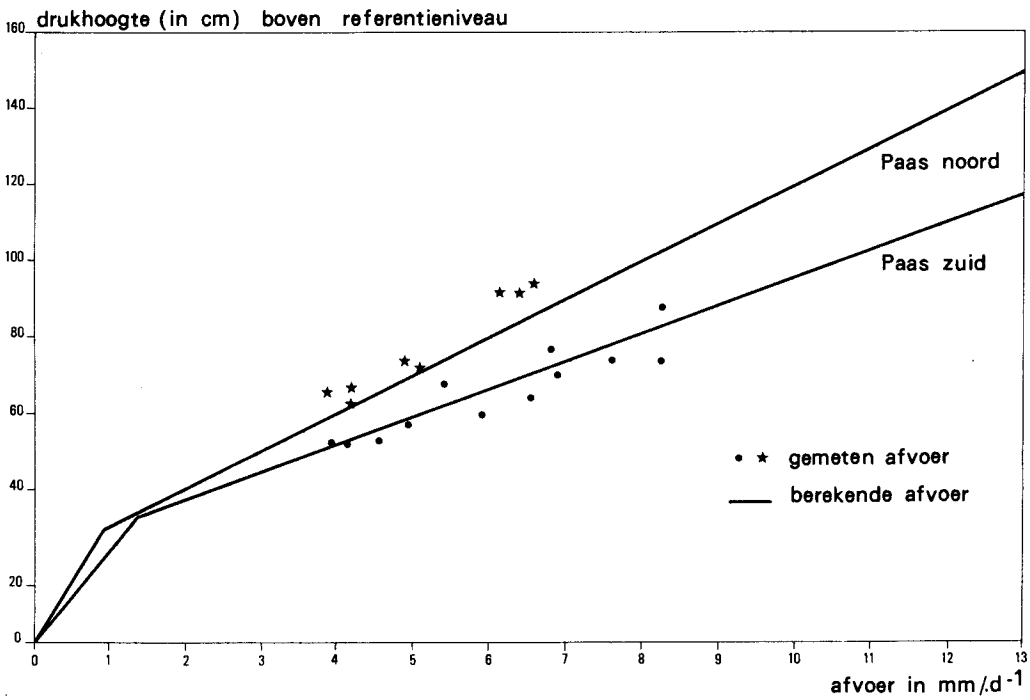
Tabel 6.3. Definitieve bergingscoëfficienten

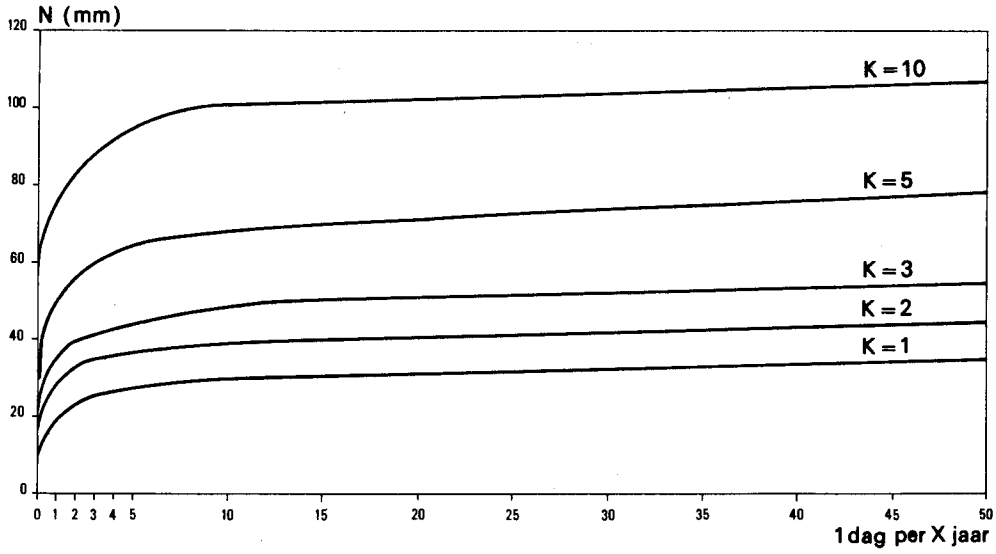
Perceel	μ oud	μ nieuw	Perceel	μ oud	μ nieuw
Alting Noord	0,06	0,06	Paas Noord	0,07	0,06
Alting Zuid	0,07	0,07	Paas Zuid	0,07	0,06
Schoenmaker	0,06	0,05			
Potze Noord	0,06	0,05	Luth	0,03	0,04
Potze Zuid	0.09	0,08	Haverman	0,05	0,04

Figuur 6.4. Het verband tussen drooglegging en afvoer

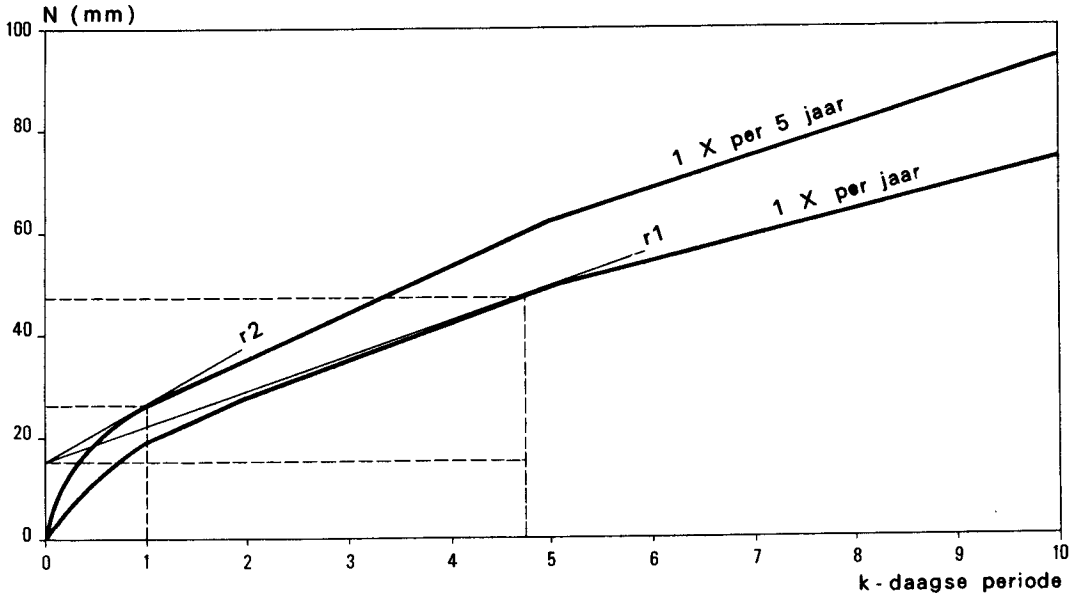


Figuur 6.5. Vergelijking van de gemeten waarden en de berekende afvoeren op het proefveld Smeerling





Figuur 6.6. Verband tussen n en de k-daagse periode bij de frequenties 1 dag per jaar en 1 dag per 5 jaar van het station Groningen in de periode oktober t/m april.



Om een bepaalde basis te hebben waarboven neerslag geborgen en afgevoerd moet worden, is ervan uitgegaan, dat er een constante basisafvoer is, namelijk één of twee mm/d. (2 mm/d. komt overeen met de gemiddelde neerslag en is derhalve vrij hoog).
Dit resulteert voor elk der 9 onderscheiden percelen in een bepaalde grondwaterstand in de winterperiode;
Het beschikbare bergingstraject is nu de afstand tussen de grondwaterstand bij een afvoer van 1 c.q. 2 mm/etm. en de ontwateringsnorm. Vermenigvuldiging met de bekende bergingsfactor geeft de beschikbare berging.
De beschikbare berging wordt uitgezet op de verticale as van de grafiek op figuur 6.6 (de berging is hier b.v. 15 mm). Vanaf dit punt dient een raaklijn te worden getrokken aan de frequentielijn 1 keer per jaar. Het raakpunt (r geeft de hoeveelheid neerslag die eens per jaar (in de winterperiode) in k-dagen valt en afgevoerd moet worden.
In het voorbeeld is k 4,75 etm. en 5 mm, zodat voor N 47 mm wordt afgelezen De berging was 15 mm, zodat de maatgevende afvoerdichtheid =6,7 mm/d. bedraagt. In tabel 6.5 is een overzicht gegeven van de berekende waarden. Bij verzwaring van de overschrijdingseistot 1 keer per 5 jaar leidt dit tot een maatgevende afvoer van: = 11 mm/d.

Tabel 6.5 Berekende afvoerdichtheden bij verschillende basisafvoeren

Perceel	Basisafvoer dichtheid 1mm/d		Basisafvoer dichtheid 2mm/d	
	Berging (mm)	Maatg. afvoer (mm/d.)	Berging (mm)	Maatg. afvoer (mm/d.)
Alting Noord	46,8	2,8	40,8	3,4
Alting Zuid	93,1	-	86,1	-
Schoenmaker	38,0	3,7	28,5	4,6
Potze Noord	40,5	3,4	32,5	4,2
Potze Zuid	92,8	-	84,8	-
Paas Noord	39,6	3,5	33,6	4,1
Paas Zuid	42,0	3,3	33,8	4,1
Luth	32,4	4,2	15,6	6,5
Haverman	24,0	5,1	20,0	5,5

Op de meeste percelen was de berging zodanig, dat er geen raaklijn aan de frequentielijn 1x per jaar kon worden getrokken. Hier is dan een verbindingslijn getrokken tot het punt k = 10 dagen bij N = 74,5 mm.

Duidelijk is, dat deze berekende afvoernorm belangrijk lager is dan de ontwerp-afvoer van 7 mm/etm. (0.08 $m^3.s^{-1}$). Naast de hoeveelheid waterberging in het profiel is dit mede een gevolg van goed doorlatende ondergrond en het licht hellend karakter van het gebied, waardoor ondergrondse afvoer een niet onbelangrijke factor is.
Met behulp van de formule De Zeeuw-Hellinga en de regenduurlijn blijkt volgens deze berekeningen het gestelde drainagecriterium aan de ruime kant. Gesteld kan worden dat in dit criterium een ruime veiligheidsmarge verdisconteerd is. De resultaten van berekeningen met het Hooghoudcriterium zijn in de praktijk goed toepasbaar gebleken. De heterogeniteit van de bodem en onvolkomenheden in het drainagestelsel maken de genoemde veiligheidsmarge veelal noodzakelijk. Wil men toch op een ontwerp besparen, dan kunnen de berekeningen met ter plaatse gemeten grootheden volgens het bovengenoemde model leiden tot een minder intensief drainagestelsel.

REGENDUURLIJNEN

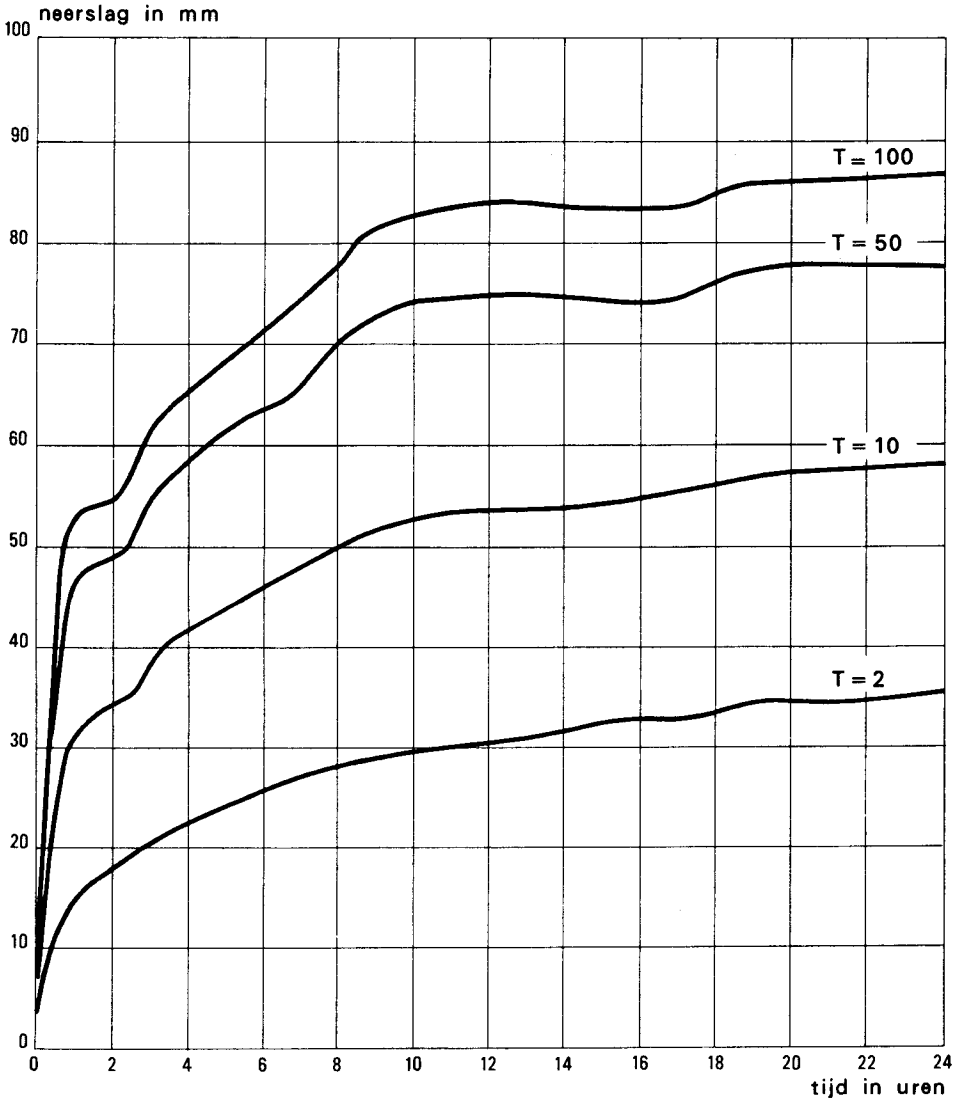
Een regenduurlijn voor een bepaalde herhalingstijd geeft aan welke neerslag gedurende een zekere periode maximaal verwacht kan worden.

Eenregenduurlijn is de omhullende van de maxima voor verschillende perioden, welke met gelijke herhalingstijd kunnen voorkomen. De regenduurlijn is geen weergave van het verloop van regenbui en zegt niets over het verloop van de neerslag gedurende een bepaalde periode.

Een maximale intensiteit kan voorkomen, zowel aan het begin van een periode als aan het eind of op ieder willekeurig moment in een periode. Bij bepaalde waterbeheersingssystemen kan dit van invloed zijn, hoewel men voor ogen moet houden, dat bij een bepaald verloop van de neerslag gedurende de maatgevende periode een grotere herhalingstijd kan behoren, dan die waarvan in eerste instantie is uitgegaan. Mocht men ten behoeve van een waterbeheersingsontwerp met bergingsvijvers de regenkromme nog moeten bepalen, dan zal in het algemeen volstaan kunnen worden met gegevens over minder kleinere tijdvakken dan vijf minuten.
Afhankelijk van het te ontwerpen systeem, kan met tijdvakken van één tot enkele uren gewerkt worden, hetgeen een belangrijke vermindering geeft van het aantal te verwerken cijfers.

Tot voor enige jaren werd meestal gewerk met de neerslaggegevens volgens Oostwoud Wijdenes (Oostwoud Wijdenes, 1941) of Braak (Braak, 1933).
De laatste jaren wordt veelal uitgegaan van de "5-minuten regens" (Van der Herik en Kooistra, 1970).
De regenduurlijnen volgens deze laatste verwerking zijn voor een aantal herhalingstijden weergegeven in figuur 7.1.

Figuur 7.1. Regenduurlijnen (van den Herik en Kooistra, 1970)



STROMINGSVORMEN EN STROMINGSTYPEN IN OPEN WATERLOPEN

De viscositeit en de zwaartekracht beïnvloeden het stromingspatroon van het water. Aan de hand van verschillende onderzoeken is gebleken, dat met invoering van kengetallen (dimensieloze grootheden) het type stroming kan worden gekarakteriseerd. Een overzicht volgt hieronder. Het effect van de viscositeit wordt weergegeven door het getal van Reynolds (= Re).

Effect van de viscositeit

Getal van Reynolds

$$Re = \frac{v\,R}{\nu}$$

v = gem. snelheid
R = hydraulische straal
ν = kinematische viscositeit

$Re < 400$	de stroming is laminair
$400 < Re < 2000$	de stroming bevindt zich in overgangszone
$Re > 2000$	de stroming is turbulent

Laminaire stroming treedt alleen op in leidingen met zeer klein profiel, bij kleine snelheden of bij taaie vloeistoffen. In waterlopen zoals die in dit rapport ter sprake zijn gekomen, zal alleen turbulente stroming optreden.

Het effect van de zwaartekracht wordt weergegeven door het getal van Froude (= F).

Effect van de zwaartekracht

Getal van Froude

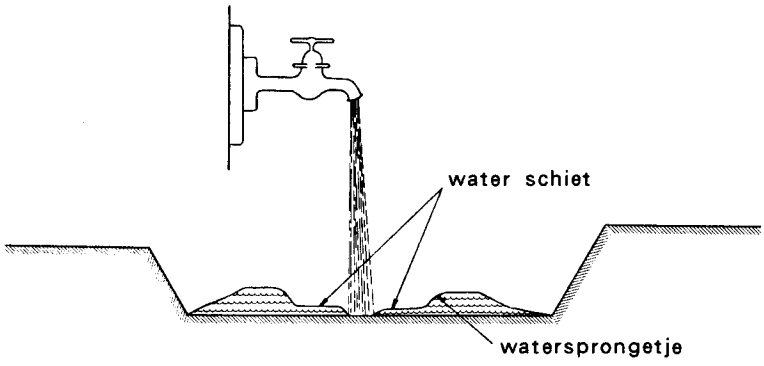
$$F = \frac{V}{\sqrt{g.D}}$$

v = gem. snelheid
g = versnelling van de zwaaretkracht
D = hydraulische diepte $= \frac{A}{T}$
A = natte oppervlakte
T = natte bovenbreedte

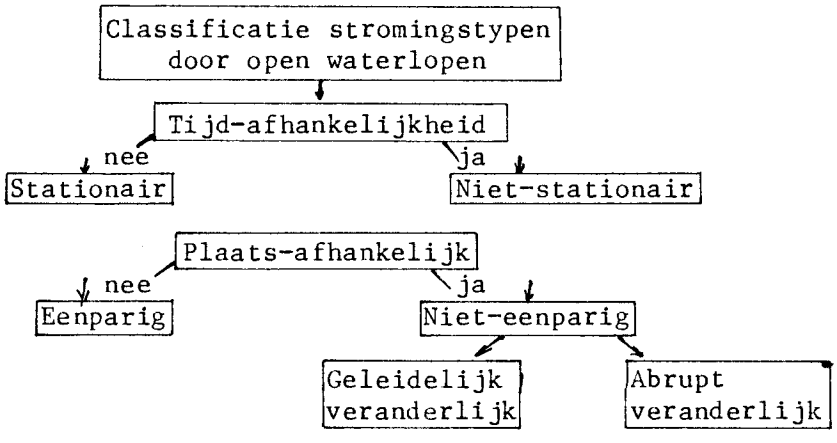
$F <$	water stroomt
$F + 1$	water in grenstoestand
$F > 1$	water schiet

Een voorbeeld van schietend water is te zien als het water uit een kraan op een gootsteen valt (figuur 8.1). In de praktijk kan schietend water voorkomen bij waterlopen met een zeer steil verhang bij bodemvallen en bij duikers die klein zijn in verhouding tot het te verwerken debiet.

Figuur 8.1. Schietend water in een gootsteen



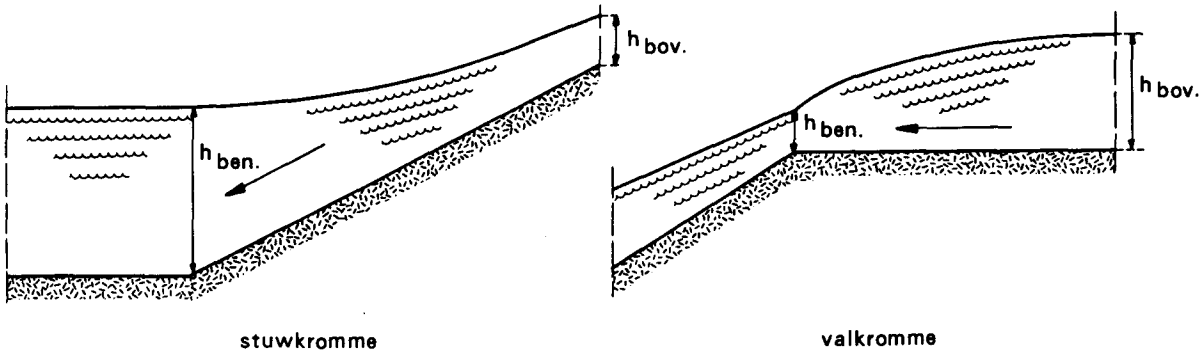
Het is van belang om te weten in welke stromingstoestand men een waterlopenplan wil berekenen. Men kan bijvoorbeeld de factor tijd wel of niet in de berekening betrekken en spreekt dan van een niet-stationaire respectievelijk stationaire stroming van het water. Als de afmetingen, het verhang en de wandruwheid over de gehele lengte van een waterloop niet veranderen en de waterlijn evenwijdig aan de bodem van de waterloop loopt, dan spreekt men van een eenparige stroming. Loopt deze waterlijn niet evenwijdig aan de bodem, dus varieert ze met de plaats in de waterloop, dan spreekt men van een niet-eenparige stroming. Hieronder volgt een classificatieschema van stromingstypen door open waterlopen.



Bij stationaire stroming is de waterdiepte in een waterloop op een bepaald punt constant gedurende het beschouwde tijdsinterval.
Bij niet-stationaire stroming is de waterdiepte in een waterloop op een bepaald punt niet constant gedurende het beschouwde tijdsinterval.

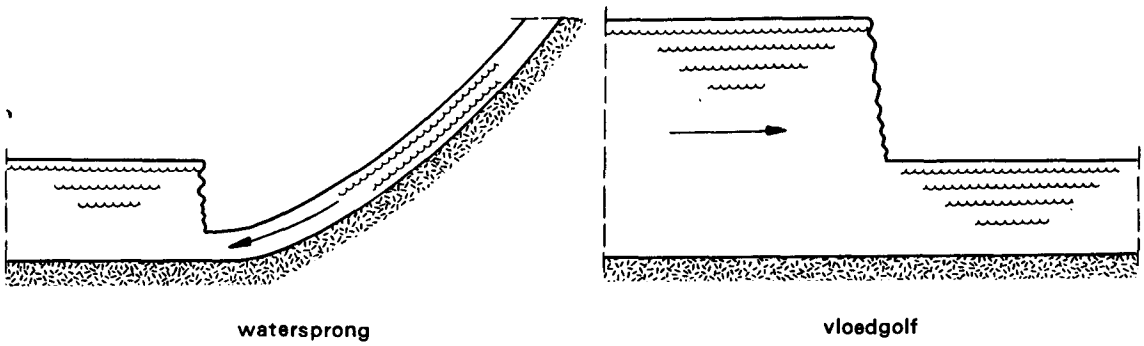
Bij eenparige stroming blijft de waterdiepte in de lengterichting van een waterloop constant (waterlijn evenwijdig aan bodemlijn).
Bij niet-eenparige stroming varieert de waterdiepte in de lengterichting van een waterloop.
Bij langzaam veranderlijke niet-eenparige stroming verandert de waterdiepte geleidelijk over "langere" afstand, zoals bij stuw- en valkrommen (figuur 8.2.).

Figuur 8.2. Stuw en valkrommen



Bij snel veranderlijke niet-eenparige stroming verandert de waterdiepte abrupt over "korte" afstand, zoals bij watersprongen en vloedgolven (figuur 8.3.).

Figuur 8.3. Watersprong en vloedgolf



Abrupt veranderlijk
stationair

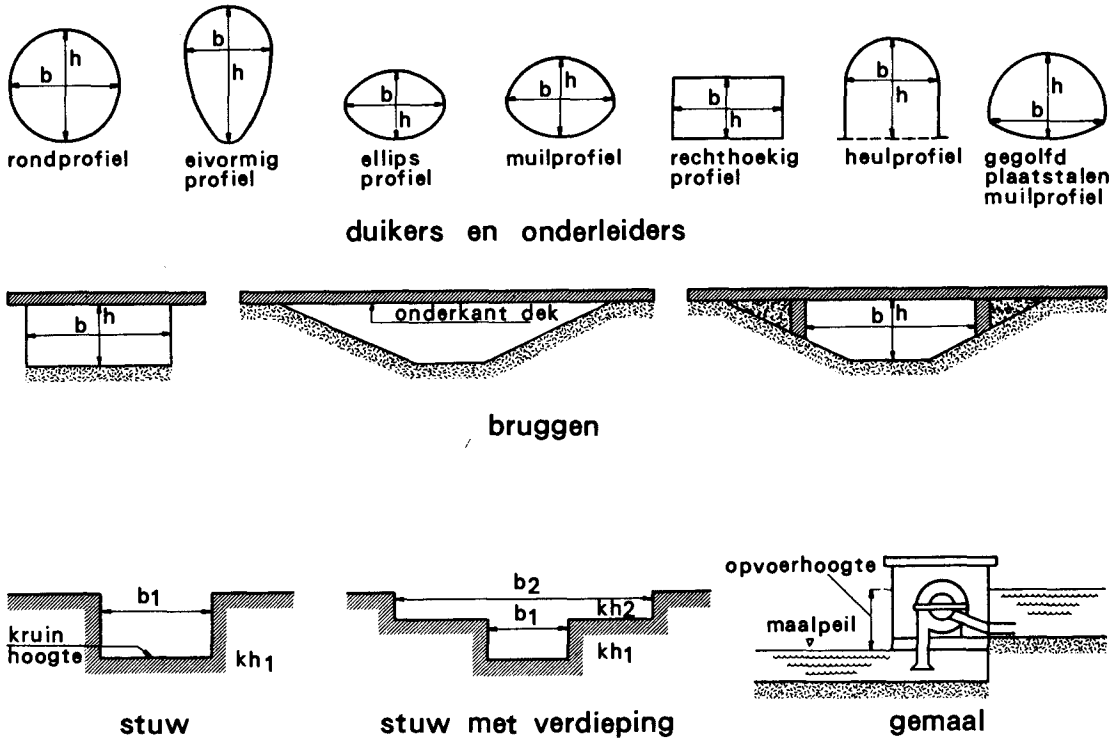
Abrupt veranderlijk
niet-stationair

KUNSTWERKEN

De kunstwerken die in bestaande of te ontwerpen waterlopenplannen voor kunnen komen zijn (figuur 9.1):

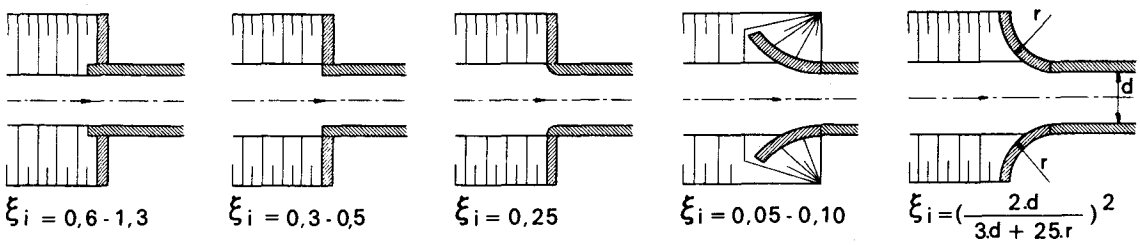
duikers
bruggen
onderleiders
aquaducten
hevels
stuwen
bodemvallen
verdeelwerken
sluizen
gemalen

Figuur 9.1. In waterlopenplannen meest voorkomende kunstwerken.



In figuur 9.2. zijn vormen van instroomopeningen weergegeven met de daarbij behorende $_i$-waarden (Huisman, 1969).

Figuur 9.2. Vormen van instroomopeningen met bijbehorende $_i$-waarden.



Voor de veel voorkomende duiker-materialen beton (Ven te Chow, 1959) en k_M-waarden gegolfd plaatstaal (Gelok, 1975) worden in tabel 9.1. en 9.2. aangegeven.

Tabel 9.1. k_M-waarden voor beton

k_M-waarden in $m^{1/3}.s^{-1}$ voor beton	Minimum	Normaal	Maximum
1. duiker, recht en schoon	75	90	100
2. duiker met bochten, verbindingen en enige verontreiniging	70	75	90
3. afgewerkt	70	85	90
4. rioolbuis met mangaten, inlaten e.d. recht	55	65	75
5. niet afgewerkt, bij stalen bekisting	70	75	85
6. niet afgewerkt, bij gladde houten bekisting	60	70	85
7. niet afgewerkt, bij ruwe houten bekisting	50	60	65

Tabel 9.2. k_M-waarden voor parallel gegolfd plaatstaal

Golfafmetingen in cm		k_M-waarden in $m^{1/3}.s^{-1}$		
Breedte	Hoogte	Minimum	Normaal	Maximum
6,77	1,27	35	40	45
15,24	5,08	25	30	35

Voor de k_M-waarden van andere duikermaterialen, zoals asbest-cement, p.v.c., polyester, polyetheen e.d. wordt verwezen naar (Ven te Chow, 1959; Huisman, 1969).

Overzicht van stuwen, die in waterlopenplannen kunnen voorkomen.

Indeling naar functie:

Meetstuwen
"Landbouwkundige" stuwen
"Technische" stuwen

Indeling naar hydraulische vorm:

a. Stuwen met overstortende straal;
   stuwen met brede kruin
   stuwen met scherpe kruin
   Beide typen kunnen volkomen of onvolkomen zijn.
b. Stuwen met opening
c. Stuwen met overstortende straal en opening
d. Hevelstuwen

Indeling naar technische uitvoering:

Vaste stuwen met rechte kruin
V-vormige kruin
gebogen kruin

Regelbare stuwen met schotbalken
schuiven
kleppen

Geautomatiseerde regelbare stuwen
elektrisch
hydraulisch
mechanisch

GEGEVENS OVER DE COMPUTERPROGRAMMA'S DIWA, GROND en TEKDIGRO

Het programma DIWA berekent waterstanden en stroomsnelheden in een waterlopenplan. Met het programma kan een waterlopenplan met boomstructuur berekend worden, voor stationaire eenparige- en niet-eenparige langzaam veranderlijke turbulente stroming. Schietend water kan niet berekend worden, met dien verstande dat de grenstoestand, zoals die onder andere bij bodemvallen voorkomt, nog juist toelaatbaar is.
De invoergegevens voor het programma zijn:
- de afmetingen van de waterlopen en de kunstwerken;
- de afwaterende oppervlakten en de afvoerfactoren;
- de verschillende criteria (N.W., H.W., M.W.), waarmee men de berekening wil laten uitvoeren.

Het programma kan gebruikt worden voor:
- het bepalen van de consequenties van afvoeren met verschillende frequenties voor een waterlopenplan;
- een controleberekening van een met de "hand" ontworpen waterlopenplan;
- het berekenen van waterlopen, waarvan de afmetingen niet gewijzigd mogen worden, b.v. vanwege landschappelijke of natuurwetenschappelijke waarde;
- het berekenen van een bestaand waterlopenplan om hierin de knelpunten te vinden;
- het berekenen van de consequenties van wijzigingen bij de uitvoering van een plan;
- het berekenen van een plan, waarbij het afvoersysteem bestaat uit een combinatie van open waterlopen en gesloten leidingen;
- het berekenen van de afmaling bij gemalen.

Onder berekening met de "hand" wordt verstaan berekening met behulp van grafieken, rekenliniaal of (zak)rekenmachine. Een dergelijke berekening van een waterlopenplan wordt meestal gecontroleerd om eventuele fouten te elimineren. Dit kan gemakkelijk met behulp van het programma gedaan worden met als voordelen, dat:
- het programma met niet-eenparige stroming rekent, waardoor er stuw-en valkrommen kunnen worden berekend. Ook worden de opstuwingen van de kunstwerken in de berekening van de waterstanden meegenomen;
- de consequenties van verschillende debieten snel berekend kunnen worden;
- de k_M-waarden waterstandsafhankelijk berekend worden;
- er meer variaties in de taludhellingen van de waterlopen mogelijk zijn;
- bestaande en te handhaven waterlopen beter berekend kunnen worden;
- de kunstwerken nauwkeuriger berekend worden. Er wordt rekening gehouden met intree-, wrijvings- en uittreeverliezen. Ook worden van verschillende typen duikers (o.a. gegolfd plaatstalen duikers), de hydraulische grootheden (natte oppervlakte e.d.) exacter berekend;
- gesloten leidingen, zowel geheel- als gedeeltelijk gevuld berekend kunnen worden;
- eventuele alternatieven snel zijn te berekenen;
- staten met gegevens van de berekende waterlopen en kunstwerken (M2- en M3-staten) niet meer getypt behoeven te worden.

Heeft men de hydraulische berekening van het waterlopenplan gereed, dan kan met het programma GROND de grondontgraving, grondaanvulling en landverlies berekend worden. Verder kan met het programma TEKDIGRO dwarsprofielen getekend worden. De invoergegevens voor deze programma's zijn:

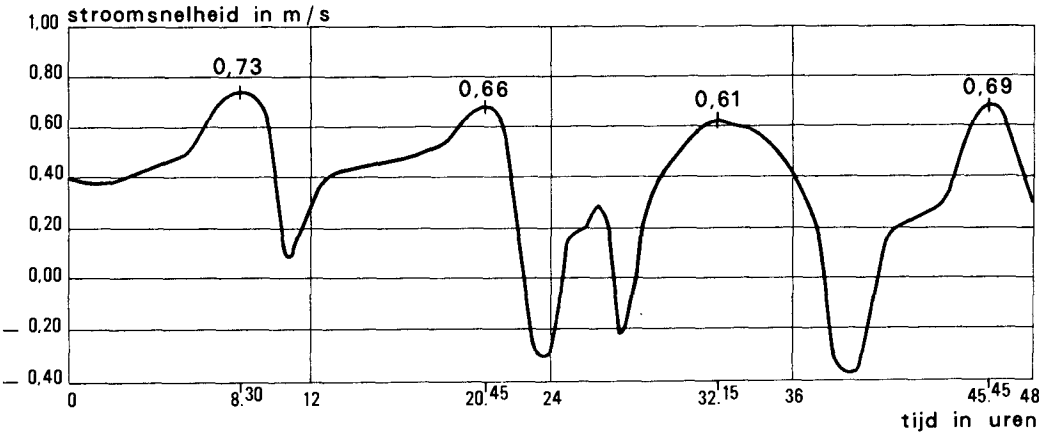
- de afmetingen van de nieuw te maken waterlopen;
- de dwarsprofielen van de bestaande waterlopen in coördinaten.

Voor meer informatie over deze programma's wordt verwezen naar de literatuur (André en Gelok, 1979).

RESULTATEN VAN EEN NIET STATIONAIRE BEREKENING VAN EEN AFWATERINGSMODEL.

In het waterschap Oldambt in Groningen was het in het kader van de ruilverkaveling Nieuw-Scheemda mogelijk om het bestaande net van boezem-kanalen met een oppervlakte van ca. 75 ha, uit te breiden met een boezemmeer van ca. 150 ha. Een geschematiseerde weergave van de boezem in takken en knooppunten is weergegeven in figuur 11.1.
In knooppunt 600 is het op zee uitslaande boezemgemaal en in de knooppunten 601 en 604 een suatiesluis gesitueerd.
Het boezemmeer wordt aangegeven door tak 632. Door de aanleg van het boezemmeer, zou de maximum toelaatbare stroomsnelheid (0,60 m/s) in tak 631, onder bepaalde omstandigheden overschreden kunnen worden. Om dit te bepalen is er een niet-stationaire berekening van de boezem uitgevoerd.
Het resultaat van de berekening is weergegeven in figuur 11.2.
Hieruit blijkt dat op vier tijdstippen (nl. 8,5; 20,75; 32,25 en 45,75 uur er maximum stroomsnelheden optreden (0,73 0,66; 0,61 en 0,69 m/s).

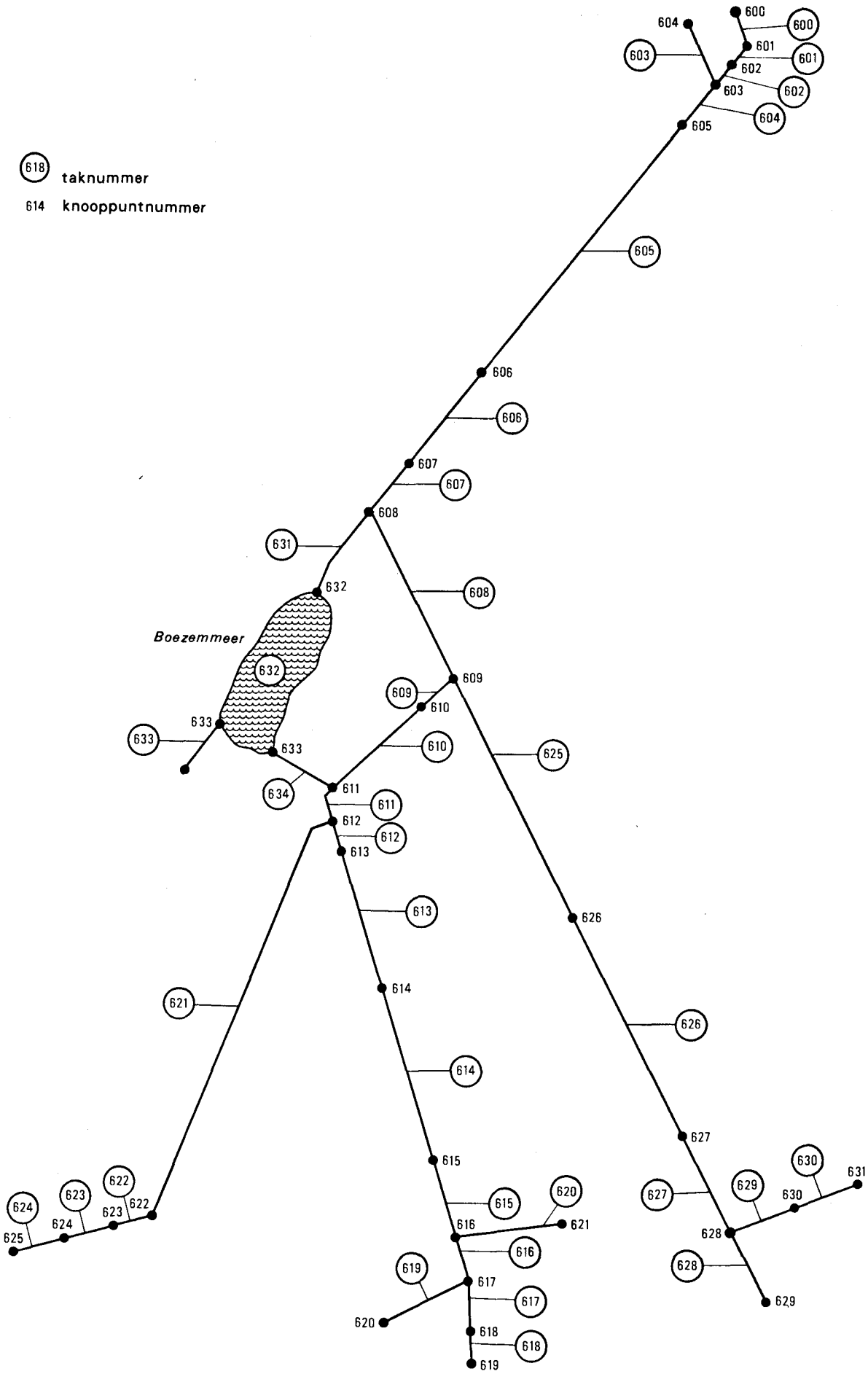
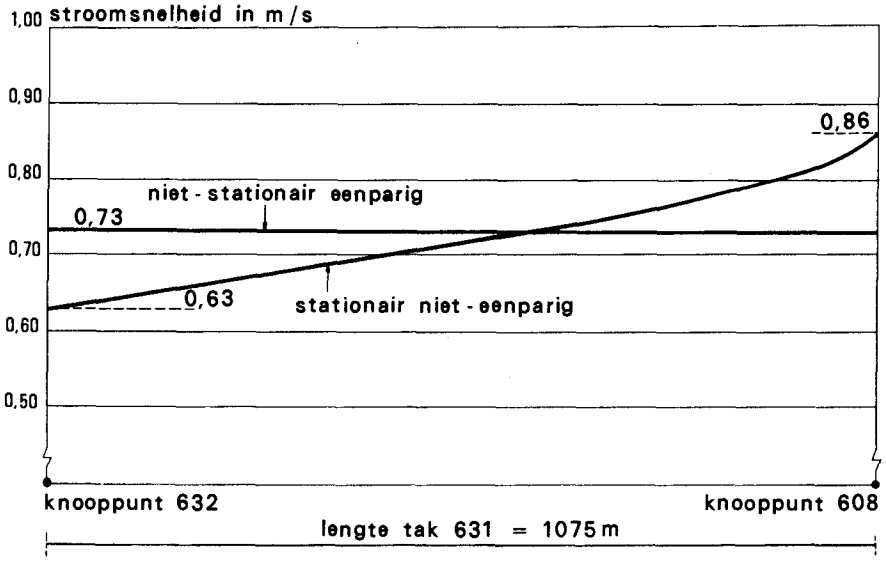
Figuur 11.2. Berekende stroomsnelheid in de tijd in tak 631



De grootst optredende stroomsnelheid is 0,73 m/s. Daar er met niet- stationaire eenparige beweging gerekend is, wil dit zeggen dat deze snelheid gezien moet worden als een gemiddelde snelheid die in het midden van tak 631 gedacht is. Met de stationaire niet-eenparige beweging is tak 631, die 1075 m lang is, voor de situatie op het tijdstip van 8,5 uur doorgerekend. Het resultaat hiervan is vermeld in figuur 11.3.

Hieruit blijkt dat de stroomsnelheid bij knooppunt 632 0,63 m/s bedraagt en bij knooppunt 608 0,86 m/s.
Deze snelheden wijken nogal aanzienlijk af van de gemiddelde snelheid van 0,73 m/s. Uit dit voorbeeld blijkt dat het zinvol kan zijn om de met de niet-stationaire eenparige berekening gevonden ongunstigste situatie door te rekenen met stationaire niet-eenparige stroming.

Figuur 11.1 Takken en knooppunten van de boezemkanalen van het Oldambt



Figuur 11.3. Stroomsnelheid in tak 631 op tijdstip 8,5 uur