

# Bergingsfactor en drainagecriterium

Dr. Ir. J. WESSELING\*

Een poging om het ontwerpcriterium voor de ontwatering aan te passen aan de bergingsfactor van de grond, waardoor een meer juiste berekening van de drainafstanden met stationaire formules mogelijk wordt.

## Inleiding

Voor het berekenen van drainafstanden worden in Nederland hoofdzakelijk de formules van Hooghoudt (1940) en Ernst (1954) toegepast. Deze formules hebben betrekking op stationaire stromingssituaties, zodat het tijdselement ontbreekt. Daarom dient naast de betreffende bodemeigenschappen een zogenaamd drainage- of ontwerpcriterium te worden ingevoerd. Dit criterium houdt in dat de drainafstand zodanig wordt berekend, dat bij een zekere vooraf gekozen afvoer de grondwaterstand niet stijgt boven een bepaald niveau. Oorspronkelijk werd hiervoor door Hooghoudt (1937, 1940) een afvoer van 5 mm/dag bij een grondwaterstand van 50 cm beneden maaiveld voorgesteld. Later is in dit criterium de afvoer verhoogd tot 7 mm/dag en werd voor grasland ook de grondwaterstand tot 40 cm beneden maaiveld verhoogd. Voor fruitteelt stelden Braams en Butijn (1958) een afvoer van 7 mm/dag bij een waterstand van 70 cm beneden maaiveld voor.

Naarmate in het ontwerpcriterium de afvoer hoger of de bijbehorende grondwaterstand lager wordt gesteld, zal men via de genoemde drainageformules een nauwere drainafstand krijgen. Hierbij zullen dan minder vaak hoge waterstanden optreden, zodat men zich verzekert van een betere ontwatering.

De hoogte van de in een gedraineerd perceel optredende grondwaterstand hangt echter niet alleen af van de drainafstand, maar ook in sterke mate van de bergingsfactor van de grond. Deze factor, die de verhouding weergeeft tussen de toegevoegde hoeveelheid water en de stijging van de grondwaterstand, komt niet voor

in stationaire stromingsformules. Bij het ontwerpen van een drainagesysteem past men voor alle grondsoorten hetzelfde ontwerpcriterium toe. In de praktijk zal een grotere bergingsfactor veelal gepaard gaan met een grotere doorlatendheid van de grond, waardoor de drainafstand ook groter zal worden. In het algemeen mag men echter niet stellen dat er een eenduidig verband bestaat tussen bergingsfactor en doorlaatfactor. Daarom is het toepassen van één enkel criterium voor alle grondsoorten in principe onjuist.

Berekening van de werkelijk optredende grondwaterstanden is alleen mogelijk met behulp van niet-stationaire stromingsvergelijkingen. Deze vergelijkingen hebben voor de praktijk het bezwaar dat ze vrij gecompliceerd zijn. In dit artikel is getracht het ontwerpcriterium voor de ontwatering aan te passen aan de bergingsfactor van de grond, waardoor een meer juiste berekening van de drainafstand met stationaire formules mogelijk wordt.

## Berekening van de grondwaterstanden bij ontwatering

Zoals boven reeds opgemerkt, geven stationaire stromingsformules geen uitsluitsel omtrent de werkelijk optredende grondwaterstanden. Dit is alleen mogelijk met pseudo- of niet-stationaire vergelijkingen.

Bij de afleiding van deze laatstgenoemde vergelijkingen moeten bepaalde aannamen omtrent het verband tussen grondwaterstand en afvoer, dan wel omtrent de bergingsfactor van de grond worden ingevoerd. Voorts wordt veelal verondersteld, dat de voeding van het grondwater wordt weergegeven door het aan het maaiveld gemeten neerslagpatroon. Door deze aannamen zijn deze oplossingen slechts be-

\* Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen

naderingen. Immers de bergingsfactor die in de afleidingen als constant wordt verondersteld, hangt niet alleen af van de grondwaterdiepte doch ook van de tijd. Verder zal, mede door de zojuist genoemde factoren, het voedingspatroon van de neerslag sterk vervormd kunnen worden voordat de neerslag als zakwater het grondwater bereikt.

Daar echter voor ons gematigde humide klimaat, en speciaal voor de winterperiode waarin de verdamping weinig variatie vertoont, mag worden verondersteld dat de toegepaste aannamen een redelijke weergave van de optredende grondwaterstanden en afvoeren niet in de weg staan, heeft het weinig zin vergaande verfijningen in de formules aan te brengen. Deze overweging heeft er toe geleid in dit artikel uit te gaan van zo eenvoudig mogelijke formules.

De niet-stationaire stromingsvergelijkingen openen de mogelijkheid voor elk vooraf gekozen neerslagpatroon grondwaterstanden en afvoeren te berekenen voor elk willekeurig drainagesysteem. Wil men zekere ontwerpeisen met behulp van deze oplossingen opstellen, dan kan men uitgaan van een zekere neerslagfrequentie. Men dient dan echter tevens een zekere verdeling van de neerslag over achtereenvolgende dagen aan te nemen (zie o.a. Visser, 1953). De uit deze sequentie voortvloeiende grondwaterstanden en afvoeren zijn dan echter arbitrair geworden. Hier is dan ook de methode van De Jager (1965) gevolgd, waarbij voor verschillende ontwateringsintensiteiten afvoeren en grondwaterstanden zijn berekend als gevolg van werkelijk gemeten neerslagen. Op deze gegevens is door De Jager een frequentieanalyse toegepast waaruit de verwachtingswaarde van de berekende factoren en hun grootte volgde.

### Karakterisering van stationaire en niet-stationaire criteria

Voor de stationaire stroming naar een drainage-systeem kan worden uitgegaan van de eenvoudigste formule van Hooghoudt

$$s = \frac{8Kdm}{L^2} \quad (1)$$

waarin

$s$  = de afvoer in meter/dag; *discharge in meter/day*

$K$  = de doorlaatfactor van de grond in meter/dag; *hydraulic conductivity of the soil in meter/day*

$d$  = dikte van de equivalentlaag in meters, als functie van de diepte van de ondoorlatende laag, de drainafstand en de afmetingen van de sloten of drains; *thickness of the equivalent layer in meters, as a function of the depth of the impermeable layer, the drain distance and the dimensions of the ditches or drains*

$m$  = opbolling van het grondwater midden tussen de sloten of drains in meters; *height in meters above drainage depths of the groundwater midway between the ditches or drains*

$L$  = drainafstand in meters; *drain distance in meters*

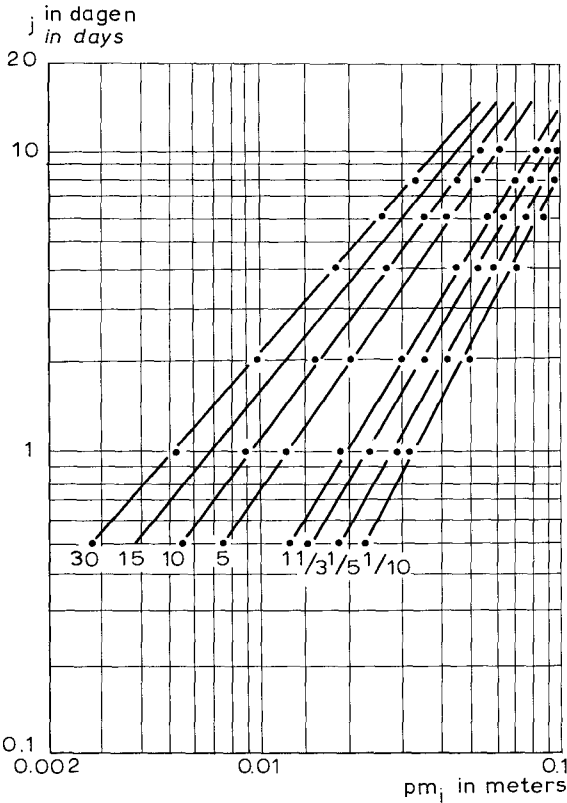
Wordt deze formule voor het ontwerp van drainage gebruikt, dan worden waarden van  $s$  en  $m$  gesteld. In feite komt het ontwerpcriterium dus neer op

$$\frac{s}{m} = \frac{8Kd}{L^2} \quad (2)$$

Voor de niet-stationaire stroming kan voor het met (1) overeenkomende geval uit de door Krayenhoff van de Leur (1958) en Maasland (1959) gegeven oplossingen worden afgeleid dat

$$m_i = \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{j}{p} \left[ R_i \sum_{n=1, -3, 5}^{\infty} \frac{1}{n^3} (1 - e^{-n^2/j}) + R_{i-1} \sum_{n=1, -3, 5}^{\infty} \frac{1}{n^3} (e^{-n^2/j} - e^{-2n^2/j}) + R_{i-2} \sum_{n=1, -3, 5}^{\infty} \frac{1}{n^3} (e^{-2n^2/j} - e^{-3n^2/j}) + \dots \right] \right\} \quad (3)$$

waarin  $j$  de door Krayenhoff van de Leur ge-



Overschrijdswaarden van  $pm_i$ ; voor verschillende  $j$ -waarden en verschillende frequenties  
*Values of  $pm_i$ ; for different values of  $j$  and different frequencies.*

definieerde reservoir-coëfficiënt voorstelt volgens

$$j = \frac{pL^2}{\pi^2 Kd} \quad (4)$$

en  $m_i$  = de grondwaterstand midden tussen de drains op het eind van elke willekeurige dag  $i$  in meters boven het vlak door de drains;  
*height in meters above drainage depth of the groundwater midway between ditches or drains at the end of day  $i$*

$p$  = de bergingsfactor; *storage coefficient*  
 $R_i$ ,  $R_{i-1}$ , etc. = neerslag op  $i$ -de,  $(i-1)$ -ste dag etc., in meters; *precipitation in meters on the  $i$ th,  $(i-1)$ th day, etc.*

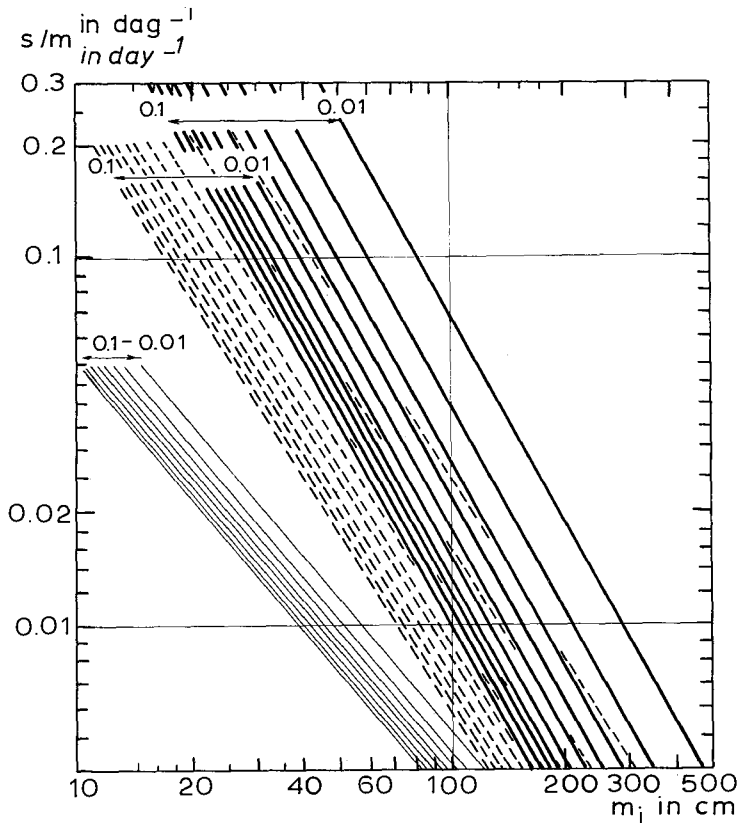
Uit (3) blijkt, dat de hoogte van de waterstand behalve van de optredende neerslag alleen afhangt van de reservoircoëfficiënt  $j$  en van de waarde van  $p$ . Met deze twee grootheden kan een drainage dus volledig worden gekarakteriseerd.

Vergelijkt men nu (2) met (4) dan volgt hieruit dat

$$\frac{s}{m} = \frac{8Kd}{L^2} = \frac{8}{\pi^2} p \frac{\pi^2 Kd}{pL^2} = \frac{8}{\pi^2} \frac{p}{j} \quad (5)$$

Hiermee is een eenvoudig verband gelegd tussen het stationaire ontwerp criterium en de niet-stationaire karakterisering van het ontwateringssysteem.

————— 1 maal per 10 jaar  
*once per 10 years*  
 - - - - - 1 maal per jaar  
*once per year*  
 - - - - - 15 maal per jaar  
*15 times per year*



Overschrijdwaarden van  $m_i$ ; voor verschillende frequenties en waarden van het ontwerpcriterium  $s/m$ .  
*Values of  $m_i$  for different frequencies and dependent on the design criterion  $s/m$ .*

### Ontwerpcriterium en te verwachten grondwaterstanden

Door De Jager (1965, fig. 18) zijn voor verschillende  $j$ -waarden de uit (3) voortvloeiende grondwaterstanden berekend voor de in de winterperioden 1913 tot 1963 in De Bilt waargenomen neerslagen. Hierop is een frequentieanalyse toegepast, waarvan het resultaat is weergegeven in de figuur op pag. 3.

Het blijkt nu, dat het verband tussen  $j$  en  $m_i$  voor de verschillende frequenties waarmee  $pm_i$  wordt bereikt of overschreden met vrij goede benadering kan worden weergegeven door de vergelijking

$$j = a(pm_i)^b \quad (6)$$

waarin de constanten  $a$  en  $b$  afhangen van de gekozen frequentie.

Invullen van (6) in (5) geeft nu

$$\frac{s}{m} = \frac{8}{\pi^2} \frac{1}{a} p^{1-b} m_i^{-b} \quad (7)$$

Deze vergelijking geeft nu het verband weer tussen het ontwerpcriterium en de te verwachten grondwaterstand. Uiteraard hangt dit verband via de factoren  $a$  en  $b$  af van de gekozen frequentie. In de figuur boven is voor een drietal frequenties het verband tussen  $s/m$  en  $m_i$  weergegeven, waarbij rekening is gehouden met verschillende bergingsfactoren. De invloed van deze laatste factor wordt groter naarmate minder vaak voorkomende overschrijdingen worden beschouwd. De mate, waarin de bergingsfactor in het ontwerpcriterium moet worden verdisconteerd, hangt dus af van de ge-

kozen frequentie. De conclusie van Visser (1962) dat het ontwerpccriterium omgekeerd evenredig is met de bergingsfactor is dan ook onjuist.

Met behulp van de figuur op pag. 4 kan voor elk ontwerpccriterium  $s/m$  de overschrijding van de grondwaterstand met de in de figuur voorkomende frequenties worden afgelezen. Indien dit gedaan wordt voor het thans gebruikte criterium van 7 mm/etm bij een grondwaterstand van 50 cm beneden maaiveld, dan krijgt men bij een gemiddelde ontwateringsdiepte van 1 meter de in de volgende tabel weergegeven overschrijdingen.

**Grondwaterstanden in meters boven de drains voor het thans geldende ontwerpccriterium van 7 mm/etm bij een waterstand van 50 cm beneden maaiveld.**

p	Aantal overschrijdingen per jaar		
	15	1	1/10
0,02	0,38	1,05	1,75
0,05	0,32	0,75	1,15
0,08	0,31	0,63	0,92
0,10	0,29	0,58	0,81
p	Number of exceedances per year		
	15	1	1/10

*Groundwater levels in meters above the drains for the design criterion 7 mm/day and a water table at 0.5 meter below surface.*

Vanzelfsprekend zijn de waarden boven 1 meter arbitrair omdat dan de berekening niet reëel meer is. In feite zou dan inundatie moeten optreden. Dit hoeft echter niet altijd het geval te zijn, omdat vooral in de bouwvoor de bergingsfactor doorgaans groter is dan de hier genomen  $p$ .

Het is niet onredelijk te veronderstellen, dat de thans voor drainage gebruikte ontwerpccriteria gelden voor een kleigrond waarvoor  $p = 0,05$  (Wesseling, 1957). Volgens bovenstaande tabel zal dan ongeveer eens per 10 jaar de waterstand tot nabij het maaiveld stijgen. Verder mag men rekenen dat eens per jaar het water stijgt

tot ongeveer 25 cm beneden maaiveld. Dit is in goede overeenstemming met de ervaring in de IJsselmeerpolders dat een drainage goed voldoet mits de grondwaterstand niet tot in de bouwvoor stijgt.

Als basis zouden we kunnen stellen, dat eens per jaar de grondwaterstand tot 25 cm beneden maaiveld zal mogen stijgen. Bij gegeven draandiepte kan dan  $m_i$  direct worden bepaald. Met behulp van de figuur op pag. 4 kan dan voor elke waarde van de bergingsfactor  $p$  het toe te passen ontwerpccriterium  $s/m$  worden afgelezen. Onderstaande tabel geeft hiervan een voorbeeld.

**Ontwerpafvoeren bij een ontwerpgrondwaterstand van 50 cm beneden maaiveld voor de eis, dat de grondwaterstand niet vaker dan eens per jaar een hoogte van 25 cm beneden maaiveld overschrijdt (draandiepte 1 meter).**

p	s/m	s in mm/dag bij $m = 0,5$
0,01	0,038	19
0,02	0,024	12
0,03	0,019	8,5
0,04	0,016	8
0,05	0,014	7
0,06	0,013	6
0,07	0,012	6
0,08	0,011	5,5
0,09	0,010	5
0,10	0,009	4,5

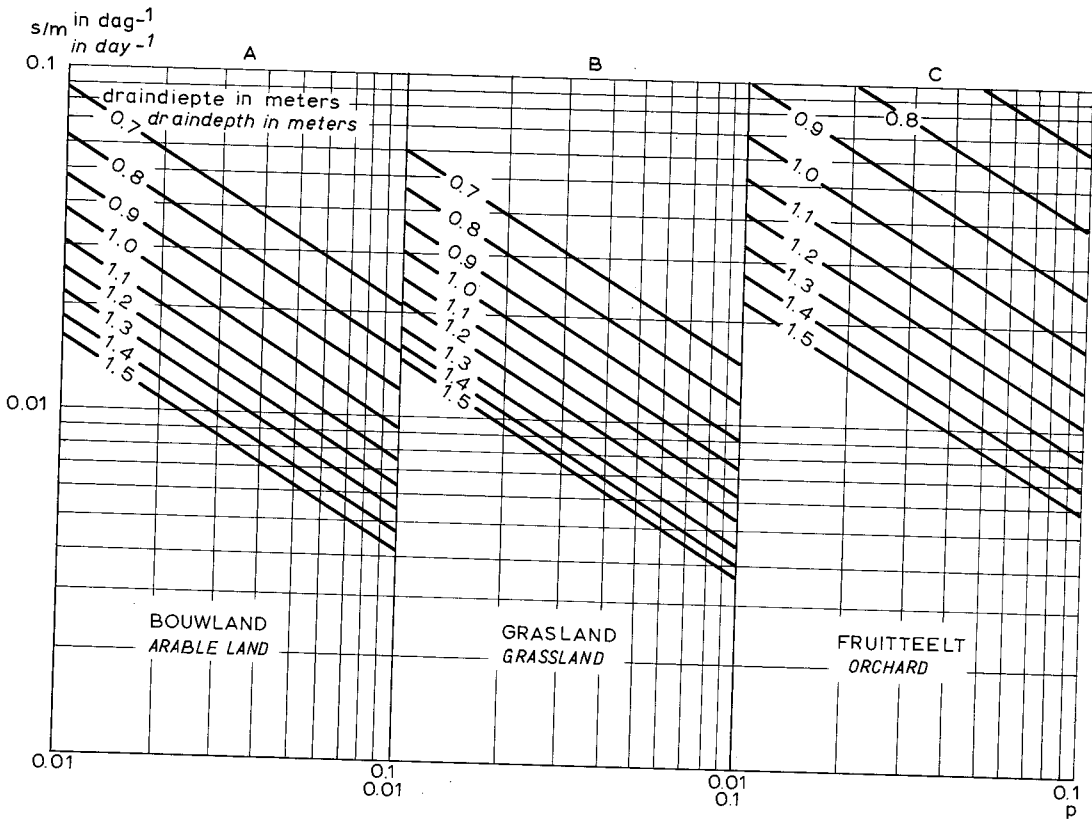
p	s/m	s in mm/day at $m = 0,5$
---	-----	--------------------------

*Design discharges for a design water table at 0.5 meter below surface under the condition that the water table does not exceed more than once a year the level of 25 cm below surface (depth of drainage 1 meter).*

Uit deze tabel blijkt duidelijk de grote invloed van de bergingsfactor op de ontwerpafvoer.

### Invloed van de draandiepte

In bovenstaande berekeningen is steeds gewerkt met een draandiepte van 1 meter. Grotere draandiepten zouden kunnen leiden tot een minder streng ontwerpccriterium. Immers bij een diepere ontwatering neemt de bergingsmogelijkheid in het profiel toe, zodat de kans op het voorkomen van hogere grondwaterstanden



Ontwerpcriteria in afhankelijkheid van de bergingsfactor van de grond en de draandiepte voor:

- A bouwland: waterstand eenmaal per jaar 0,25 m beneden maaiveld
- B grasland: waterstand eenmaal per jaar 0,15 m beneden maaiveld
- C boomgaarden: waterstand eenmaal per jaar 0,50 m beneden maaiveld

*Design criteria in dependence of the storage factor  $p$  and the depth of drainage:*

- A arable land: water table once per year at 0.25 m below surface
- B grassland: water table once per year at 0.15 m below surface
- C orchards: water table once per year at 0.50 m below surface

kleiner wordt. Hier staat tegenover dat bij grotere draindiepten de waarde van  $m$  in het ontwerpcriterium toeneemt, zodat uit de berekening een grotere drainafstand wordt verkregen. Een grotere drainafstand betekent ook een grotere  $j$ -waarde. Hierdoor zal echter de afvoerintensiteit geringer worden, zodat hogere grondwaterstanden gedurende langere tijd gehandhaafd zullen blijven. De vraag is nu of de afname van de afvoerintensiteit of de grotere bergingsmogelijkheid zal gaan overheersen. Om deze vraag te beantwoorden kunnen we voor een aantal hypothetische draindiepten met het thans gebruikte ontwerpcriterium de waarde van  $s/m$  berekenen. Deze waarden kunnen nu worden vergeleken met die welke uit de figuur op pag. 4 volgen, indien als eis wordt gesteld dat een waterstand van 25 cm beneden maaiveld slechts eens per jaar mag worden bereikt of overschreden. Het resultaat van een dergelijke bewerking is weergegeven in onderstaande tabel.

**Waarden voor  $s/m$  bij verschillende draindiepten volgens het huidige ontwerpcriterium en waarden die zouden moeten gelden bij  $p = 0,05$  als de waterstand slechts eenmaal per jaar een hoogte van 25 cm beneden maaiveld mag bereiken of overschrijden.**

Draindiepte	$s/m$ volgens ontwerpcriterium	$s/m$ uit fig. pag. 4
0,70	0,035	0,033
0,80	0,023	0,023
0,90	0,018	0,018
1,00	0,014	0,014
1,10	0,012	0,012
1,20	0,010	0,010
1,30	0,009	0,008
1,40	0,008	0,007
1,50	0,007	0,006

<i>Drain depth</i>	<i>s/m after design criterion</i>	<i>s/m after fig. page 4</i>
0,70	0,035	0,033
0,80	0,023	0,023
0,90	0,018	0,018
1,00	0,014	0,014
1,10	0,012	0,012
1,20	0,010	0,010
1,30	0,009	0,008
1,40	0,008	0,007
1,50	0,007	0,006

*Values of  $s/m$  for different drain depths according to the present design criterion and values at  $p = 0,05$  under the condition that the water table will not exceed more than once a year a height of 25 cm below surface.*

Uit bovenstaande tabel blijkt, dat de  $s/m$ -waarden vrijwel gelijk zijn. De grotere bergings-

mogelijkheid in het profiel bij grotere draindiepten wordt dus gecompenseerd door geringere afvoerintensiteiten. Het huidige ontwerpcriterium houdt kennelijk voldoende rekening met de diepte van ontwatering, mits men aanneemt dat dit criterium geldt voor een gemiddelde  $p$ -waarde van 0,05.

### Algemene criteria

Het blijkt dat het thans in Nederland gebruikte criterium voor bouwland overeenkomt met een grondwaterstand die eens per jaar een hoogte van 25 cm beneden maaiveld bereikt of overschrijdt. Hierbij is vooropgesteld dat  $p = 0,05$  voor een kleigrond.

Uitgaande van een frequentie van eenmaal per jaar geeft (7) voor de invloed van de bergingsfactor op het ontwerpcriterium

$$\frac{s}{m} = cp^{-0,61} \quad (8)$$

waarin  $c$  een constante is die afhangt van de ontwateringsdiepte. De waarden van  $c$  kunnen worden bepaald met behulp van de figuur op pag. 4. Voor verschillende draindiepten geeft figuur A op pag. 6 het verband tussen  $p$  en  $s/m$  voor bouwland.

Voor grasland wordt veelal het criterium 7 mm/etm bij een grondwaterstand van 40 cm beneden maaiveld aangehouden. Uit de figuur op pag. 4 blijkt, dat dit neerkomt op een grondwaterstand die eenmaal per jaar komt tot 15 cm beneden maaiveld voor  $p = 0,05$ . De toe te passen  $s/m$ -waarden kunnen worden afgelezen uit figuur B op pag. 6.

Voor fruitteelt stellen Braams en Butijn (1958) een ontwerpcriterium van 7 mm/dag bij een grondwaterstand van 70 cm beneden maaiveld. Dit blijkt volgens de figuur op pag. 4 neer te komen op een grondwaterstand die eens per jaar 50 cm beneden maaiveld bereikt of overschrijdt. Ook hiervoor kunnen  $c$ -waarden worden bepaald.

Voor de  $s/m$ -waarden bij de verschillende waarden van  $p$ , zie figuur C op pag. 6.

### Samenvatting

Drainafstanden worden in Nederland doorgaans

berekend met behulp van stationaire formules. Nagegaan is wat het hiervoor benodigde ontwerp-criterium betekent in termen van grondwaterstandsoverschrijdingen. Het blijkt nu dat het voor akkerbouw toegepaste criterium van 7 mm/dag bij een grondwaterstand van 50 cm overeenkomt met een waterstand die eens per jaar een hoogte van 25 cm beneden maaiveld bereikt of overschrijdt.

Hierbij is verondersteld dat het ontwerp-criterium geldt voor een goede kleigrond met een bergingsfactor 0,05. Hiervan uitgaande kon met behulp van door De Jager (1965) uitgevoerde frequentieanalyses van grondwaterstanden het ontwerp-criterium voor gronden met grotere en kleinere bergingsfactoren worden vastgesteld.

## Summary

### *Storage factor and drainage criterion*

Drainage systems generally are designed with the aid of steady state flow equations (Hooghoudt, 1940; Ernst, 1954). The design criterion used consists of a discharge and a water table height. The same criterion is used for all types of soils, independent of the storage factor  $p$ .

Comparing steady and non-steady state solutions (eqs. 1, 2, 3 and 4), a relation between the design criterion  $s/m$  for steady state and the reservoir coefficient  $j$  for non-steady state flow can be derived (eq. 5).

The results of a frequency analysis of computed non-steady state water tables for rainfall data measured during the winter periods 1913 to 1963 (De Jager, 1965), lead to eq. 6 for the relation between the reservoir coefficient and the height of the water table. Comparing eqs. 5 and 6 gives the relation between the steady state design criterion  $s/m$  and the height of the water table (eq. 7). The factors  $a$  and  $b$  in eq. 7 depend on the chosen frequency.

Eq. 7 combined with the data given in fig. page 3 results in fig. page 4. From this figure it is possible to determine for any arbitrary design criterion the frequency with which a certain height  $m_1$  of the water table is exceeded.

For agricultural land the present design criterion is a discharge of 7 mm/day at a water table

depth of 50 cm below surface. From fig. page 4 it can be read that for a good clay soil with  $p = 0.05$  this gives a water table that exceeds once per year a height of 25 cm below surface (table page 5 l.). This is in good agreement with practical experience. For other storage factors table page 5 r. gives design discharges. The value of  $m$  in the design criterion depends on the depth of drainage. Since with increasing depth the  $m$  increases, this leads to larger drain spacings. In table page 5 r. it is proved that in the latter case the discharge intensity for larger spacings is reduced in such a way that the probability of occurrence of high water tables is the same for all depths.

Finally design criteria for other values of  $p$  were derived (fig. page 6) for the cases of arable land, grassland and orchards.

### Literatuur:

- Braams, B. W. en J. Butijn. 1958. Drainage in de fruitteelt. Meded. Dir. Tuinb. 21 : 763-770.
- Ernst, L. F. 1954. Het berekenen van stationaire grondwaterstromingen welke in een verticaal vlak afgebeeld kunnen worden. Rapport IV. Rijkslandbouwproefstation en Bodemkundig Instituut T.N.O. Groningen.
- Hooghoudt, S.B. 1937. Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond, No. 6. Versl. Landb. Onderz. 43 (13B).
- , 1940. Bijdragen tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond, No. 7. Versl. Landb. Onderz. 46 (14B).
- Jager, A. W. de. 1965. Hoge afvoeren van enige Nederlandse stroomgebieden. Proefschrift Wageningen.
- Visser, W. C. 1953. De grondslagen van de drainageberekening. Landb. Tijdschr. 65 : 66-81.
- , 1962. Wie beeinflusst das Speicherungsvermögen den Dränabstand. Zeitschrift für Kulturtechnik 3 : 84-90.
- Wesseling, J. 1957. Enige aspecten van de waterbeheersing in landbouwgronden. Versl. Landb. Ond. 57.3.