



INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN WATERHUISHOUDING
INSTITUTE FOR LAND AND WATER MANAGEMENT RESEARCH
P.O. BOX 35, WAGENINGEN, THE NETHERLANDS

Berekening van maatgevende afvoeren, onafhankelijk van gemeten afvoeren

G. W. Bloemen

Verspreide overdrukken
Miscellaneous Reprints **131**

Uit:
From:

Polytechn. Tijdschrift
19, 1972

Berekening van maatgevende afvoeren, onafhankelijk van gemeten afvoeren

G. W. BLOEMEN Ing.

Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding
Wageningen



Overdruk uit Polytechnisch tijdschrift editie Bouwkunde Wegen- en waterbouw nr. 19 – 1972

Berekening van maatgevende afvoeren, onafhankelijk van gemeten afvoeren

G. W. BLOEMEN*

1. Inleiding

Men kan zich afvragen of het meten van afvoeren in een niet verbeterd gebied een aanvaardbare basis vormt voor het vaststellen van de afvoernormen die bij verbetering van de ontwatering moeten worden aangehouden. De gemeten afvoeren immers zijn sterk gebonden aan de bestaande ontwateringstoestand, en het feit alleen al dat de behoefte aan verbetering hiervan bestaat, wijst er op, dat de afvoeren als gevolg van verbetering kunnen veranderen. Ook gemeten grondwaterstanden behoeven niet bepalend te zijn voor de grootte van de maatgevende afvoer; ze geven alleen de behoefte aan verbetering van de ontwatering aan.

Onafhankelijk van bestaande afvoeren of ontwateringstoestanden kunnen afvoernormen worden berekend, indien de eisen van gewas en bedrijfsvoering – beschreven door een hoogst toelaatbare grondwaterstand en de frequentie waarmee deze mag worden overschreden – bekend worden verondersteld. De hoogte en de frequentie van het voorkomen van bepaalde grondwaterstanden hangt namelijk af van de bergings- en doorlatendheidseigenschappen van de grond, van de hydrologische ontsluiting van het gebied en van de plaatselijke intensiteit van neerslag en verdamping. Bovendien kunnen in sommige gevallen kwel of wegzijging nog van invloed zijn. Dit principe is al eerder aangegeven door De Zeeuw (1954).

In dit artikel wordt een rekenmodel besproken dat de hiervoor genoemde factoren betreft in een bepaling van de samenhang tussen de bergingscapaciteit en de noodzakelijke afvoer in een gebied. De methode heeft betrekking op die situaties waarin de oppervlakteafvoer is te verwaarlozen, die niet het gevolg is van inundatie door stijging van het grondwater tot aan het maaiveld.

Bij de berekening is als kleinste tijdseenheid één etmaal genomen; de maatgevende afvoer is in millimeters per etmaal berekend. Gedurende kortere tijdsintervallen zullen afvoertoppen van grotere intensiteit met daarbij behorende slootpeilen kunnen optreden.

2. De afgeleiden van regenduurlijnen

Als oppervlakteafvoer van geen betekenis is, hangt de afvoerintensiteit in de ontwateringsmiddelen sterk samen met de uitstromingsintensiteit.

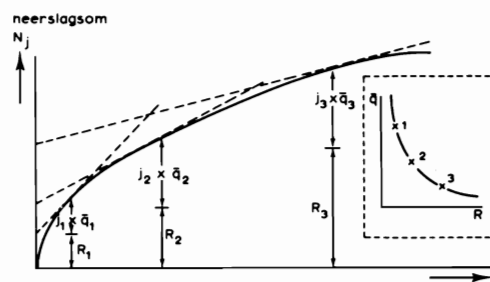
Tussen de maatgevende afvoer en het peil in de leidingen zal dan een veel directer verband bestaan dan wanneer een belangrijk deel van de afvoer onafhankelijk van de grondwaterstroming tot stand komt. Het peil van de leidingen moet bij grondwaterafvoer immers ruimte laten voor voldoende drukverval in de grond, omdat anders de uitstroming geremd wordt en de vereiste ontwatering niet tot stand kan komen. De maatgevende afvoer en de drooglegging in de leiding kunnen bij hoofdzakelijk grondwaterafvoer dan ook niet onafhankelijk van elkaar worden vastgesteld, doordat zij door hydrologische ontsluiting en doorlatendheidsconstanten aan elkaar gebonden zijn.

Hoe in principe bij een aanvaardbaar geachte overschrijdingskans van een hoogst toelaatbare grondwaterstand, ofwel de kritieke grondwaterstand, de maatgevende afvoer en de daarbij behorende drooglegging moeten worden gevonden, volgt uit de overweging dat zonder oppervlakteafvoer de kritieke grondwaterstand zal worden overschreden wanneer in een bepaalde periode meer regen valt dan in de grond geborgen en/of afgevoerd wordt. De kans op overschrijding van deze kritieke grondwaterstand is dus eigenlijk de kans op overschrijding van een neerslagsom. Hoe groot deze kritieke neerslagsom is, volgt uit kansverdelingen van de neerslaghoeveelheden nadat is beslist met welke frequentie de overschrijding van de kritieke grondwaterstand toelaatbaar is. Uit deze kansverdelingen kunnen zogenaamde regenduurlijnen worden geconstrueerd, die de samenhang weergeven tussen het aantal dagen j en de grootte van de j -daagse neerslagsom N_j , die met toelaatbare frequentie wordt bereikt of overschreden. In figuur 1 is een dergelijke lijn weergegeven.

De tangens van de raaklijn aan de regenduurlijn in figuur 1 geeft aan hoe groot de gemiddelde grondwaterafvoer moet zijn in een periode waarvan de lengte door de abscis van het raakpunt wordt aangegeven. Het snijpunt van deze raaklijn met de ordinaat geeft de voor deze afvoerintensiteit noodzakelijke bergingscapaciteit aan.

De inzet in figuur 1 toont van welk type de samenhang tussen de bergingscapaciteit R en de gemiddelde dagafvoer q is. Als gevolg van de degressieve toename van de kritieke neerslagsom neemt volgens figuur 1 bij een toenemende bergingscapaciteit het af te voeren gedeelte van de neerslag af in verhouding tot het aantal dagen waarin dit moet gebeuren. Bij beheerste ontwatering zal dus bij afnemende bergingscapaciteit de gemiddelde dagafvoer moeten toenemen. Ieder punt op krommen zoals die in de inzet

* Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.



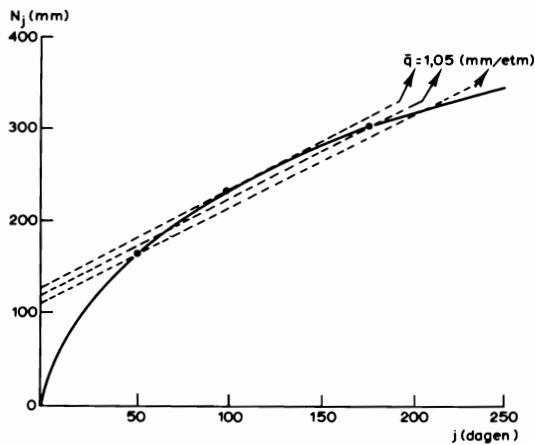
1. Schematische voorstelling van een regenduurlijn met het principe van de afleiding van de in de inzet weergegeven samenhang tussen de bergingscapaciteit R en de gemiddelde dagafvoer (q) in j -dagen

in figuur 1 heeft dus als coördinaten een combinatie van bergingscapaciteit en afvoerintensiteit. Voor gegeven stromingconstanten verhouden de gemiddelde en maatgevende grondwaterafvoeren zich als de bijbehorende stijghoogteverschillen. Ze zijn uiteraard gecorreleerd en de samenhang tussen bergingscapaciteit en maatgevende afvoer kan worden weergegeven door een lijn die evenwijdig loopt met de lijn die de samenhang tussen bergingscapaciteit en gemiddelde afvoer weergeeft. Wanneer hoofdzakelijk grondwaterafvoer optreedt, zijn grondwater- en open waterpeilen gecorreleerd en tussen bergingscapaciteit en open waterpeilen bestaat dan verband. In paragraaf 4 zal blijken dat bij gegeven waarden van enige constanten, die de ontwateringstoestand aan het begin van de j -daagse periode en de bergingseigenschappen van de grond beschrijven, de drooglegging een functie is van de bergingscapaciteit. Daardoor zal uit gegeven regenduurlijnen en voor de gegeven hydrologische voorwaarden een samen-

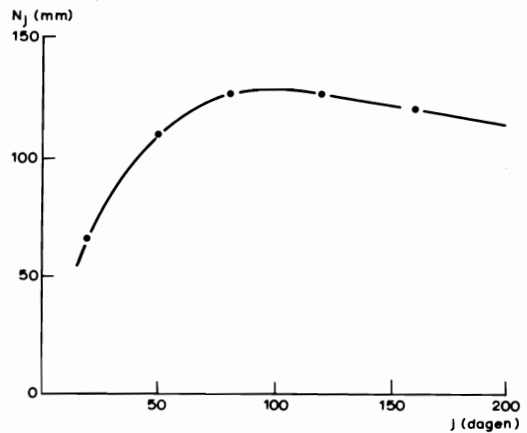
hang tussen drooglegging en maatgevende afvoer afgeleid kunnen worden, die ook van het type in de inzet in figuur 1 is. Deze krommen zullen de afgeleiden van de regenduurlijnen worden genoemd. De afgeleide geeft aan hoe door een toenemende ontwateringssnelheid een kleinere drooglegging met een grotere maatgevende afvoer behoort samen te gaan.

3. De constructie van de afgeleiden van een regenduurlijn

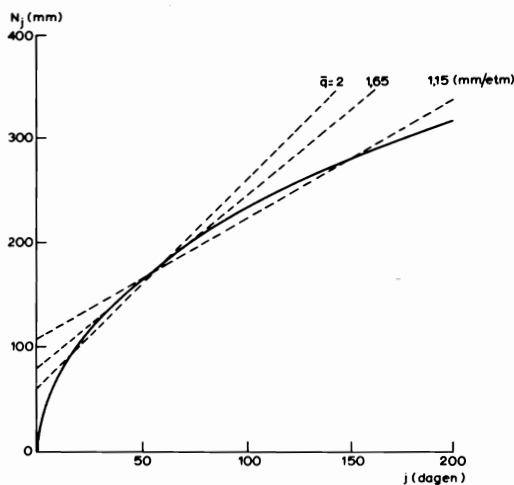
In figuur 2 wordt verduidelijkt dat, wanneer met een vaste waarde voor de gemiddelde dagafvoer uit opklimmende j -daagse neerslagsommen op een regenduurlijn het intercept op de ordinaat wordt bepaald, de hoogste waarde van dit intercept behoort bij een raaklijn aan de regenduurlijn. Op deze wijze kunnen de coëfficiënten van raaklijnen aan die regenduurlijn in punten die opklimmende neerslagsommen voorstellen, worden gevonden. Een aantal punten op krommen zoals weergegeven in figuur 1 kan nu worden



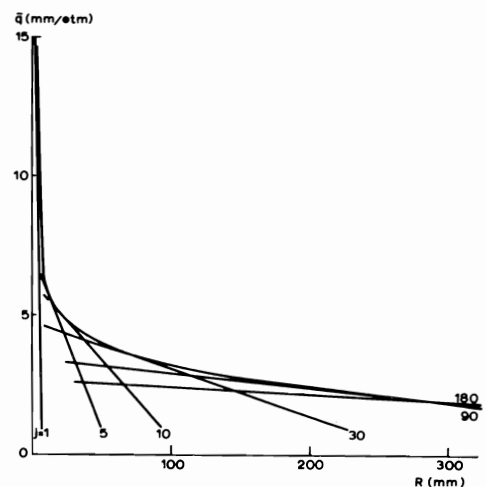
2. Wanneer door punten op een regenduurlijn, die opklimmende neerslagsommen voorstellen, lijnen worden getrokken met een vaste hellingshoek, waarvan de tangens de gemiddelde dagafvoer q aangeeft, dan is de lijn met het hoogste intercept op de Y-as een raaklijn aan de regenduurlijn



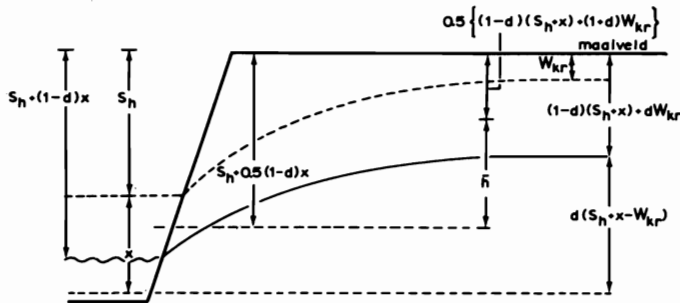
3. Het Y-intercept van de in figuur 2 bedoelde raaklijn is het hoogste punt op een kromme waarvan de coördinaten zijn de j -waarden van een beperkt aantal punten op de regenduurlijn en de Y-intercepten van lijnen door deze punten met een gelijke hellingshoek



4. Van lijnen met verschillende hellingshoek door één punt op een regenduurlijn is er slechts één raaklijn aan die regenduurlijn



5. Schatting van de kromme, die de samenhang aangeeft tussen de bij elkaar behorende bergingscapaciteit (R) aan het begin van de j -daagse periode en de gemiddelde dagafvoer (q) in die periode bij een zekere overschrijdingstolerantie van een kritieke grondwaterdiepte



6. Schematisering van de ontwateringstoestand aan het begin van een j -daagse periode

gevonden, door voor een aantal opklimmende neerslagsommen op een gegeven regenduurlijn vast te stellen bij welke j -waarde en dagafvoer het hoogste Y -intercept wordt gevonden. Een nadeel hierbij is dat dit zou moeten gebeuren voor een aantal neerslagsommen met de kleinste mogelijke j -intervallen.

Grafisch is er echter een vereenvoudiging mogelijk. Als voor een beperkt aantal punten op een regenduurlijn het bij een gegeven gemiddelde dagafvoer behorende Y -intercept, dat de bergingscapaciteit voorstelt, wordt bepaald, kan de grootte van het intercept worden uitgezet tegen j , en het bij de raaklijn behorende intercept kan op een vloeiende kromme door deze punten als de hoogste waarde worden afgelezen. In figuur 3 wordt dit geïllustreerd met cijfers, gemeten in figuur 2.

Een eenvoudiger constructie is echter die volgens welke eveneens voor een beperkt aantal neerslagsommen, het Y -intercept wordt bepaald voor verschillende waarden van de gemiddelde dagafvoer. Volgens figuur 4, die dit principe aangeeft, is er nu ook maar één combinatie die een raaklijn aan de regenduurlijn beschrijft. Wanneer de verschillende gemiddelde dagafvoeren en bijbehorende Y -intercepten voor één j -daagse neerslagsom tegen elkaar worden uitgezet, liggen ze op een rechte lijn. Hierop bevindt zich maar één punt waarvan de coördinaten gelijk zijn aan de coëfficiënten van de raaklijn aan de regenduurlijn in het punt dat de j -daagse neerslagsom voorstelt.

Aan weerszijden van dit punt worden combinaties aangegeven die de coëfficiënten zijn van raaklijnen aan regenduurlijnen met een lager niveau dan gegeven is. In figuur 5 zijn voor enige neerslagsommen met toenemende j -waarden op dezelfde regenduurlijn deze lijnen getekend. Hieruit blijkt dat, wanneer de lijnen met voor de kleinste mogelijke tijdseenheid opklimmende j -daagse neerslagsommen bepaalde coördinaten q en R zouden worden getekend, er een patroon van elkaar snijdende rechte lijnen zou ontstaan. Dit patroon zou aan één kant worden begrensd door een kromme, gevormd door de punten die als coördinaten de coëfficiënten van alle raaklijnen aan de gegeven regenduurlijn hebben. In figuur 5 is het beloop van deze kromme geschat, door de lijn te trekken waaraan alle berekende elkaar snijdende lijnen éénmaal raken.

De constructie van de kromme die in par. 2 de afgeleide van de regenduurlijn werd genoemd, gaat in principe zoals hierboven is aangegeven. De samenhang tussen bergingscapaciteit en drooglegging wordt echter beheerst door doorlatendheids- en bergingseigenschappen. De coördinaten „drooglegging” en „maatgevende afvoer” van de lijnen die het patroon vormen dat het beloop van de afgeleide van de regenduurlijn bepaalt, moeten daarom uit opklimmende neerslag-

sommen op deze duurlijn worden berekend met behulp van een rekenmodel waarin parameters voor berging en afvoer voorkomen.

4. Het principe van een rekenmodel

Hoe afvoercoëfficiënten en de daarbij behorende drooglegging worden berekend, kan het eenvoudigste worden aangegeven door aan te nemen dat de j -daagse neerslagsom N_j zodanig verdeeld is, dat de grondwaterdiepte gedurende de j -daagse periode rechtlijnig met de tijd afneemt en dat op de laatste dag de hoogst toelaatbare grondwaterstand is bereikt. De kritieke j -daagse neerslagsom N_j wordt over bergingscapaciteit R en de afstroming q verdeeld als:

$$N_j = R + pjq \quad (1)$$

De factor p geeft aan, gedurende welk gedeelte van het aantal dagen j afstroming plaatsvindt. De berekening wordt mogelijk wanneer zowel de afvoer als de berging beschreven kunnen worden als een functie van het verschil tussen twee niveaus. Wanneer alleen grondwaterafvoer optreedt, is dit voor de gemiddelde dagafvoer q het gemiddelde drukverval h tussen het gemiddelde grondwaterniveau W en het gemiddelde slootpeil S . In het eenvoudigste geval geldt dan dat $q = 8 kD(S - W)/l^2$.

De factoren k , D en l hebben de uit de formule van Hooghoudt bekende betekenis en zijn tezamen een maat voor de ontwateringssnelheid. $8 kD/l^2$ wordt hierna met b aangegeven.

Hoe (1) kan worden uitgewerkt tot een vergelijking waaruit de drooglegging kan worden opgelost, blijkt uit de bijlage en figuur 6. De drooglegging aangegeven als het verschil tussen het hoogwaterpeil in de sloot en het maaiveld van lage terreingedeelten, wordt daarbij aangeduid met S_h , de waterdiepte bij maatgevende afvoer met x en de kritieke grondwaterdiepte ten opzichte van maaiveld met W_{kr} . Deze grootheden, uitgedrukt in meters onder maaiveld, worden geschreven met een positief teken.

Ook N_j wordt in meters uitgedrukt. De grond- en slootwaterstand aan het begin van de j -daagse periode zijn na verbetering van de ontwatering in principe onbekend. Daarom wordt een factor d ingevoerd, waarmee het mogelijk wordt om deze beginstanden te beschrijven met S_h , x en W_{kr} . Ook de factor p in (1) kan in d worden uitgedrukt. Uit de bijlage blijkt dat de term pjq in (1) kan worden geschreven als:

$$pjq = \frac{bj}{1-d} \cdot 0.5(1+d)(S_h - W_{kr}) \quad (2)$$

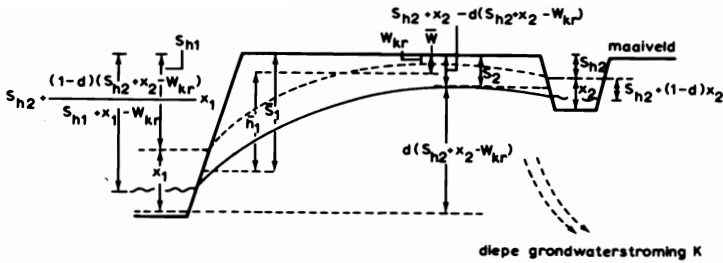
$$\text{waarin: } \frac{1}{1-d} = 1 \text{ als } 1-d \leq 1 \quad (2a)$$

De vraag hoeveel water geborgen wordt bij stijging van het grondwater van de begin-grondwaterstand W_0 naar W_{kr} moet door integratie worden opgelost. Hiervoor is aangenomen dat de bergingscoëfficiënt μ met de grondwaterdiepte W verandert volgens $\mu = fW^m$ (Makkink 1962; Bloemen, 1970). De oplossing voor de berging wordt dan:

$$R = \frac{f}{m+1} \left(W_{kr}^{m+1} - W_{kr}^{m+1} \right)$$

of met W_0 geschreven zoals in de bijlage sub 2 is aangegeven:

$$R = \frac{f}{m+1} \left[W_{kr}^{m+1} - \left\{ (1-d)(S_h + x) + dW_{kr} \right\}^{m+1} \right] \quad (3)$$



7. Schematisering van de ontwateringstoestand aan het begin van een j -daagse periode in een gebied met stromingen naar sloten, een grote leiding en een ver verwijderde rivier

Aangezien een grondwaterstijging het gedeelte van de neerslagsom dat in de j -daagse periode afgevoerd moet worden, verkleint, moet in (1) dit deel met een negatief teken worden ingevuld. Verg. (1) wordt nu:

$$N_j = - \frac{f}{m+1} \left[W_{kr}^{m+1} - \left\{ (1-d)(S_h + x) + dW_{kr} \right\}^{m+1} \right] + \frac{b \cdot j}{1-d} \cdot 0,5(1+d)(S_h - W_{kr}) \quad (4)$$

Als enige onbekende kan S_h uit (4) worden opgelost, nadat voor de overige factoren de waarde is vastgesteld en nadat de j -daagse neerslagsommen die behoren bij de overschrijdingsfrequentie van de kritieke grondwaterstand zijn bepaald.

Nadat S_h is berekend, kan de maatgevende afvoer q_m worden berekend uit het verschil tussen de kritieke grondwaterdiepte en de drooglegging als:

$$q_m = b(S_h - W_{kr}) \quad (5)$$

Met één waarde van b in (4) en (5) vindt men de coördinaten van één punt op één van de lijnen die het patroon vormen dat het beloop van de afgeleide van de regenduurlijn bepaalt.

5. Een rekenmodel voor samengestelde afstroming*

Verg. (4) en (5) zijn alleen bruikbaar wanneer de ontwatering door één enkele stroming plaatsvindt. In de praktijk kunnen echter gelijktijdig verschillende grondwaterstromingen optreden, bijvoorbeeld naar drain en sloot, grotere leiding en rivier. De j -daagse neerslagsom wordt dan over bergingscapaciteit R en afvoer $Q = \sum q_i$ verdeeld als:

$$N_j = R + p_1 q_1 + p_2 q_2 + \dots + p_n q_n \quad (6)$$

De bergingscapaciteit aan het begin van de j -daagse periode kan analoog aan (3) worden geschreven met constanten voor elk der grondwaterstromingen als:

$$R = \frac{f}{m+1} \cdot \left[W_{kr}^{m+1} - \left\{ (1-d_i)(S_{hi} + x_i) + d_i W_{kr} \right\}^{m+1} \right] \quad (7)$$

De afvoer door elk van de stromingen kan analoog aan (2) worden geschreven als:

* De berekeningen die voor deze beschouwing werden uitgevoerd, en de programmering voor de computer van de gehanteerde vergelijkingen werden uitgevoerd door het Instituut voor Wiskunde, Informatieverwerking en Statistiek T.N.O. te Wageningen.

$$p_i q_i = \frac{b_{ij}}{1-d_i} \cdot 0,5(1+d_i)(S_{hi} - W_{kr}) \quad (8)$$

Wanneer men nu met n stromingen te maken heeft, dan komen d_1 tot en met d_n voor. Aangezien er één begin-grondwaterstand is, moet er een bepaalde verhouding bestaan tussen de factoren d_i . Deze zou moeten worden beschreven, omdat de waarden zelf niet gemeten zijn en ze niet onafhankelijk van elkaar geschat kunnen worden. Het is echter mogelijk om de zaak wat te vereenvoudigen.

In de eerste plaats kan een zeer langzame, weinig veranderlijke diepe grondwaterstroming die buiten het gebied tot afstroming komt, door een constante worden aangegeven. Dit heeft het voordeel dat hiermee, behalve een verkleining, ook een vergroting van het waterbezwaar door deze stroming kan worden verantwoord. Als deze hoeveelheid in meters per dag K wordt genoemd, dan is het totaal in j dagen gelijk aan jK meter.

In de tweede plaats kan overal waar met behulp van d_i de begin-grondwaterstand wordt beschreven, dit met constanten voor dezelfde stroming worden gedaan zodat nog maar één constante d over is. Het verdient dan de voorkeur, de constanten te nemen voor die stroming waarvoor men de afgeleide van een regenduurlijn wil kennen.

In de bijlage sub 7 wordt aangegeven wat hiervan de consequenties zijn voor de uitwerking van (6).

Wanneer nu bijvoorbeeld een situatie bestaat zoals schematisch is voorgesteld in figuur 7, dan kan de stroming naar een rivier buiten het gebied als een constante K worden aangegeven. Als de stroming naar de leiding en die naar de sloot respectievelijk met de indices 1 en 2 worden aangegeven en men wil de afgeleide voor de stroming naar de sloot kennen, wordt (6) geschreven als:

$$N_j = jK \frac{f}{m+1} \left[W_{kr}^{m+1} - \left\{ (1-d)(S_{h2} + x_2) + dW_{kr} \right\}^{m+1} \right] + \frac{S_{h1} + x_1 - W_{kr}}{(1-d)(S_{h2} + x_2 - W_{kr})} \cdot j b_1 \cdot \left[S_{h1} + \frac{(1-d)(S_{h2} + x_2 - W_{kr})x_1}{2(S_{h1} + x_1 - W_{kr})} - 0,5 \left\{ (1-d)(S_{h2} + x_2) + (1+d)W_{kr} \right\} \right] + \frac{b_2}{1-d} \cdot 0,5(1+d)(S_{h2} - W_{kr}) \quad (9)$$

Na de oplossing van S_{h2} uit (9) kan de maatgevende afvoer door de sloot worden berekend als:

$$q_{m2} = b_2(S_{h2} - W_{kr}) \quad (10)$$

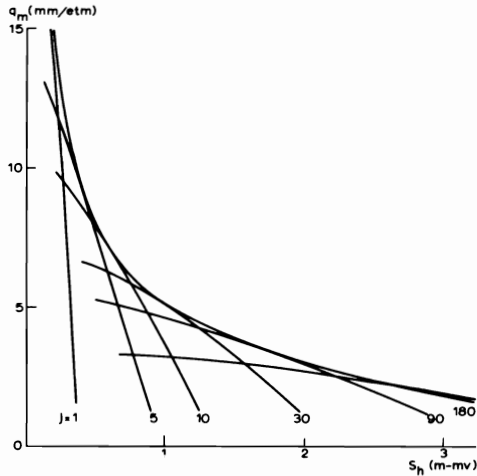
Met (9) en (10) berekent men uit opklimmende j -daagse neerslagsommen op een regenduurlijn en met verschillende waarden voor b_2 de coördinaten van de lijnen die het patroon vormen dat het beloop van de afgeleide voor de grondwaterstroming naar de sloot bepaalt.

Afhankelijk van de drainerende werking van de leiding is de maatgevende afvoer hierin wat hoger dan die in de sloot en kan worden berekend als

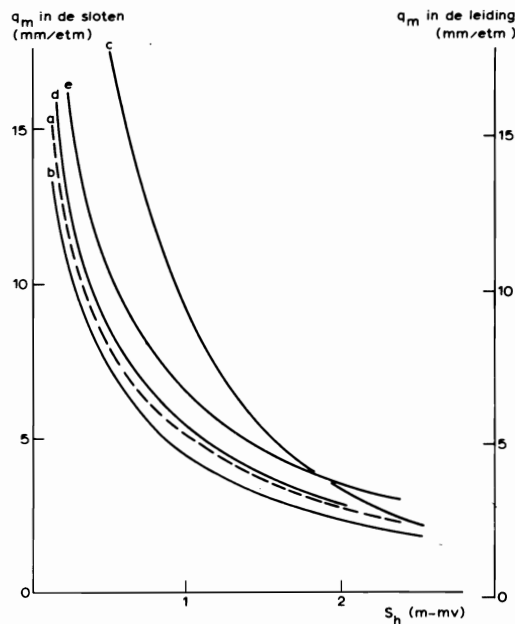
$$Q = q_{m2} + b_1(S_{h1} - W_{kr}) \quad (11)$$

6. Grote verscheidenheid in afgeleiden van regenduurlijnen

In figuur 8 is de afgeleide van dezelfde regenduurlijn gegeven waaruit samenhang in figuur 5 werd bepaald. De afgeleide werd geconstrueerd met behulp van de uit (9) en (10) berekende punten op de lijnen met de coördinaten S_h en q_m . Deze lijnen zijn niet meer recht, aangezien de bergingscoëfficiënt niet rechtlijnig met de grondwaterdiepte samenhangt.



8. De schatting van de afgeleide van dezelfde regenduurlijn, waaruit de kromme in figuur 5 werd berekend



9. Verschillende afgeleiden van regenduurlijnen; a is de afgeleide in figuur 8; b is de afgeleide van dezelfde regenduurlijn, berekend voor een wegzijgingsverlies van 0,02 mm/etm en ontwatering naar twee niveaus. Herhalingstijd van overschrijding

$$T = 1 \text{ jaar, } c \text{ als } a, T = 10 \text{ jaar} \quad \frac{f}{m+1} =$$

$$0,06, d = 0,5; d \text{ als } b, b = 0,6; e \text{ als } b, \frac{f}{m+1} =$$

$$= 0,03$$

Eenvoudigheidshalve werd met de berekeningen voor de afgeleide in figuur 8 aangenomen dat $K = 0$ en $b_1 = 0$, zodat feitelijk (9) en (10) werden herleid tot (4) en (5). In figuur 9 is behalve de afgeleide a uit figuur 8 ook een afgeleide b van dezelfde regenduurlijn gegeven, waarbij een klein bedrag voor wegzijging in rekening is gebracht, terwijl verder grondwaterstroming naar twee ontwateringsniveaus binnen het gebied optreedt. Dit is dus de situatie die in figuur 7 en door (9) werd voorgesteld; in par. 10 wordt hier verder op ingegaan. Als gevolg van het kleine infiltratieverlies is de maatgevende afvoer zowel in de sloot als in de leiding volgens afgeleide b wat kleiner dan volgens afgeleide a. De betekenis van de grondwaterafvoer naar de leiding ten opzichte van die naar de sloot is zeer gering.

Uit de ligging van de afgeleide b ten opzichte van c, waarvoor is aangenomen dat $T = 10$ jaar, $f/(m+1) = 0,06$ en $d = 0,5$, blijkt dat een verschillende herhalingstijd van de overschrijding van de kritieke grondwaterdiepte een grote invloed heeft op de afgeleide. In feite verandert met de herhalingstijd de regenduurlijn. Uit de ligging van de afgeleiden d en e ten opzichte van b blijkt, dat een hogere waarde voor de factor d en een lagere voor de bergingsconstante $f/(m+1)$ tot gevolg hebben dat de afgeleiden bij dezelfde stromingsconstanten verschuiven naar hogere waarden voor de drooglegging en de maatgevende afvoer. Dit is een direct gevolg van een verkleining van de bergingscapaciteit aan het begin van de j-daagse perioden naar evenredigheid van de verandering in de waarde van genoemde constanten.

Figuur 9 bevestigt de juistheid van de voorspelling in par. 2 over de vorm van de afgeleiden van regenduurlijnen. Het blijkt dat uit dezelfde regenduurlijn afgeleiden kunnen worden berekend met dezelfde grondvorm, maar ze vertonen onderling wel aanzienlijke verschillen. De wijzigingen zijn het gevolg van de verandering van de constanten in (9).

Niet in figuur 9 is aangetoond dat de afgeleiden van regenduurlijnen veranderen door wijziging van de regenduurlijn als gevolg van:

- landelijke verschillen in neerslagregime;
- de tijd van het jaar waardoor de regenduurlijn geldt, omdat de neerslagintensiteit een seizoenschommeling vertoont;
- de grootte van het gebied waarvoor de regenduurlijn geldt, omdat de extremen in puntmetingen van de neerslag zullen worden afgevlakt wanneer gemiddelde regenduurlijnen voor verscheidene neerslagstations zouden worden samengesteld.

7. Bepaling van de parameters in (9)

Aangezien de verscheidenheid aan afgeleiden van regenduurlijnen zeer groot is, dienen ze bij voorbereiding van een ontwerpplan te worden geconstrueerd voor die combinaties van waarden van de parameters (9) die in het gebied worden aangetroffen. Deze waarden moeten eerst worden vastgesteld.

De constante f in $f/(m+1)$ geeft aan, hoe groot de bergingscoëfficiënt μ is bij een grondwaterdiepte van één meter beneden maaiveld, terwijl m aangeeft hoe deze coëfficiënt toeneemt bij dalende en afneemt bij stijgende grondwaterstand. Het zijn parameters in de waterbalansvergelijking van de grond en ze kunnen evenals de parameter b_i voor de grondwaterstroming grafisch of numeriek worden bepaald door oplossing van deze vergelijking (Bloemen, 1966, 1970). Hetzelfde geldt voor de grootte van de kwelstroming of de wegzijging (Bloemen, 1968).

De parameters voor de berging kunnen voor evenwichtsvochtgehalten uit de vorm van de pF -krommen worden berekend (Makkink, 1962).

Aangezien de bovenbedoelde oplossing van de waterbalansvergelijking is gebaseerd op gegevens over de grondwaterbeweging, verkrijgt men in eerste instantie informatie met een meer of minder sterke plaatselijke betekenis. Over het algemeen echter zullen voor niet te kleine gebieden gemiddelde waarden voor de parameters kunnen worden bepaald met gegevens van de grondwaterstandsbuizen van de Dienst Grondwaterverkenning T.N.O.

Naar een als overschrijding van een kritieke grondwaterstand geformuleerd landbouw-economisch criterium is nog weinig onderzoek verricht (Sieben, 1965). Over de herhalingstijd van een overschrijding bestaan bij de ontwerptechniek opvattingen die voor de berekeningen overgenomen kunnen worden. De hierbij behorende kritieke grondwaterstand W_{kr} zal echter moeten worden geschat.

S_{hi} en x_i zijn civieltechnische grootheden uit het ontwerpplan en kunnen hieraan worden ontleend.

De hoogte van de grondwaterstand aan het begin van j -daagse perioden, zal gedurende het jaar variëren en daarom zal de parameter d geen constante waarde hebben. Feitelijk moet deze waarde worden gebaseerd op een kansverdeling van de neerslag en verdampingsoverschotten, voorafgaande aan de j -daagse perioden. Aangezien hierover niets bekend is, zal de waarde van d moeten worden geschat.

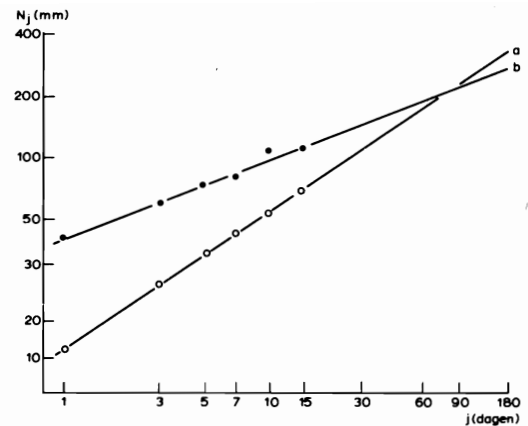
Ook de waarde van de kritieke grondwaterstand en het overschrijdingscriterium zal gedifferentieerd kunnen worden. Men zal 's zomers aan lagere kritieke grondwaterstanden denken dan 's winters en deze ook met een kleinere frequentie van overschrijding willen accepteren.

8. De constructie van regenduurlijnen

Omdat verschillende parameters in (9) een met het seizoen veranderende waarde kunnen hebben, terwijl ook het overschrijdingscriterium dat de grootte van de j -daagse neerslagsommen bepaalt, kan veranderen, zal men regenduurlijnen voor opeenvolgende data en voor de daarbij aangenomen overschrijdingskansen moeten construeren. De afgeleiden van deze regenduurlijnen zullen met de passende waarden voor de parameters moeten worden berekend.

De j -daagse neerslagsommen, die met een bepaalde kans zullen optreden, kunnen worden gevonden door vereffening van overschrijdingsfrequenties die voor 25 neerslagstations door het K.N.M.I. zijn gepubliceerd. Voor de stations Hoofddorp en Winterswijk zijn deze frequenties vereffend, door de kansverdeling van j -daagse neerslagsommen als Goodrich-krommen voor te stellen (De Boer, 1957). De hoeveelheid neerslag in j -dagen, die met een bepaalde herhaling zal optreden of worden overschreden, kan met constanten worden berekend, die voor verschillende j -waarden en maanden zijn opgegeven. In de meeste gevallen zal men dus nog op stations zijn aangewezen, waarvan een vereffening ontbreekt. Men zal dan zelf de vereffening moeten uitvoeren en daarbij de hieronder beschreven werkwijze kunnen volgen.

In de huidige ontwerptechniek gaat men uit van een herhalingstijd in jaren waarmee bepaalde afvoeren optreden. De overschrijdingsfrequenties P van neerslagsommen die eenmaal in T jaren optreden, worden door De Boer berekend als $P = 1/(n \times T)$, waarin n het aantal j -daagse perioden in één maand is. Deze formule levert voor j -daagse perioden van 15 dagen nog een overschrijdingsfrequentie op, die weinig van



10. De neerslagsommen voor $j \geq 15$ worden gevonden door extrapolatie op een rechte lijn die ontstaat door de neerslagsommen voor $j = 15$ en kleiner op dubbellogaritmisch papier tegen de bijbehorende j uit te zetten; lijn a is voor januari, Winterswijk, overschrijdingskans 1 x per jaar; lijn b is voor augustus, Winterswijk, overschrijdingskans 1 x per 50 jaar

die voor ééndaagse perioden verschilt. De op deze wijze berekende sommen voor 1 tot en met 15 dagen liggen nog aanvaardbaar op een rechte lijn als men ze op dubbel-logaritmisch papier tegen j uitzet. Dat is ook nog het geval als men niet de door De Boer vereffende waarden neemt, maar de onvereffende. In figuur 10 is dit voor enige maanden voor het station Winterswijk aangetoond.

Voor grotere waarden dan $j = 15$ verandert deze rechtlijnigheid gauw en een regenduurlijn op metrische schaal getekend, vertoont dan zelfs een sterke daling tot bij $j = 30$ en vervolgens weer een afnemende toename. De oorzaak hiervan is dat bij de elementaire neerslagverdelingen die door het K.N.M.I. zijn samengesteld het aantal perioden binnen een maand afneemt met toenemende j -waarden. Er zijn nog geen regenduurlijnen beschikbaar waarvoor dit aantal perioden als parameter geldt. Daarom is aangenomen dat de werkwijze die figuur 10 opleverde, de beste benadering geeft van regenduurlijnen van het gevraagde type. Voor $j > 15$ kan, door extrapolatie op rechte lijnen zoals in figuur 10 weergegeven, de neerslagsom worden afgelezen. Bovendien worden de waarden voor $j = 1$ tot en met 15 nog wat vereffend.

De j -daagse neerslagsommen waarvan frequentieverdelingen bekend zijn, hebben betrekking op puntmetingen. Men zou zich kunnen voorstellen dat in (9) N_j wordt vervangen door rN_j , waarin r een reductiefactor is voor puntsgewijs gemeten neerslagsommen, afhankelijk van gebiedsgrootte en tijdvaklengte en misschien van het seizoen. Er is in Nederland echter weinig bekend over deze relaties tussen gebiedsgrootte en neerslagintensiteit per tijdseenheid, en bij de hierna gegeven voorbeelden is er geen rekening mee gehouden.

9. Onafhankelijke berekening van draandiepte en maatgevende afvoer in gedraineerde gebieden

De toepassing van de afgeleiden van de regenduurlijnen kan het eenvoudigste worden gedemonstreerd aan gronden die voor een bevredigende ontwatering

volledig afhankelijk zijn van een buizendrainage. Aangezien de afstroming door de grond naar de sloot dan van geen belang is, kan in (9) $b_1 = 0$ worden gesteld. De schommelingen van het slootwater hebben geen betekenis zolang de uitmondingen van de drains niet onder water komen en daarom geldt dat $x_2 = 0$, want de waterdiepte in de drains is een te verwaarlozen grootheid. Berekening van de drooglegging is daardoor in feite ook een berekening van de noodzakelijke draindiepte bij gegeven drainafstand geworden.

Het hoogwaterpeil in de sloot of leiding waarin de drains uitmonden, behoort in principe onder de draindiepte te liggen, omdat anders de uitstroming wordt geremd. Berekening van de maatgevende afvoer is dan van belang voor de dimensionering van deze slooten of leidingen.

Het hier gegeven voorbeeld wordt gevonden op Noord-Beveland. Een aanzienlijke oppervlakte werd hier in het verleden gedraineerd op 0,50 m diepte met een onderlinge afstand van 20 m. Deze combinatie ontstond door de drainage aan te passen aan een van oudsher bestaande begreppeling. Langzaam maar zeker vervangen hier nieuwe drainages deze oude.

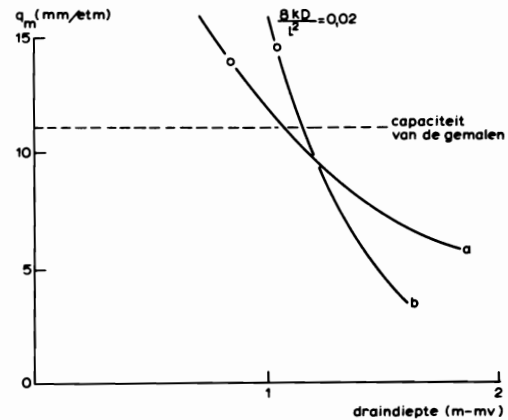
Door bestudering van de grondwaterbeweging in deze gronden als reactie op regenbuien, kon worden berekend dat $f/(m+1) = 0,04$ in de winterperiode; in de maanden mei tot en met augustus geldt dat $f/(m+1) = 0,06$. De stroming naar de drains vindt betrekkelijk snel plaats, aangezien $b_2 = 0,02$. De ondergrondse afvoer is te verwaarlozen, dus $K = 0$. Aangezien echter boven de drains weinig water kan worden geborgen, zal 's winters de bergingscapaciteit langdurig voor het grootste deel benut zijn en komt wateroverlast vaak voor. 's Zomers zal dit in mindere mate of in het geheel niet het geval zijn, aangezien de verdamping dan een grote rol speelt.

De gronden zijn overwegend als bouwland in gebruik en men zal daarom in de voorjaars- en zomermaanden aan de kritieke grondwaterdiepte en de overschrijdingsfrequentie daarvan strengere eisen stellen dan in de winter.

In tabel I zijn voor de opeenvolgende maanden van het jaar de waarden gegeven die redelijke schattingen lijken te zijn van de constanten in (9) en van het herhalingsinterval T dat het niveau bepaalt van de regenduurlijn waarvan de afgeleiden worden berekend.

Tabel I Waarden van de constanten in vergelijking (8) voor de berekening van de draindiepte

	$\frac{f}{m+1}$	d	W_{kr} (m)	T (jaren)
januari	0,04	0,75	0,15	1
februari	0,04	0,50	0,30	10
maart	0,04	0,25	0,30	10
april	0,04	0,25	0,30	10
mei	0,06	0,0	0,30	50
juni	0,06	0,0	0,30	50
juli	0,06	0,0	0,30	50
augustus	0,06	0,0	0,30	50
september	0,04	0,25	0,30	50
oktober	0,04	0,50	0,30	10
november	0,04	0,75	0,15	1
december	0,04	0,75	0,15	1



11. De afgeleiden voor november (a) en voor augustus (b) berekend met constanten voor kleigronden op Noord-Beveland volgens tabel I uit j -daagse neerslagsommen gemeten op het station Kerkwerwe

Het dichtst bij Noord-Beveland gelegen K.N.M.I.-station waarvan frequentieverdelingen van j -daagse neerslagsommen bekend zijn, is Kerkwerwe (K.N.M.I. 1958). Hieruit werden enkele j -daagse neerslagsommen berekend voor de eerste dag van de opeenvolgende maanden en voor het in tabel I opgegeven herhalingsinterval T . Daaruit werden de voor iedere maand geldende afgeleiden berekend. Het blijkt nu dat deze afgeleiden zeer verschillend uitvallen, maar dat die voor de maanden met de hoogste d -waarden evenals die voor de grootste herhalingstijd T de grootste maatgevende afvoer aangeven bij draindiepten van minder dan 1,20 m. Van beide groepen liggen de afgeleiden voor november en voor augustus het hoogst. Figuur 11 toont deze afgeleiden en het punt $8KD/12 = 0,02$ geeft aan waar het gegeven drainagegeval erop voorkomt.

Het blijkt nu dat aan het voor de wintermaanden gestelde ontwateringscriterium gemakkelijker is te voldoen dan aan dat voor de zomermaanden.

Immers, bij de geldende drainagesnelheid is in het eerste geval de noodzakelijke draindiepte 0,85 m, in het tweede 1,03 m, terwijl de bijbehorende afvoer, die dan resp. éénmaal per jaar of éénmaal in 50 jaar wordt overschreden resp. 14 en 14,5 mm/etm. bedraagt. Nu laat het criterium voor de wintermaanden weinig ruimte, dat voor de zomermaanden veel meer. Men zal in dit geval daarom de afgeleide voor november als uitgangspunt voor verdere beschouwingen kiezen. Het gevolg is dat daardoor de herhalingstijd van de overschrijdingen van de kritieke grondwaterstand in de zomer wordt verkleind. Zou deze bijvoorbeeld tot 40 of 30 jaar worden teruggebracht, dan is dit landbouw-economisch vermoedelijk aanvaardbaarder dan een 0,20 m diepere drainage.

Bedoelde verdere beschouwingen hebben betrekking op een keuzemogelijkheid in het civiel-technische vlak. Men kan bijvoorbeeld een maatgevende afvoer van 14 mm/etm te hoog vinden. De bestaande gemalen op Noord-Beveland hebben een capaciteit van ongeveer 11 mm/etm. Zou men de drainage hierbij willen aanpassen, dan zou volgens de afgeleide voor

november in figuur 11 een gemiddelde draindiepte van 1,08 m vereist zijn. Door deze grotere diepte ontstaat een grotere berging die de daling van de afvoercapaciteit compenseert. Nu immers ligt dit drainagegeval bij het punt op de afgeleide, waar geldt $8kD/l^2 = 0,0116$.

Doorlatendheidsconstanten zijn onveranderlijk en de stroomsnelheid is omgekeerd evenredig met het kwadraat van de drainafstand. Daarom zal bij een maatgevende afvoer van 11 mm/etm en een draindiepte van 1,10 m de drainafstand moeten worden vergroot tot:

$$\sqrt{\frac{0,02}{0,0116}} \times 400 = 26 \text{ m.}$$

In deze onderlinge afhankelijkheid van maatgevende afvoer, draindiepte en drainafstand ligt een raakpunt met de civieltechniek en met de economie van het ontwerpplan.

10. Berekening van de maatgevende afvoer voor een middelhoog zandgebied

Door de kleine schaal waarop de ontwatering zich in drainagegevallen afspeelt, verliezen factoren zoals terreinhelling en hoogteverschillen veel van hun betekenis. De berekende draindiepte is een richtgetal dat gemakkelijk in het drainage-advies kan worden toegepast bij het vaststellen van de hoogte van de drainreeksen aan het boven- en benedeneind, daarbij rekening houdend met terreinverhang en verschillen in maaiveldhoogte. De schaalvergroting bij ontbreken van drainage brengt complicaties mee.

Het hoogwaterpeil in de ontwateringsmiddelen wordt immers bepaald door de vereiste drooglegging van bepaalde lage terreingedeelten. In de grote ontwateringseenheden, die bij ontbreken van buizendrainage ontstaan, zullen echter grotere hoogteverschillen van het terrein kunnen voorkomen dan op een te draineren perceel. Voor de grootte van de bergingscapaciteit is dit van veel belang. In het rekenmodel zal men dan ook niet de drooglegging, zoals die voor de laagste terreingedeelten wordt vereist, invoeren, maar deze moeten meten ten opzichte van de gemiddelde terreinhoogte in de afvoergebieden.

Het terreinverhang in de richting van de afwatering van de leidingen heeft voor de berging uiteraard geen betekenis. Men zal het verschil tussen de voor het hoogwaterpeil maatgevende laagste terreingedeelten en de gemiddelde terreinhoogte moeten berekenen zoals dat dwars op de richting van de leiding optreedt. Zeer hoge, geïsoleerde terreingedeelten zoals essen, kunnen daarbij buiten beschouwing blijven.

Als voorbeeld wordt de maatgevende afvoer berekend voor een leiding in een middelhoog zandgebied in de Achterhoek. Verschillende gegevens zijn ontleend aan het plan voor de verbetering van de afwatering van het desbetreffende stroomgebied (K.N.H.M., 1969). Volgens dit plan gaat men uit van een drooglegging van 0,50 m à 0,60 m bij een afvoer die éénmaal per jaar optreedt.

In de berekening is 0,55 m aangehouden. Volgens de hoogtekaart van het betrokken gebied ligt de gemiddelde terreinhoogte in de afvoergebieden dwars op de richting van de leidingen 0,40 m boven de laagste terreingedeelten die het hoogwaterpeil bepalen. Daarom wordt in het rekenmodel ingevuld $S_{h1} = 0,95$ m. De waterdiepte bij maatgevende afvoer in de leiding neemt van boven naar beneden toe van 0,50 m tot 0,75 m. Voor de waterdiepte in de sloten die in de leiding uitmonden, werd arbitrair 0,40 m genomen.

Uit beschikbare gegevens uit andere bron (Bloemen, 1970) blijkt, dat de snelheid waarmee het grondwater naar de leiding stroomt, wordt weergegeven door $b_1 = 0,0002$. Voor de grondwaterstroming naar de sloten geldt dat $b_2 = 0,008$. Er doet zich een klein wegzijgingsverlies voor van 0,02 mm/etm.

Voor de bergingsberekening kan gelden dat $f/(m + 1) = 0,06$.

In tabel II zijn voor de opeenvolgende maanden de toelaatbare herhalingstijd T van de overschrijding van de kritieke grondwaterdiepte opgegeven, evenals de geschatte waarde van d , die de bergingscapaciteit aan het begin van de j -daagse perioden aangeeft.

Uit de j -daagse neerslagsommen, gemeten op het station Winterswijk, met de gegeven herhalingstijd werden nu met de gegeven constanten voor iedere maand de afgeleiden voor de stroming naar de sloten berekend.

Het blijkt dan dat januari de kritieke maand is. Ondanks de korte herhalingstijd van de overschrijding, ligt de afgeleide voor januari veel hoger dan die voor de zomermaanden met een veel langer herhalingsinterval en dus veel hogere neerslagsommen. Het grote verschil in de nog beschikbare berging tussen zomer en winter is echter van overheersende betekenis. Dit wil niet zeggen dat 's zomers nooit de kritieke grondwaterdiepte kan worden bereikt of overschreden, maar wel dat dit met langere herhalingsintervallen dan 50 jaar voorkomt.

In figuur 12 is de afgeleide voor januari gegeven. Onderscheid is gemaakt tussen een waterdiepte in de leiding van 0,75 m en van 0,50 m. Veel verschil maakt dit niet, omdat de drainerende invloed van de leiding niet groot is. Dit blijkt eveneens uit het geringe verschil tussen de maatgevende afvoer in de sloten en dat in de leiding, respectievelijk berekend met (10) en (11). Uit figuur 12 blijkt nu, dat in het desbetreffende gebied bij een drooglegging van 0,55 m de maatgevende afvoer 7,0 mm/etm zou moeten bedragen.

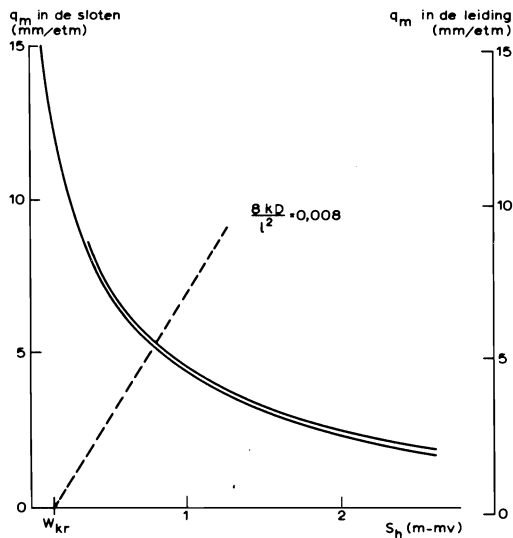
Dit is 0,81 m³/sec. 1 000 ha en wat lager dan de specifieke afvoer van 1 m³/sec. 1 000 ha, die in het verbeteringsplan wordt aangenomen.

Bovendien blijkt uit figuur 12, dat bij de gegeven hydrologische ontsluiting een drooglegging van 0,55 m niet past. De snelheid waarmee het gebied door de sloten wordt gedraineerd, blijkt te klein. Het gevolg is dat bij een drooglegging van 0,55 m de kritieke grondwaterdiepte veel vaker dan éénmaal per jaar wordt overschreden. Het alternatief is een drooglegging van 0,80 m, met door een grotere berging een kleinere maatgevende afvoer, namelijk van 5,2 mm/etm.

Handhaving van een drooglegging van 0,55 m houdt de noodzaak in tot een verkleining van de slootafstand in het gebied. In par. 9 is aangegeven hoe deze zou moeten worden berekend als de huidige slootafstand bekend zou zijn.

Tabel II Waarden van T en d voor de berekening van de maatgevende afvoer in het als voorbeeld genomen middelhoge zandgebied

	T	d		T	d
januari	1	0,5	juli	50	-0,2
februari	1	0,5	augustus	50	-0,2
maart	10	0,4	september	50	0,0
april	10	0,2	oktober	10	0,2
mei	50	0,0	november	1	0,4
juni	50	-0,1	december	1	0,5



12. De afgeleiden voor januari berekend met parameters voor een afvoergebied van middelhoge zandgrond. a. waterdiepte in de leiding 0,75 m; b. waterdiepte in de leiding 0,50 m

Dat in het betrokken type van afvoergebieden een goede ontwatering alleen door diepere of door meer sloten kan worden bereikt, is al eerder gesteld (Bon, 1968) en wordt hier duidelijk bevestigd. Ziet men tegen deze consequenties op, dan is een grotere tolerantie met betrekking tot de overschrijding van de kritieke grondwaterdiepte noodzakelijk.

Het tot voorbeeld gekozen afvoergebied is een vrij homogeen gebied van middelhoge zandgronden. Vooral grotere afvoergebieden zullen dikwijls niet zo homogeen zijn. Het ligt dan meer voor de hand om per onderdeel van het gebied de nodige berekeningen uit te voeren om tot een evenwichtig geheel van hoogwaterpeilen en daarbij passende maatgevende afvoeren te komen.

11. Enige aanvullende opmerkingen en conclusies

Het afvoerproces is in de voorgaande beschouwingen sterk geschematiseerd. Vaak zal de afvoer door ingewikkelder functies worden voorgesteld dan die zijn gebruikt. Door deze in te bouwen, zullen de rekenmodellen wel moeilijker oplosbaar maar waarschijnlijk niet onoplosbaar worden. Het zal echter vaak wel moeilijk zo niet onmogelijk zijn om deze functies op zo grote schaal als voor gebiedsplanning nodig is te leren kennen met zodanig eenvoudige hulpmiddelen, dat dit in het kader van de voorbereiding van een ontwerpplan nog aanvaardbaar is. Bovendien moet men dit aspect zien in het complexe geheel waarin het past. De keus van kritieke grondwaterdiepte en toelaatbare overschrijdingsfrequentie hiervan is voornamelijk arbitrair en zeker van geen grotere degelijkheid dan de geschematiseerde afvoerfunctie, die in ieder geval op waarneming berust. Een en ander neemt niet weg dat het voor de hand ligt om, waar dat mogelijk is, gebruik te maken van voortschrijdende kennis, en bijvoorbeeld een verantwoording van oppervlakteafvoer in het rekenmodel te integreren, zodat de toepassingsmogelijkheden niet beperkt behoeven te blijven tot gebieden zonder oppervlakteafvoer.

Ook moet gestreefd worden naar het gebruiken van geschiktere frequentieverdelingen, bij voorkeur van het neerslagoverschot, die voorwaardelijk zouden moeten zijn. De neerslagoverschotverdeling binnen j -daagse perioden en de hoeveelheden over zekere voorafgaande perioden zouden hierbij de parameters moeten zijn.

De in de paragrafen 9 en 10 gegeven voorbeelden tonen duidelijk aan, wat de praktische consequenties zijn van de afhankelijkheid tussen kritieke grondwaterdiepte, de overschrijdingsfrequentie daarvan, de maatgevende afvoer, de drooglegging en de hydrologische ontsluiting.

Deze afhankelijkheid vloeit voort uit het afvoermechanisme. Er wordt een niet te scheiden verantwoording door geschapen voor alle aspecten van een verbeteringsplan. De besproken rekentechniek kan deze helpen dragen, door de bij elkaar behorende cijfers te verschaffen, daarbij rekening houdend met klimaats- en gebiedskenmerken. Daarom zijn afgeleiden van regenduurlijnen al in een vroeg stadium van voorbereiding van een ontwerpplan van belang.

Literatuur:

- Bloemen, G. W. - 1966: The calculation of evapotranspiration from groundwater depth observations. Commissie voor Hydrologisch Onderzoek T.N.O. Versl. en Meded. 12, 's-Gravenhage;
1968: Determination of constant rate deep recharge or discharge from groundwater level data. J. of Hydrol. 6, 1: 58 - 68.
1970: Berging, afvoer en verdamping in de Gelderse Achterhoek volgens grondwateranalyse. In: Hydrologisch Onderzoek in het Leerinkbeekgebied. 2e interim rapport Comm. ter bestudering van de waterbehoefte van de Gelderse landbouwgronden. Prov. Waterstaat, Arnhem.
- Bon, J. - 1968: Afvoer en berging in verband met beekverbetering, toegelicht aan het stroomgebied van de Luntersebeek. I.C.W. Meded. 107.
- Koninklijke Nederlandse Heidemaatschappij 1969: Verbeteren afwatering stroomgebied Beneden-Slinge, bovenstrooms Onland. Rapp. 183.
- Makkink, G. F. - 1963: Vijf jaren lysimeteronderzoek; een hydrologische studie. Versl. Landbouwk. Onderzoek 681, Pudoc, Wageningen.
- Sieben, W. H. - 1965: Het verband tussen ontwatering en opbrengst bij de jonge zavelgronden in de Noordoostpolder. Van zee tot land 46. Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders, Zwolle.
- Zeeuw, J. W. de - 1954: Polderinrichting. In: Cultuurtechniek voordrachten gehouden op de B-cursus van 8-11 september 1953. Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage.

Bijlage

Ontwikkeling van de afvoertermen in vergelijkingen (1) en (6)

1. Enige gebruikte symbolen

j = aantal dagen

N_j = neerslagsom in j dagen

R = bergingscapaciteit

q = gemiddelde dagelijkse afstroming

p = gedeelte van het aantal dagen j , dat afstroming plaatsvindt

$b = 8kD/l^2$

W = gemiddeld grondwaterniveau
 S = gemiddeld slootpeil
 S_h = drooglegging onder maaiveld
 x = waterdiepte bij maatgevende afvoer
 W_{kr} = hoogst toelaatbare grondwaterdiepte onder maaiveld
 d = factor, voor de betekenis zie onder 2

2. Beschrijving van W met S_h , x , W_{kr} en d (fig. 6)

$S_h + x$ = laagwaterpeil in de sloot bij afvoer = 0.
 $S_h + x - W_{kr}$ = verschil tussen het laagwaterpeil in de sloot en de hoogst toelaatbare grondwaterstand.
 d = factor die aangeeft welk gedeelte van het verschil $S_h + x - W_{kr}$ is verdwenen; $d \leq 1$.
 De grondwaterstand W_0 aan het begin van een j -daagse periode kan nu geschreven worden als:
 $W_0 = S_h + x - d(S_h + x - W_{kr}) =$

$$(1 - d)(S_h + x) + dW_{kr}$$

Als de begingrondwaterstand lager is dan het laagwaterpeil in de sloot, dan geldt $d < 0$. Bij $d = 1$ geldt $W_0 = W_{kr}$.

In par. 4 is aangenomen dat de grondwaterdiepte rechtlijnig met de tijd afneemt. De gemiddelde grondwaterstand gedurende een j -daagse periode ligt dan midden tussen de begingrondwaterstand en W_{kr} en is dus gelijk aan:

$$W = 0,5 \{ (1 - d)(S_h + x) + dW_{kr} \} + W_{kr}$$

of:

$$W = 0,5 \{ (1 - d)(S_h + x) + (1 + d)W_{kr} \}$$

3. Beschrijving van S met S_h , x en d

De slootwaterstand aan het begin van een j -daagse periode kan worden beschreven als $S_h + cx$. De factor c geeft aan welk deel van de waterdiepte bij maatgevende afvoer nog niet is verwezenlijkt en heeft dus een betekenis tegengesteld aan die van de factor d .

Als geen afvoer optreedt, geldt dat $d = 0$ en $x = 0$, terwijl als $d = 1$ de waterdiepte maximaal moet zijn, omdat dan maatgevende afvoer optreedt. Daarom geldt dat $c = 1 - d$ bij rechtlijnige samenhang tussen grondwaterdiepte en afvoer ($q = bh$) zowel als tussen grondwaterdiepte en tijd. De gemiddelde slootwaterstand in een j -daagse periode ligt midden tussen de begin-slootwaterstand en S_h is dus:

$$S = 0,5 \{ S_h + (1 - d)x \} + S_h \text{ of}$$

$$S = S_h + 0,5(1 - d)x$$

4. Beschrijving van q met S_h , x , W_{kr} en d

$q = b(S - W)$ wordt nu:

$$q = b[S_h + 0,5(1 - d)x - 0,5$$

$$\{ (1 - d)(S_h + x) + (1 + d)W_{kr} \}]$$

$$q = b[S_h + 0,5(1 - d)x - 0,5(1 - d)$$

$$S_h - 0,5(1 - d)x - 0,5(1 + d)W_{kr}]$$

$$q = b\{S_h - 0,5(1 - d)S_h - 0,5(1 + d)W_{kr}\}$$

$$q = b \cdot 0,5(1 + d)(S_h - W_{kr})$$

5. De factor p uitgedrukt in d

Afstroming treedt op als de grondwaterstand boven het laagwaterpeil in de sloot stijgt. Bij de veronderstelling dat op de laatste dag van de j -daagse periode

W_{kr} is bereikt, betekent dit een duur van de afstroming evenredig met de grondwaterstijging =

$$S_h + x - W_{kr}$$

De totale grondwaterstijging van de begingrondwaterstand

$(1 - d)(S_h + x) + dW_{kr}$ (vgl. sub 2) tot W_{kr} is echter gelijk aan $(1 - d)(S_h + x - W_{kr})$. Dit leidt tot:

$$p = \frac{S_h + x - W_{kr}}{(1 - d)(S_h + x - W_{kr})} = \frac{1}{(1 - d)}$$

p kan dus evenals c in d worden uitgedrukt met de bepaling dat

$$0 \leq p \leq 1$$

6. Schrijfwijze van de afvoerterm in (1)

De term pjq in (1) in par. 4 kan nu worden geschreven als:

$$pjq = \frac{j \cdot b}{1 - d} \cdot 0,5(1 + d)(S_h - W_{kr})$$

7. Complicaties bij samengestelde afstroming

Als bij samengestelde afstroming de stroming, waarvoor men de afgeleide van de regenduurlijn wil construeren, met de index o wordt aangeduid en de andere stroming met de index i dan geldt dat:

$$p_i = \frac{S_{hi} + x_i - W_{kr}}{(1 - d)(S_{ho} + x_o - W_{kr})}$$

Hieruit blijkt dat alleen voor p_o de vereenvoudiging $p_o = 1/(1 - d)$ opgaat.

Ook voor $c_i = 1/p_i$ heeft dit de consequentie dat alleen voor c_o de vereenvoudiging $c_o = 1 - d$ opgaat.

Als zich de situatie weergegeven in figuur 7 voordoet en de stromingen naar de leiding en naar de sloot worden resp. met indices 1 en 2 aangegeven, terwijl men de afgeleide voor de stroming naar de sloot wil construeren, dan kan alleen voor deze stroming de vereenvoudigde schrijfwijze van (8) worden toegepast met de index $i = 2$. Voor de stroming naar de leiding met de index $i = 1$ is geen vereenvoudigde schrijfwijze mogelijk en wordt de term $p_1/q_1 =$

$$p_1 b_1 (S_1 - W) \text{ samengesteld uit:}$$

$$p_1 = \frac{S_{h1} + x_1 - W_{kr}}{(1 - d)(S_{h2} + x_2 - W_{kr})}$$

$$S_1 = S_{h1} + 0,5 \cdot c \cdot x_1 = S_{h1} + 0,5$$

$$\frac{(1 - d)(S_{h2} + x_2 - W_{kr})}{S_{h1} + x_1 - W_{kr}} x_1$$

$$W = 0,5 \{ (1 - d)(S_{h2} + x_2) + (1 + d)W_{kr} \}$$

j en b_1 zijn gegeven.

(6) wordt dus uitgewerkt tot (9) in par. 5 met jK voor de stroming naar de rivier, met R volgens (7) met de index $i = 2$ en een negatief teken (zie par. 4), met p_1/q_1 zoals hierboven is aangegeven en met p_2/q_2 volgens (8) met de index $i = 2$.