

INSTITUUT VOOR CULTUURTECHNIEK EN
WATERHUISHOUDING, WAGENINGEN

ENIGE ASPECTEN VAN DE
WATERBEHEERSING IN LANDBOUWGRONDEN

WITH A SUMMARY

SOME ASPECTS OF THE WATER GOVERNMENT
IN AGRICULTURAL SOILS

J. WESSELING



STAATSDRUKKERIJ

UITGEVERIJBEDRIJF

VERSL. LANDBOUWK. ONDERZ. NO. 635 — 'S-GRAVENHAGE — 1957

2070014

INHOUD

	Blz.
I. INLEIDING	1
II. DE WATERBEHOEFTE DER GEWASSEN.	4
1. De verdamping.	4
a. Verdampingsbepalingen.	4
b. De werkelijke verdamping	5
2. Watergebruik en opbrengst	6
a. De totale waterbehoefte	6
b. De waterbehoefte gedurende het groeiseizoen.	8
3. Wateropname uit de grond	10
a. Algemeen	10
b. Wateropname bij zeer diepe grondwaterstand	11
c. Vochttoevoer uit het grondwater	13
4. Samenvatting en conclusies	20
III. DE LUCHTBEHOEFTE DER GEWASSEN.	21
1. De eisen die de plant stelt aan de luchtvoorziening	21
2. De luchtuitwisseling tussen grond en atmosfeer	22
a. De diffusie in het algemeen	22
b. De diffusieconstante van grond.	23
c. De CO ₂ -produktie	24
d. De activiteitsverdeling met de diepte	26
e. Verandering van de activiteit gedurende het groeiseizoen.	28
f. Beschrijving van de aëratie met behulp van de stationaire diffusie	28
3. Samenvatting en conclusies.	29
IV. BEPALING VAN DE GUNSTIGSTE GRONDWATERSTANDSDIEPTE.	31
1. Directe bepaling van de meest gewenste ontwateringsdiepte	31
2. Indirecte bepaling van de meest gewenste grondwaterstand	35
a. Algemeen	35
b. Bepaling van de grondwaterstand als geen infiltratie wordt toegepast	35
c. Bepaling van de grondwaterstand bij infiltratie	39
d. Bepaling van de grondwaterstand bij infiltratie uit de aëratie.	41
e. Berekening	44
3. Samenvatting en conclusies	47
V. WATERBEHEERSING DOOR DRAINAGE	49
1. Drainage	49
2. Uitvoering van de drainage	50
a. Formules ter bepaling van de drainafstand.	50

De auteur promoveerde op 10 mei 1957 aan de Landbouwhogeschool te Wageningen op een gelijkloidend proefschrift tot Doctor in de Landbouwkunde.

	Blz.
b. De formules van HOOGHOUDT	51
c. De draindiameter	53
d. Interpretatie van de formules ter bepaling van de drainafstand	55
3. Drainafvoermetingen beschreven in de literatuur	57
4. Beschrijving van de eigen afvoermetingen	59
a. Proefpercelen en opstelling apparatuur	59
b. De gebruikte apparatuur	61
5. Resultaten van de metingen	66
a. De neerslag	66
b. De grondwaterstand	67
c. Het bergend vermogen van de grond	70
d. De afvoer	72
e. Het verband tussen afvoer en grondwaterstand	75
f. De te verwachten grondwaterstanden	78
6. Samenvatting en conclusies	81
SUMMARY	82
LITERATUUR	86

I. INLEIDING

Het doel van de waterbeheersing is het scheppen van een voor de plant zo gunstig mogelijk milieu wat betreft de water- en luchtvoorziening. Onder Nederlandse omstandigheden komt dit neer op een tweetal maatregelen, nl.

- a. de afvoer van het wateroverschot in de winter,
- b. het voorkomen of opheffen van een tekort in de zomer.

Vanaf de eerste wereldoorlog is in ons land aan eerstgenoemde maatregelen veel aandacht besteed, doch sinds een tiental jaren wordt het belang van de laatstgenoemde maatregelen steeds meer ingezien. Het is duidelijk, dat op gronden met een zeer klein waterhoudend vermogen, waarop geregeld verdroging optreedt, watertoevoer gedurende de zomer wenselijk is. Op gronden met een zeer goede waterberging zal daarentegen veelal geen vochttekort zijn te verwachten. Hiertussenin ligt een groot overgangsgebied van matig goede gronden, die in sommige gevallen kunnen profiteren van een betere watervoorziening in de zomer. Bij de beantwoording van de vraag of dit al of niet het geval is, moeten de hoeveelheid vocht die de grond ter beschikking van de plant kan stellen en de behoefte van het gewas bekend zijn.

Onderwerpen we de waterbeheersing aan een nadere beschouwing, dan blijkt, dat bij de uitvoering van de onder a. genoemde maatregelen doorgaans wordt uitgegaan van een maximaal toelaatbare grondwaterstand bij een bepaalde neerslag. De mate, waarin de grond water kan bergen zonder deze stand te overschrijden, hangt ook af van de diepte van het ontwateringssysteem. De eisen, die aan dit systeem gesteld worden zijn dus geringer, naarmate de diepte groter is. Aan deze diepte zijn echter grenzen gesteld, omdat deze bepalend is voor de hoeveelheid vocht die de grond gedurende de zomer ter beschikking kan stellen. Een te diepe ontwatering in de winter kan nl. leiden tot een vochttekort in de zomer. Een typisch voorbeeld hiervan vormen beekverbeteringen, waarbij verlaging van het winterpeil aanleiding geeft tot verdrogingsverschijnselen. Anderzijds geeft een te ondiepe ontwatering kans op nadelige invloeden op het gewas en de grond. De ontwateringsdiepte heeft dus een bovengrens, bepaald door de luchtbehoefte en een ondergrens bepaald door de waterbehoefte. De vraag of watervoorziening moet worden toegepast, kan dus worden beantwoord door na te gaan of de ontwateringsdiepte zodanig kan worden gekozen, dat de grond voldoende vocht bevat, terwijl tevens aan de luchtbehoefte van het gewas kan worden voldaan. Uitgaande van deze gedachtengang, moet eerst de water- en luchtbehoefte van de gewassen bekend zijn. Vervolgens dient nagegaan te worden onder welke omstandigheden in de grond aan deze eisen kan worden voldaan.

In dit geschrift wordt een theoretische verhandeling gegeven over de optimale grondwaterstand bij drainage, die vergeleken wordt met de experimenten, welke sinds vele jaren over dit onderwerp zijn verricht. Van belang voor een controle van de in de praktijk bereikte resultaten bij drainage en voor een toetsing van de theorie is, dat men de beschikking heeft over een betrouwbare meetapparatuur, die gedu-

rende langere tijd in werking blijft. Een zodanige apparatuur werd door de auteur ontworpen; hiermee werden enige controlemetingen verricht. Hiervan wordt in het laatste hoofdstuk een en ander behandeld.

Het watergebruik hangt hoofdzakelijk af van de verdamping. Eerst is dan ook een korte uiteenzetting gegeven over de verdamping en de factoren die hierop invloed uitoefenen. Vervolgens is aan de hand van in de literatuur beschreven onderzoeken een beschouwing gegeven over de invloed van het waterverbruik op de opbrengst. Hieruit is de waterbehoefte van de gewassen afgeleid.

Om na te gaan, op welke wijze de waterbehoefte kan worden gedekt, moeten de afzonderlijke bronnen worden beschouwd. De plant put zijn water uit de neerslag, de bodemvoorraad en de vochttoevoer uit lagen beneden de wortelzone. Achtereenvolgens is dan ook nagegaan, in hoeverre de plant water aan de grond kan onttrekken en door welke factoren de opstijging uit diepere lagen wordt beïnvloed.

In hoofdstuk III is de luchtbehoefte aan een nadere beschouwing onderworpen. Uit fysiologisch onderzoek blijkt, dat de meeste planten nog een normale groei vertonen bij zeer lage zuurstofgehalten. In de grond gaan deze echter gepaard met hoge CO_2 -gehalten. De algemene opvatting is dan ook, dat de schade bij een slechte luchtvoorziening wordt veroorzaakt door te veel CO_2 . Luchtuitswisseling tussen grond en atmosfeer is dus nodig om de gevormde CO_2 af te voeren. De oorzaken van de schade door te veel CO_2 zijn in het midden gelaten. Nagegaan is, welke eisen de plant stelt aan de aëratie en wat hiervoor het luchtgehalte van de grond moet zijn. Tevens is onderzocht of voldoende gegevens ter beschikking staan om de luchtuitswisseling kwantitatief te beschrijven.

Aan de hand van de in de vorige hoofdstukken verwerkte gegevens is in hoofdstuk IV nagegaan, hoe de waterbeheersing moet worden uitgevoerd. Hiertoe is eerst de opbrengst ontwateringsdieptecurve aan een nadere beschouwing onderworpen, speciaal wat betreft de aspecten van de water- en luchtvoorziening. Daarna is nagegaan, in hoeverre het mogelijk is aan de watervoorziening te voldoen door de ontwateringsdiepte minder groot te kiezen. In gevallen waarin deze methode leidt tot te hoge grondwaterstanden, moet een lagere stand worden aangehouden en later infiltratie of beregening worden toegepast. In het eerste geval zal de grondwaterstand op een bepaald peil worden ingesteld. De vaststelling van dit peil is eveneens nader beschouwd. Hierbij is zowel aandacht aan de water- als aan de luchthuishouding besteed. Bij de beregening speelt daarentegen het vochtgehalte van de grond een belangrijke rol. Met behulp van de gegevens omtrent de aëratie van de grond is berekend, welk luchtgehalte de grond minimaal moet hebben.

In het laatste hoofdstuk is de ontwatering door middel van drainage behandeld. Het blijkt nl. dat de theoretische zijde van deze ontwatering zeer ver gevorderd is, terwijl over de landbouwkundige interpretatie nogal wat onenigheid bestaat. Verder zijn tot nu toe vrijwel geen afvoer- en grondwaterstandsmetingen aan drainages verricht. Zodoende kan meestal niet worden nagegaan, in hoeverre de voor de bepaling van de drainafstand gebruikte formules en de daarin gebruikte criteria in de praktijk voldoen. Een kort overzicht van bovengenoemde formules en hun gebruik is

daarom gegeven. Daarna zijn een aantal door ons uitgevoerde afvoer- en grondwaterstandsmetingen, alsmede de daarbij gebruikte apparatuur, beschreven. Hierbij is speciaal aandacht besteed aan de neerslag, de afvoer en de daarbij optredende grondwaterstanden. Verder is nog nagegaan of de bij de drainagevoorschriften gebruikte criteria overeenkomen met de werkelijk optredende afvoeren en grondwaterstanden.

II. DE WATERBEHOEFTE DER GEWASSEN

I. DE VERDAMPING

a. Verdampingsbepalingen

De bepaling van de verdamping kan op verschillende wijzen geschieden. De voornaamste worden hier puntsgewijs genoemd.

1. *Periodieke vochtbepalingen van de grond.* Verandering van de hoeveelheid vocht in de grond tussen twee bepalingen, vermeerderd met de in die periode gevallen neerslag, geeft de verdamping, mits geen water is afgevoerd naar of toegevoerd uit diepere lagen. Deze toe- en afvoer kan in sommige gevallen worden berekend uit de verandering van het zoutgehalte van de grond.

2. *Lysimeterwaarnemingen.* Door periodieke weging van de lysimeter bij bekende neerslaghoeveelheid en drainage kan de verbruikte hoeveelheid water worden bepaald.

3. *De waterbalans.* De som van afvoer en verdamping in een bepaald gebied moet in elke periode gelijk zijn aan de som van neerslag, grondwaterbergingsverandering en eventuele andere watertoevoer in dit gebied (kwel en infiltratie).

4. *De energiebalans.* De energie, gebruikt voor de verdamping, vormt de sluitpost in de energiebalans. De door het aardoppervlak geabsorbeerde en in warmte omgezette straling, verminderd met de infrarode uitstraling wordt behalve voor verdamping gebruikt voor de verwarming van de lucht en de grond. Verschillende formules voor de berekening van de diverse grootheden werden gegeven door ALBRECHT (3), ANDERSON (5) en PENMAN (133).

5. *Verticaal damptransport.* In perioden van niet te korte duur zal het waterdampgehalte van de onderste luchtlagen vrijwel constant zijn. De verplaatsing van waterdamp in de atmosfeer geschiedt dan ook vrijwel geheel in verticale richting door turbulente uitwisseling. Door bepaling van de windsnelheid en de waterdampgehalten op verschillende hoogten kan, met behulp van daarvoor opgestelde formules, de verplaatste hoeveelheid waterdamp worden berekend. Bij een breed opgezet onderzoek op het Lake Hefner (109) bleken de formules van SVERDRUP (171) en SUTTON (170) waarden te geven die minder dan 10 % verschillen van die, verkregen uit de waterbalans.

6. *Correlatiemethoden.* Hierbij wordt uitgegaan van een correlatie tussen de verdamping en eenvoudig te bepalen grootheden. Zo zijn correlaties bekend met de gemiddelde maandtemperatuur (174), het produkt van de gemiddelde maandtemperatuur en het percentage zonneshijn (21), straling en temperatuur (176), en verzadigingsdeficit en windsnelheid (1, 109). Als basis van de verdampingsberekening wordt hierbij meestal uitgegaan van de veronderstelling, dat de plant voldoende vocht tot zijn beschikking heeft.

De drie eerstgenoemde experimentele methoden zijn zeer tijdrovend en hebben het nadeel, dat tevoren geen inzicht in de te verwachten grootte van de verdamping kan worden verkregen.

De correlatiemethoden zijn strikt genomen alleen geldig voor die gebieden en tijdstippen, waarvoor ze zijn ontwikkeld. Correlaties met de temperatuur zijn niet juist, omdat in de verschillende jaargetijden de relatie tussen deze grootheid en de verdamping niet dezelfde is. Volgens van WIJK en de VRIES (200) moet de verdamping, berekend volgens THORNTWHAITE (174) achterkomen op de werkelijke verdamping, omdat de temperatuur achterkomt op de straling. Deze verschuiving in tijd werd door van BAVEL en WILSON (17) en MAKINK (106) experimenteel aangetoond. Een praktisch bezwaar is bovendien, dat de correlatiemethoden niet bruikbaar zijn voor perioden korter dan een maand, omdat met gemiddelden wordt gewerkt.

De methode van de energiebalans gaf bij het onderzoek op het Lake Hefner (5) voor perioden langer dan 7 dagen waarden, die minder dan 5% verschilden van die welke berekend waren uit de waterbalans van het meer, mits alle termen in de energiebalans nauwkeurig werden vastgesteld. Een berekening per decade is dus hiermede zeker mogelijk. Door verschillende onderzoekers, o.a. ALBRECHT (3), BUDYKO (30), EGOROV (48), MOKKAVEEV (116), PENMAN (133, 136), THORNTHWAITTE en MATHER (zie 136), wordt dan ook de voorkeur gegeven aan deze methode. Tot eenzelfde conclusie komen speciale congressen op dit gebied in de USSR (140) en in Nederland (39).

Bij de later in dit hoofdstuk behandelde waterbehoefte wordt door ons gebruik gemaakt van de berekeningsmethode van PENMAN (133). Hierbij is de oppervlakte-temperatuur die in de energiebalans voorkomt, geëlimineerd, zodat de verdamping kan worden berekend uit normale meteorologische waarnemingen (temperatuur, relatieve zonneshijn, relatieve vochtigheid en windsnelheid). De verdamping van een gewas kan worden berekend uit die voor een vrij wateroppervlak, met behulp van voor kort gras in Z.O.-Engeland bepaalde reductiefactoren. Hierbij moet worden aangenomen, dat deze ook voor ons land gelden. De berekening kan echter ook direct voor een gewas worden uitgevoerd (135, 137). Voorbeelden van dergelijke berekeningen werden gegeven door VAN WIJK en DE VRIES (200). Bij de berekening kan gebruik worden gemaakt van grafieken of nomogrammen, zoals ontworpen door MAKKINK (104) en RIJKOORT (156).

De aldus berekende potentiële verdamping (E_T) wordt door PENMAN (136) als volgt gedefinieerd: „*It is the amount of water transpired in unit time by a short green crop, completely shading the ground of uniform height and never short of water*”.

In bovengenoemd artikel wordt voor de jaarverdamping als nauwkeurigheid van de berekening 10% genoemd. De mogelijkheid wordt daarbij niet uitgesloten, dat over kortere perioden de nauwkeurigheid kleiner is.

De formules werden door MAKKINK (106) getoetst met behulp van lysimeterwaarnemingen. Hierbij bleek, dat de voor gras berekende verdamping doorgaans 10% kleiner was dan de werkelijke waarden. De auteur wijt dit aan een voor ons land te kleine invloed van de door PENMAN experimenteel bepaalde invloed van de wind. De mogelijkheid bestaat echter, dat de beschouwde perioden van 2 tot 4 dagen te kort zijn.

b. De werkelijke verdamping

De werkelijke verdamping kan om drie redenen kleiner zijn dan de potentiële. Deze zijn:

- 1e. een tekort aan voor de plant opneembaar vocht,
- 2e. een onvolledige grondbedekking,
- 3e. een regulering door de plant (ziekte, maaien van gras).

De vraag in hoeverre het vochtgehalte van de grond van invloed is op de verdamping, is moeilijk te beantwoorden. Een aantal onderzoekers in de USA en wel speciaal VEIHMAYER en HENDRICKSON (179), menen dat al het vocht in de grond

tussen veldcapaciteit en verwelking even gemakkelijk opneembaar is. Hetzelfde wordt min of meer stilzwijgend door PENMAN (134) aangenomen. THORNTHWAITTE en MATHER (175) veronderstellen daarentegen een continue vermindering van de verdamping bij dalend vochtgehalte van de grond. ASLYNG en KRISTENSEN (8), MAKKINK en VAN HEEMST (108) en SLATYER (165) vermelden een soortgelijk effect. MAKKINK en VAN HEEMST vonden een sterkere teruggang in verdamping, naarmate de grond droger en de potentiële verdamping groter was. Andere onderzoekers (zie 169) vonden daarentegen geen invloed van het vochtgehalte van de grond op de verdamping.

De proeven van VEIHMAYER EN HENDRICKSON (169) hebben betrekking op vruchtbomen, die de grond in de potten geheel doorwortelden. Speciaal bij eenjarige gewassen is echter de groeisnelheid van de wortels van groot belang. Mogelijk speelt ook het vochttransport in de grond hierbij een belangrijke rol. Bij welk vochtgehalte van de grond de verdamping terug zal lopen, is dan ook niet zonder meer te zeggen.

Uit proeven van HARROLD (65) en WIND (201) blijkt, dat de bodembedekking bij de verdamping een grote rol speelt. Vermindering van de verdamping bij onvolledige grondbedekking is een gevolg van het feit, dat de directe verdamping uit de grond veel geringer is dan de transpiratie door de plant. De eerste hangt sterk af van het vochtgehalte van de bovengrond, d.w.z. hoofdzakelijk van de verdeling van de neerslag. Doorgaans is deze voor een kale grond slechts een fractie van de transpiratie. VERHOEVEN (180) vond b.v. voor Zeeland een gemiddelde van 3 cm gedurende de maanden mei tot en met augustus.

Voor gewassen als aardappelen, bieten en maïs, die eerst lange tijd na de poot- of zaaidatum de grond volledig bedekken, kan de factor bodembedekking een belangrijke rol spelen. Ook bij granen is deze invloed waarschijnlijk groter dan op het eerste gezicht zou lijken, omdat een deel van de straling de grond weer direct bereikt op een tijdstip, dat ver voor de oogst ligt.

2. WATERGEBRUIK EN OPBRENGST

a. De totale waterbehoefte

Onder de totale waterbehoefte wordt de hoeveelheid vocht verstaan, die de plant nodig heeft voor een goede produktie. Onderzoekingen van COLE (37), MC. DERMOTT en IVINS (112), LEHANE en STAPLE (96), STAPLE en LEHANE (168) en WERNER (194) tonen aan, dat het voor de produktie geen enkel verschil maakt, of het water wordt verkregen uit de bodemvoorraad of uit de neerslag.

Een indruk omtrent de waterbehoefte van een gewas kan worden verkregen door de zg. „transpiratiecoëfficiënt”. Daar deze echter voor de verschillende gewassen verschillend is en bovendien beïnvloed wordt door factoren als bodemvruchtbaarheid, bemesting, het optreden van ziekten en plagen e.d., wordt hiervan niet veel gebruik meer gemaakt. (14, 136, 146, 177). De verdamping daarentegen wordt vrijwel geheel bepaald door klimatologische factoren, door de hoeveelheid beschikbaar water en door de vorm van het oppervlak van het gewas. Vooropstellend dat het

gewas voldoet aan de bij de definitie van de potentiële verdamping gestelde eisen van bodembedekking en vochtvoorraad, zou deze verdamping dus een betere maat zijn voor de waterbehoefte. Daar echter de werkelijke verdamping doorgaans geringer is dan de potentiële, kan men de vraag stellen welk percentage van de laatste als voldoende moet worden aangemerkt.

Men neemt dikwijls aan, dat de waterbehoefte gelijk is aan de potentiële verdamping (130, 134, 136). Onderzoekingen van ALPATEV (4), BAUMANN (13, 14), VAN DUIN (44), UHLIG (178) en WESSELING EN VAN WIJK (197) tonen daarentegen aan, dat optimale opbrengsten kunnen worden verkregen bij een vochthoeveelheid die kleiner is dan E_T . Dit verschijnsel is te wijten aan het feit, dat de bodem niet gedurende het gehele groeiseizoen bedekt is. Wellicht kan de plant bovendien een zeker tekort tolereren voordat de opbrengst terugloopt.

De waterbehoefte, – uitgedrukt in procenten van E_T – zal voor gewassen, die de grond lange tijd geheel of gedeeltelijk onbedekt laten, kleiner moeten zijn. De bevestiging hiervan wordt gegeven door een onderzoek van VAN DUIN EN SCHOLTE UBING (46), waarin voor aardappelen de reeds eerder bepaalde hoeveelheid van 0,75 E_T (197) als voldoende wordt gevonden.

Een verdere bevestiging geeft de vergelijking met andere gegevens omtrent de waterbehoefte. Zo geven BLANEY EN CRIDDLE (21) waarden voor de zg. „consumptive use” (CU), welke zij definiëren als: „the sum of the water, used by the vegetative growth of a given area in transpiration and building of plant tissue and that evaporated from adjacent soil, snow or intercepted precipitation on the area in any specified time, divided by the area”.

Hierbij wordt verondersteld, dat de plant voldoende vocht ter beschikking heeft, en de opbrengst goed is, doch de grondbedekking hoeft niet volledig te zijn. Uit de vergelijking van de CU-waarden en de berekende E_T voor dezelfde periode (tabel 1) blijkt, dat de eerste doorgaans kleiner is dan E_T .

TABEL 1. Vergelijking van de „consumptive use” en E_T in cm voor een tweetal stations in de USA.

Plaats	Gewas	Periode	CU	E_T	Vershil	CU/ E_T
Mesa	katoen	1/4-31/10	79	117	38	0,68
	sorghum	1/7-31/10	54	63	9	0,86
	grape fruit	1/3-31/10	102	125	23	0,82
	sinaasappel	1/3-31/10	82	125	43	0,66
	soyabonen	1/6-31/10	57	81	24	0,70
Scotsbluff	luzerne	14/5-27/ 9	66	66	0	1,00
	granen	20/4-25/ 7	37	55	18	0,71
	suikerbieten	20/4-15/10	61	81	20	0,75
	aardappelen	20/6-30/ 9	39	51	12	0,76

TABLE 1. Comparison between the consumptive use (CU) and E_T (in cm) for two stations in the U.S.A.

De goede overeenkomst voor suikerbieten en aardappelen met de eerder genoemde voor Nederland gevonden waarden valt direct op. Voor luzerne wordt echter een

zeer grote hoeveelheid water aangegeven. Dit is verklaarbaar door het feit, dat dit gewas de grond gedurende het gehele groeiseizoen bedekt. Hetzelfde geldt waarschijnlijk voor grasland. Hierover ontbreken echter de nodige gegevens.

Vast staat dus wel, dat voor akkerbouwgewassen – onafhankelijk van het klimaat – in de gehele groeiperiode een totale hoeveelheid water nodig is, ongeveer gelijk aan $0,75 E_T$; dit is enigszins afhankelijk van het tijdstip waarop het bodemoppervlak geheel bedekt is en de duur hiervan tot aan de oogst. Voor gras kan voorlopig een totale vochthoeveelheid worden aangenomen, die gelijk is aan E_T . Voor een nauwkeurige bepaling van deze hoeveelheden zal in de eerste plaats de invloed van de graad van bedekking van de grond op de verdamping bekend moeten zijn.

b. De waterbehoefte gedurende het groeiseizoen

Over het algemeen zal onder klimatologische omstandigheden als die in West-Europa, de bodemvoorraad plus neerslag gedurende het groeiseizoen niet voldoende zijn om aan de behoefte van het gewas te voldoen, wanneer ten minste de bodemvoorraad gering is. Bij een eventuele watertoediening zal men zich dus af moeten vragen, wat het geschiktste moment is om dit te doen.

BAUMANN (13, 14) meent, dat onder normale omstandigheden de hoogste opbrengsten worden verkregen, wanneer een droog voorjaar gevolgd wordt door een natte zomer. In een droog voorjaar zullen volgens hem de wortels n.l. een grotere diepte bereiken (zie ook 134). In de daarop volgende natte zomer zal de inmiddels uitgeputte bodemvoorraad dan weer gedeeltelijk worden aangevuld. In een relatief nat voorjaar daarentegen zullen de wortels een geringe diepgang vertonen; volgt nu een droge periode, dan zal de kleine bodemvoorraad spoedig zijn uitgeput en de produktie is minder.

Men mag hieruit echter niet – zoals BAUMANN doet – zonder meer de conclusie trekken, dat planten die in een jong stadium weinig vocht ter beschikking hebben, ook op latere leeftijd met minder vocht toe kunnen. Is de hoeveelheid neerslag gedurende de gehele groei in beide gevallen gelijk, dan zal de plant in een droog voorjaar gevolgd door een natte zomer meer vocht ter beschikking hebben dan in het omgekeerde geval. ASLYNG en KRISTENSEN (8) zijn dan ook de mening toegedaan, dat de grootste opbrengsten worden verkregen in jaren waarin het voorjaar nat, de zomer droog is. De tegenstelling tussen deze opvattingen is verklaarbaar, doordat de genoemde onderzoekers geen rekening hebben gehouden met de totale hoeveelheid vocht, die de plant ter beschikking had.

Bij vergelijking van opbrengstgegevens over een groot aantal jaren komt BROUWER (26) tot de conclusie, dat de gewassen meestal aan het begin van de bloei een „kritische periode” meemaken, waarin de neerslag in hoge mate bepalend is voor de opbrengst. Deze perioden zullen doorgaans echter samenvallen met het moment, waarop de bodemvoorraad is uitgeput. Uit een onderzoek van VAN DUIN en SCHOLTE UBING (46) naar de correlatie tussen de opbrengst van aardappelen en de neerslag blijkt deze n.l. het grootst te zijn in de maand juli. In deze maand is er in vrijwel geen enkel jaar meer opneembaar water in de bodem aanwezig. In dit opzicht is het dan ook ver-

klaarbaar, waarom BROUWER (27) de berekeningstijdstippen baseert op de zg. kritische perioden.

Het bestaan van een kritische periode is op grond van bovenstaande dus terug te voeren op de beschikbaarheid van vocht in de grond. Hiermee wil echter niet gezegd zijn, dat een dergelijke periode in het geheel niet bestaat. Uit potproeven b.v., die DREIBRODT (43) met bonen uitgevoerd heeft, blijkt nl. de verdeling van de watergiften over de tijd wel degelijk invloed te kunnen hebben op de opbrengst.

Als er een kritische periode bestaat, zal de plant in deze tijd waarschijnlijk sterker reageren op de zuigspanning van het water in de grond dan in de rest van de groeiperiode. Uit de vele door RICHARDS en WADLEIGH (146) gerefereerde onderzoeken blijkt er echter gedurende het gehele groeiseizoen een invloed van de zuigspanning op de opbrengst te bestaan. De opbrengst blijkt doorgaans te dalen bij toenemende zuigspanningen. De mate waarin dit het geval is, hangt echter van de plantesoort af. Zo merkt PENMAN (136) op, dat b.v. granen en vroege aardappelen maximale opbrengsten geven bij zuigspanningen overeenkomend met de veldcapaciteit, terwijl suikerbieten en gerst een hogere vochtspanning tolereren. STOLP en WESTERHOF (169) vonden maximale opbrengsten van aardappelen en tomaten bij zuigspanningen kleiner dan overeenkomend met veldcapaciteit. Daarbij komt nog, dat de reactie van de plant verschillend is voor wat betreft de groei van vegetatieve en generatieve delen (8, 136, 179). Ter illustratie hiervan zijn de resultaten van een onderzoek van ASLYNG en KRISTENSEN (8) opgenomen in tabel 2. Hierbij werd haver verbouwd in lysimeters, waarin op 30 cm diepte verschillende zuigspanningen werden gehandhaafd. In het laatste geval liep deze steeds op, omdat geen water werd toegediend.

TABEL 2. Opbrengst van haver, watergebruik en vochtopname uit de grond als gemiddelde van 3 lysimeters bij verschillende vochtspanningen op 30 cm diepte (naar ASLYNG en KRISTENSEN)

Vochtspanning (cm)	Opbrengst (gram)		Verdamping (mm)	Vochtopname uit de grond (mm)
	graan	stro		
100	321 ± 11,7	448 ± 5,0	492 ± 13,3	108 ± 1,8
200	276 ± 7,6	384 ± 8,4	473 ± 4,7	113 ± 5,9
400	278 ± 13,9	359 ± 17,5	455 ± 23,7	127 ± 20,2
800	281 ± 11,0	327 ± 3,3	404 ± 16,0	110 ± 14,2
—	276 ± 4,4	320 ± 15,6	345 ± 7,7	167 ± 7,8

TABEL 2. *Yield of oats, water consumption and uptake from the soil as an average for 3 lysimeters at different soil moisture tensions (8)*

Uit de tabel blijkt, dat, hoewel de verdamping bij toenemende zuigspanning afneemt, de korrel-opbrengst slechts daalt tussen 100 en 200 cm. De stro-opbrengst daalt echter wel met toenemende zuigspanning. Het verschil in verdamping is niet bijzonder groot en kan voor een deel zijn veroorzaakt door verschillen in directe verdamping uit de grond, ten gevolge van een hoger vochtgehalte bij lage zuigspanningen.

Het verkrijgen van een maximale opbrengst hangt echter niet alleen af van de vochtvoorziening. De mate, waarin de plant een tekort aan lucht tolereert is van evenveel betekenis. Zo blijkt uit onderzoek van MARRINK (103), dat bij lage zuigspanningen in grasland aanzienlijke opbrengstdalingen op kunnen treden. Bovendien

zullen soms nog andere factoren moeten worden gezien. Van grasland is b.v. bekend, dat hoge voorjaarswaterstanden de produktie remmen (205). Waarschijnlijk speelt de temperatuur van de grond hierbij een belangrijke rol, omdat later in het groeiseizoen de luchtvoorziening bij eenzelfde grondwaterstand wel voldoende is, ondanks de hogere CO₂-produktie.

3. WATEROPNAME UIT DE GROND

a. Algemeen

Uit de voorgaande paragraaf blijkt, dat voor een goede produktie een minimum-hoeveelheid vocht ter beschikking van de plant moet staan. In gebieden, waar zondanige klimatologische omstandigheden heersen, dat gedurende het groeiseizoen van de plant een hoeveelheid neerslag valt die geringer is dan bovenbedoelde hoeveelheid, is de plant voor een deel van zijn watervoorziening aangewezen op het in de grond geaccumuleerde water. Naast de kennis van de hoeveelheid water die de grond vast kan houden, is het gedeelte hiervan, dat voor de plant opneembaar is, van groot belang.

Algemeen wordt aangenomen, dat de plant water aan de grond kan onttrekken tot een bepaald vochtgehalte, het zg. verwelkingspercentage. Dit wordt gedefinieerd als het vochtgehalte, waarbij de planten de eerste tekenen van verwelking vertonen, waarvan zij zich gedurende één nacht in een met waterdamp verzadigde atmosfeer niet herstellen. Dit vochtgehalte wordt bereikt, wanneer de vochtspanning 15 tot 20 atm ($pF = 4,0$ tot $4,3$) bedraagt; dit is enigszins afhankelijk van de plantesoort, de worteldichtheid en de snelheid waarmee de uitdroging van de grond tot stand komt (131, 146, 169, 179).

Bij de bepaling van het verwelkingspercentage wordt veelal gebruik gemaakt van potcultures van daarvoor geschikte planten als tomaat en zonnebloem. Op het tijdstip, dat bovengenoemde verwelkingsverschijnselen zich voordoen, wordt dan het vochtgehalte van de grond bepaald. Door de intensieve beworteling zal dit gehalte over de gehele pot vrijwel constant zijn. Onder natuurlijke omstandigheden daarentegen, zal de plant een met de diepte afnemende worteldichtheid vertonen (62, 192). Omdat echter de maximale wateropname afhangt van de worteldichtheid, zullen de diepere lagen in mindere mate worden uitgeput. De zones rondom de wortels, waarin dit wel het geval is, zullen elkaar in deze lagen niet meer overlappen. Waterverplaatsing van nattere plaatsen naar drogere zal – als gevolg van de sterke daling van het capillair geleidingsvermogen van de grond bij afnemend vochtgehalte – doorgaans zo gering zijn, dat de plant hierdoor niet van vocht kan worden voorzien. Is hij dan verder niet in staat nieuwe wortels te vormen, dan zal verwelking optreden, zonder dat de gehele grond in de wortelzone is uitgeput.

De kleinste vochtgehalten die door de plant in de grond veroorzaakt kunnen worden, zullen afhangen van de plante- en grondsoort en van de klimatologische omstandigheden. Deze door BAIER met „Bodenfeuchteminima” betitelde hoeveelheid zal in natte jaren relatief hoog, in droge jaren laag zijn. Voor de bepaling van de voor de

plant opneembare maximale hoeveelheid vocht zijn de laatstgenoemde jaren beslissend. De hierin bereikte minimale vochtgehalten („Verarmungsgrenze”) zijn bepalend voor de grootte van de bodemvoorraad. Aan het oppervlak zal het minimumvochtgehalte vrijwel gelijk zijn aan of iets lager zijn dan het verwelkingspercentage; op grotere diepten zijn daarentegen aanmerkelijk hogere waarden te verwachten.

b. Wateropname bij diepe grondwaterstand

Hieronder worden die gevallen verstaan, waarbij de grondwaterstand zich op een zodanige diepte bevindt, dat vochttoevoer uit het grondwater te verwaarlozen is.

Voor eenjarige gewassen wordt in gematigde streken doorgaans een vochtonttrekkingsdiepte van 100 tot 120 cm aangegeven (9, 10, 11, 38, 59, 120, 168, 180). Onder extreem droge omstandigheden kan deze onttrekkingsdiepte groter zijn. Zo vonden COLE en MATTHEWS (38) voor wintertarwe in de Great Plains diepten van 1,6 tot 1,8 m. Hierbij werd de beschikbare hoeveelheid vocht berekend met behulp van de over 30 jaren gemiddelde minimumvochtgehalten. Een gedeelte van de resultaten van dit onderzoek is weergegeven in tabel 3.

TABEL 3. Hoeveelheden beschikbaar vocht in cm in verschillende lagen naar COLE en MATTHEWS (38)

Laag	0-30 cm	30-60 cm	60-90 cm	90-120 cm	120-150 cm	150-180 cm
Loamy fine sand	3,15	2,36	2,38	2,44	2,24	2,13
Fine sandy loam	3,38	3,17	3,12	2,92	2,92	1,65
Very fine sandy loam	4,27	3,48	3,30	3,23	3,22	2,16
Silty clay loam	4,67	4,16	4,11	3,81	3,81	2,18

TABLE 3. Available moisture in various layers of the soil (38)

GLIEMEROTH (61) bepaalde de maximale onttrekkingsdiepte door de invloed van de neerslag te elimineren. De gewassen werden nl. geteeld onder glas. Evenals in het bovengenoemde onderzoek betrof het hier een tot op grote diepte homogeen profiel. Het vochtgehalte van de grond nam bij de oogst lineair met de diepte toe. Hetzelfde is het geval bij een onderzoek van MOREL en RICHER (120), weergegeven in fig. 1.

De daling van het vochtgehalte aan de onderzijde van de lijn voor zomertarwe is, zoals uit de door de auteurs gegeven granulaire analyse blijkt, te wijten aan een lichtere laag in het profiel. In dit geval bedroeg de neerslag van mei tot september 5,98 cm, zodat mag worden aangenomen dat de grond volledig was uitgeput. De totale wateropname van wintertarwe uit deze lichte kleigrond was 10,44 cm, waarvan 9,68 cm of 93 % uit de laag 0 tot 100 cm. Bij verwaarlozing van verschillen in dichtheid van de grond en aannemende, dat aan het oppervlak het verwelkingspercentage is bereikt, blijkt de laag tot 80 cm diepte voor 90 % van het opgenomen vocht te hebben gezorgd. Daarbij is 33 % van het vocht tussen veldcapaciteit en verwelking niet opgenomen.

Ook uit het onderzoek van VERHOEVEN (180) volgt voor wintertarwe en raaigras

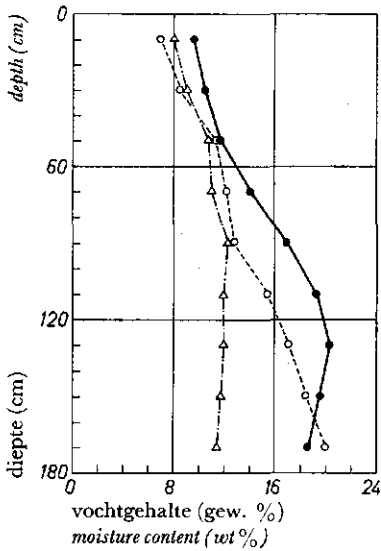


FIG. 1.
Vochtgehalten op verschillende diepten na de oogst van luzerne (Δ), winterarwe (\circ) en zomertarwe (\bullet) in een kleigrond in Zd.-Frankrijk naar MOREL en RICHER (120)

FIG. 1.
Moisture content at various depths after harvest of alfalfa (Δ), winter wheat (\circ) and spring wheat (\bullet) in a clay soil in southern France after (120)

een lineaire afname van de opgenomen hoeveelheid vocht met de diepte (zie 197). De hierbij gevonden lijn loopt echter iets minder steil dan in de voorgaande gevallen. Dit kan worden toegeschreven aan een geringere bewortelingsdichtheid ten gevolge van het zoutgehalte van de ondergrond.

BAIER (11) vond op fijnzandige kalkarme leem in Hohenheim, dat in het droge jaar 1949 onder erwten, rogge, tarwe, koolzaad, haver en suikerbieten het vochtgehalte op 100 cm diepte niet daalde beneden 19 gew. %. Is hierbij aan de oppervlakte het verwelkingspercentage (10%) bereikt, dan zal bij een lineaire afname van de onttrekking met de diepte de laag 0-80 cm 85% van de totale hoeveelheid vocht geleverd hebben, terwijl uit deze laag 30% van het verschil tussen veldcapaciteit en verwelking niet is opgenomen.

Uit deze gegevens blijkt, dat door eenjarige gewassen een hoeveelheid water aan de grond kan worden onttrokken, die ongeveer overeenkomt met 50% van het verschil tussen veldcapaciteit en verwelking in de wortelzone. Dit geldt dan voor gewassen verbouwd in een gematigd klimaat en op profielen waarin geen lagen voorkomen, die storend werken op de wortelgroei.

Passen we bovenstaande toe op enkele Nederlandse gronden, waarvan de vochthoudendheid is weergegeven in tabel 4, dan levert de laag 0-80 cm bij een onttrekkingsdiepte van 120 cm gemiddeld 89% van het beschikbare vocht.

Bovenstaande regel geldt niet voor overjarige gewassen als klaver en luzerne, waarvoor veel grotere onttrekkingsdiepten zijn vastgesteld (28, 120, 121, 143). Voor grasland zal een veel geringere onttrekkingsdiepte gelden. Een redelijke waarde is 40 cm (44, 46a). Daar hier echter de bovenlaag vrij dicht beworteld is, kan wel worden aangenomen, dat de gehele 40 cm tot het verwelkingspunt wordt terugge-

TABEL 4. Waarden voor veldcapaciteit en verwelking in vol. % van enkele Nederlandse gronden naar STOLP en WESTERHOF (169)

Grondsoort	Veldcapaciteit	Verwelking
Zand (Westland)	8,7	2,0
Zand (Wageningen)	18,0	6,8
Klei (Westland)	36,5	21,5
Klei (Bovenkarspel)	43,0	29,0
Veen (Westland)	39,0	20,0

TABLE 4. *Field capacity and wilting percentage (vol. %) for some soil types in the Netherlands (169)*

bracht. Hetzelfde geldt voor discontinue profielen, bestaande uit een dunne klei- of humuslaag op een zandige ondergrond waarin de wortels niet doordringen.

c. *Vochttoevoer uit het grondwater*

Waterverplaatsing in een onverzadigde grond zal hoofdzakelijk in vloeibare vorm moeten plaatshebben.

In het voor de plant belangrijke traject van zuigspanningen zal de relatieve vochtigheid van de bodemlucht niet dalen beneden 98 % (pF 4,2). Bij 20° C is de dampspanning van water 17,5 mm (166), zodat bovengenoemde relatieve vochtigheid overeenkomt met een dampdruk van 17,2 mm. Zou dit drukverschil voorkomen over een afstand van 1 mm, dan zou bij een poriëvolume van de grond van 50 % een waterverplaatsing in dampvorm door diffusie van 0,03 mm/etmaal optreden.

De waterverplaatsing in dampvorm ten gevolge van temperatuurverschillen kan evenmin van grote betekenis zijn. Tussen 10 en 20° C neemt de verzadigingsdampdruk ongeveer met 1 mm per °C toe. Een temperatuurgradiënt overeenkomend met 1° per cm, zou dan bij een poriëvolume van 50 % eveneens een waterverplaatsing door diffusie van 0,03 mm/etm. tengevolge kunnen hebben. De voor de waterverplaatsing belangrijke temperatuurgradiënten treden echter alleen maar op bij bevroren grond en dit is voor ons probleem dus niet belangrijk.

De stroming voldoet aan wetten analoog aan de wet van Darcy voor verzadigde grond. Echter met dien verstande, dat de doorlatendheid in het eerste geval niet constant is, doch afneemt bij kleiner wordend vochtgehalte. In dit geval spreekt men veelal over capillair geleidingsvermogen in plaats van over doorlatendheid (24, 35, 75, 119, 145, 146, 147, 148, 167, 202). De ouderen van bovengenoemde onderzoekers menen, dat beneden een vochtgehalte overeenkomend met de veldcapaciteit, het capillair geleidingsvermogen nul is. Als zodanig geeft MOORE (119) voor zand een pF = 1,90; voor fijnzandige leem 1,96; voor zavel 2,08 en voor klei 2,15. Nieuwere onderzoekingen (148, 167) wijzen echter uit dat deze grootte dan weliswaar zeer klein is, doch dat nog waterverplaatsing mogelijk is.

Een overzicht van het in de literatuur gevonden verband tussen het geleidingsvermogen en de zuigspanning voor verschillende grondsoorten is gegeven in fig. 2. Hierbij zijn de minerale gronden al naar gelang hun zwaarte verdeeld in 3 groepen. Voor zand- en kleigronden blijken alle gegevens samen een vrij redelijk verband te geven. Voor veengronden zijn te weinig metingen verricht om hierover te kunnen

FIG. 2.

Verband tussen het capillair geleidingsvermogen (K^1) en de zuigspanning (ψ)
 ○ *Bennet sand, Superstition sand, Coastella loamy fine sand* (145)
 □ *Pachappa fine sandy loam, Milville silt loam* (145); *Ramona loam* (148). *Shelby silt loam, Marshal silt loam* (35).
 △ *Chino silty clay loam, Preston clay* (145); *Yolo light clay* (119); *Komklei* (202)
 ● *Peat soils* (147)

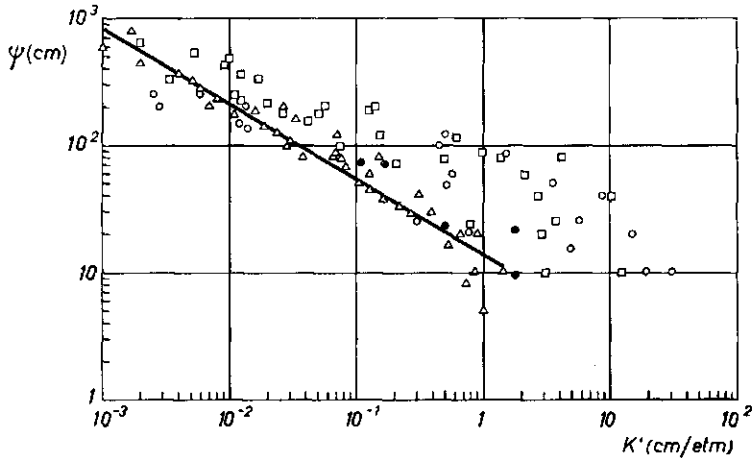


FIG. 2.

Relation between the capillary conductivity (K^1) and the moisture tension (ψ)

oordelen. Wel wordt door RICHARDS en WILSON (147) verondersteld, dat de lijn voor deze gronden nog steiler moet zijn dan die voor zand, hetgeen door een onderzoek van MAKINK (107) wordt bevestigd.

Voor zandgronden kan tevens een indruk worden verkregen van de grootte van het capillair geleidingsvermogen met behulp van de door IRMAY (75) ontwikkelde formule:

$$\frac{K^1}{K} = \frac{(S - S_0)^3}{(1 - S_0)^3} \quad (2.1)$$

Hierin is:

K de doorlaatfactor van de verzadigde grond,

K^1 het capillair geleidingsvermogen,

S de fractie van de poriën gevuld met water,

S_0 de fractie van de poriën gevuld met water, dat niet deel neemt aan de stroming.

Voor waarden van S_0 gelijk aan 0,10 à 0,15 worden resultaten verkregen, die goed overeenstemmen met de experimenten van WYCKOF en BOTSET (207). Het verloop van de verhouding K^1/K voor verschillende waarden van S is weergegeven in fig. 3.

Ook CHILDS en COLLIS-GEORGE (34) geven een berekeningsmethode voor zandgronden. Deze is gebaseerd op de poriënverdeling in de grond, zoals die bepaald kan worden uit de vochtkarakteristiek. Het nadeel is echter dat de methode vrij omslachtig is en bovendien slechts het verloop van het geleidingsvermogen geeft. Voor de bepaling van de juiste grootte moet één waarde bekend zijn om de z.g.

„matching factor” te kunnen berekenen. Vergelijking van deze berekeningsmethode met de experimenten van WYCKOF en BOTSET leverde voor de methode van CHILDS en COLLIS-GEORGE 10 tot 40 % hogere waarden voor K^1/K , als S ligt tussen 0,2 en 0,7. Daar echter te weinig vergelijkingsmateriaal ter beschikking staat, kan niet worden nagegaan, in hoeverre de genoemde methoden geschikt zijn voor de berekening van het geleidingsvermogen. Hiertoe zullen meer gemeten waarden van zandgronden bekend moeten zijn.

FIG. 3.

Verband tussen de verhouding K^1/K en de verzadiging (S) van zandgrond volgens experimenten van WYCKOFF EN BOTSET (—) en berekening volgens verg. 2.1 met $S_0 = 0,10$ (- - -) en $S_0 = 0,15$ (- . . -)

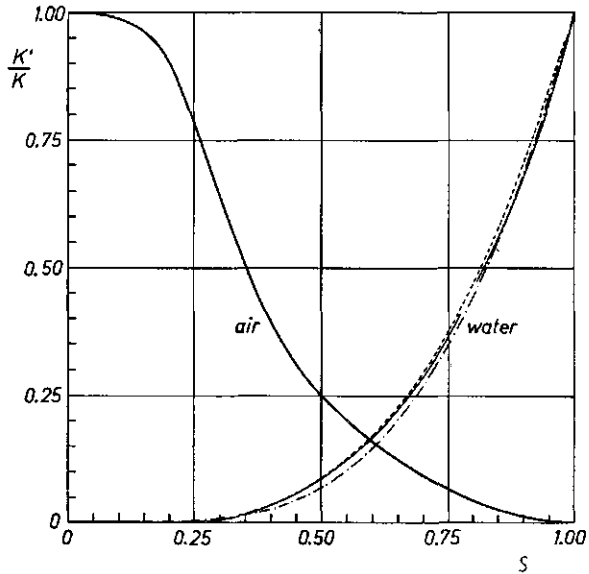


FIG. 3.

Relation between the ratio K^1/K and the saturation (S) of sandy soil after experiments by (207) (—) and calculation with eq. 2.1 in which S_0 is 0.10 (- - -) and 0.15(- . . -).

Wat de bepalingen van het geleidingsvermogen betreft, hebben alleen die van WIND (202) betrekking op grond in zijn natuurlijke ligging; de overige zijn alle verricht aan geroerde monsters. Omdat blijkt, dat het geleidingsvermogen bij eenzelfde vochtgehalte toeneemt bij dichtere pakking van de grond (167) en dat tevens de temperatuur een nog onbekende invloed uitoefent, is een nader onderzoek naar deze invloeden gewenst. Bovendien zal de invloed van het hysteresiseffect nader moeten worden onderzocht (35).

Uit het capillair geleidingsvermogen is de waterverplaatsing te berekenen. Het eenvoudigste geval doet zich voor, wanneer men uitgaat van de aanwezigheid van een grondwaterstand. In de evenwichtstoestand, waarin geen verdamping en/of waterafvoer optreedt, is de zuigspanning waaronder het water op een bepaalde hoogte boven het freatisch vlak staat, gelijk aan de afstand tot dit vlak. Dat deze evenwichtstoestand inderdaad optreedt moge blijken uit fig. 4, ontleend aan VAN HEESEN (66). Hiervoor werden in het voorjaar van 1954 de in het terrein gevonden vochtgehalten van een aantal kleiprofielen in het polderdistrict Veluwe vergeleken met de uit de vocht karakteristiek bepaalde gehalten.

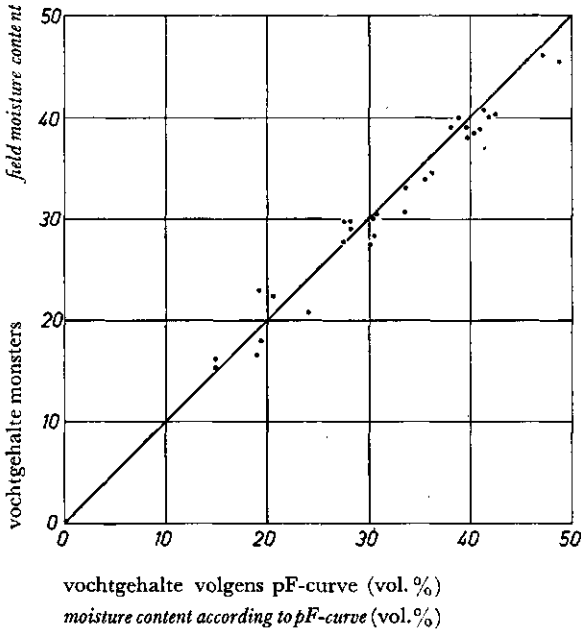


FIG. 4.
Verband tussen het vochtgehalte op verschillende hoogten boven de grondwaterstand volgens de pF-curve en het in het voorjaar op dezelfde hoogte in het terrein gevonden gehalte naar VAN HEESSEN (66)

FIG. 4.
Relation between the moisture content at various heights above groundwater level read from pF-curve and the spring moisture content in the field at the same height after (66)

Verandering van de vochtspanningsgradiënt in één van beide richtingen veroorzaakt een vloeistofverplaatsing. De verticaal opwaarts gerichte stroming kan dan worden weergegeven door de formule:

$$v = K^1 \left(\frac{d\psi}{dz} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Hierin is:

- v de stroomsnelheid in $\text{cm}^3/\text{cm}^2 \text{ etm.}$,
- K^1 het capillair geleidingsvermogen in $\text{cm}/\text{etm.}$,
- ψ de zuigspanning in cm ,
- z de afstand tot het freatisch vlak in cm .

Bij een eenvoudig wiskundig verband tussen K^1 en ψ is het mogelijk de benodigde vochtspanningsgradiënt voor het transport van een bepaalde hoeveelheid vocht te berekenen. Uit fig. 2 blijkt, dat dit verband voor kleigrond bij benadering is weer te geven door:

$$K^1 = 250 \psi^{-2} \quad (2.3)$$

Invullen van deze waarde in 2.2 en omwerken geeft:

$$z = \int \frac{d\psi}{\frac{v}{250} \psi^2 + 1} \quad (2.4)$$

Hieruit volgt voor z

$$z = \frac{1}{\sqrt{v/250}} \operatorname{arctg} \left(\psi \sqrt{\frac{v}{250}} \right) + \text{Const.} \quad (2.5)$$

Heeft nu het transport plaats vanuit het grondwater, dan kunnen we $\psi = 0$ stellen voor $z = 0$, waardoor de constante = 0 wordt. Doordat formule 2.3 niet geldt voor $\psi < 20$ is dit niet helemaal juist, doch de hierdoor ontstane fout zal gering zijn (zie ook 202).

Voor verschillende gevallen zal integreren van soortgelijke vergelijkingen als 2.4 niet mogelijk zijn. Oplossingen kunnen dan gevonden worden door numeriek integreren of de bepaling van ψ met een benaderingsmethode als ontworpen door DE WIT (204), welke ook door WESSELING en VAN WIJK (197) is toegepast. De intervallen zullen hierbij echter kleiner moeten worden genomen dan in laatstgenoemd artikel het geval is.

In fig. 5 is het verband tussen z en ψ uitgezet voor verschillende waarden van v , berekend met de vergelijking 2.5.

Hieruit blijkt, dat het water met een gegeven stroomsnelheid tot een bepaalde hoogte boven het freatisch vlak kan stijgen. Zetten we de aldus gevonden waarde van deze hoogte af tegen de stroomsnelheid, dan ontstaan lijnen als in fig. 6. In deze figuur zijn tevens de waarden opgenomen, die door ons door numerieke integratie van een soort-

FIG. 5.
Het verband z en ψ volgens verg. 2.5.
De cijfers naast de curven geven de stroomsnelheid in cm/etm.

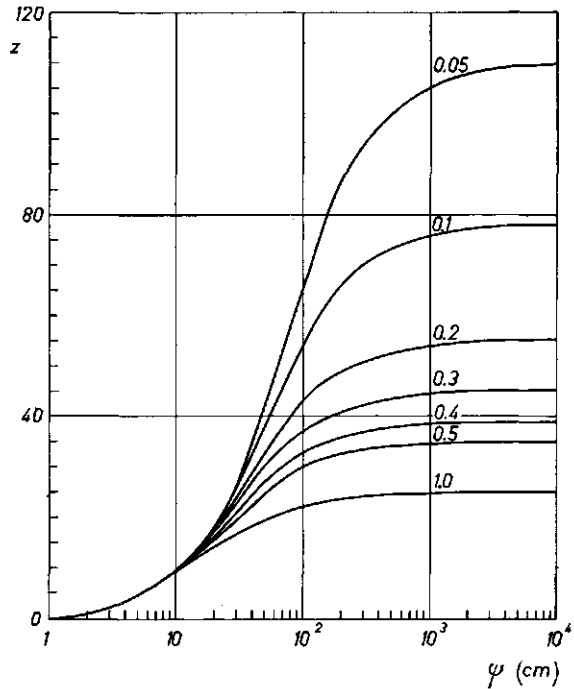


FIG. 5.
The relation between z and ψ according to eq. 2.5. Figures near curves indicate the velocity in cm/day.

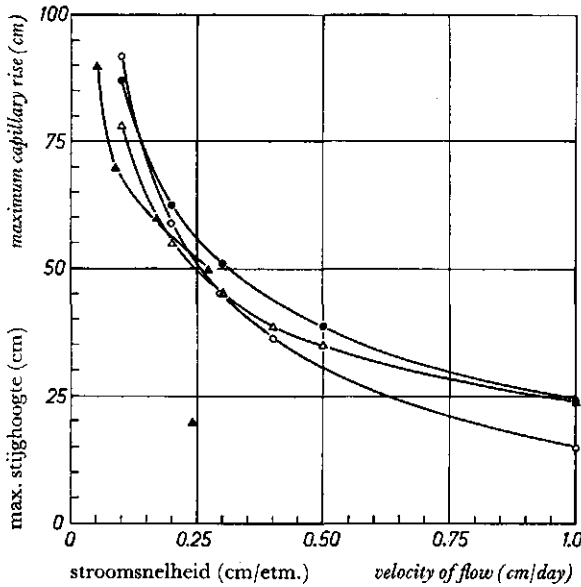


FIG. 6.

De maximale capillaire stijghoogte bij verschillende stroomsnelheden

- △ volgens verg 2.5.
- door WIND (202) voor komklei berekend
- voor Preston clay berekende waarden
- ▲ door MAZEE (111) experimenteel bepaald

FIG. 6.

Maximum height of capillary rise for various velocities of flow

- △ according to eq. 2.5
- values for heavy clay after (202)
- values for Preston clay
- ▲ experimental values for sandy soil after (111)

gelijke vergelijking als 2.4 voor Preston clay (145) zijn verkregen, alsmede de door WIND (202) voor komklei berekende en de door MAZEE (111) experimenteel bepaalde waarden voor zandgrond met een U-cijfer van 75 en een kleigehalte van 6%. Vergelijken we nu de berekende stijghoogten met de door MAZEE experimenteel bepaalde, dan blijken beide voor lage snelheden een soortgelijk verloop te vertonen. Bij hogere snelheden treden echter bij de experimentele gegevens aanmerkelijk lagere waarden op. Deze afwijkingen komen bij alle door MAZEE onderzochte gronden voor. De oorzaak hiervan moet worden gezocht in de apparatuur.

De bepalingen werden nl. uitgevoerd door de grond te brengen in een glazen buis (A). In deze buis werd d.m.v. een fles van Mariotte (M) een constante grondwaterstand gehandhaafd. Aan de bovenkant van de grondkolom werd water onttrokken door middel van een gazen korfje met silicagel (S). Bij de hoge grondwaterstanden moet nu de opnamesnelheid van het gel bepalend zijn geweest voor de capillaire opstijging, zoals een eenvoudige berekening kan aantonen. Bij een volumegewicht van het gel van 0,7 en een wateropnemend vermogen van 40% van zijn eigen gewicht, kan elke cm^3 gel 0,28 gram water opnemen. Bij twee maal per dag verversen van het gel komt dit – bij een capillaire opstijging van 0,28 cm per dag – neer op een verzadigde laag van 0,5 cm. Stellen we de relatieve vochtigheid van de lucht in het gel op nul, dan is de gemiddelde drukgradiënt van de waterdamp bij 20° C gelijk geweest aan 17,5:0,4 mm Hg/cm, als het gaasje een dikte had van 0,05 cm en 0,1 cm boven de grond hing. Bij een porositeit van het gel van 50% zou dan de diffusiesnelheid gelijk moeten zijn aan 3,5 mg/cm^2 dag. Bij metingen aan een analoog apparaat met silicagel van verschillende grofheid, bleek echter de maximum opnamesnelheid te liggen tussen 0,24 en 0,31 cm/dag. Bepalingen van de capillaire opstijging bij hogere grondwaterstanden is met een dergelijk apparaat alleen mogelijk, indien de opnamecapaciteit van het gel wordt verhoogd door b.v. de lucht te laten circuleren.

Men mag dus wel aannemen, dat de door MAZEE gegeven waarden voor de capillaire opstijging bij hoge grondwaterstanden te klein zijn. Bij zijn onderzoek ging het er echter meer om de hoogte te bepalen tot waarop een hoeveelheid van 2 mm/dag op kan stijgen, zodat minder aandacht is besteed aan de hogere snelheden.

Berekening als bovenstaande kunnen ook worden uitgevoerd, wanneer een grondwaterstand ontbreekt of zich op grotere diepte bevindt. Hierbij moet echter op een bepaalde diepte een zekere zuigspanning worden aangenomen.

Voor gronden, waarin een constante grondwaterstand wordt gehandhaafd, gelden voor een bepaalde verdamping zuigspanningscurven als weergegeven in fig. 5. Het is echter denkbaar, dat het spanningsverloop beïnvloed wordt door de beworteling van het gewas, omdat ook de wortels een hoeveelheid water kunnen transporteren. Dit komt dan neer op een groter capillair geleidingsvermogen van de grond dan in het laboratorium wordt gemeten. Voor grasland toont WIND (203) aan, dat deze invloed zeer gering is. Voor bouwland kan dit echter vanwege het grotere aantal wortels op grotere diepte wel het geval zijn. Uit metingen van WIND (201) blijkt inderdaad, dat het spanningsverloop in dit geval minder steil is.

Houdt men de grondwaterstand niet op een constant niveau, dan zal deze dalen

FIG. 7.

Apparaat voor de bepaling van de capillaire opstijging, zoals gebruikt door MAZEE (111)

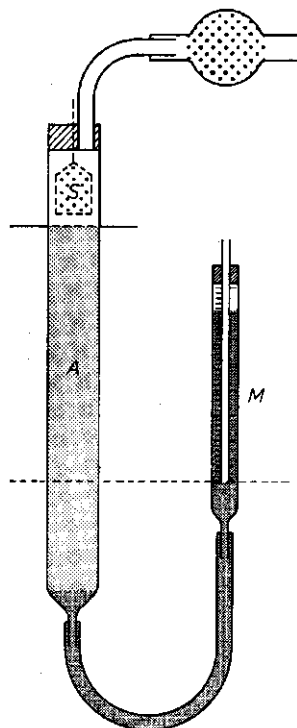


FIG. 7.

Apparatus used by (111) to evaluate capillary rise in soils

onder invloed van de verdamping en de daardoor ontstane capillaire opstijging. Hierbij is dan niet zonder meer te zeggen, hoeveel vocht uit het grondwater aan de plant ten goede komt. Een berekeningsmethode voor deze hoeveelheid zal worden gegeven in hoofdstuk IV.

4. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Voor een gewas dat voldoende water ter beschikking heeft en de grond volledig bedekt, kan met vrij grote nauwkeurigheid de verdamping worden berekend met behulp van meteorologische gegevens als relatieve zonneshijn, relatieve vochtigheid, temperatuur en windsnelheid. Het teruglopen van de verdamping door een tekort aan vocht in de grond is afhankelijk van de groeisnelheid van de wortels en de mogelijke waterverplaatsing in de grond.

De totale waterbehoefte gedurende het groeiseizoen kan worden aangegeven als percentage van de zg. potentiële verdamping. Voor akkerbouwgewassen kan dit percentage gesteld worden op 75. Voor grasland en b.v. klaver en lucerne moet het vooralsnog op 100 gesteld worden. Het verschil in deze hoeveelheden is toe te schrijven aan een verschil in bedekkingsgraad van de bodem.

Het bestaan van een zg. „kritische periode” is niet zonder meer bewezen, hoewel wel aanwijzingen in deze richting bestaan. Doorgaans vallen deze perioden echter samen met de tijd, dat de bodemvoorraad is uitgeput.

Wat de wateropname van de plant uit de grond betreft, kan worden aangenomen dat bij afwezigheid van een grondwaterstand in gematigde streken, de helft van de hoeveelheid vocht tussen veldcapaciteit en verwelking in de wortelzone door de plant kan worden opgenomen. Hetzelfde geldt indien de grondwaterstand zich op zodanige diepte bevindt, dat deze geen invloed op de beworteling heeft. Een uitzondering hierop vormt grasland, dat waarschijnlijk de bovenste 40 cm van de grond tot het verwelkingspercentage uit kan putten als gevolg van de dichte beworteling in deze laag. In homogene profielen kan de onttrekkingsdiepte voor granen, peulvruchten en bieten gesteld worden op 1,2 m; voor aardappelen op 1 m.

In een onverzadigde grond voldoet de verplaatsing van water aan wetten, analoog aan de wet van Darcy. Bij bekend zijn van het capillair geleidingsvermogen kan uit het verloop van de zuigspanning het capillair transport worden berekend. Omgekeerd kan bij een bepaalde opstijgingssnelheid de benodigde zuigspanningsgradiënt worden bepaald.

III. DE LUCHTBEHOEFTE DER GEWASSEN,

I. DE EISEN DIE DE PLANT STELT AAN DE LUCHTVOORZIENING

Uit de onderzoeken omtrent de luchtbehoefte van de plant (31, 36, 159) blijkt, dat deze zowel afhangt van de temperatuur als van de plantesoort. Van de land- en tuinbouwgewassen gelden b.v. aardappelen, tomaten, erwten en maïs als zeer luchtbehoefstig. Granen daarentegen stellen veel minder eisen.

Over het algemeen vertonen vrijwel alle planten een normale groei, wanneer het zuurstofgehalte in het wortelmilieu ligt boven 10%. Daar echter in de grond de som van O_2 en CO_2 vrijwel constant is (60, 78, 160), zou dit O_2 -gehalte eerst bereikt worden bij ca 10% CO_2 . Nu blijkt uit CO_2 -bepalingen, dat dergelijke hoge gehalten vrijwel nooit voorkomen. Een achteruitgang in groei zal dus veel eerder veroorzaakt worden door een te hoge CO_2 -, dan door een te lage O_2 -concentratie (31, 98, 150).

LUNDEGAARDH (98) stelt als eis, dat het CO_2 -gehalte op 15 cm diepte niet boven 1% mag komen. Op grotere diepten kunnen dan nog aanmerkelijk hogere waarden voor komen, zoals b.v. blijkt uit berekeningen van VAN BAVEL (15), VAN DUIN (45) en ROMELL (150) en metingen van NELLER (123). Een gehalte van 1% CO_2 is dus op zichzelf niet schadelijk, zoals sommige auteurs suggereren (161, 169). PETERSON (139) vermeldt, dat volgens CHANG en LOOMIS eerst 10 à 12% CO_2 schadelijk is voor de meeste planten. Het CO_2 -gehalte rondom de wortels kan echter aanmerkelijk hoger zijn dan CO_2 -bepalingen van de grond aangeven, omdat de monsters een veel groter volume omvatten (114). Dit effect zal des te groter zijn, naarmate de grond minder dicht beworteld is. Hierdoor zijn dan ook de hoge waarden van CHANG en LOOMIS te verklaren. Het gemiddelde gehalte in de grond zal dan echter aanmerkelijk kleiner moeten zijn dan 10 à 12%.

Men kan zich nu afvragen, welk luchtgehalte de grond moet hebben om de gevormde CO_2 zo snel af te voeren, dat dergelijke hoge gehalten in het wortelmilieu worden voorkomen.

BAVER en FARNSWORTH (19) vonden een sterke teruggang in de opbrengst van suikerbieten, indien de „non-capillary porosity” d.w.z. het luchtgehalte van de grond bij veldcapaciteit lager was dan 10%. BAVER (18) geeft dit gehalte van een aantal grondsoorten, welke zijn opgenomen in tabel 5.

TABEL 5. Luchtgehalte van verschillende grondsoorten bij pF 2,7 naar BAVER (18)

Silt loam	0,13-0,15
Clay	0,12-0,15
Clay	0,18
Loam	0,11
Sandy clay loam	0,09-0,13
Clay	0,115
Silt loam	0,10
Quartzsand (20-40 mesh)	0,22

TABLE 5. Air content of various soil types at field capacity (18)

Ook PAYNE (129) geeft een soortgelijk overzicht, waaruit blijkt, dat dit gehalte meestal ligt bij ca. 10%. VISSER (183) vond, dat op doorgaans goed producerende kleigronden in Groningen het luchtgehalte bij veldcapaciteit 10% was, onafhankelijk van het kleigehalte van die gronden.

Aangezien de veldcapaciteit het minimumvochtgehalte van de grond is dat door ontwatering bereikt kan worden, zijn bovengenoemde luchtgehalten blijkbaar voldoende voor het gewas. De veldcapaciteit treedt echter alleen op aan het begin van het groeiseizoen, wanneer de beworteling nog zeer ondiep is en de CO₂-productie zich beperkt tot de bovenlaag, waardoor de uitwisseling gemakkelijk plaats vindt. In dit licht moeten ook de door KOPECKY (zie 60) gegeven noodzakelijke luchtgehalten gezien worden, welke in tabel 6 zijn opgenomen.

TABEL 6. Minimum luchtgehalten voor verschillende gewassen naar KOPECKY (zie 60)

Gras	0,06-0,10
Tarwe	0,10-0,15
Haver	0,10-0,15
Gerst	0,15-0,20
Suikerbieten	0,15-0,20

TABLE 6. Minimum air content for various crops after KOPECKY (see 60)

Het moet dan ook ten sterkste worden betwijfeld, of bovengenoemde luchtgehalten van de grond voldoende zijn om de gevormde CO₂ af te voeren bij grotere worteldiepten.

KOHNKE (94) gaat niet uit van een bepaald luchtgehalte van de grond, doch gebruikt de term „aeration porosity limit” om onderscheid te maken tussen grote en kleine poriën. Als grens tussen beide wordt een diameter van 60 μ aangenomen. D.w.z. dat de voor de aëratie belangrijke poriën geen water meer bevatten bij een pF = 1,7. Hij concludeert hieruit, dat de grondwaterstand minstens 90 cm moet zijn, wil de bovenste 40 cm van de grond een voldoende luchtgehalte hebben. In wezen is dit criterium echter foutief. Een lichte grond zou dan nl. een veel grotere luchtbehoefte hebben dan een zwaardere. Immers bij een pF = 1,7 zal in de eerste al een relatief groot deel van de poriën leeg zijn, terwijl dit in de laatste nog slechts zeer klein is. Bovendien bestaat er, afgezien van natte perioden, geen evenwicht tussen grondwaterstand en vochtgehalte overeenkomend met de vochtspanningscurve. Door de verdamping treden nl. hogere zuigspanningen op dan met deze curve overeenkomen.

Strekt de activiteit van de wortels (en de microben) zich tot op grotere diepte uit, dan is dus niet zonder meer te zeggen, welk luchtgehalte de grond moet hebben. In de volgende paragrafen zal dan ook worden nagegaan of voldoende gegevens bekend zijn om het CO₂-gehalte van de grond te berekenen met behulp van de fysische processen, die de uitwisseling van gassen tussen grond en atmosfeer bewerkstelligen.

2. DE LUCHTUITWISSELING TUSSEN GROND EN ATMOSFEER

a. De diffusie in het algemeen

Onderzoekingen van BUCKINGHAM (29) en ROMELL (150, 151) tonen aan, dat de

uitwisseling van gassen tussen grond en atmosfeer door aerodynamische stroming, veroorzaakt door verschillen in totale druk (luchtdrukveranderingen, temperatuursverschillen, invloed van de wind en het indringen van regen in de grond) vrijwel geen invloed uitoefent op de totale gasuitwisseling. Een uitzondering hierop vormen zeer grove gronden onder steile helling. Deze gevallen kan men echter als voor de landbouw van geen betekenis zijnde, buiten beschouwing laten. Tegenwoordig wordt dan ook algemeen aangenomen, dat de diffusie de enige factor is, waarmee men bij de aëratie van de grond moet rekenen (15, 18, 45, 78, 99, 132, 142, 172).

De stationaire diffusie van een gas door een grondkolom, waarin dit gas niet wordt opgenomen of geproduceerd, voldoet aan de vergelijking:

$$q = -D \frac{\delta c}{\delta z} \quad (3.1)$$

Hierin is:

- q de diffunderende hoeveelheid in grmol/cm² sec,
- D de diffusieconstante in cm²/sec,
- c de concentratie in grmol/cm³,
- z de afstand in cm.

Voor het geval er per tijds- en volume-eenheid een hoeveelheid α wordt geproduceerd (α positief) of opgenomen (α negatief) geldt voor de verandering van de hoeveelheid gas in de grond de vergelijking:

$$\frac{\delta q}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left(D \frac{\delta c}{\delta z} \right) + \alpha \quad (3.2)$$

Voor de stationaire toestand geldt dan:

$$\alpha + \frac{\delta}{\delta z} \left(D \frac{\delta c}{\delta z} \right) = 0 \quad (3.3)$$

Voor de berekening van de aëratie zullen oplossingen van deze vergelijkingen gezocht moeten worden (zie hoofdstuk IV). Hiervoor moeten echter de diffusieconstante van de grond en de waarde van α bekend zijn. Deze grootheden en de factoren die hierop van invloed zijn, zullen dus eerst aan een nadere beschouwing worden onderworpen.

b. De diffusieconstante van grond

De diffusie van gassen door water is ca. 10⁴ maal zo klein als die door lucht (166). De diffusie in de grond moet dus vrijwel geheel plaatshebben door de met lucht gevulde poriën. Behalve BUCKINGHAM (29) vonden alle onderzoekers dan ook een rechtlijnig verband tussen het met lucht gevuldë poriënvolume x_1 en de diffusieconstante, althans voor waarden van x_1 tussen 0,10 à 0,15 en 0,6.

Voor kleine waarden van x_1 zullen de met lucht gevulde poriën geen aaneengesloten geheel meer vormen, waardoor de diffusieconstante nul wordt. De opgegeven waarden, waarvoor dit het geval is, lopen nogal uiteen, zoals uit het door VAN DUIN (45) gegeven overzicht (tabel 7) blijkt.

TABEL 7 Verhouding van de diffusieconstanten in grond (D_g) en in lucht (D_l) en het geblokkeerd poriënvolume, naar VAN DUIN (45)

Onderzoeker	Materiaal	D_g/D_l	Geblokkeerd por. vol.
PENMAN	„sand” glaspoeder	0,66 x_l	0,0
BLAKE EN PAGE	„clay”	0,71 x_l	0,0
	„clay”	1,3 $x_l - 0,16$	0,10
TAYLOR	„loam”	0,66 x_l	0,0
	kwartzsand	0,97 $x_l - 0,10$	0,10
	glaspoeder	0,78 $x_l - 0,08$	0,10
VAN BAVEL	„sand”, glaspoeder	0,72 $x_l - 0,06$	0,08
HAGAN	„fine sand”,		0,26-0,29
	„fine sandy loam”, „loam”		
	„clay”		
BUCKINGHAM	sand, „clay loam” „loam”		0,15
VINE	„clay”		0,12

TABLE 7. The ratio D_g/D_l and the fraction of air-filled pores in the soil (45)

De waarnemingen van VAN BAVEL (15), PENMAN (132) en TAYLOR (172) zijn weergegeven in fig. 8. Rechthoekige vereffening geeft:

$$D_g/D_l = 0,92 x_l - 0,12 \quad (3.4)$$

Evenals VAN DUIN (45) zullen wij voor onze berekeningen gebruik maken van de vergelijking:

$$D_g/D_l = 0,9 x_l - 0,1 \quad (3.5)$$

geldend voor $0,13 < x_l < 0,6$. Beneden de waarde $x_l = 0,13$ is de diffusieconstante misschien niet geheel nul, doch is in elk geval wel zeer klein (172). Hieruit blijkt dus al, dat de grond in elk geval een luchtgehalte moet hebben dat ligt boven 0,13.

Hoewel het poriënvolume met een geheel andere exponent in de vergelijkingen voor de permeabiliteit voor lucht voorkomt, vindt men ook hier voor de waarden van x_l 0,10 à 0,15 een permeabiliteit die nul is (29, 75, 207).

Volgens (166, p. 644) hangt de diffusieconstante, behalve van de aard van het gas en het medium waardoor de diffusie plaats heeft, af van de temperatuur en de totale druk volgens:

$$D = D_0 \left(\frac{T}{273} \right)^m \frac{p_0}{p} \quad (3.6)$$

Hierin is T in °K, p_0 en p in atm en $m = 1,75$ à $2,00$. Daar de concentratie van het gas eveneens afhangt van de temperatuur, is de invloed hiervan op de diffusie zelf dus ongeveer de helft van die, welke voor D geldt.

c. De CO_2 -produktie

In de literatuur zijn verschillende methoden beschreven om de CO_2 -produktie van de grond te bepalen. Resultaten van deze metingen zijn in diverse artikelen vermeld (29, 69, 90, 93, 98, 99, 102, 123, 138, 162, 164, 193).

FIG. 8.

Verband tussen de verhouding D_g/D_l en x_l volgens bepalingen van VAN BAVEL (\blacktriangledown), PENMAN (\triangle) en TAYLOR (\circ)

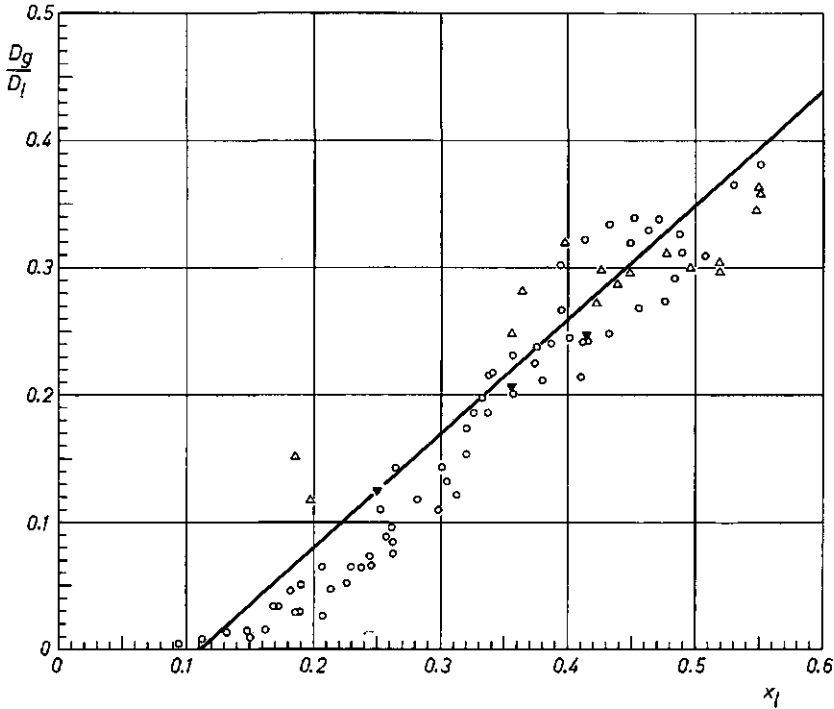


FIG. 8.

Relation between the ratio D_g/D_l and the fraction of airfilled pores x_l after experiments by VAN BAVEL (\blacktriangledown), PENMAN (\triangle) and TAYLOR (\circ)

Wat de grootte betreft, trekt ROMELL (150) uit waarnemingen van SjöJSTROM de conclusie, dat de CO_2 -productie in de zomer voor bouwland varieert van 0,55 tot 0,82 g/m² uur en voor bos van 1,2 tot 2,3 g. De waarden van KOEPF (91) voor bouwland lopen uiteen van 0,15 tot 0,40. WURMBACH (206) geeft voor grasland waarden van 8,8 tot 11,9 g. Dit is in overeenstemming met de veel hogere CO_2 -gehalten, die RUSSELL en APPELYARD (160) in grasland vonden.

Uit bovenstaande cijfers blijkt, dat de CO_2 -productie sterk kan variëren. De voornaamste factoren die op de grootte ervan invloed hebben, zijn de temperatuur, de fysische, chemische en biologische eigenschappen van de grond en de aard en het ontwikkelingsstadium van het gewas.

De invloed van de temperatuur blijkt duidelijk uit de waarnemingen van KOEPF (88, 89) MAGERS (102) en WURMBACH (206). Deze invloed zal volgens LUNDEGAARDH (98, 99) tot 20° C de voornaamste factor zijn. Daarboven is het vochtgehalte van de grond veelal limiterend.

Dat het vochtgehalte van de grond een belangrijke rol speelt, blijkt ook uit het jaarlijkse verloop. Verschillende onderzoekers (88, 89, 90, 160, 162, 193, 206) vonden een maximum in de voorzomer en herfst en een minimum in de zomer. Ondanks de hogere temperaturen in de laatstgenoemde periode blijft de produktie beperkt door het lage vochtgehalte van de grond.

d. De activiteitsverdeling met de diepte

Naast de totale CO₂-produktie is de verdeling met de diepte van belang voor de diffusiesnelheid. Hoewel geen directe activiteitsbepalingen op verschillende diepten in de literatuur werden gevonden, is omtrent het verloop met de diepte toch wel enig inzicht te verkrijgen, mits men de totale activiteit splitst in die van de wortels en van de microben (bacteriën, schimmels en actinomyceten). De invloed van het overige bodemleven, voor wat betreft de produktie van CO₂ kan men achterwege laten, omdat het belang hiervan waarschijnlijk gering is.

Over het algemeen zal zowel het aantal bacteriën als het aantal wortels met de diepte afnemen. Voor wat de eerste betreft blijkt dit uit de verdeling, zoals die door WAKSMAN (zie 150) gevonden werd als gemiddelde van een tweekal tuingronden, een weiland en een bosgrond. Deze verdeling is weergegeven in fig. 9. Schimmels en actinomyceten vertoonden vrijwel dezelfde verdeling.

Neemt men aan, dat de activiteitsverdeling evenredig is met het aantal bacteriën, dan zal de CO₂-produktie tot een bepaalde zuurstofconcentratie constant moeten zijn. LUNDEGAARDH (98) vermeldt, dat volgens SCHLOSSIG en WOLLNY de activiteit van de bacteriën bij temperaturen van 14 tot 25° C bij luchtdoorvoer werd gehandhaafd tot een zuurstofconcentratie van 6%. Zonder luchtdoorvoer werd door WOLLNY een geringe afname geconstateerd bij 15% O₂. Schimmels daarentegen zijn vrijwel immuun voor een lage O₂- en een hoge CO₂-concentratie. Alleen in de diepere lagen is dus een teruggang van de activiteit mogelijk als gevolg van een tekort aan O₂.

Tegen een bacteriëntelling en ook tegen een CO₂-produktiebepaling in het laboratorium is als bezwaar aan te voeren, dat een bepaald aantal geen maat is voor de activiteit (98, 206). Bepaalde in de grond actieve bacteriën zouden b.v. op een kunstmatige voedingsbodem niet kunnen gedijen, terwijl anderzijds sporen van andere bacteriën onder gunstige omstandigheden wel tot ontwikkeling komen. Dit bezwaar is waarschijnlijk niet van al te grote betekenis, omdat ook de wortelverdeling een soortgelijk verloop vertoont. Ter illustratie hiervan is in fig. 9 ook de door PENNINGSFELD (138) bepaalde wortelverdeling van selderij aangegeven. Uit een onderzoek van GLIEMEROTH (61) aan haver, bonen en gerst op een homogeen leemprofiel blijkt een vrijwel identiek verloop met de diepte.

We kunnen, evenals VAN DUIN (45) de activiteitsverdeling voorstellen door de algemene formule:

$$\alpha(z) = \alpha(0) \left\{ 1 - \left(\frac{z}{l} \right)^c \right\} \quad (3.7)$$

Hierin is:

- α de activiteit in grmol/cm³ sec,
- z de beschouwde diepte in cm,
- de diepte, waarop de activiteit nul is.

FIG. 9.

Relatieve afname van het aantal bacteriën met de diepte als gemiddelde van een drietal gronden volgens WAKSMAN (---) en de relatieve wortelverdeling van selderij volgens PENNINGSFELD (—)

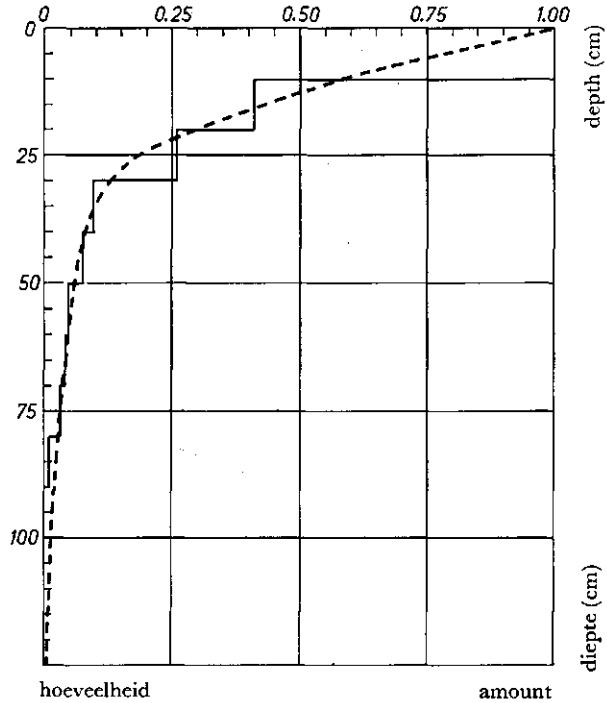


FIG. 9.

Relative decrease of the amount of bacteria with depth as an average for three types of soil after WAKSMAN (---) and the relative distribution of the roots of a celery crop after (138) (—)

Een constante verdeling met de diepte kan zich b.v. voordoen op profielen, bestaande uit een dunne humusrijke laag op een humusloze of een kleilaag op zand, waarbij de wortels niet in de onderliggende laag doordringen. Hierbij kan zonder bezwaar l gelijk gesteld worden aan de dikte van de laag.

Hetzelfde geldt voor grasland. Daarin zit, afhankelijk van het gebruik, 80 à 90% van de wortels in de bovenste 10 cm (62, 87). Waarschijnlijk zal men ook hier de beste benadering vinden door l te stellen op 20 à 40 cm, tenzij de invloed van de microben zich uitstrekt tot op veel grotere diepte.

Voor een homogeen akkerbouwprofiel, waarin de wortelgroei niet wordt belemmerd door een hoge grondwaterstand, zal als gemiddelde een vrij goede benadering worden verkregen door de vergelijking 3.7 met $c = 1/4$. Voor granen is l dan te stellen op 125 cm, voor aardappelen op 90 à 100 cm.

Over het algemeen wordt de activiteit hier dus tot op veel grotere diepte beschouwd dan in de literatuur, waar deze veelal beperkt wordt gedacht tot de bovenste 30 cm (zie o.a. 15, 45). In deze laag vindt weliswaar het grootste deel van de activiteit plaats, doch ook op grotere diepte wordt CO_2 geproduceerd, getuige de aanwezigheid van wortels en microben.

e. *Verandering van de activiteit gedurende het groeiseizoen*

Uit diverse onderzoeken (90, 91, 113, 206) blijkt de CO_2 -productie geleidelijk met de ontwikkeling van het gewas toe te nemen. MEYER en SCHAFFER (113) toonden aan, dat dit voornamelijk te wijten is aan een vergroting van de wortelomvang omdat de bodembedekking geen invloed had. Omtrent de toename van het aantal bacteriën in deze tijd werden geen cijfers gevonden.

Wat het aantal wortels betreft, geeft het reeds eerder genoemde onderzoek van GLIEMEROTH (61) een beeld. Het resultaat hiervan is voor een tweetal gewassen en data weergegeven in fig. 10.

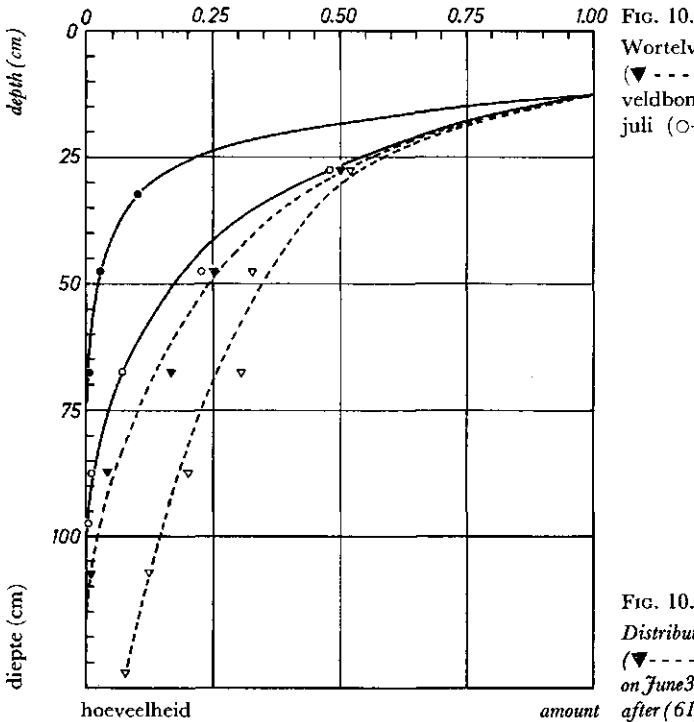


FIG. 10.
Distribution of roots of barley on June 3 (▼---▼) and July 29 (---) and of beans on June 3 (●—●) and July 31 (○—○) after (61)

Het blijkt, dat eenzelfde verdeling tijdens het groeiseizoen vrijwel gehandhaafd blijft. Formule 3.7 kan dus steeds voor de berekening van het CO_2 -gehalte blijven gelden, mits voor l passende waarden worden gebruikt.

f. *Beschrijving van de aëratie met behulp van de stationaire diffusie*

Uit het voorgaande blijkt, dat de activiteit een min of meer periodiek verloop moet vertonen, analoog aan de temperatuur. Daar echter allerlei factoren als eigenschappen van de grond en aard en ontwikkelingsstadium van het gewas eveneens een rol spelen, is het moeilijk algemene regels voor de grootte van de activiteit te geven. Bij

de berekening van de diffusie zal men bovendien uit moeten gaan van een bepaalde activiteitsverdeling met de diepte. Onze kennis hieromtrent is echter vrij gering. Verder zullen variaties in de activiteit eerst met enige vertraging in diepere lagen doordringen.

Beschrijving van de aëratie volgens de niet-stationaire toestand zal dus stuiten op moeilijkheden, omdat over een aantal van de te gebruiken grootheden te weinig bekend is. Bovendien zal het evenwicht voortdurend worden verstoord door toe- of afname van het vochtgehalte onder invloed van neerslag en verdamping. Evenals bij de drainage zal men echter voor korte tijdsbestekken kunnen volstaan met de stationaire toestand. Afwijkingen hiervan zullen doorgaans geringer zijn dan bij de grondwaterstroming. Zo berekent ROMELL (150), dat per minuut ca. 2% van de lucht in de bovenste 20 cm van de grond wordt ververst. Veranderingen in de activiteit kunnen dus slechts een relatief geringe invloed hebben, omdat de partiële drukken van de gassen in de bodem zich veel sneller kunnen wijzigen dan het geval is met de activiteit (15).

Het beschouwen van achtereenvolgende stationaire toestanden zal bij een stijgende activiteit een hoger CO₂-gehalte geven dan in werkelijkheid het geval is, omdat de verhoogde activiteit vertraagd in diepere lagen optreedt. In het voorjaar is de luchtuitwisseling het belangrijkste, omdat de grond dan relatief veel water bevat. Omdat de activiteit – afgezien van de dagelijkse fluctuaties – in deze periode in het algemeen toenemend is, zal men door het beschouwen van de stationaire toestand nooit een te laag CO₂-gehalte in de grond berekenen.

3. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Algemeen wordt aangenomen, dat schade door een slechte luchtvoorziening eerder plaatsvindt door een teveel aan CO₂, dan door een tekort aan O₂. Hoewel hierbij bekend is, dat de diverse gewassen verschillende eisen stellen, zijn de juiste criteria voor de CO₂-gehalten niet bekend. Vooralnog lijkt de eis, dat voor alle gewassen het CO₂-gehalte op 15 cm diepte niet boven 1% mag komen, het meest voor de hand liggende criterium voor de instelling van de ontwateringsdiepte. Op grotere diepten en rondom de wortels zullen dan weliswaar veel hogere gehalten voorkomen, doch deze zullen – gezien de hoge cijfers die in de literatuur genoemd worden – waarschijnlijk niet spoedig een nadelige invloed hebben op de plant.

Uit de in de literatuur gevonden gegevens blijkt niet zonder meer, hoe groot het luchtgehalte van de grond moet zijn om de CO₂-concentratie zodanig laag te houden, dat geen schade optreedt. Wel blijkt een gehalte van ongeveer 10% voldoende te zijn bij geringe worteldiepten. Om ook voor grotere worteldiepten een indruk van het benodigde luchtgehalte van de grond te krijgen, is nagegaan of voldoende gegevens beschikbaar zijn om het CO₂-gehalte te berekenen.

De luchtuitwisseling tussen grond en atmosfeer vindt hoofdzakelijk plaats door diffusie. Factoren, die invloed hebben op de aëratie zijn de diffusieconstante, de totale CO₂-productie en de verdeling hiervan met de diepte.

De diffusieconstante hangt af van het luchtgehalte van de grond. Is dit gehalte lager dan ca. 13%, dan is hij verwaarloosbaar klein. Dit komt overeen met de minimale luchtgehalten die in de grond worden gevonden bij veldcapaciteit.

De CO₂-produktie hangt af van de temperatuur, de aard en het ontwikkelingsstadium van het gewas en de fysische, chemische en biologische eigenschappen van de grond.

De berekening van de aëratie met behulp van de niet-stationaire diffusie stuit op moeilijkheden, omdat over een aantal van de te gebruiken grootheden te weinig bekend is. Voor korte tijdsbestekken kan men echter wel volstaan met de stationaire diffusie. Hiervoor is naast de diffusieconstante kennis van de CO₂-produktie en de verdeling hiervan over de diepte nodig. Voor gronden, bestaande uit een dunne bovenlaag waar beneden geen wortels doordringen, en voor grasland kan de activiteit over de gehele diepte constant worden verondersteld. Voor homogene akkerbouwprofielen ontbreken echter vooralsnog gegevens over de activiteitsverdeling.

In hoofdstuk IV zal voor enkele gevallen de CO₂-concentratie onder verschillende omstandigheden worden berekend met behulp van de in dit hoofdstuk gegeven formules.

IV. BEPALING VAN DE GUNSTIGSTE GRONDWATERSTANDSDIEPTE

I. DIRECTE BEPALING VAN DE MEEST GEWENSTE ONTWATERINGSDIEPTE

In tegenstelling met de in de volgende paragraaf te behandelen methoden, zullen hier alleen de onderzoeken omtrent de meest gewenste ontwateringsdiepte behandeld worden, die gebaseerd zijn op directe bepalingen van de relatie opbrengst-grondwaterstand.

Een goed overzicht van de ervaring betreffende de gunstigste ontwateringsdiepte in ons land tot 1917, is vastgelegd in een enquête van het Ministerie van Landbouw (182). Zonder uitzondering blijkt men voor alle gewassen een lage winterwaterstand te prefereren. Hoge standen in die periode acht men niet nadelig, mits zij slechts gedurende enkele dagen optreden en niet bij herhaling voorkomen.

Wat de zomerstanden betreft, worden voor akkerbouwgewassen de volgende gewenste diepten opgegeven:

veen	1,5 à 1,8 m
klei	1,5 à 1,8 m
rodoorn	0,75 à 2,0 m
zand	0,75 à 1,0 m

Voor grasland lopen de opgegeven waarden uiteen van 0,20 tot 0,75 m, afhankelijk van grondsoort en gebied. Recentere gegevens, gebaseerd op onderzoek, zijn van dezelfde orde van grootte.

Opbrengst-grondwaterstandsproeven voor veengrond worden o.a. beschreven door EDEN e.a. (47), HARMER (64), NICHOLSON (126), NICHOLSON en FIRTH (128), ROE (149) en v. D. WOERDT (205). Naast de veensoort is de dikte van de veenlaag van belang (185). Hiermee is wel eens onvoldoende rekening gehouden, o.a. door ROE (149). In een algemeen overzicht merkt RUSSELL (157) op, dat bij de eerstgenoemde (Engelse) onderzoeken weinig aandacht besteed is aan de egalisatie, in tegenstelling met Nederlands onderzoek.

Onderzoek op minerale gronden wordt beschreven door BLAUW (22), HOOGHOUDT (73), MINDERHOUD (115), VERINK en VISSER (181), VISSER (184, 186) en WESTRA en VISSER (199).

VISSER (187) geeft een overzicht van de methoden van onderzoek. Hierin worden genoemd:

- a. het grondwaterstandsproefveld,
- b. monsterplekken met onderscheiding naar factorencomplexen,
- c. monsterplekken met onderscheiding naar groeifactoren.

Bij de eerste methode worden de verschillende te onderzoeken waterhuishoudkundige toestanden (grondwaterstandsdiepten) kunstmatig aangelegd. Het meest bekende proefveld in ons land is dat te Nieuw-Beerta. Bij de beide andere methoden kiest men verschillende reeds in het terrein bestaande toestanden. Past men onderscheiding naar factorencomplexen toe, dan worden de plekken zodanig in-

gedeeld, dat de overige omstandigheden (profiel, grondsoort, bemesting, gewas enz.) zoveel mogelijk gelijk zijn. Daar echter de verschillende grootheden veelal gekoppeld zijn, is het moeilijk een bepaalde invloed aan één factor toe te schrijven.

Daarom tracht men bij de laatste methode de invloed van elke factor afzonderlijk te bepalen door een differentiatie naar alle factoren toe te passen. Een beschrijving van deze methode werd in bovengenoemd artikel gegeven¹. De methode, die algemeen wordt toegepast bij de afdeling Onderzoek van de Cultuurtechnische Dienst, eist echter een grote ervaring in het onderkennen van de verschillende factoren.

Beschouwen we de vorm van een zg. opbrengst-ontwateringsdieptecurve, zoals weergegeven in fig. 11 ontleend aan MASCLEE (110), dan zien we, dat de curve een maximum vertoont bij een grondwaterstand van 55 cm. Het linkergedeelte van de

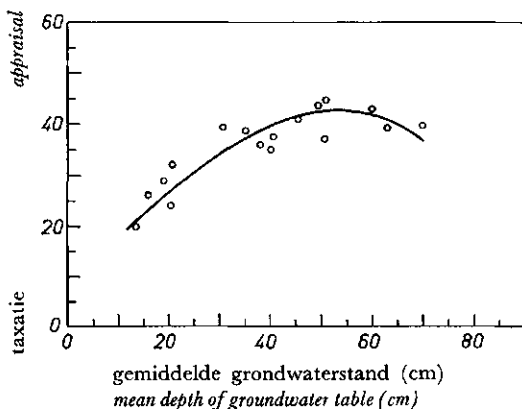


FIG. 11.

Verband tussen de taxatie van grasland op moerasveen en de gemiddelde grondwaterstand voor het jaar 1947 naar MASCLEE (110)

FIG. 11.

Relation between the appraisal of grassland on bogpeat and the mean depth of the groundwater table for the year 1947 after (110)

opbrengstdepressie kan toegeschreven worden aan een gebrek aan lucht, het rechter gedeelte aan een tekort aan vocht. Een dergelijke curve zal dus in wezen zijn samengesteld uit twee afzonderlijke krommen, waarvan de een de reactie van het gewas op de lucht, de ander die op de vochtvoorziening weergeeft (36, 107, 190). Als gevolg van een verandering in de lucht- en watervoorziening valt te verwachten, dat het maximum van de curve zich in een droog jaar naar links, in een nat jaar naar rechts zal verplaatsen. Voor een bepaald gewas en een gegeven grondsoort zal men dus voor elk jaar, afhankelijk van de weersomstandigheden, een andere curve moeten vinden. Dat dit inderdaad het geval is, blijkt uit een door ons uitgevoerde bewerking van de door HOOGHOUDT (73) gegeven opbrengstcijfers van het grondwaterstandsproefveld te Nieuw-Beerta. De opbrengst is hierbij uitgedrukt in procenten van die, verkregen op het vak met een grondwaterstand van 120 cm. De opbrengsten van het 150 cm-vak zijn weggelaten, omdat hierop vaak oogstdepressies optraden door legering van het gewas. Verder is als maat voor het droog of nat zijn van het jaar het verschil tussen de potentiële verdamping gedurende het groeiseizoen (E_T) en de neerslag in die periode (N) genomen. De aldus verkregen waarden zijn in fig. 12

¹ Een uitvoerige beschrijving van deze methode wordt gegeven door Th. J. Ferrari: Een onderzoek over de stroomruggonden van de Bommelerwaard, met als proefgewas de aardappel. Versl. Landbouwk. Onderz. 58. 1 (1952).

FIG. 12.

Relatieve opbrengst van zomergranen en (E_T-N) gedurende het groeiseizoen voor resultaten van het grondwaterstandsproefveld te Nieuw-Beerta (73)

● grondwaterstand 40 cm

○ grondwaterstand 60 cm

▽ grondwaterstand 90 cm

De opbrengst is uitgedrukt in procenten van het vak met een grondwaterstand van 120 cm

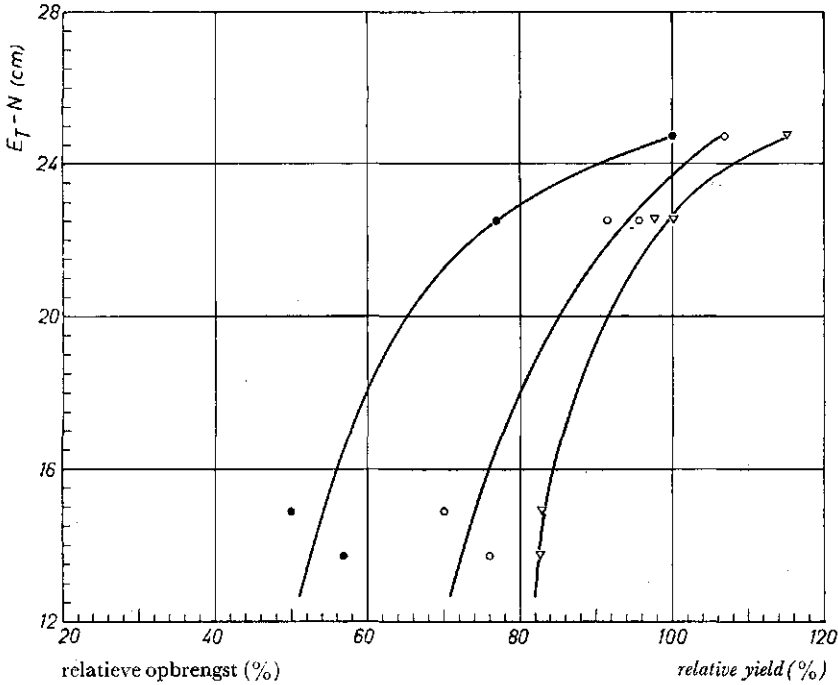


FIG. 12.

Relation between the relative yield of summer graincrops and (E_T-N) during the growing season

● depth of water table 40 cm below surface

○ depth of water table 60 cm below surface

▽ depth of water table 90 cm below surface

The yield is expressed in percent yield of the plot with the groundwater table at a depth of 120 cm

tegen elkaar uitgezet. Het blijkt dan, dat de relatieve opbrengst van de vakken met hoge grondwaterstanden des te groter is, naarmate (E_T-N) groter en dus het jaar droger is.

Bij bovengenoemd onderzoek werd de grondwaterstand constant op een bepaalde diepte gehouden. Fig. 11 heeft daarentegen betrekking op een - over een bepaalde periode berekende - gemiddelde grondwaterstand. Dit gemiddelde zegt echter niets

over grootte, tijdstip en duur van de fluctuaties. Beide zijn echter van belang. Hoge standen in de winter zullen van weinig betekenis zijn, mits zij lager blijven dan 30 à 50 cm beneden maaiveld (195). Bij grasland kunnen natte omstandigheden een nadelige invloed hebben op de kwaliteit van het grasbestand (181). Verder veroorzaken hoge standen in het voorjaar een late groei van het gras, waardoor de totaal-opbrengst nadelig wordt beïnvloed. Van aardbeien is bekend, dat hoge grondwaterstanden in

FIG. 13.

Verband tussen de opbrengst van rogge op zandgrond in 1949, de gemiddelde grondwaterstand en de jaarlijkse fluctuatie volgens BLOEMEN (23). De getrokken lijnen geven punten aan met dezelfde opbrengst. De gestippelde lijnen verbinden punten met dezelfde grondwaterstand in de zomer en verschillende diepten in de winter. Bij A is de grondwaterstand gedurende het gehele jaar 100 cm. Bij B is de gemiddelde stand 85 cm; de fluctuatie is 30 cm. De diepte in de zomer was dus 100 cm, in de winter 70 cm.

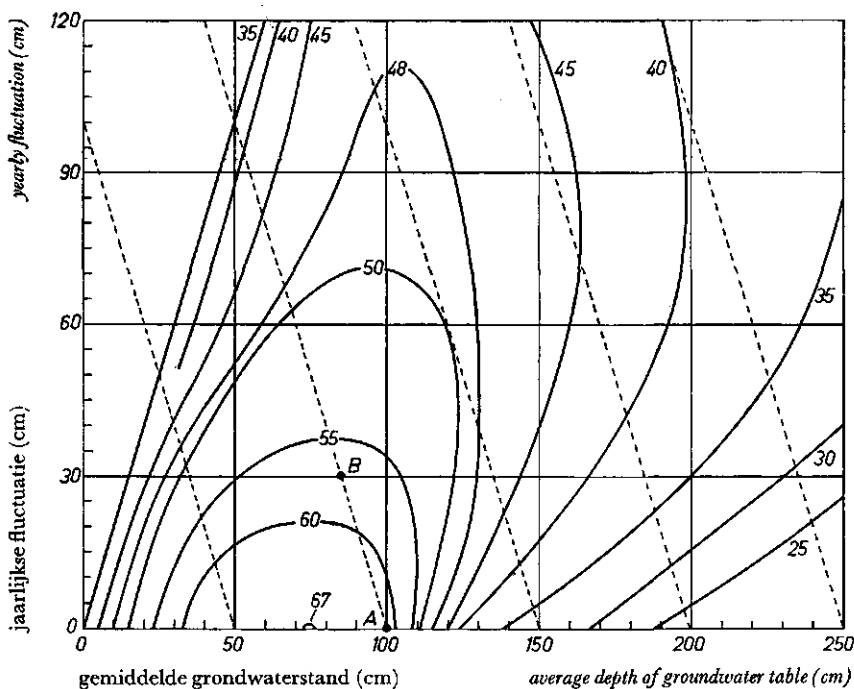


FIG. 13.

Relation between the yield of a rye crop on sandy soil in the year 1949, the mean depth and the yearly fluctuation of the water table after (23). The full drawn lines indicate points with the same yield. The dashed lines indicate points with the same depth of the groundwater table in summer and different depths in winter. So for instance at point A the water table is constant at a depth of 100 cm during the whole year. In point B the average depth is 85 cm; the fluctuation 30 cm. So the depth in summer was 100 cm and in winter 70 cm.

augustus nadelig zijn, omdat in deze maand een sterke wortelgroei optreedt (186).

Anderzijds is een tijdelijke verhoging van de grondwaterstand in de zomer voordelig voor het gewas, omdat de watervoorziening gunstig er door wordt beïnvloed. Dit blijkt b.v. uit een onderzoek van BLOEMEN (23). Hierbij werd voor rogge op zandgrond zowel de gemiddelde grondwaterstand als de grootte van de fluctuaties in rekening gebracht. Uit de aan dit onderzoek ontleende fig. 13 blijkt, dat bij een gemiddelde grondwaterstand van 1,25 m en dieper een hogere opbrengst wordt verkregen, naarmate de jaarschommelingen groter zijn.

Er bestaat dus geen algemene opbrengst-grondwaterstandscurve, die geldt voor alle jaren. Waarschijnlijk zullen voor grasland zelfs nog verschillende curven gelden, afhankelijk van het jaargetijde (107). Een curve, geldend voor een bepaald jaar, kan dan ook niet zonder meer een maat zijn voor de gunstigste ontwateringsdiepte.

Bij de beschouwing van het resultaat van één enkel jaar zal men na moeten gaan, in hoeverre in dit jaar een vochttekort is opgetreden en met welke frequentie een groter of kleiner tekort is te verwachten. Evenals bij de reeds eerder beschreven theoretische bepaling voor de gunstigste ontwateringsdiepte (197), dient men voor de bepaling van een eventueel tekort of overschot uit te gaan van de voorjaarsgrondwaterstand. Op het moment dat de verdamping gelijk is aan de neerslag, bestaat er evenwicht tussen het freatisch vlak en het vochtgehalte van de grond daarboven. De beschikbare hoeveelheid vocht kan dus worden bepaald. Waarschijnlijk zal men voldoende nauwkeurig zijn, als voor deze stand het sloot- of polderpeil wordt genomen. Een negatieve waarde van ($E_T - N$) over een bepaalde periode geeft een stijging van de grondwaterstand, indien deze waarde groter is dan het vochtdeficit in de grond.

Fluctuaties van de grondwaterstand gedurende het groeiseizoen worden hiermee dus in rekening gebracht. Tevens dient men na te gaan, hoeveel water uit het grondwater aan de plant ten goede komt en in hoeverre water naar of van elders wordt af- of aangevoerd. De laatste hoeveelheid kan echter dikwijls niet of moeilijk in rekening worden gebracht.

Ook kan men voor de bepaling van de ontwateringsdiepte gebruik maken van een gemiddelde curve, zoals dit wordt gedaan door VAN DER VOORT (191), WESTERHOF (198) en de ZEEUW (209). Hiervoor moet men echter bepalingen over meer jaren ter beschikking hebben, of de berekening baseren op het resultaat van een „gemiddeld” jaar.

2. INDIRECTE BEPALING VAN DE MEEST GEWENSTE GRONDWATERSTAND

a. Algemeen

Bij de indirecte bepaling wordt gebruik gemaakt van bepaalde factoren die afhangen van de diepte van het grondwater, zoals de zuigspanning die het vocht op een bepaalde diepte in de grond heeft en de beschikbare hoeveelheid lucht en/of water in de grond.

Zoals reeds werd opgemerkt, zullen de wintergrondwaterstanden weinig of geen invloed uitoefenen, mits ze niet hoger komen dan 30 à 50 cm beneden maaiveld. Het gaat hier dus voornamelijk om de zomerstanden, waarbij onderscheid gemaakt zal worden in het geval dat infiltratie wordt toegepast, dus een bepaald zomerpeil moet worden ingesteld, en het geval dat de grondwaterstand onder invloed van de verdamping geleidelijk daalt.

b. Bepaling van de grondwaterstand als geen infiltratie wordt toegepast.

Wordt in de zomer geen infiltratie toegepast, dan zal de voorjaarsgrondwaterstand (ontwateringsdiepte) zodanig moeten zijn, dat de grond nog zoveel vocht bevat, dat een vochttekort slechts b.v. ééns per 10 jaar valt te verwachten.

De methode van de berekening van de beschikbare hoeveelheid vocht in de grond werd reeds eerder gegeven (197). Zoals in de vorige paragraaf is opgemerkt, mag men hierbij van de voorjaarsgrondwaterstand het sloot- of polderpeil nemen. Verder kan, zoals uit hoofdstuk II blijkt, voor het najaarsvochtgehalte in homogene profielen een lineair verloop met de diepte worden aangenomen, waarbij aan het oppervlak een vochtgehalte gelijk aan het verwelkingspercentage voorkomt. Aan het onderind van de wortelzone kan het vochtgehalte gesteld worden op dat bij veldcapaciteit.

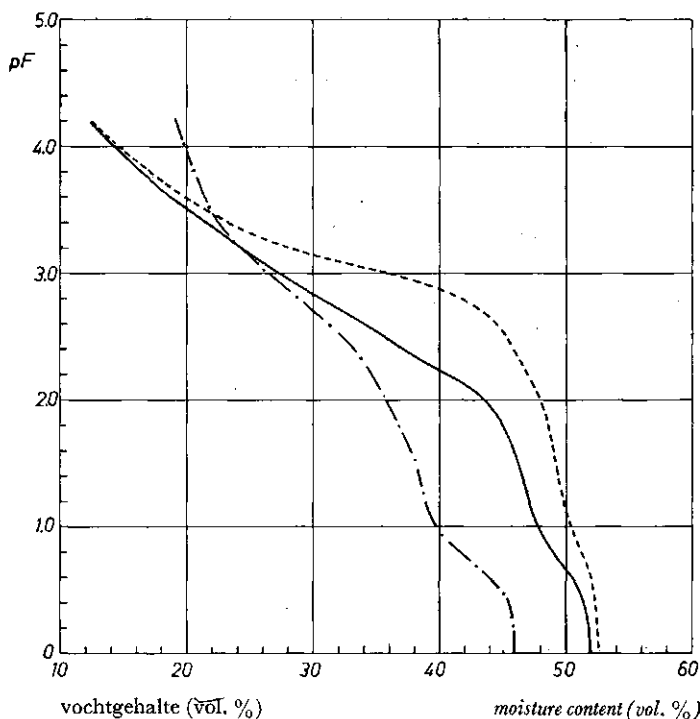


FIG. 14.
pF-curve van de klei-
grond, waarop de in
hoofdstuk V beschreven
afvoermetingen zijn ver-
richt.
(- - - -) Laag 0-30 cm
(—) 30-130 cm
(- - - -) 130-150 cm

FIG. 14.
pF-curve of the light clay
soil on which drain outflow
measurements described in
chapter V are made.
Layer 0-30 cm (- - - -),
30-130 cm (—) and
130-150 cm (- - - -)

Hierbij wordt verondersteld, dat de grondwaterstand geen invloed uitoefent op de uiteindelijke diepte van de wortelzone.

Bij de berekening van de hoeveelheid vocht die aan de plant ten goede komt uit lagen beneden de wortelzone, werd in bovenaangehaald artikel aangenomen, dat deze 3 à 3,5 cm per jaar bedroeg. We zullen thans een methode beschrijven om deze hoeveelheid vast te stellen.

Uit onderzoekingen van VERHOEVEN (180) blijkt de capillaire opstijging hoofdzakelijk in het voorjaar en het begin van de zomer op te treden. Dit is gezien de in hoofdstuk II beschreven daling van het geleidingsvermogen met afnemend vochtgehalte verklaarbaar. Daar het hier echter gaat om de totale hoeveelheid zien we af van een verdere beschouwing van het tijdstip van opstijging. Hierdoor kunnen we het probleem zodanig schematiseren, dat we – uitgaande van een gegeven voorjaarsgrondwaterstand – de opgestegen hoeveelheid bepalen voor het geval het freatisch niveau over een bepaalde afstand gedaald is.

Als voorbeeld voor de berekening nemen we de in hoofdstuk V beschreven lichte kleigrond, waarvan de vochtkarakteristiek is weergegeven in fig. 14. Verder wordt verondersteld, dat het vochtspanningsverloop boven het freatisch niveau voor verschillende stijgsnelheden kan worden weergegeven door fig. 5. Heerst nu aan het onder-eind van de wortelzone een zuigspanning, gelijk aan die bij veldcapaciteit (1/3 atm), dan blijkt uit fig. 5 een transport van 10 mm/etm. nog mogelijk te zijn, als de grondwaterstand zich op 24 cm beneden de wortelzone bevindt. Een stroomsnelheid van 5 mm/etm. is dan nog mogelijk, als deze afstand 33,5 cm is enz. Uit het bekende spanningsverloop kan met behulp van de vochtkarakteristiek ook het verloop van

FIG. 15.

Verloop van het minimumvochtgehalte beneden de wortelzone bij verschillende afstanden van het onder-eind van de wortelzone tot de grondwaterstand voor de kleigrond in fig. 14. De cijfers naast de lijnen geven de maximum stijgsnelheid in cm/etm.

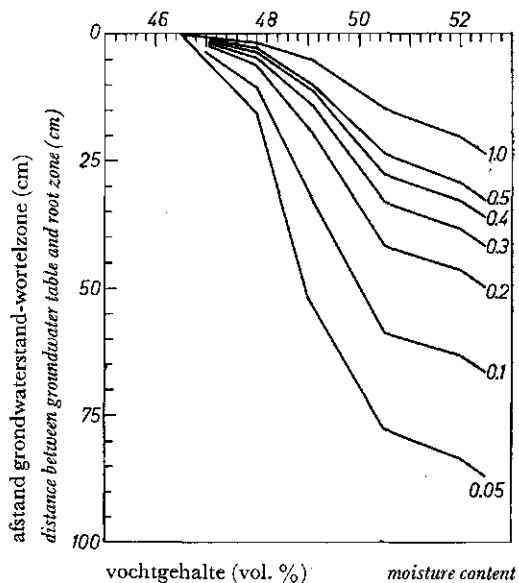


FIG. 15.

Distribution of the minimum moisture content below the root zone at various distances between the lower boundary of the root zone and the groundwater table for the clay soil of fig. 14. Figures near curves indicate the maximum velocity of capillary rise in cm/day.

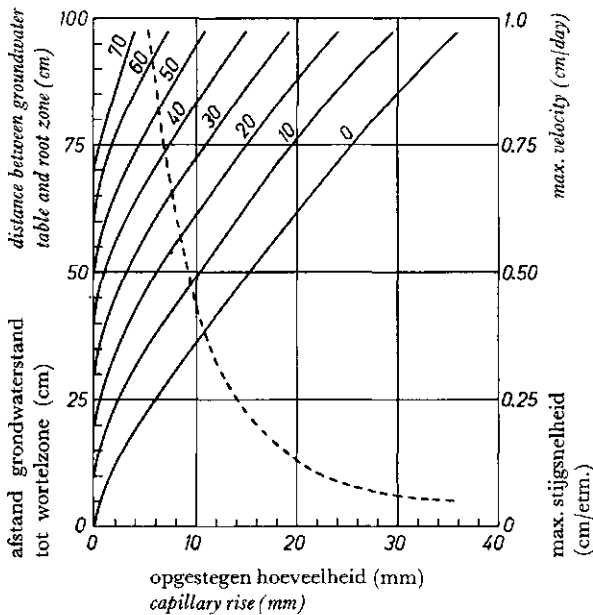


FIG. 16.

Maximaal opgestegen hoeveelheden vocht in mm bij verschillende afstanden tussen grondwaterstand en wortelzone op het eind van het groeiseizoen. De cijfers bij de lijnen geven de afstand tussen de uiteindelijke wortelzone en de grondwaterstand in het voorjaar. De gestippelde lijn geeft de maximum snelheid aan, waarmee een bepaalde hoeveelheid kan opstijgen.

FIG. 16.

Maximum amount of capillary rise at various distances between the groundwater table and the lower boundary of the root zone at the end of the growing season. The figures near full drawn curves indicate the distance between the lower boundary of the root zone at the end of the growing season and the depth of the groundwater table in spring. The dashed line indicates the maximum velocity for various amounts of capillary rise.

het vochtgehalte boven de grondwaterstand worden bepaald. In fig. 15 is dit gehalte weergegeven voor verschillende afstanden van de grondwaterstand tot de onderkant van de wortelzone. Dit zijn de minimumgehalten die bij de betreffende grondwaterstanden op kunnen treden. Een grotere stroomsnelheid bij dezelfde grondwaterstand is immers niet mogelijk en bij een geringere opstijging is het vochtgehalte groter.

De grootste hoeveelheid, die de grond bevatten kan, wordt – evenals in de wortelzone – bepaald door de diepte van de voorjaarsgrondwaterstand. Omdat het vochtverloop bij gegeven grondwaterstand in het voorjaar bekend is, kan de opgestegen hoeveelheid met behulp van de in fig. 15 gegeven gehalten worden berekend. Het resultaat is weergegeven in fig. 16. In deze figuur zijn tevens de opgestegen hoeveelheden uitgezet tegen de stijgsnelheid (gestippelde lijn). Het blijkt dat de opgestegen hoeveelheid sterk toeneemt met afnemende snelheid. Zo kan maximaal 35 mm opstijgen met een snelheid van 0,5 mm/etm. Daar deze hoeveelheid overeenkomt met de door VERHOEVEN (180) gevonden gemiddelde waarde voor kleigronden, zullen we aannemen, dat de opstijging met een snelheid kleiner dan 0,5 mm/etm. voor de plant van weinig waarde is. In dit geval wordt dus verondersteld, dat de grondwaterstand op het eind van het groeiseizoen 91 cm is gedaald sinds het voorjaar.

Voor de uiteindelijke worteldiepte kunnen de voor de wateronttrekking gevonden waarden (hoofdstuk II) worden gebruikt. Waarschijnlijk zal dit ongeveer de diepte zijn, waarboven zich 90 à 95 % van de wortels bevindt.

Voor discontinue profielen kan een soortgelijke berekening worden opgezet. Wordt b.v. een relatief dunne bovenlaag geheel doorworteld, dan geldt voor de bodemvoor-

raad het verschil tussen veldcapaciteit en verwelking, vermenigvuldigd met de dikte van de laag. Voor de berekening van de capillair opgestegen hoeveelheid water kan dan aan het ondereind van de wortelzone een pF overeenkomend met die van de verwelking worden aangenomen.

De ontwateringsdiepte zal zodanig moeten worden gekozen, dat de som van bodemvoorraad en de te verwachten hoeveelheid neerslag tijdens het groeiseizoen zodanig is, dat deze b.v. slechts eens per 10 jaar kleiner is dan $0,75 E_T$ voor akkerbouwgewassen en kleiner dan E_T voor grasland. Om aan de luchtvoorziening te kunnen voldoen, zal de voorjaarsgrondwaterstand echter zodanig diep moeten zijn, dat de bouwvoor (bovenste 20 cm) minstens een luchtgehalte heeft van ca. 13%. Wordt hierbij niet meer voldaan aan de eerste eis, dan is vochtvoorziening op deze wijze niet mogelijk, en zal men dus een zeker tekort moeten tolereren of over moeten gaan tot watertoevoer in de zomer. Dit zal doorgaans het geval zijn in gronden met een slecht waterhoudend vermogen of bij gewassen met een geringe worteldiepte, zoals grasland. In het laatste geval zal zelfs in zeer goede gronden niet op deze wijze in de waterbehoefte kunnen worden voorzien (197). Bovendien is opzetten van de grondwaterstand in het voorjaar minder gewenst, omdat dit – zoals in de vorige paragraaf is opgemerkt – kan leiden tot een late groei.

c. Bepaling van de grondwaterstand bij infiltratie

Ook hier is afgezien van de winterwaterstanden en is alleen aandacht besteed aan de bepaling van de meest gewenste stand in de zomer.

WIND (202) gaat bij de bepaling uit van het capillaire geleidingsvermogen van de grond. Zoals in hoofdstuk II is uiteengezet, kan hiermee het potentiaalverloop boven de grondwaterstand voor verschillende stijgsnelheden worden berekend. Hij stelt de verdamping op een gemiddelde waarde (3 mm/dag). Om uitdroging van de bovengrond te voorkomen, moet dan de stijgsnelheid van het water uit het grondwater gelijk zijn aan deze verdamping. De hoogte, tot waarop deze hoeveelheid kan stijgen, hangt echter af van de toe te laten zuigspanning in de wortelzone. Daarom veronderstelt WIND verder, dat de zuigspanning op 10 cm diepte onder gras niet boven 1000 cm mag komen. De gewenste grondwaterstand kan dan uit curven, als in fig. 5 weergegeven, worden bepaald.

Deze methode is zonder meer toe te passen op een discontinu profiel met een relatief dunne goed doorwortelde bovenlaag, mits het zuigspanningsverloop kan worden berekend voor de ondergrond. Door het stellen van de eis, dat een bepaalde hoeveelheid water in de bovenlaag moet kunnen worden toegevoerd, is men verzekerd van een goed contact tussen beide lagen.

Uit onderzoekingen van MAKKINK (103, 107) blijkt de opbrengst van grasland maximaal te zijn bij zuigspanningen van ca. 100 cm. Zou men deze zuigspanning in de door WIND gebruikte methode in gaan vullen, dan zouden veel hogere grondwaterstanden worden gevonden. Hierbij is het dan de vraag, of de luchtvoorziening niet in het gedrang komt.

FIG. 17.

Bepaling van de gunstigste grondwaterstand bij infiltratie volgens MAKKINK (107)

I droge-stoftoename als functie van de vochtspanning

II vochtspanning als functie van de grondwaterstand

III droge-stoftoename als functie van de grondwaterstand

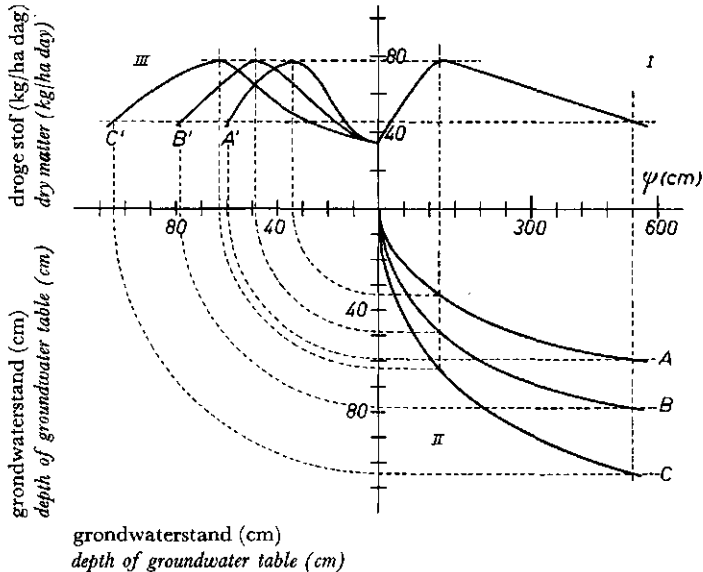


FIG. 17.

Estimation of the depth of the groundwater table in the case of sub-irrigation after (107)

I increase of dry matter as a function of the soil moisture tension

II moisture tension as a function of the depth of the groundwater table

III increase of dry matter as a function of the depth of the groundwater table

Door MAKKINK (107) werd dan ook een methode ontwikkeld, die gebaseerd is op het verband tussen opbrengst en zuigspanning. Deze is schematisch weergegeven in de aan genoemd artikel ontleende fig. 17. Rechts beneden zijn drie zuigspanningsverlopen weergegeven, die corresponderen met van beneden naar boven toenemende verdamping. Combinatie van deze curven met de rechts boven weergegeven opbrengst-zuigspanningscurve geeft de invloed van de grondwaterstand op de opbrengst. Ook hier blijkt weer, dat het optimum van de laatste curven verschuift naar diepere grondwaterstanden, naarmate de wateronttrekking van de grond geringer en dus het jaar natter is.

Bij deze methode worden zowel de lucht- als de watervoorziening in rekening gebracht. Het verloop van de zuigspanning boven de grondwaterstand geeft de mogelijkheden, die de grond hiertoe biedt, terwijl de opbrengst-zuigspanningscurve de invloed van beide factoren op de groei van het gewas omvat. Om deze reden verdient deze methode de voorkeur boven die van WIND. Voor de bepaling van de meest

gewenste grondwaterstand moet dan echter naast het capillair geleidingsvermogen, het verband tussen opbrengst en zuigspanning bekend zijn.

Voor akkerbouwgewassen is deze methode minder geschikt, omdat het spanningsverloop boven de grondwaterstand hier in grotere mate bepaald wordt door de diepere beworteling (201), zodat vermoedelijk niet kan worden volstaan met de bepaling van het capillair geleidingsvermogen in het laboratorium. Verder zal – door de diepere beworteling – waarschijnlijk een minder duidelijk verband tussen opbrengst en zuigspanning op één enkele diepte worden gevonden. Betere resultaten zijn te verwachten, indien men de zuigspanning op verschillende diepten beschouwt. Dit doet b.v. TAYLOR (173) die de zg. „mean integrated soil moisture tension” invoert. Nader onderzoek hierover blijft echter gewenst.

d. Bepaling van de grondwaterstand bij infiltratie uit de aëratie

De grondwaterstand moet zo diep zijn, dat kan worden voldaan aan de luchtbehoefte van het gewas. Zoals in hoofdstuk III is uiteengezet, kan de luchtuitwisseling tussen grond en atmosfeer worden berekend als een geval van stationaire diffusie. Hiertoe moeten zowel het luchtgehalte van de grond als de grootte en de verdeling van de activiteit bekend zijn. Indien het nu mogelijk is uit deze gegevens de CO₂-concentratie te berekenen, dan kan uit de eis dat deze op 15 cm diepte niet groter mag zijn dan 1 %, de gewenste grondwaterstandsdiepte worden vastgesteld.

Daar het verloop van het vocht- en luchtgehalte boven de grondwaterstand afhangt van de aard van de grond en van de verdamping, zijn een aantal gevallen berekend, waarbij het luchtgehalte in de grond met de diepte afneemt volgens:

$$x_{l,z} = x_{l,0} (1 - c_k z^k) \quad (4.1)$$

Voor k zijn de waarden 1 en 2 genomen. De verschillende waarden voor c_k en x_{l,0} en l zijn opgegeven in tabel 8. De oplossingen voor deze gevallen werden berekend door het Mathematisch Centrum te Amsterdam.

TABEL 8. Waarden van l voor de bij de berekening gebruikte waarde van x_{l,0} en c_k.

x _{l,0}	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4
c ₁ · 10 ³ =	4	87,5	120	—	—
	6	58,3	80	94,4	104,8
	8	—	60	70,8	78,5
	10	—	—	56,7	62,9
c ₂ · 10 ³ =	4	93,5	109,6	118	125
	6	76,5	89,5	97,4	102,3
	8	66,1	77,5	84,2	88,6
	10	59,2	69,3	75,3	79,4
	12	54	63,3	68,6	72,4

TABLE 8. Values of l, dependent on x_{l,0} and c_k.

Vooropgesteld is, dat de grondwaterstand geen invloed uitoefent op de activiteitsverdeling, zodat deze kan worden weergegeven door verg. 3.7 met $c = \frac{1}{2}$, dus:

$$\alpha(z) = \alpha(o) \left\{ 1 - \left(\frac{z}{l} \right)^{\frac{1}{4}} \right\} \quad (4.2)$$

Verder is de activiteit nul gesteld op de diepte, waarop $x_l = 0,13$. De l 's waarbij dit optreedt zijn weergegeven in tabel 8. Voor de totale CO_2 -productie kan dan worden geschreven:

$$\int_0^l \alpha(z) dz = \alpha(o) l \cdot \frac{1}{5} = B \quad (4.3)$$

Evenzo geldt:

$$\int_0^z \alpha(z) dz = 5B \left\{ \frac{z}{l} - \frac{4}{5} \left(\frac{z}{l} \right)^{\frac{5}{4}} \right\} \quad (4.4)$$

De afname van de diffusieconstante met de diepte (verg. 3.5) kan in rekening worden gebracht door:

$$D(z) = 0,9 D_l (x_{l,z} - x_{l,l}) \quad (4.5)$$

Bij 15°C is $D_l = 0,14 \text{ cm}^2/\text{sec}$. Verder is:

$$x_{l,l} = x_{l,o} (1 - c_k l^k) \quad (4.6)$$

zodat 4.5 overgaat in:

$$D(z) = 0,126 c_k x_{l,o} (l^k - z^k) \quad (4.7)$$

Invullen van 4.4 in 3.3 en integratie levert:

$$5B \left\{ \frac{z}{l} - \frac{4}{5} \left(\frac{z}{l} \right)^{\frac{5}{4}} \right\} = -D(z) \frac{\delta c}{\delta z} + D(o) \frac{\delta c}{\delta z_o} \quad (4.8)$$

Daar echter $D(l) = 0$ volgt dat:

$$B = D(o) \frac{\delta c}{\delta z_o} \quad (4.9)$$

zodat 4.8 overgaat in:

$$-D(z) \frac{\delta c}{\delta z} = B \left\{ -1 + 5 \frac{z}{l} - 4 \left(\frac{z}{l} \right)^{\frac{5}{4}} \right\} \quad (4.10)$$

Invullen van de betreffende waarde van $D(z)$ uit 4.7 geeft dan voor 4.10:

$$\frac{\delta c}{\delta z} = \frac{B \left\{ -1 + 5 \frac{z}{l} - 4 \left(\frac{z}{l} \right)^{\frac{5}{4}} \right\}}{0,126 c_k x_{l,o} (l^k - z^k)} \quad (4.11)$$

Integratie van deze vorm levert dan:

$$C = C_o - \frac{B}{0,126 c_k x_{l,o}} \int_0^z \frac{-1 + 5 \frac{z}{l} - 4 \left(\frac{z}{l}\right)^4}{l^k - z^k} dz \quad (4.12)$$

Stellen we $t = \frac{z}{l}$, dan geeft 4.12 voor $k = 1$:

$$C = C_o - \frac{B}{0,126 c_1 x_{l,o}} \int_{t=0}^{t=\frac{z}{l}} \frac{-1 + 5t - 4t^4}{1-t} dt = C_o + \frac{BI_1}{0,126 c_1 x_{l,o}} \quad (4.13)$$

en voor $k = 2$:

$$C = C_o - \frac{B}{0,126 c_2 x_{l,o}} \int_{t=0}^{t=\frac{z}{l}} \frac{-1 + 5t - 4t^4}{1-t^2} dt = C_o + \frac{BI_2}{0,126 c_2 x_{l,o}} \quad (4.14)$$

In deze vergelijkingen is C_o de concentratie van de CO_2 aan het oppervlak. Deze is 0,03 mol % of bij $15^\circ C$ gelijk aan $1,27 \cdot 10^{-8}$ grmol/cm³.

Voor I_1 en I_2 werden de in tabel 9 gegeven waarden berekend.

TABEL 9. Waarden voor I_1 en I_2 uit de verg. 4.13 en 4.14 voor verschillende waarden van t

$t =$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
I_1	0	0,163	0,274	0,347	0,388	0,401
I_2	0	0,149	0,236	0,284	0,309	0,316

TABLE 9. Values of I_1 and I_2 according to eq. 4.13 and 4.14 for various values of t

Het verloop van het CO_2 -gehalte met de diepte, voor de gevallen opgenomen in tabel 8, is weergegeven in de figuren 18 en 19, resp. voor een lineair en een kwadratisch verloop van het luchtgehalte. Hierbij is de CO_2 -productie gesteld op 10^{-10} grmol/cm² sec of 154 mg/m² uur. Voor grotere waarden van B kan het CO_2 -gehalte zonder meer worden bepaald door de in de figuren 18 en 19 gevonden gehalten te vermenigvuldigen met het aantal malen dat de beschouwde productie groter is dan bovengenoemde 154 mg/m² uur.

Bedenken we, dat de CO_2 -productie zeker op kan lopen tot het 4 à 5-voudige van genoemde waarde, dan blijkt uit de figuren, dat het luchtgehalte aan het oppervlak voor alle berekende gevallen minstens 0,25 à 0,30 moet zijn, wil het CO_2 -gehalte op 15 cm diepte beneden 1 % blijven.

De voor de infiltratie benodigde grondwaterstand kan nu met behulp van de figuren

FIG. 18.

Verloop van het CO₂-gehalte in de grond met de diepte volgens verg. 4.13 met $B = 154 \text{ mg/m}^2 \text{ uur}$. De cijfers bij de krommen geven resp. de waarden van c en $x_{l,0}$ aan.

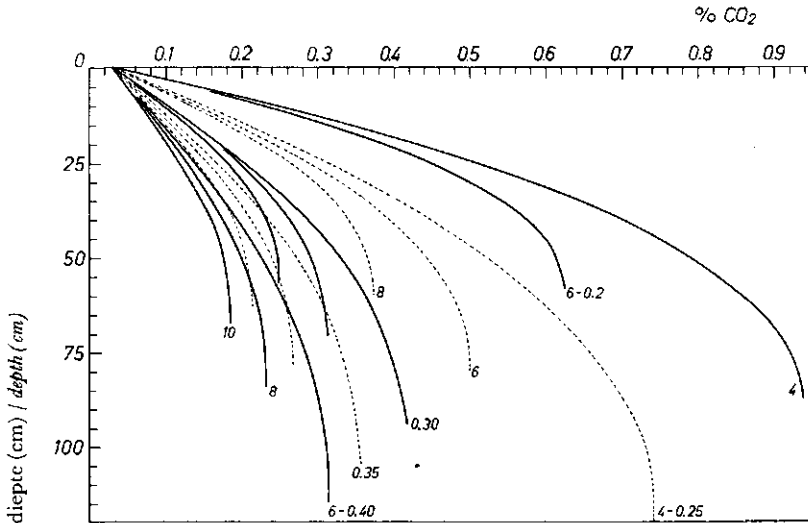


FIG. 18.

Course of CO₂-content in the soil with depth according to eq. 4.13 with $B = 154 \text{ mg/m}^2 \text{ hr}$. Figures near curves indicate the values of c and $x_{l,0}$ respectively.

worden bepaald. Uit het capillair geleidingsvermogen van de grond kan voor een bepaalde verdamping het zuigspannings- en daarmee het vochtverloop boven de grondwaterstand worden bepaald (zie verg. 2.5). Uit het hieruit volgend verloop van het luchtgehalte en de CO₂-productie kan nu de concentratie van dit gas worden bepaald met behulp van de figuren. Aan de hand hiervan moet de grondwaterstand zodanig worden gekozen, dat het CO₂-gehalte op 15 cm diepte beneden 1% blijft. Vooralnog zijn echter te weinig gegevens omtrent het capillair geleidingsvermogen en de CO₂-productie bekend om de methode te toetsen.

e. Berekening

Bij de toepassing van berekening vervalt de noodzaak van de bepaling van de meest gewenste grondwaterstand. Hierbij doet zich echter de vraag voor, op welke gronden berekening is toe te passen en in welke mate water aan de grond mag worden toegevoerd.

Voor grasland kan uit de waarnemingen van MAKINK (103, 107) worden vastgesteld, dat de beste groei wordt verkregen bij een zuigspanning op 10 cm diepte die ligt bij ongeveer 100 cm. STOLP en WESTERHOF (169) vermelden proeven met aard-

appelen, waarbij de maximumopbrengst lag bij zuigspanningen kleiner dan 100 cm. Voor sla bleek het optimum voor zandgrond te liggen bij ca. 400 cm. De vraag is nu, of bij dergelijke lage zuigspanningen het luchtgehalte in bepaalde gronden niet zodanig is, dat de luchtvoorziening te klein wordt.

Uit een onderzoek van LEMON en ERICKSON (97) blijkt, dat tomatenplanten bij 24° C een optimale groei vertoonden, wanneer op 20 cm diepte 30 à 40.10⁻⁵ gram O₂ per cm² per minuut werd aangevoerd. Bij deze proeven in ca. 30 cm diepe potten kan zonder bezwaar de activiteit over de gehele diepte constant worden gesteld. De totale O₂-behoefte kan dan worden gesteld op 1,5 à 2.10⁻⁵ mg/cm²sec. Hieruit volgt, bij verwaarlozing van de anaërobe omzettingen, een CO₂-ontwikkeling van 0,69 à 0,92.10⁻⁶ mg/cm²sec. Volgens VAN BAVEL (15) en VAN DUIN (45) kan dan de concentratie van de CO₂-concentratie worden weergegeven door:

$$C = C_0 - \frac{\alpha}{D} \left\{ -lz - \frac{z^2}{2} \right\} \tag{4.17}$$

Invullen van de betreffende waarden bij 24° C levert voor x₁ de waarde 0,20 à 0,23, indien de CO₂-druk op 15 cm diepte gesteld wordt op 7,6 mm (1%). Uit het boven-

FIG. 19.

Verloop van het CO₂-gehalte in de grond met de diepte volgens verg. 4.14 met B = 154 mg/m² uur. De cijfers bij de krommen geven resp. de waarden voor c en x_{1,0}.

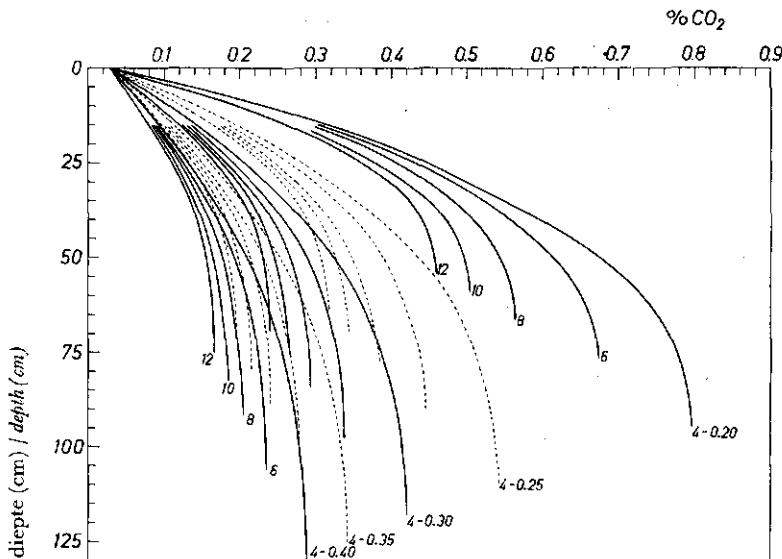


FIG. 19.

Course of the CO₂-content in the soil with depth according to eq. 4.14 with B = 154 mg/m² hr. Figures near curves indicate the values of c and x_{1,0} respectively.

genoemde onderzoek van STOLP en WESTERHOF (1954) blijkt, dat bij berekening van aardappelen en tomaten nog geen nadelige invloed werd ondervonden bij $x_l = 0,20$. Dit komt dus goed overeen met het hiervoor aangehaalde onderzoek, als men bedenkt, dat hierbij de temperatuur aanmerkelijk hoger was.

Bezien we het vraagstuk iets algemener, dan kunnen we uitgaan van een activiteitsverdeling als aangegeven door verg. 4.2. Wordt de grond door berekening op veldcapaciteit gehouden, dan is het luchtgehalte over de gehele diepte constant, zodat verg. 3.1 kan worden geschreven als:

$$\alpha(z) = -D \frac{\delta^2 c}{\delta z^2} \quad (4.18)$$

Integreren van 4.18 met de randvoorwaarden $\frac{\delta c}{\delta z} = 0$ voor $z = l$ en $C = C_0$ voor $z = 0$ geeft:

$$C = C_0 - \frac{\alpha(0)}{0,14(0,9x_l - 0,1)} \left\{ \frac{1}{2} z^2 - \frac{16}{45} z^{\frac{9}{4}} \left(\frac{l}{z} \right)^{\frac{1}{4}} - 0,2 l z \right\} \quad (4.19)$$

Stellen we $\alpha(0)$ - onafhankelijk van de bereikte worteldiepte - op 10^{-6} mg/cm²sec,

FIG. 20.

Het CO₂-gehalte van de grond op 15 cm diepte (gestippelde lijnen en bovenste schaal) afhankelijk van l (rechtterschaal), berekend volgens verg. 4.19 met $\alpha = 10^{-6}$ mg/m²sec. De getrokken lijnen geven het CO₂-gehalte (onderste schaal) weer op de bij curven vermelde diepte afhankelijk van x_l (linker schaal).

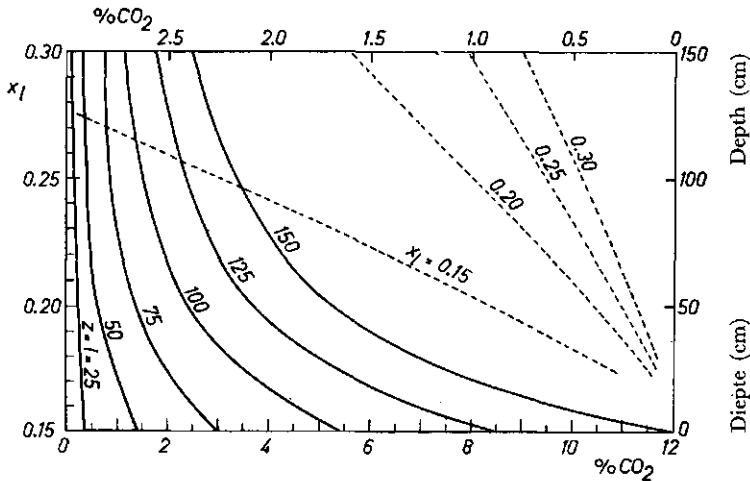


FIG. 20.

CO₂-content of the soil at a depth of 15 cm (dashed lines and upper scale) dependent on l (right hand scale), calculated with the aid of eq. 4.19 with $\alpha = 10^{-6}$ mg/m² sec. The full drawn lines indicate the CO₂-content (lower scale) at depths $z = l$ for various values of $x_{l,0}$ (left hand scale).

dan worden voor $x_i = 0,15, 0,20, 0,25$ en $0,30$ en $l = 25, 50, 75, 100$ en 125 cm de in fig. 20 weergegeven waarden voor de CO_2 -concentratie op verschillende diepten verkregen. Hieruit blijkt allereerst een relatief sterke toename van de CO_2 -concentratie voor x_i tussen $0,15$ en $0,20$ voor alle waarden van l . Voor de lage waarden van l zijn relatief zeer kleine activiteiten ingezet, nl. voor 25 en 50 cm, resp. 180 en 360 mg/m^2 uur. Doch ook voor 2 à 3 maal zo hoge waarden zullen de CO_2 -gehalten niet van grote betekenis zijn. Ook hier blijkt dus, dat – wanneer de activiteit beperkt blijft tot de bovenste lagen – een waarde van $x_i = 0,15$ voldoende is om de gevormde CO_2 af te voeren. Overschrijdt de activiteit echter een diepte van 50 à 75 cm, dan kunnen reeds vrij hoge gehalten aan CO_2 voorkomen, die met een toenemende activiteit uiteraard nog stijgen. Bij $l = 100$ cm zal x_i minstens $0,17$ à $0,18$ moeten zijn, terwijl dit gehalte bij grotere l op zal lopen tot $0,20$ à $0,25$. Deze waarden komen dus goed overeen met de door КОРЕЦКЫ genoemde luchtgehalten (zie tabel 6). Bezien we de in tabel 7 gegeven waarden voor x_i bij veldcapaciteit, dan moet men concluderen, dat beregening van akkerbouwgewassen op zwaardere gronden niet gewenst is; omdat dan bezwaren van CO_2 -ophoping kunnen optreden.

3. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

Er bestaat geen algemene opbrengst-grondwaterstandscurve die geldt voor elk jaar. De optimale grondwaterstandsdiepte hangt nl. af van de mate, waarin een vochttekort gedurende het groeiseizoen voorkomt. Een over een bepaalde periode gemiddelde grondwaterstand geeft geen inzicht in de invloed van de optredende fluctuaties.

Gaat men bij de bepaling van bijv. het polderpeil uit van een opbrengst – grondwaterstandscurve, dan zal – wanneer deze curve betrekking heeft op één enkel jaar – moeten worden nagegaan in hoeverre in dat jaar een eventueel vochttekort of -overschot is voorgekomen. Het peil zal dan moeten worden afgestemd op de frequentie, waarmee een bepaald tekort of overschot valt te verwachten.

Voor de bepaling van een vochttekort moet worden vastgesteld, in hoeverre het gewas water opneemt uit de grond en toegevoerd krijgt uit lagen beneden de wortelzone of van elders. Een methode voor de berekening van de eerste hoeveelheid, met behulp van het capillair geleidingsvermogen van de grond, is gegeven.

Voor gronden met een matig goede vochthoudendheid is het mogelijk in de waterbehoefte van akkerbouwgewassen te voorzien door de ontwatering minder diep uit te voeren. Voor grasland is dit niet mogelijk door de grotere waterbehoefte en de geringere worteldiepte. De grondwaterstand mag in het voorjaar echter niet hoger zijn dan de stand waarbij de bovenste 20 cm van de grond een luchtgehalte heeft van ca. 13% . Is de bodemvoorraad dan nog te klein om aan de waterbehoefte te voldoen, dan zal infiltratie of beregening moeten worden toegepast.

De gunstige grondwaterstand voor grasland bij infiltratie kan worden bepaald uit de opbrengst-zuigspanningscurve en het verloop van het vochtgehalte boven de

grondwaterstand. De vaststelling van het peil is ook voor andere gewassen in principe mogelijk uit de aëratie van de grond. Hiertoe moet naast het verloop van het luchtgehalte ook de produktie van de CO_2 bekend zijn. Voor een aantal gevallen is het verloop van de CO_2 -concentratie met de diepte berekend.

Bij berekening zal men erop bedacht moeten zijn, dat bij een luchtgehalte beneden 20% schade kan optreden door een te hoog CO_2 -gehalte van de grond. Dit geldt speciaal voor akkerbouwgewassen.

V. WATERBEHEERSING DOOR DRAINAGE

1. DRAINAGE

Het gedeelte van de waterbeheersing, dat de afvoer van overtollige neerslag uit de grond naar de afvoerwegen omvat, wordt in Nederland meestal met *ontwatering* aangeduid. Wordt deze ontwatering verkregen met behulp van onderaardse gangen, dan spreekt men van drainage. In dit hoofdstuk wordt voornamelijk gesproken over drainage, doch een groot deel van de inhoud is zonder meer toepasbaar op de ontwatering door sloten en greppels.

Het principe van de drainage is reeds zeer lang bekend, (2, 79) doch in haar huidige vorm vindt zij eerst sedert ruim een eeuw algemene toepassing in Europa. In de laatste veertig jaren is veel onderzoek verricht aan drainage. Een kort overzicht hiervan is reeds eerder gegeven (195).

Het effect van een drainagesysteem hangt voor een groot deel af van de diepte en de onderlinge afstand van de reeksen. Een groot deel van het onderzoek is dan ook gewijd aan de bepaling van het juiste verband tussen afstand en diepte. Oorspronkelijk ging men hierbij uit van proefvelden, waarop verschillende combinaties werden aangebracht, of van een aantal percelen met zo goed mogelijk gelijke omstandigheden wat ligging en grondsoort betreft, doch op verschillende afstanden gedraineerd. Percelen, die de hoogste opbrengsten gaven, werden dan als juist gedraineerd aangemerkt. Deze proeven moesten voor een goed inzicht jaren lopen, omdat uit de resultaten van een enkel jaar geen juiste conclusies kunnen worden getrokken (158). Al spoedig trachtte men dan ook de eerder verkregen resultaten samen te vatten door een correlatie met de eigenschappen van de grond als percentage afslibbaar, hygroschopiteit, bevochtigingswarmte, specifiek oppervlak e.d. (24, 95, 122, 155, 210). Hoewel deze in het laboratorium bepaalde eigenschappen van de grond in het algemeen geen maat kunnen zijn voor de structuur, in casu de doorlatendheid, blijkt toch uit het onderzoek van BOUMANS (25), DONNAN en BLANEY (42) en ZUNKER (210), dat het percentage afslibbaar – althans bij lichtere gronden – een redelijke samenhang vertoont met deze factor. De voorschriften, vervat in de Duitse Dränanweisung (6), zijn voornamelijk gebaseerd op het laatstgenoemde onderzoek. Fig. 21 geeft hiervan een voorbeeld.

Voor andere omstandigheden moeten een aantal correcties worden aangebracht om tegemoet te komen aan de aard, ligging en gebruikwijze van de grond. Hier wordt dus alleen maar met de totale neerslag per jaar rekening gehouden. Aangezien echter de neerslag in het zomerhalfjaar doorgaans niet tot afstroming komt, is dit een slechte maat voor de te verwachten neerslag en de intensiteit daarvan gedurende het winterhalfjaar.

Een meer geperfectioneerde, empirische methode is ontwikkeld in de Zuiderzeepolders. Hier worden de diverse lagen in de grond geclassificeerd naar de te verwachten snelheid, waarmee ze na rijping water zullen doorlaten, en naar hun diepteligging. Een beschrijving van deze methode wordt gegeven door VAN DER MOLEN (117). Hier komen niet alleen de verschillende eigenschappen van de grond beter tot

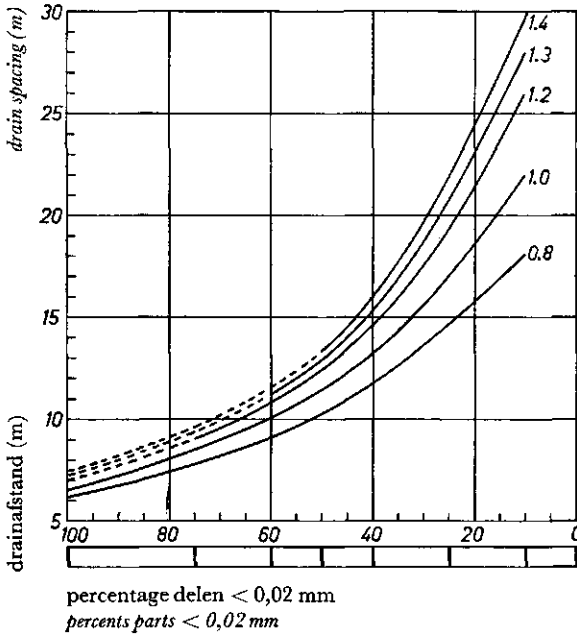


FIG. 21.

Verband tussen de drainafstand voor bouwland en de zwaarte van de grond voor $N < 650$ mm/jaar en helling van de grond van 2% volgens (6). De cijfers naast de curven geven de draindiepten aan.

FIG. 21.

Relation between drain spacing for arable soils and soil texture in the case of precipitation is < 650 mm/year and the slope of the soil is 2%, after (6). The figures near curves indicate depth of drainage.

uiting, maar door het relatief kleine gebied mag men bovendien afzien van klimatologische verschillen.

Op de overige gronden in Nederland wordt de drainafstand doorgaans bepaald met behulp van formules, waarin behalve de doorlaatfactor van de grond ook de afvoer en de dikte van het stromingsprofiel voorkomen. Dit soort formules, waarmee met betrekkelijk weinig metingen de drainafstand kan worden bepaald, wordt thans ook meer en meer in het buitenland gebruikt (42, 101, 163).

De in deze formules in te voeren waarden voor afvoer en toe te laten grondwaterstand bepalen in hoge mate de drainafstand. De werkelijk optredende waarden zijn echter niet op voldoende schaal vastgesteld. In dit hoofdstuk zullen dan ook eerst in het kort de gebruikte formules, die de stroming van het water in de grond weergeven, en de toepassing daarvan in de praktijk worden besproken. Daarna zal een overzicht worden gegeven van de in de literatuur gevonden afvoer- en grondwaterstandmetingen. Tenslotte volgt een beschrijving van enkele door ons uitgevoerde metingen en de daarbij gebruikte apparatuur.

2. UITVOERING VAN DE DRAINAGE

a. Formules ter bepaling van de drainafstand

De formules, die het verband geven tussen de drainafstand enerzijds en de doorlaatfactor van de grond, de afvoer, de grondwaterstand en de dikte van het stromings-

profiel anderzijds, hebben vrijwel alle betrekking op de stationaire toestand. De neerslag per tijdseenheid wordt dus gelijkgesteld aan de afvoer. Verder veronderstellen de formules een gelijke diepte voor alle reeksen en een grond die isotroop doorlatend is.

Hoewel de drainage in wezen een niet-stationaire toestand is, mag zij voor kleine tijdsintervallen als stationair worden beschouwd. Voor de niet-stationaire stroming gelden nl. aanmerkelijk ingewikkelder formules. Door de onzekerheid in de te gebruiken grootheden echter, worden de resultaten dan toch niet nauwkeuriger.

De grondwaterstand tussen de drains (of de sloten) zal doorgaans niet horizontaal zijn, doch een min of meer gebogen vlak vormen. Oplossingen van de differentiaalvergelijkingen voor de grondwaterstroming voor verschillende gevallen met een horizontale grondwaterstand zijn bekend (63, 80, 81, 82, 83, 84). Bij de veronderstelling, dat alleen horizontale stroming optreedt, d.w.z. dat de drains liggen op een ondoorlatende laag, wordt de vorm van het freatisch vlak weergegeven door een deel van de ellips (41, 63, 70, 95, 152, 153, 210). Analytische oplossingen, met niet-horizontale grondwaterspiegels zijn uitgewerkt door van DEEMTER (40), ENGLUND (50) en GUSTAFSON (63).

Behalve, dat een aantal van bovengenoemde oplossingen betrekking hebben op speciale gevallen, zijn ze doorgaans voor de praktijk minder bruikbaar omdat er moeilijk te bepalen grootheden in voorkomen. MAASLAND (101) en VAN SCHILFGAARDE e.a. (163) komen dan ook tot de conclusie, dat de door HOOGHOUTD ontwikkelde benaderingsformules zich het beste lenen voor algemeen gebruik, te meer omdat de afwijking ten opzichte van analytische oplossingen gering is. Zo vond van DEEMTER (40) voor $2 r_0/l = 0,002$ waarden van l , die goed met de door HOOGHOUTD bepaalde overeenkwamen. Voor $2 r_0/l < 0,002$ en $2 r_0/l > 0,002$ werden door hem resp. iets grotere en iets kleinere waarden gevonden. De afwijkingen waren echter kleiner dan 10%. De laatste waarde wordt door HOOGHOUTD (72) als nauwkeurigheid voor zijn formules opgegeven. Deze afwijkingen zijn van zodanige aard, dat de bedoelde formules zonder bezwaar gebruikt kunnen worden, vooral omdat de doorlaatfactor een van plaats tot plaats wisselende grootte heeft (zie o.a. 85).

b. De formules van HOOGHOUTD

Een kort overzicht van de bedoelde formules volgt hieronder. Voor de volledige afleiding kan worden verwezen naar de oorspronkelijke literatuur (71, 72).

Voor het geval onderling evenwijdige loodrechte sleuven reiken tot een ondoorlatende laag, laat zich de volgende formule afleiden:

$$l^2 = 4 K \cdot \frac{H^2 - h^2}{S} \quad (5.1)$$

Hierin is:

K de doorlaatfactor van de grond in m/etm,

S de afvoer in m/etm,

l de afstand tussen de sleuven in m,

H de hoogte van de grondwaterstand midden tussen de sleuven gemeten vanaf de ondoorlatende laag in m,

h de hoogte van het water in de sleuf in m.

Voor het geval $h = 0$, gaat 5.1 over in:

$$l^2 = 4 K \frac{H^2}{S} \quad (5.2)$$

Deze formule, die door ENGLUND (50), RUSSELL (158) en ZUNKER (210) aan COLDING wordt toegeschreven, is in de drainageliteratuur algemeen bekend als de formule van ROTHE (51, 71, 72, 95, 152, 153).

Wordt de hoogte van de grondwaterstand midden tussen de sleuven ten opzichte van het slootpeil m_0 genoemd, dan is verg. 5.1 te schrijven als:

$$l^2 = \frac{8 K h m_0 + 4 K m_0^2}{S} \quad (5.3)$$

Indien zich i.p.v. sleuven drains ter plaatse van de waterspiegel in de sleuven bevinden, gaat verg. 5.3 niet geheel op als $h \neq 0$, omdat de stroming zich dan ook beneden het vlak van de drains voortzet en rondom de drains een radiale stroming optreedt (41, 42, 72). Deze invloed brengt HOOGHOUT in rekening door in plaats van de waarde h in 5.3 een waarde d in te vullen. Deze d-waarde geeft de dikte weer, die een laag grond met dezelfde doorlaatfactor moet hebben om bij hetzelfde drukhoogteverschil dezelfde afvoer te bewerkstelligen als de drains vervangen worden gedacht door smalle loodrechte sleuven die reiken tot de onderkant van de fictieve d-laag. De waarde van d is afhankelijk van de straal van de natte omtrek van de drain of sloot r_0 , en de drainafstand l volgens:

$$d = \frac{l}{8b + c} \quad (5.4a)$$

Waarin voor b kan worden geschreven:

$$b = \frac{2,303}{\pi} \left[\log 0,75 \frac{h}{r_0} \sum_{n=1}^{\infty} \log \frac{n^{2/2} - 0,5 h^2}{(n^{2/2} + 4 h^2) n l} \left\{ (n^{2/2} + 3,293 h^2)^2 + 8 h^4 \right\} \right] \quad (5.4b)$$

en voor c:

$$c = \frac{(l - 1,414 h)^2}{8 h l} \quad (5.4c)$$

Voor het geval $h \geq 1/4 l$ wordt de som van b en c gelijk aan a, waarbij voor a kan worden geschreven:

$$a = \frac{2,303}{\pi} \left\{ \log \frac{l}{2 r_0} - 0,197 \right\} \quad (5.4d)$$

Dit wil zeggen dat het er voor de stroming niet meer toe doet of de ondoorlatende laag al of niet aanwezig is. De laatste conclusie wordt door van DEEMTER (40) bevestigd.

Invullen van de waarde d in 5.3 geeft:

$$l^2 = \frac{8 K d m_0 + 4 K m_0^2}{S} \quad (5.5)$$

Bij een geringe opbolling van de grondwaterstand kan de laatste term van de teller worden verwaarloosd, zodat dan de formule overgaat in:

$$l^2 = \frac{8 K d m_0}{S} \quad (5.6)$$

De voor verschillende waarden van h en l geldende d's volgens verg. 5.4 a t/m d worden door HOOGHOUT in tabelvorm gegeven.

Indien de grond bestaat uit lagen met verschillende doorlaatfactoren neemt HOOGHOUT de gemiddelde doorlaatfactor volgens:

$$K_{gem} = \frac{K_1 h_1 + K_2 h_2 + \dots + K_n h_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \quad (5.7)$$

Hierbij kan dan nog onderscheid worden gemaakt tussen de (gemiddelde) doorlaatfactor boven en die beneden het vlak van de drains. Deze grootheden worden dan resp. gebruikt in de laatste en eerste term van de noemer van 5.5. Bij het niet-samenvallen van het vlak door de drains met een scherpe scheiding in het profiel kan deze werkwijze nogal verschillen opleveren. ERNST (52 leidt dan ook formules af, waarin de doorlaatfactor van de verschillende lagen zonder meer kan worden gebruikt en waarbij het er niet toe doet of de grenzen van lagen samenvallen met de draindiepte.

c. De draindiameter

Uit de verg. 5.4a t/m d voor de d-waarde en uit de formules van ERNST (51) blijkt, dat de diameter van de buis slechts een zeer geringe invloed uitoefent op de drainafstand. De keuze van de buisdiameter zal dan ook voornamelijk bepaald worden door de hoeveelheid water die de buis moet transporteren. VISSER (188) berekent uit de door hem experimenteel bepaalde formules¹) voor de stroming van water in drainbuizen, dat onder Nederlandse omstandigheden buizen met een diameter van 5 cm bij enkelvoudige drainage ruim voldoende zijn om de overtollige neerslag af te voeren. Bij samengestelde drainages wordt dit echter anders; dan moet men zich afvragen, wat de maximale oppervlakte is, die door buizen van een bepaalde diameter kan afwateren.

~ Een groot aantal formules voor de stroming in drainbuizen wordt gegeven door HEYNDRIKX (68) en FRANKE (58). Uit het artikel van eerstgenoemde en uit WESSELING en VAN SOMEREN (196) blijkt, dat de diverse formules grote verschillen in wrijvingsverliezen te zien geven. Voor de berekening van de stroming in drainbuizen kan men dan ook waarschijnlijk het beste gebruik maken van stromingsformules, die gelden voor gewone buizen, mits men de hiermee berekende snelheid met een bepaalde factor reduceert.

De door VISSER (188) bepaalde formule voor goed afgewerkte en met veel zorg gelegde buizen levert nl. vrijwel dezelfde resultaten als de voor gewone buizen geldende formule van COLEBROOK (zie 38).

DE WIT (205) leidt zowel voor de vormverschillen als voor de verschuivingen tussen de buizen onderling, formules af voor de reductiefactoren. Uit de door hem gegeven grafiek blijkt, dat de verschuiving over een bepaalde afstand doorgaans ongeveer tweemaal zoveel invloed heeft als een even groot verschil in diameter. Dit is in overeenstemming met de door HEYNDRIKX getrokken conclusie, dat het leggen van de buizen een veel grotere invloed heeft dan de afwijkingen in vorm tussen de buizen onderling. De laatste factor speelt echter een belangrijke rol bij de bepaling van de kwaliteit van de drainbuizen.

Bij het leggen van de buizen zijn de optredende verschuivingen niet zonder meer bekend, zodat de invloed hiervan niet direct uit de door DE WIT gegeven formules kan worden bepaald. Vergelijking van de door HEYNDRIKX gerefereerde onderzoeken levert voor normaal gelegde buizen een „aansluitings- en vormfactor” van ongeveer 0,9 (196).

¹ Een beschrijving van deze experimenten wordt gegeven in *Der Kulturtechniker*, jrg. 41 (1938), p. 131 e.v.

Bij het ouder worden van de buizen zal bovendien rekening moeten worden gehouden met een eventuele slibafzetting in de buizen. HEYNDRIKX stelt daarom voor oude buizen een reductie van 25 % voor, zodat de totale reductie op de stroomsnelheid neer zou komen op ca. 35 % van die in gewone buizen. De met behulp van de formule van VISSER (188) gevonden oppervlakten worden in de praktijk doorgaans met 50 % gereduceerd.

Aangezien bovengenoemde reductiefactoren de verschillen tussen de diverse formules veelal overtreffen, heeft het weinig zin hierop nader in te gaan. Hier wordt dan ook volstaan met het geven van de berekende oppervlakten volgens de formules van VISSER (188) en die van COLEBROOK (zie 58). Deze met 50 % gereduceerde waarden zijn, samen met de door FRANKE (58) gegeven praktijkwaarden, in fig. 22

FIG. 22.

Minimum diameter van de drainbuizen voor verschillende oppervlakten bij een afvoer van 7 mm/etm. en een verhang van 20 cm/100 m

▽ volgens VISSER (188) gereduceerd met 50 %

● volgens formule van COLEBROOK (zie 28) gereduceerd met 50 %

○ volgens FRANKE (28) in de praktijk toegepaste waarden

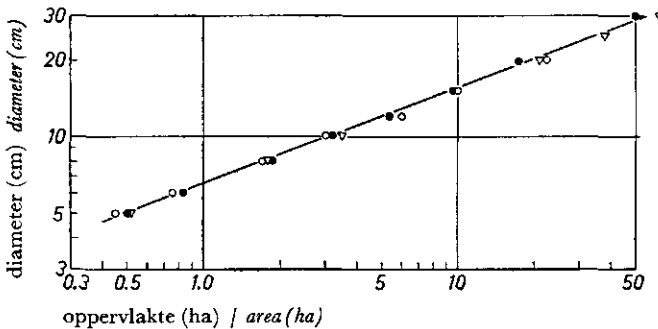


FIG. 22.

Minimum size of drain tiles for various areas with a drainage coefficient of 7 mm/day and a slope of tile lines of 20 cm/100 m

▽ after (188) with 50% reduction

● after the flow equation of COLEBROOK (see 28) with 50% reduction

○ values used in practice after FRANKE (28)

opgenomen. De oppervlakten gelden voor een helling van 20 cm/100 m en een afvoer van 7 mm/etm. Daar de afwaterende oppervlakte omgekeerd evenredig is met de afvoer, kunnen de in de figuur gegeven waarden eenvoudig worden berekend voor andere waarden van de afvoer. De waarden liggen over het algemeen iets hoger dan die, welke worden gebruikt door HEYNDRIKX (68) en de in de Duitse Dränanweisung (6) voorkomende en iets lager dan die door de ASAE (7) voorgestelde waarden. Bij de

laatste gaat men echter uit van een constante afvoer door de gehele buis, terwijl de berekende waarden gelden voor het geval de afvoer evenredig met de lengte van de drainreeks toeneemt en bij de uitmonding juist geen water boven de drain staat.

d. Interpretatie van de formules ter bepaling van de drainafstand

Hier zal verder worden afgezien van de keuze van de buisdiameter en steeds worden uitgegaan van de in Nederland doorgaans gebruikte buizen met een binnendiameter van 5 cm.

In de formules 5.5 en 5.6 komen verschillende grootheden voor, die bekend moeten zijn om de drainafstand te kunnen bepalen. In de eerste plaats is dit de doorlaatfactor. De meest gangbare methode om deze grootheid te meten is die met behulp van een boorgat. Voor de hierbij gebruikte apparatuur en berekeningsformules zij verwezen naar de betreffende literatuur (16, 25, 51, 70, 85). De vraag is, tot hoe diep K bekend moet zijn. BOUMANS (25) neemt aan, dat dit het geval moet zijn tot een diepte, gelijk aan $\frac{1}{8} l + 1$ meter. Dit is echter in wezen in tegenspraak met de conclusies van HOOGHOUDT (72) en van VAN DEEMTER (40), dat de waarde van d niet meer verandert als een ondoorlatende laag dieper zit dan $\frac{1}{4} l$. Zet men aan de hand van de desbetreffende tabel van HOOGHOUDT (72) de afhankelijkheid van h , l en d uit (fig. 23) voor normale drainbuizen ($r_0 = 0,04$), dan blijkt dat bij de bepaling van K tot op een diepte gelijk aan $\frac{1}{8} l + 1$, de waarde van d voldoende vaststaat bij drainafstanden beneden ca 30 m.

FIG. 23.
Het verband tussen h , l en d volgens verg. 5.4 a t/m d voor $r_0 = 0,04$. Voor $h > \frac{1}{8} l + 1$ verandert d relatief weinig voor kleine l .

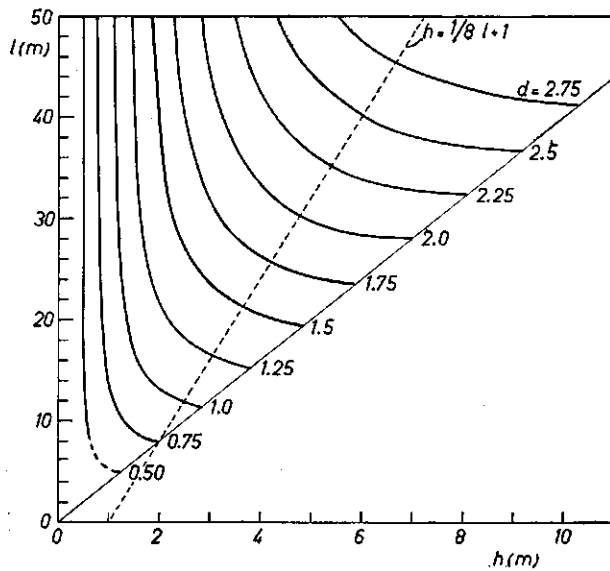


FIG. 23.
Relation between h , l , and d according to eq. 5a - d for $r_0 = 0.04$. The increment of d is small for $h > \frac{1}{8} l + 1$ and small values of l .

De waarde van l wordt zodanig gekozen, dat bij een bepaalde afvoer de grondwaterstand midden tussen de drains een bepaalde hoogte bereikt. HOOGHOUDT (72) neemt als criterium een afvoer van 5 mm/etm. bij een grondwaterstand van 50 cm — m.v. Deze waarde is gebaseerd op drainafvoermetingen in de Rietwijkeroorderpolder en lysimeterafvoermetingen te Groningen. BOUMANS (25) geeft als afvoer 7 mm/etm., waarbij de grondwaterstand niet mag stijgen boven resp. 40 en 50 cm beneden maaiveld in gras- en bouwland. VAN DER MOLEN (117) daarentegen neemt als criteria 10 mm/etm. bij een grondwaterstand van 20 en 30 cm voor resp. begreppeld en gedraineerd land. Daar de drains meestal gelegd worden onder een helling van 10 tot 20 cm per 100 m en daar m_0 volgens HOOGHOUDT geldt voor het midden van de reeks, zal bij een grondwaterstandscriterium van 50 cm en een drainlengte van 150 m de grondwaterstand aan het begin van de reeks 15 à 30 cm hoger zijn dan aan het eind. Bij begreppeld land is dit verschil veel geringer door de veel kleinere hellingen die gebruikt worden bij de aanleg.

Er blijkt dus geen overeenstemming te bestaan over de afvoer- en grondwaterstandscriteria, terwijl beide toch een grote invloed uitoefenen op de uiteindelijke drainafstand, zoals blijkt uit fig. 24. Hierbij is S gesteld op 7 en 10 mm/etm. K op 0,5 en 1 m/etm. en h op 2 en 4 m. De draindiepte is hierbij steeds op 1 m aangehouden.

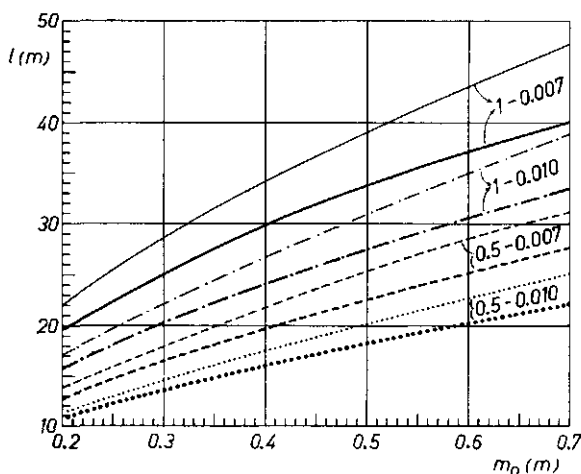


FIG. 24.

De invloed van de in verg. 5.3 voorkomende grootheden op de drainafstand. Voor de dikke lijnen is $h = 2$, voor de dunne is $h = 4$. De cijfers naast de curven geven resp. de waarden van K en S in m/etm. De draindiepte is op 1 m gesteld.

FIG. 24.

The influence on drain spacing of the factors in eq. 5.3. Thick lines refer to $h = 2$, thin lines to $h = 4$. Figures near curves indicate the values of K and S in m/day respectively. The depth of drainage is taken to be 1 m.

In gronden met een groot poriënvolume zal een bepaalde hoeveelheid neerslag een veel lagere grondwaterstand veroorzaken dan in een grond met een klein bergend vermogen. VISSER (189) meent dan ook, dat de te kiezen afvoer naar de grondsoort gedifferentieerd moet worden. Hierin is weliswaar reeds gedeeltelijk voorzien, doordat de eerste gronden meestal wijder worden gedraineerd, doch er bestaat zeker geen lineair verband tussen de doorlaatfactor en het bergend vermogen. Wordt de laatste

factor in rekening gebracht, dan zal bij gelijkblijvend grondwaterstandscriterium de afvoer verschillend moeten zijn. Juiste oplossingen zijn dan alleen te verkrijgen door de niet-stationaire stroming te beschouwen. VISSER (189) ontwikkelt, uitgaande van de verg. 5.1, formules voor de stijging en daling van de grondwaterstand midden tussen de drains onder invloed van bepaalde neerslagintensiteiten. Hierbij wordt uitgegaan van een gemiddelde neerslag, die door buien van bepaalde te verwachten intensiteit worden versterkt. HELLINGA (67) doet hetzelfde, uitgaande van een plotseling optredende grote bui, gevolgd door een constante neerslag. Hoewel beide methoden een inzicht geven in de te verwachten grondwaterstanden, is de invloed van de hoogte en duur van standen hoger dan 30–50 cm — m.v. niet voldoende bekend om hieruit conclusies te trekken over de al of niet goede werking van een drainagesysteem.

3. DRAINAFVOERMETINGEN BESCHREVEN IN DE LITERAATUUR

Uitgaande van bepaalde waarden voor afvoer en grondwaterstand midden tussen de drains, kan de drainafstand door betrekkelijk weinig metingen worden bepaald met behulp van eenvoudige formules, die het verband tussen stroming en de eigenschappen van de grond weergeven. Om na te gaan in hoeverre de veronderstelde afvoer en grondwaterstand overeenkomen met de werkelijk optredende waarden, zijn metingen in het terrein noodzakelijk. Hoewel deze controle een gelijktijdige meting van afvoer en grondwaterstand eist, hebben de meeste metingen aan drainages betrekking op de afvoer alleen. Grondwaterstandswaarnemingen alleen zijn daarentegen weinig verricht, terwijl slechts enkele gevallen van combinaties in de literatuur beschreven zijn (49, 86, 118, 180). Daarbij komt, dat van een groot deel van de metingen slechts week- of maandgemiddelden zijn gegeven, terwijl ze verder veelal betrekking hebben op hellende gronden. Zoals zal blijken, liggen de problemen hier enigszins anders dan in vlak terrein. Daarom zal eerst een kort overzicht worden gegeven van een aantal in de literatuur beschreven proeven.

Een uitgebreid onderzoek werd door FEILBERG en door FEILBERG en BORCH (53, 54, 55, 56) verricht op een 3 ha groot proefveld met een samengestelde drainage in Denemarken. Zowel afvoer als neerslag werden hierbij geregistreerd en in de artikelen als week- en maandgemiddelden gegeven. Tabel 10 geeft een deel van de resultaten.

TABEL 10. Aantal weken, dat een bepaald weekgemiddelde van neerslag en afvoer werd gemeten over de periode 1927–1949 door FEILBERG, FEILBERG en BORCH (56)

	< 10	10–20	20–30	30–40	40–50	> 50 mm/week
Neerslag	386	113	45	19	7	2
Afvoer	536	30	6	—	—	—

TABLE 10. Number of weeks in which rainfall and drain outflow reached a certain average (56)

Extreem hoge weekgemiddelden voor de afvoer kwamen hier dus niet voor. Gemiddeld werd in de periode oktober tot en met maart 29,7% van de neerslag afgevoerd. Het hoogste percentage gaf januari met 47,3%. Het proefveld lag echter hoger dan zijn omgeving, zodat een groot deel van de neerslag ondergronds moet zijn afgevoerd. Dit blijkt ook, wanneer men bovengenoemde percentages vergelijkt met overeenkomstige cijfers verkregen door HUDIG en WELT (74).

TABEL 11. Neerslag in mm en percentages van de neerslag, die in de verschillende afvoerperioden (oktober t/m maart) door de drains werden afgevoerd op het proefveld te Uithuizermeeden (74)

Afvoerperiode	1901/02	02/03	03/04	04/05	05/06	06/07	07/08	08/09	09/10
Neerslag	277	84	446	196	400	149	229	154	680
Afvoer	67,0	49,8	53,2	35,6	49,4	68,1	67,7	39,5	82,7

TABLE 11. *Rainfall and percentage of rainfall measured as drain outflow (74)*

Op laatstgenoemd proefveld bleek de grondwaterstand sterk onder invloed te staan van de omringende sloten, zodat mag worden aangenomen, dat ook hier een deel van de neerslag direct naar de sloten is afgevoerd.

Extreem hoge daggemiddelden (13,5 mm), die op het Deense proefveld voorkwamen, moeten waarschijnlijk voor een deel toegeschreven worden aan afvoer door de relatief doorlatender bouwvoor. Op dit verschijnsel wordt voor het eerst door FLODKVIST (57) gewezen. Op deze hellende gronden treden nl. afvoeren op bij grondwaterstanden, die ver beneden het vlak door de drains liggen, zoals NICHOLSON (124) aantoon uit afvoermetingen van BARLEY DENTON. Zo beschrijft ook ZAVADIL (208) een proefveld in Brünn, waarop alleen afvoeren werden waargenomen bij zeer heftige regenbuien.

Bovengenoemd effect van de afstroming blijkt ook uit andere metingen. Zo vonden ROTHE en PHILIPP (154), dat naarmate de drainage dieper is, de curve die de afvoer met de tijd weergeeft, een lagere doch bredere top vertoont. Hetzelfde effect werd door NICHOLSON (124) waargenomen bij een vergelijking tussen afvoeren op bouw- en grasland. Door CHILDS (33) werd bij een onderzoek aan moldrainages gevonden, dat bij een gestadige regen de afvoer minder hoog opliep dan bij een heftige bui, doch dat een veel groter percentage van de neerslag door de drains werd afgevoerd.

Bij enigszins hellende gronden gaan dus de voor vlak terrein ontwikkelde stromingsformules niet op, omdat dan een groter deel van het water door de bouwvoor zijn weg zoekt naar de drainsleuven. Er is reeds eerder (195) op gewezen, dat deze metingen dus niet zonder meer toepasbaar zijn op vlak terrein.

In het laatste geval kan echter ook bovengrondse afvoer optreden, terwijl hier ook rekening moet worden gehouden met directe afvoer naar de sloten. Ook toevoer van hoger gelegen delen kan optreden. Door ENGELHARDT (49) werden een tweetal drains

ter lengte van 120 m gelegd op een onderlinge afstand van 20 m en een diepte van 2 m. Naast de door hem vermelde toevoer van water uit de sloot, zal hier een aanmerkelijke toevoer vanuit de – niet gedraineerde – omgeving opgetreden zijn. VERHOEVEN (180) komt tot zeer lage afvoercijfers, omdat een groot deel van het water door verslemping via het oppervlak werd afgevoerd. De neerwaartse waterpassage, berekend uit de ontzilting, was echter aanmerkelijk hoger dan uit de drainafvoer en het zoutgehalte van het drainwater zou volgen. Een directe afvoer naar de sloten is hier – gezien de opzet van de proeven – dan ook waarschijnlijk, hoewel een deel van het verschil in bovengenoemde bepalingen van de ontzilting kan zijn gelegen in de te hoge verdampingscijfers. Hiervoor werden nl. waarden gebruikt, die 1,5 à 2 maal zo hoog lagen als de berekende potentiële verdamping in dezelfde periode.

Behalve bovengenoemde moeilijkheden, bestaat er nog een bron van fouten in berekeningen als die van VERHOEVEN. De drainafvoeren werden slechts éénmaal per dag gemeten, terwijl uit verschillende onderzoeken (32, 33, 57, 124, 145) blijkt, dat van uur tot uur grote verschillen kunnen optreden. Zowel de drainafvoer als de grondwaterstand zullen dus voor een goed beeld zo vaak mogelijk gemeten moeten worden. Daarom is bij de door ons uitgevoerde afvoer- en grondwaterstandsmetingen dan ook gebruik gemaakt van zelfregistrerende apparaten.

4 BESCHRIJVING VAN DE EIGEN AFVOERMETINGEN

a. Proefpercelen en opstelling apparatuur

De metingen werden gedurende de winter 1955/1956 verricht op een drietal percelen in de Zuidplaspolder op ca. 1,5 km ten zuiden van Moerkapelle. De keus van deze percelen werd voornamelijk bepaald door het homogene profiel. De grond bestaat nl. op deze percelen uit lichte zeeklei, die op 1,5 à 2,0 m overgaat in slibhoudend zand.

Perceel I, behorend tot het bedrijf van de heer van Bergen, heeft een breedte van 196 m en is gedraineerd op een afstand van 17 m. Het peil in de sloot, waarin de drains uitmonden, wordt door een elektrisch gemaaltje gehandhaafd op 80 cm beneden de drains. De drainage werd in 1953 aangelegd. Voordien vond de ontwatering plaats door sloten op een onderlinge afstand van ongeveer 60 m.

De percelen II en III, gelegen op het bedrijf van de heer v.d. Torren, hebben een breedte van 114 m en zijn eveneens overdwars gedraineerd. De onderlinge afstand tussen de reeksen bedraagt hier 30 m. De huidige drainage werd aangelegd in 1952 en dient als vervanging van een ouder systeem, dat bestond uit een enkele drainreeks midden over het perceel met zijdrains naar de sloten op onderlinge afstanden van 50 m. Het peil in de sloten wordt hier geregeld door een windbemaling, die kan uitmalen tot 45 cm beneden de uitmonding van de drains. In tegenstelling tot perceel I werd de drainafstand hier bepaald aan de hand van ervaring, opgedaan bij vroeger uitgevoerde drainages op hetzelfde bedrijf.

Op elk perceel werd de afvoer van een willekeurige drainbuis gemeten met behulp van een hierna te beschrijven afvoermeter. Op één plaats midden tussen de drains werd de grondwaterstand geregistreerd met een daartoe ontworpen apparaat. Verder werd op verschillende plaatsen in de percelen de grondwaterstand eens per 7 à 14 dagen opgenomen in grondwaterstandsbuizen, bestaande uit op elkaar geplaatste kraagloze betonnen drainbuizen met een inwendige diameter van 5 cm. De plaats van de diverse meetpunten is schematisch weergegeven in fig. 25.

FIG. 25.

Opstelling van de afvoer- en grondwaterstandsmeter en de plaats van de grondwaterstandsbuizen bij de afvoermetingen

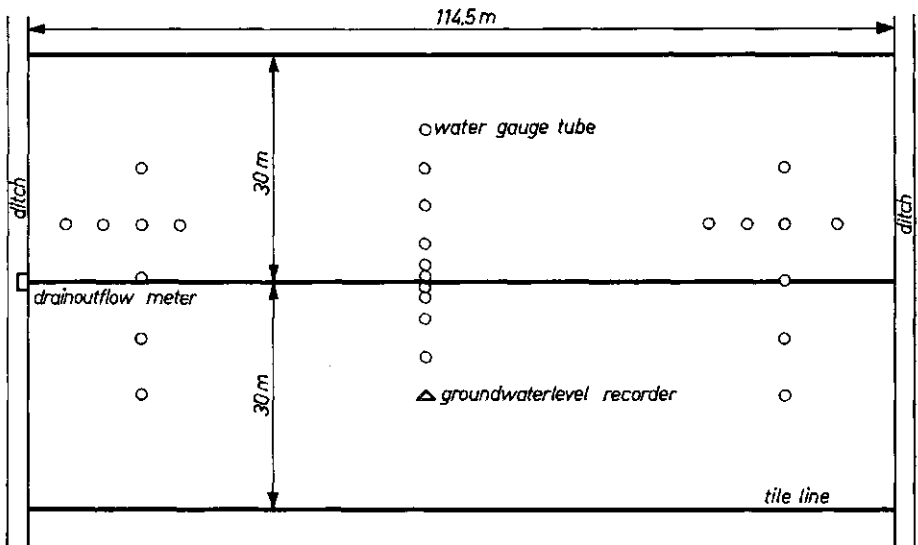


FIG. 25.

Appointment of drain flow meter, groundwater level recorder and water gauge tubes during drain flow measurements

De grondwaterstandsbuizen en de overige apparatuur werden in de laatste helft van september geplaatst. De neerslag werd gemeten met behulp van een registrerende neerslagmeter van de fa. van Doorn te de Bilt, die ongeveer midden tussen de drie percelen was geplaatst.

De waterpassing van de grondwaterstandsbuizen en de drainreeksen werd uitgevoerd door de Technische Dienst van de N.V. Grontmij te Haarlem. Verder werden door de afdeling Onderzoek van de Cultuurtechnische Dienst te den Haag op een zestal plaatsen op elk perceel doorlaatfactoren bepaald. De resultaten van deze meting zijn weergegeven in tabel 12.

TABEL 12. Doorlaatfactoren van de grond, zoals bepaald met de boorgatenmethode

Perceel	Diepte (m)	K m/etm.	Diepte (m)	K m/etm.
I	0,95-1,45	0,53	0,95-1,90	0,23
	0,95-1,40	0,58	0,95-1,90	0,29
	0,95-1,35	0,47	0,95-1,85	0,43
II	1,00-1,40	0,14	1,00-1,90	0,35
	1,00-1,35	0,13	1,00-1,95	0,27
	1,00-1,40	0,11	1,00-1,95	0,27
III	0,95-1,35	0,25	0,95-1,90	0,26
	0,95-1,30	0,24	0,95-1,90	0,30
	0,95-1,40	0,26	0,95-1,90	0,25

TABEL 12. *Permeability of the soil, determined by the auger hole method*

Hieruit blijkt, dat de doorlaatfactor van de ondergrond op alle drie percelen niet veel uiteenloopt.

Berekening van de gemiddelde doorlaatfactoren van de diverse lagen volgens verg. 5.7 geeft voor de bepaling van de drainafstanden volgens verg. 5.5 de in tabel 13 opgenomen waarden. Hierbij is S gesteld op 7 mm/etm. De doorlaatfactor van de grond boven de drains is gelijk genomen aan die bepaald in de ondiepe gaten, terwijl de grond tot op grote diepte doorlatend is verondersteld.

TABEL 13. Met behulp van verg. 5.5 berekende drainafstanden voor de drie proefpercelen en de werkelijke waarde hiervan

Perceel	Berekende drainafstand		Werkelijke afstand
	$m_0 = 0,5$	$m_0 = 0,7$	
I	16	22	17
II	13,5	18	30
III	14,5	19	30

TABEL 13. *Calculated and actual drain spacing on the trial fields*

b. De gebruikte apparatuur

GRONDWATERSTANDSMETERS

Voor de grondwaterstandsmeters werd het door THIJSSSEN e.a. (173a) beschreven apparaat, weergegeven in fig. 26, gekozen.

Het apparaat bestaat uit een rubberzak beschermd door een geperforeerde messing cilinder, die via een slang verbonden is met een manometer. Rubberzak, slang en manometer zijn aan de ene zijde gevuld met anti-vries (alcohol 50%), aan de andere zijde met kwik. In het open been van de manometer drijft een vlotter die de registreerpen draagt. De rubberzak wordt geplaatst op de bodem van de grondwaterstandsbuis. De druk die nu door het grondwater op de zak wordt uitgeoefend, wordt via de manometer op de registratietrommel overgebracht. Het verband tussen het verschil in grondwaterstandshoogte en de verplaatsing van de metalen vlotter is afhankelijk van de diameters van de benen van de manometer. Deze werden bij de uitvoering zodanig gekozen, dat een grondwaterstandsverhoging van 15 cm een verplaatsing van de vlotter van 1 cm teweeg bracht.

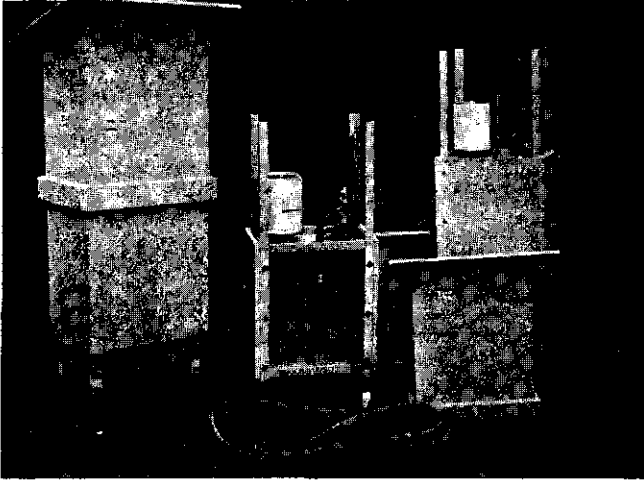


FIG. 26.
Grondwaterstandmeters

FIG. 26.
Groundwater level recorders

De registratie van de grondwaterstand geschiedde in een zelfde grondwaterstandsbuis als die, waarin de stand periodiek werd opgenomen. Evenals bij de afvoermeters werden uurwerken met een omlooptijd van 7 dagen gebruikt. De trommels hadden een diameter van 9 cm.

AFVOERMETERS

Een drainafvoermeter dient te kunnen werken met een klein drukverschil, omdat de afstand tussen drainuitmonding en slootwaterstand veelal gering is. De registratie moet mogelijk zijn van zeer kleine hoeveelheden tot de maximaal te verwachten afvoer van de drain, terwijl de capaciteit van de meter groter moet zijn dan de afvoer om vrije uitstroming van het water uit de drain te waarborgen. De meter moet verder van een zo eenvoudig mogelijke constructie zijn en ongevoelig voor door het water meegevoerde verontreinigingen.

Verskillende typen afvoermeters worden in de literatuur beschreven o.a. door BLACKBABY (20), CHILDS (32), FEILBERG (54), JANERT (77), PRYTZ (141) en DONNAN en BLANEY (42). Behalve in (20) en (42) berusten al de beschreven apparaten op hetzelfde principe, nl. het meten van de waterhoogte in een bak, waarin aan de ene zijde het water van de drain instroomt om het aan de andere zijde door openingen van een bepaalde vorm weer te verlaten. De afvoer van het water door een enkele opening is evenredig met de wortel uit de hoogte van het water in de bak boven die opening. Om op elk moment direct de afvoer te kunnen bepalen en de over een bepaalde tijd afgevoerde hoeveelheid eenvoudig vast te kunnen stellen, is een afvoer evenredig met de hoogte gewenst. Dan kan de afgevoerde hoeveelheid nl. door planimetreren van de afvoercurve worden bepaald. Om dit te bereiken, zal de uitstroomopening van beneden naar boven in breedte moeten afnemen. De bepaling van de vorm van de opening eist dan echter veel experimenteel werk, omdat de

contractiecoëfficiënt niet constant is. Wij hebben de werkwijze van CHILDS (32) overgenomen en de voorplaat voorzien van een met de hoogte afnemend aantal ronde openingen, waarvan de verdeling zodanig is, dat een lineair verband wordt verkregen. Het aantal openingen, dat hiervoor op elke hoogte nodig is, kan dan op eenvoudige wijze worden berekend.

TABEL 14. Berekening van het aantal openingen in elke rij voor een afvoermeter met openingen van 4 mm diameter. Als eenheid van F is het oppervlak van 6 openingen gekozen. De tussen haakjes geplaatste cijfers geven het benodigde aantal openingen per rij weer.

h (cm)	$F_1 \sqrt{h}$ 1e rij (6)	$F_2 \sqrt{h}$ 2e rij (3)	som	$F_3 \sqrt{h}$ 3e rij (2)	som	$F_4 \sqrt{h}$ 4e rij (2)	som	$F_5 \sqrt{h}$ 5e rij (2)	som
1	0,89	—	—	—	—	—	—	—	—
2	1,34	0,45	1,79	—	—	—	—	—	—
3	1,67	0,67	2,34	0,30	2,64	—	—	—	—
4	1,95	0,84	2,97	0,44	3,23	0,30	3,53	—	—
5	2,19	0,97	3,16	0,56	3,72	0,44	4,16	0,30	4,46
6	2,41	1,10	3,51	0,65	4,16	0,56	4,72	0,44	5,16
7	2,61	1,20	3,81	0,73	4,54	0,65	5,19	0,56	5,75
8	2,79	1,30	4,09	0,80	4,89	0,73	5,62	0,65	6,27
9	2,97	1,40	4,37	0,87	5,24	0,80	6,04	0,73	6,79
10	3,13	1,48	4,61	0,93	5,54	0,87	6,41	0,80	7,21
enz.									

TABEL 14. Calculation of the number of holes in every row for a drain flow meter with openings of 4 mm diameter. For the unity of F the area of 6 openings has been taken. Figures in parentheses indicate the number of openings in every row.

De eerste getallen van de somkolommen moeten resp. 1, 2, 3 enz. maal 0,89 zijn.

FIG. 27.
Drainafvoermeters

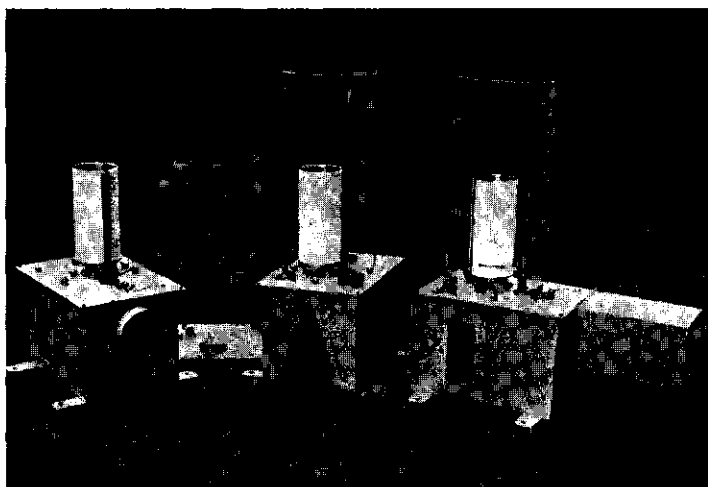


FIG. 27.
Recording drain flow meters

De gaten zijn geplaatst in horizontale rijen op een onderlinge afstand van 1 cm (zie fig. 27). Het aantal gaten in deze rijen moet nu zodanig worden gekozen, dat het verband tussen h en $F \sqrt{h}$ rechtlijnig wordt, als F het oppervlak van de openingen en h de hoogte van het water in de bak is.

De ijking van de aldus berekende meetplaten geschiedde door de ingevoerde hoeveelheid te meten met een flow-rator van het fabrikaat Fisher en Porter¹. Wordt het debiet met Q aangegeven, dan geeft rechtlijnige vereffening van de meetpunten (fig. 28) de volgende waarden:

n	\bar{h}	\bar{Q}	\bar{m}	\bar{q}	$\sigma_{\bar{q}}$	$\sigma_{\bar{m}}$
38	6,49	8,52	0,75	0,13	0,01	0,004

FIG. 28.

Ijkkurve van de drainafvoermeter

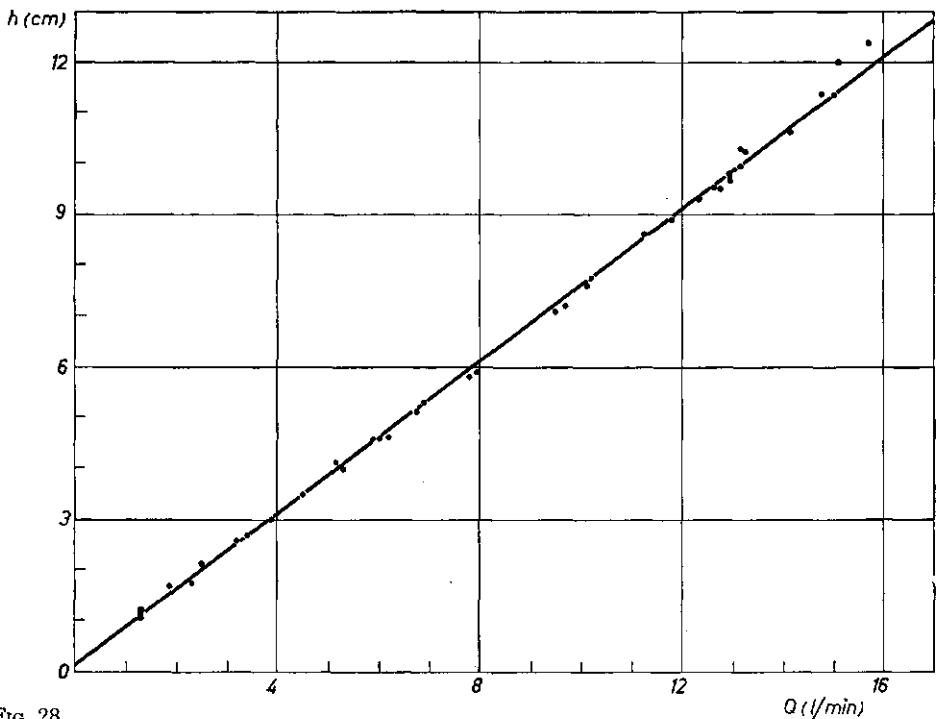


FIG. 28.

Calibration curve of the drain flow meter

¹ De flow-rator bestaat uit een stalen vlotter in een verticaal geplaatste, van beneden naar boven wijder wordende, gekalibreerde glasbuis. Tussen de vlotter en de wand van de buis bevindt zich dus een naar boven toenemende ruimte. De voor de stroming beschikbare grootte van de opening is afhankelijk van de plaats van de vlotter. Neemt de stroomsnelheid van de aan de onderkant ingevoerde vloeistof toe, dan verplaatst de vlotter zich onder invloed van de vloeistofdruk totdat opnieuw evenwicht tussen deze druk en de naarwaarts gerichte druk van het gewicht van de vlotter is ontstaan. De hoogte van de vlotter in de buis is evenredig met de doorstromende hoeveelheid.

De nauwkeurigheid van de metingen bedraagt dus ongeveer 5%. CHILDS (32) geeft voor een soortgelijk apparaat een nauwkeurigheid van 2% bij kleine Q en een fout kleiner dan 1% bij grote Q . Een deel van de gevonden afwijkingen kan worden toegeschreven aan de variërende druk van de waterleiding. De instelling van de meter is nl. iets trager dan die van de flow-rator. Voor veldwaarnemingen is deze tragere instelling echter geen bezwaar, omdat hier niet zulke snelle veranderingen van de drainafvoer te verwachten zijn.

Fig. 29 toont de opstelling van het apparaat. De registratie van de waterhoogte in de bak geschiedt door een pen, die verbonden is aan een vlotter. Deze vlotter beweegt zich in het midden van de bak in een buis, die ter hoogte van de bodem is voorzien van een aantal openingen, zodat steeds in rustig water wordt gemeten. De eigenlijke meetplaat met openingen aan de voorzijde werd vervaardigd van roestvrij staal met een dikte van 1 mm; het overige deel van de bak bestond uit messingplaten. Het uurwerk wordt door een plastic cilinder beschermd tegen invloeden van het weer.

FIG. 29.

Plaatsing van de drainafvoermeter voor de drainuitmonding

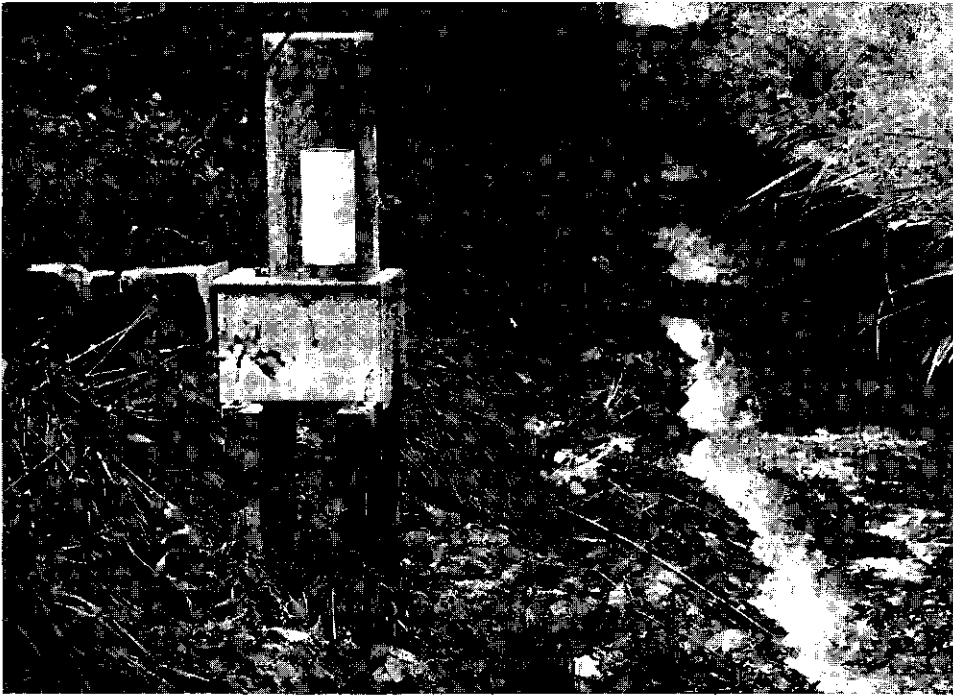


FIG. 29.

Set up of the drain flow meter in the field

5. RESULTATEN VAN DE METINGEN

a. De neerslag

De neerslag gedurende de periode september tot en met januari, maart en april is opgenomen in tabel 15. In februari werden vanwege de vorst geen metingen verricht. De waarnemingen van 16 tot 31 oktober zijn verricht met een gewone regenmeter.

TABEL 15. Neerslag in de periode 1 september 1955 tot 1 mei 1956

	september	oktober	november	december	januari	maart	april
1	—	11,2	—	0,4	5,7	1,6	—
2	—	—	—	—	0,4	1,0	—
3	—	—	—	5,7	0,2	0,4	0,5
4	—	1,6	—	—	1,1	4,9	5,2
5	7,2	16,1	—	—	0,1	—	—
6	—	17,2	—	—	0,3	1,8	0,7
7	—	9,8	0,4	0,2	1,1	—	—
8	0,7	—	6,0	0,5	5,2	—	—
9	—	—	1,0	3,9	0,4	—	—
10	0,2	—	—	5,3	5,4	—	0,6
11	—	—	—	2,3	1,7	—	0,6
12	8,7	—	—	—	15,4	—	17,3
13	18,3	—	2,2	—	—	0,1	9,0
14	30,4	—	—	5,9	1,1	2,8	—
15	3,5	—	0,3	5,1	0,2	0,1	—
16	9,2	3	0,6	4,0	—	—	—
17	4,3	6	0,2	4,6	—	—	—
18	—	14	0,1	1,3	2,3	—	1,5
19	—	—	0,5	2,2	3,1	—	0,3
20	—	3	0,7	—	4,8	0,8	0,3
21	—	17	—	—	0,5	0,1	—
22	—	—	1,9	0,3	3,6	1,7	—
23	—	—	1,5	0,2	22,0	—	—
24	—	2	1,9	—	3,3	—	—
25	2,5	—	1,2	0,5	1,2	—	2,3
26	0,3	—	—	5,7	11,7	—	—
27	8,8	12	—	6,0	0,6	—	1,4
28	14,4	11	—	—	—	—	—
29	17,1	15	—	—	12,7	—	1,3
30	9,8	3	0,4	0,4	2,6	0,3	—
31	—	2	—	2,1	—	—	—

TABEL 15. *Precipitation in the period Sept. 1, 1955 - May 1, 1956*

Volgens het Maandelijks Overzicht der Weergesteldheid van het KNMI waren de maanden november, februari, maart en april droger dan normaal en oktober en januari natter. In februari werd in de Bilt 24 mm neerslag afgetapt. Vrijwel gedurende deze gehele maand trad vorst op. In de maand januari viel op de 2e, 3e, 4e en 10e

sneeuw. Verder was in de periode van 14 t/m 18 december de temperatuur afwisselend boven en beneden het vriespunt, zodat enkele malen ijzel optrad.

Uit het door VISSER (189) gegeven kansdiagram blijkt, dat de neerslag in december en januari slechts één's per 30 winters wordt overtroffen.

b. De grondwaterstand

Op 26 september werden op de drie percelen midden tussen de drains grondwaterstanden van resp. 1,45, 1,75 en 1,95 m waargenomen. Door de overvloedige regen in de laatste dagen van september steeg de grondwaterstand echter snel tot boven het vlak door de drains. Gedurende de verdere periode bleef de grondwaterstand hier boven en wisselde in hoogte met de neerslag en afvoer. In de eerste helft van februari werd een geleidelijke daling van de grondwaterstand waargenomen. Uit de waarnemingen op alle percelen blijkt, dat de vorst weinig of geen invloed heeft gehad op de grondwaterstand.

De tussen 10 oktober en 15 februari geregistreerde grondwaterstanden zijn in klassen ingedeeld en opgenomen in tabel 16.

TABEL 16. Aantal dagen tussen 10 oktober en 15 februari, waarop de grondwaterstand midden tussen de drains een bepaalde hoogte bereikte

Perceel	0-30	30-50	50-70	70-90	> 90 cm-mv
I	0	4	13	49	64 dagen
II	10	33	29	19	39 dagen
III	5	29	39	37	20 dagen

TABLE 16. Number of days on which the groundwater table midway between tile lines reached a certain depth

De diepere grondwaterstanden kwamen hoofdzakelijk voor in de eerste helft van oktober, in november en in december.

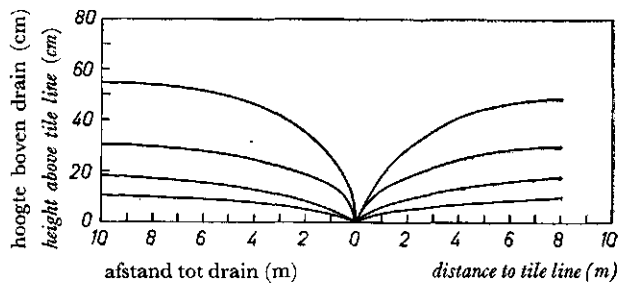
Gezien de voorkomende grondwaterstanden, voldoet de drainage op perceel I zeer goed aan de gestelde eisen. Op de percelen II en III komen echter te vaak hoge standen voor. Hoewel hierdoor volgens de eigenaar nooit schade werd geconstateerd,

FIG. 30

Verloop van de grondwaterstand op perceel I aan weerszijden van de drain waarvan de afvoer werd gemeten

FIG. 30.

Shape of the groundwater table on parcel I



zijn de standen volgens de thans bij de drainage geldende begrippen te hoog. De drainafstanden zijn dus te groot genomen, zoals ook blijkt uit tabel 13.

Uit de periodieke opnamen van de grondwaterstandsbuizen op verschillende afstanden van de drains kan het verloop van de grondwaterstand tussen de drains worden nagegaan. In fig. 30 is dit verloop weergegeven voor een viertal opnamen op verschillende data op perceel I. De grondwaterstanden aan de linkerkzijde van de drain, waaraan de afvoer werd gemeten blijkt voortdurend hoger te zijn dan die aan de rechterzijde. Dit is een gevolg van het feit, dat de linkerdrain doorgaans minder afvoert. Hetzelfde verschijnsel zien we op de percelen II en III (fig. 31). Hier is het effect echter nog sterker.

FIG. 31.

Verloop van de grondwaterstand op perceel II en III. Op 30 jan. (—), 2 jan. (- . . . -), 16 jan. (- - - -) en 14 nov. (—)

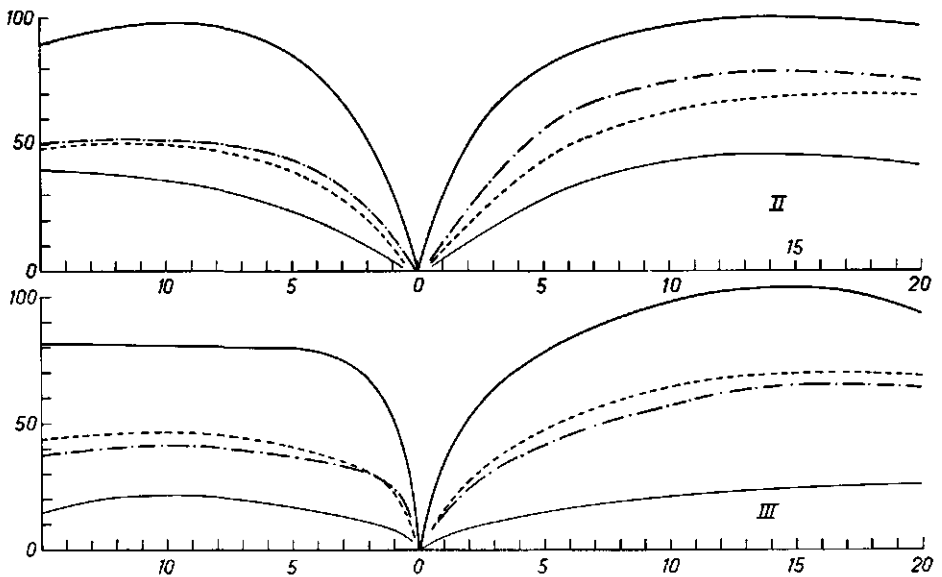


FIG. 31.

Shape of the groundwater table on parcel II and III on Jan. 30 (—), Jan. 2 (- . . . -), Jan. 16 (- - - -) and Nov. 14 (—)

Beschouwen we de onderlinge hoogteligging van de drains (tabel 17), dan blijkt deze op de percelen I en II een deel van het verschil te kunnen verklaren. Waarschijnlijk is echter, dat op de percelen II en III het oude drainagesysteem, waarvan zijleidingen op ongeveer 25 m van de meetdrain in de sloot uitmondten, nog water afvoerden. De eindbuizen van dit systeem werden weliswaar verwijderd en de buizen

met klei dichtgestopt, doch dit kan niet verhinderen dat delen van het oude stelsel zorgen voor een snellere toevoer naar de drains.

TABEL 17. Hoogteligging van de naastliggende drains t.o.v. de meetdrain

Perceel	Plaats	Links	Rechts
I	uitmonding	0	0
	midden	+ 5,2	+ 2,2
	boven	+ 6,8	- 1,7
II	uitmonding	- 5,3	- 7,0
	midden	- 6,0	- 0,1
	boven	- 6,6	+ 6,9
III	uitmonding	- 0,7	+ 2,9
	midden	- 1,4	- 0,4
	boven	- 1,9	- 3,6

TABLE 17. Height of adjoining drain tiles compared with the height of the tile line from which outflow was measured

FIG. 32.

Verloop van de grondwaterstand op perceel II en III evenwijdig aan de drains op een afstand van 7,5 m op 30 jan. (- - - -), 2 jan. (—) en 16 jan. (- . . . -)

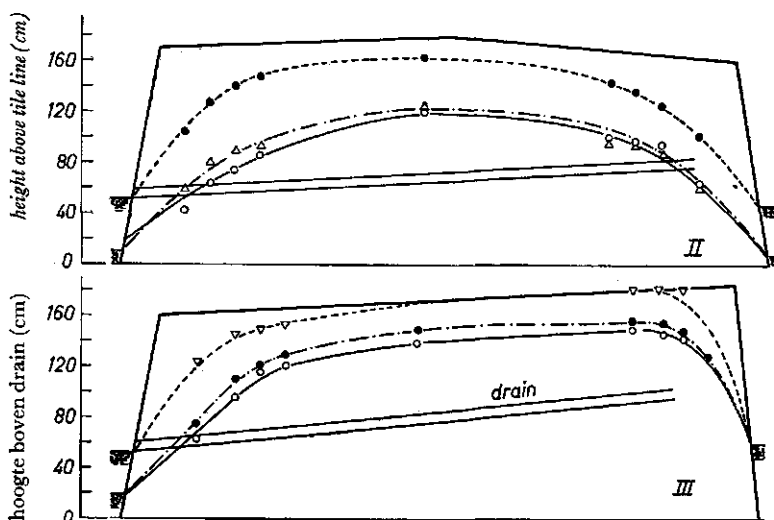


FIG. 32.

Course of the groundwater level on parcel II and III parallel to tile line at a distance of 7,5 m on Jan. 30 (- - - -), Jan. 2 (—) and Jan. 16 (- . . . -)

Uit dezelfde waarnemingen is ook het verloop van de grondwaterstand in het perceel evenwijdig aan de drains na te gaan (fig. 32). Hiervoor is de stand genomen, die op 7,5 m van de drains optrad. Op perceel I werd een soortgelijk verloop waargenomen. Het grote verschil in slooteffect op perceel III is voornamelijk te wijten aan het verschil in peil. Op de rechtersloot wordt bovendien afvalwater van de naastgelegen bedrijfsgebouwen geloosd. Hierdoor kan de doorlatendheid van de slootwand kleiner zijn geworden.

c. Het bergend vermogen

Bij wisselende grondwaterstand wordt de hoogte in sterke mate bepaald door de hoeveelheid water, die de grond kan bergen. Onder het effectief bergend vermogen wordt hier het gedeelte van de grond verstaan, dat nog water op kan nemen. Dit vermogen kan worden bepaald door na te gaan, welke grondwaterstandsverhoging een bepaalde regenbui ten gevolge heeft. In tabel 18 zijn een aantal van deze, voor de drie percelen bepaalde, grootheden opgenomen. Tevens is in deze tabel het theoretisch bergend vermogen opgenomen. Hieronder wordt het grondvolume verstaan, dat volgens de vocht karakteristiek nog water op kan nemen, wanneer wordt uitgegaan van de veronderstelling, dat er evenwicht bestaat tussen het freatisch niveau en het vochtgehalte van de grond daarboven. Omdat het vochtgehalte met de hoogte boven de grondwaterstand afneemt, zal het theoretisch bergend vermogen groter zijn, naarmate een dikkere laag wordt beschouwd. Hoewel de vocht karakteristiek (fig. 14) is bepaald voor perceel II, is hiermee ook het theoretisch bergend vermogen van de beide andere percelen bepaald.

De waarden van het effectief bergend vermogen kunnen enigszins variëren, naarmate zich een vochtoverschot of tekort ten opzichte van de evenwichtstoestand in de grond voordoet (tabel 18).

Afgezien van de hogere waarden, die voor de bouwvoor op de percelen II en III werden gevonden, blijkt het effectief bergend vermogen op de percelen I en III gemiddeld ongeveer 0,05, dat op perceel II 0,04 te zijn. Verder blijkt dit vermogen doorgaans de helft tot twee derde van de theoretische waarde te bedragen.

Het valt te verwachten, dat het enige tijd duurt voordat de neerslag de grondwaterstand bereikt, afhankelijk van de hoogte waarop zich het grondwater bevindt. In tabel 19 is het verschil in tijd opgenomen tussen het begin van de neerslag en het moment, dat de grondwaterstand opliep.

De zaksnelheid neemt met het verloop van de tijd sterk af om na de voorjaarsbewerking weer op te lopen. Dit blijkt b.v. uit de waarnemingen van 6 en 14 maart op de percelen I en II. Waarschijnlijk is de afname van de zaksnelheid toe te schrijven aan het zwellen van de grond en het dichtslaan van de bovenlaag als gevolg van de grote hoeveelheid neerslag die eind januari viel.

TABEL 18. Het effectief en theoretisch bergend vermogen van de grond

Per- ceel	Datum	Neerslag mm	Duur bui uren	Grondwaterstand (cm-mv)		Bergend vermogen	
				van	tot	eff.	theor.
I	17/10	20	—	100	58	0,05	0,06
	22/11	1,4	1	100	98	0,07	0,09
	10/12	3,2	3,5	95	89	0,05	0,09
	15/12	4	5	89	83	0,07	0,08
	8/1	5	12	92	83	0,06	0,08
	11/1	5,1	4,5	89	76	0,04	0,08
	12/1	12,5	12	74	50	0,05	0,06
	20/1	4	8	95	87	0,05	0,08
	22/1	4	10,5	93	87	0,07	0,08
	23/1	18	16	90	51	0,05	0,07
	23/1	3,5	1,5	51	43	0,04	0,06
	26/1	5,8	3,5	87	67	0,03	0,07
	26/1	0,5	4	67	66	0,05	0,08
	29/1	14	6,5	89	52	0,04	0,07
	II	20/10	3	—	185	177	0,04
21/10		17	—	177	136	0,04	—
24/10		2	—	140	131	0,05	—
27/10		12	—	125	82	0,03	0,09
28/10		11	—	82	52	0,04	0,07
8/11		6	1,5	77	67	0,06	0,07
9/11		1	1,5	67	65	0,05	0,07
28/11		1	0,5	100	98	0,05	0,09
10/12		3,2	3,5	98	93	0,06	0,09
27/12		6	9	110	96	0,04	0,10
8/1		5	12	100	88	0,04	0,09
12/1		12	12	88	58	0,04	0,07
20/1		4,2	9	44	37	0,06	0,07
26/1		11,7	5	20	11	0,13	—
III		9/12	4,2	7	86	81	0,08
	9/12	3,2	3,5	81	76	0,06	0,08
	10/12	3,2	3,5	76	71	0,06	0,08
	14/12	6	3,5	74	59	0,04	0,07
	15/12	4	5	59	51	0,05	0,07
	16/12	5	18	51	42	0,06	0,06
	27/12	6	9	50	35	0,04	0,06
	7/1	6	13	50	37	0,05	0,06
	20/1	4,2	9	60	54	0,07	0,09
	23/1	17,9	12	54	15	0,05	—
	23/1	5	4	15	8	0,07	—
	24/1	1,6	4	9	7	0,08	—
	26/1	11,7	5	42	28	0,08	—
	27/1	0,6	1	28	26	0,03	—
	29/1	14	8	53	18	0,04	—

TABEL 18. Actual and theoretical water storage of the soil

TABEL 19. De tijd, die verloopt tussen het begin van een regenbui en het moment, dat de grondwaterstand gaat stijgen en de zaksnelheid van het water in cm/uur

Perceel	Datum	Grwst. cm	Tijd uren	cm/uur	Perceel	Datum	Grwst. cm	Tijd (uren)	cm/uur	
I	10/11	95	5	29	II	11/1	68	9	8	
	10/11	99	6,5	15		12/1	38	5	8	
	11/1	90	7	13		20/1	45	4	11	
	12/1	71	4	18		26/1	25	6,5	4	
	21/1	90	7	13		29/1	17	4	4	
	23/1	93	7	13		14/3	49	3	16	
	26/1	87	9	10		III	20/10	86	8	11
	30/1	91	6	15			29/10	82	6,5	12
	6/3	97	4	24			14/12	70	3,5	20
	7/10	77	4	19			15/12	57	2,5	33
	10/12	96	5	19			27/12	65	3,5	19
	28/12	56	7	8			20/1	68	4,5	15
							22/1	63	4	16
							26/1	42	8	5
				29/1	55	10,5	5			
				29/1	44	6	7			

TABLE 19. *Lapse of time between rainfall and start of rising of the water table midway between tile lines and the infiltration velocity of the soil*

d. De afvoer

Op de percelen II en III konden geen middelmatige en hoge afvoeren worden geregistreerd, omdat bij neerslag van enige betekenis het peil in de sloten zo hoog opliep, dat de meters geheel of gedeeltelijk onder water stonden. In het begin van de

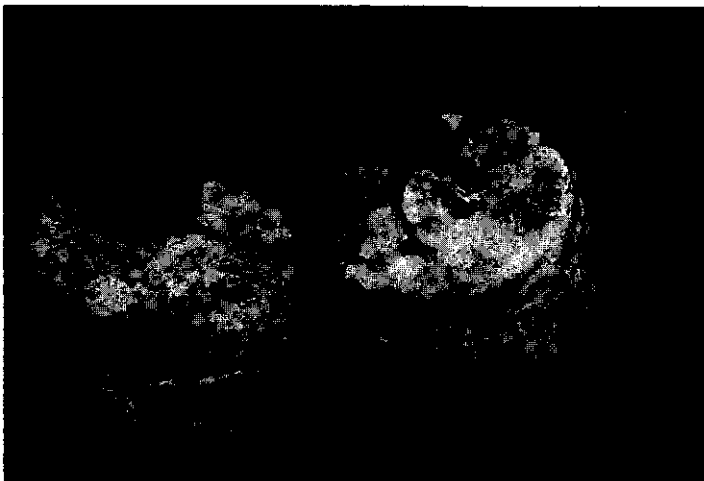


FIG. 33.
Corrosie van aluminium vlotters door drainwater na 2 weken gebruik

FIG. 33.
Corrosion of aluminium floats by drainage water after 2 weeks use

meting werden verder moeilijkheden ondervonden, doordat de aluminium vlotters van de meters binnen 14 dagen waren gecorrodeerd (zie fig. 33). Nadat plastic vlotters werden gebruikt, was dit euvel verdwenen.

Aan het begin van de metingen voerden de buizen nogal wat turfstrooisel en grovere zanddelen af. Om verstopping van de openingen te voorkomen werden daarom in de meters geperforeerde messing platen met openingen van 2 mm diameter geplaatst.

De eerste afvoeren werden gemeten na de regenval van 5 oktober. Op perceel I en de naastliggende percelen voerden de drains echter reeds af na de regenval van 25 september. De reden van dit verschil is gelegen in de verdamping. Op de percelen II en III stond in die tijd resp. klaver en karwij, terwijl op perceel I ongeveer $\frac{3}{4}$ van het oppervlak was ingenomen door bieten en witlof, terwijl de rest braak lag, evenals de omliggende percelen.

Zoals reeds eerder is opgemerkt, werd op elk perceel de afvoer van één drain geregistreerd. Van de naastliggende drains werd de afvoer periodiek opgenomen. Fig. 34 geeft het resultaat van een zestal van deze metingen op perceel I. Zoals reeds uit de grondwaterstand bleek, voerde de linkerdrain bij geringe afvoeren minder af dan de rechter- en de meetdrain. Bij hoge afvoeren was dit niet het geval, omdat de capaciteit van de meter te gering was. Nadat hierin was voorzien, werden echter op geen

FIG. 34.
Verband tussen de afvoer van de meetdrain en de naastliggende drains: (●) links, (Δ) rechts

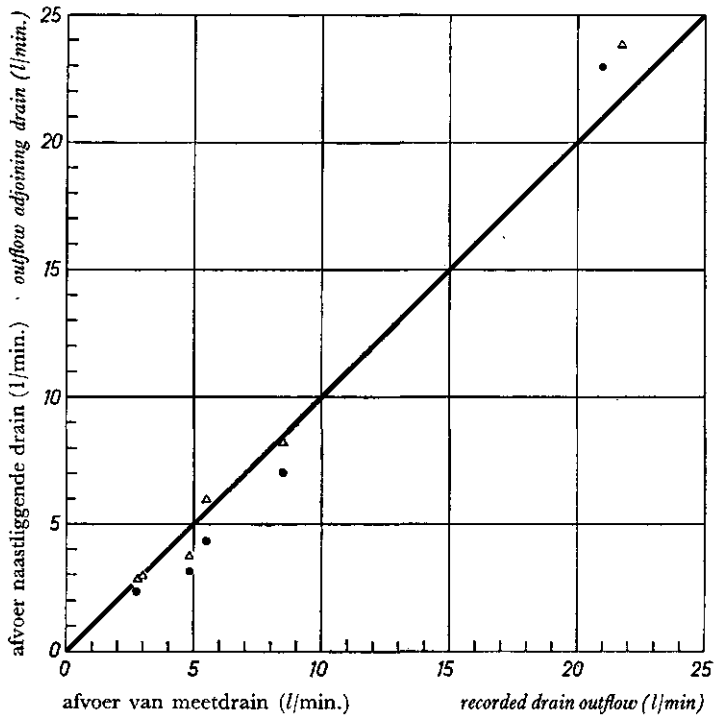


FIG. 34.
Relation between the recorded drain outflow (abscissa) and the outflow from the tile lines at the left (●) and right (Δ) hand side

der percelen meer hoge afvoeren waargenomen. Op de beide andere percelen werd – als gevolg van de werking van het oude drainagesysteem – eveneens een verschil in afvoer tussen de buizen waargenomen. Op 4 maart werden hier voor de linker-, midden- en rechterdrain resp. waargenomen 1,69, 2,36 en 2,72 l/min. en 0,11, 0,16 en 0,22 l/min.

Hoewel de verschillen op perceel I niet groot geweest kunnen zijn, zou het beter geweest zijn als de afvoer van meer drains gemeten was, al kan in homogene grond waarin de drains overal even diep liggen, wel worden volstaan met de meting aan een enkele drain (118).

Zoals reeds eerder opgemerkt werd, was de capaciteit van de afvoermeter op perceel I te klein om topafvoeren te meten. De hoogst geregistreerde afvoer bedroeg 11,8 mm, terwijl op 30 januari aan de naastliggende drains resp. 14,1 en 14,4 mm werd afgevoerd. Bij de omrekening van de hoeveelheid op het aantal mm is ervan uitgegaan, dat van de 196,2 m 26,2 m het water op de sloten afvoerde. Wordt met deze veronderstelling de afvoer in de periode 1 oktober tot 1 april (behalve februari) ingedeeld in grootte-klassen, dan wordt het in tabel 20 gegeven resultaat verkregen.

TABEL 20. Aantal dagen in de periode 1 oktober tot 1 april (behalve februari) waarop de afvoer en de neerslag een bepaalde waarde bereikte

	0-3	3-5	5-7	7-10	> 10 mm/etm.
Afvoer	123	15	4	2	10 dagen
Neerslag	122	8	11	1	12 dagen

TABLE 20. *Number of days in the period Oct. 1 – April 1 (excl. February) on which drain outflow and rainfall reached a certain value*

Het aantal dagen, waarop afvoeren groter dan 10 mm voorkwamen, is wellicht iets hoger door de te geringe capaciteit van de meter, doch dit kan niet meer dan 1 à 2 dagen schelen. Afvoeren van 7 mm of meer komen dus nog vrij geregeld voor.

Om na te gaan in hoeverre bovengenoemde veronderstelling van afvoer naar de sloot juist is, werd in een tweetal perioden de totale afvoer bepaald door planimetren van de afvoercurven. De waterberging in de grond werd bepaald door de vormverandering van het freatisch vlak aan begin en eind van deze periode in rekening te brengen. In de periode 17 oktober 12.00 uur tot 23 oktober 12.00 uur werd een afvoer van 29,6 mm geregistreerd. Bij een effectieve berging van 0,05 blijkt de watervermeerdering in de grond 7,3 mm te zijn. De neerslag in deze periode bedroeg 40 mm, terwijl voor de potentiële verdamping 3,6 mm werd berekend. De waarden geven dus een goede overeenkomst.

Als tweede periode werd die van 19 december tot 31 januari genomen. In deze periode was de neerslag 124,1 mm, terwijl voor de potentiële verdamping 14 mm werd berekend. De in de grond geborgen hoeveelheid neerslag bedroeg 10 mm. Als afvoer wordt dan 113,5 mm berekend, d.w.z. 13,5% meer dan uit de neerslag, verdamping

en berging mogelijk is. In de eerstgenoemde periode in oktober trad op twee van de zes dagen een topafvoer op, terwijl dit aantal in de laatste periode slechts 4 van de 41 was. De invloed van de geringere afvoer van de linkerdrain doet zich dus hier sterker gelden.

e. Het verband tussen afvoer en grondwaterstand

Uit de geregistreerde afvoer- en grondwaterstanden blijkt, dat de afvoer na het begin van een regenbui veel sneller oploopt dan de grondwaterstand midden tussen de drains. Fig. 35 geeft dit beeld voor de periode 17 t/m 23 oktober. Helaas zijn voor

FIG. 35.
Verloop van de afvoer (—) en de grondwaterstand midden tussen de drains (—) op perceel I in de periode 17-23 oktober

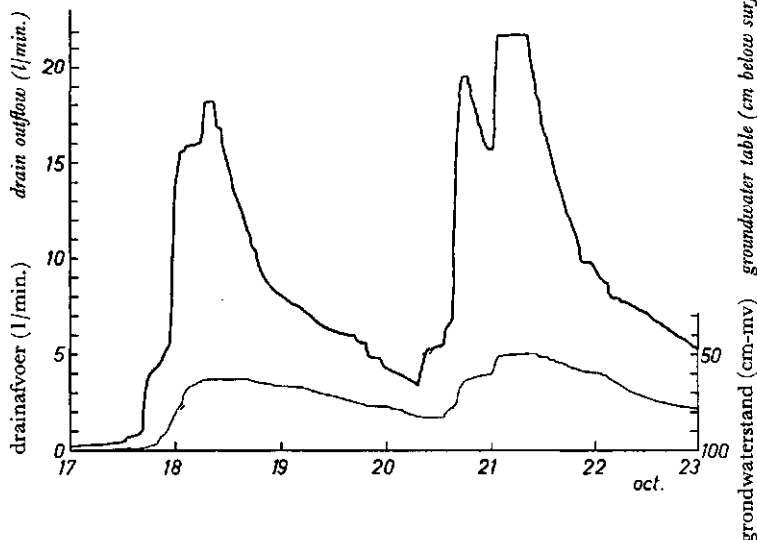


FIG. 35.
Course of the drain outflow (—) and the groundwater level midway between tile lines (—) on parcel I in the period October 17-23

deze periode geen neerslagregistraties ter beschikking. Uit het verloop van neerslag, afvoer en grondwaterstand midden tussen de drains in de periode 23 tot 30 januari (fig. 36) blijkt echter, dat de tijd tussen het begin van de neerslag en het begin van de afvoer ongeveer de helft is van die tussen het begin van de neerslag en het oplopen van de grondwaterstand midden tussen de drains.

Het voortijdig oplopen van de afvoer moet worden toegeschreven aan een snellere toevoer van het water, dat op en vlakbij de relatief beter doorlatende drainsleuf valt. Bovengrondse afvoer naar de drainsleuven werd niet waargenomen.

Bij geen der waarnemingen werd water boven de drains waargenomen. Naarmate men dichter bij de drains komt, wordt het water dus relatief sneller afgevoerd. Dit blijkt ook uit het verloop van de grondwaterstand in de figuren 35 en 36. Bij een bui van 20 mm kan alleen het water, dat op de drainsleuf valt, gedurende bijna 2 uur een topafvoer van 20 l/min. geven. Het water, dat daarbij valt op een strook ter breedte

FIG. 36.

Verloop van de afvoer (—) de grondwaterstand midden tussen de drains (—) en de neerslag (. . . .) op perceel I in de periode 23-29 januari

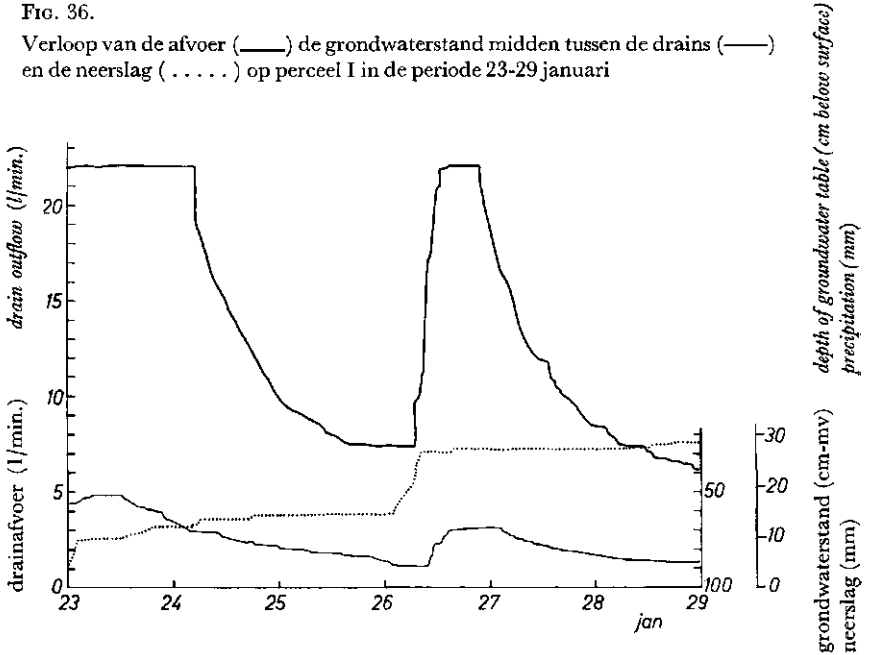


FIG. 36.

Course of the drain outflow (—), the groundwater level midway between tile lines (—) and the precipitation (. . . .) on parcel I in the period January 23-29

van een meter aan weerszijden van de drainsleuf, kan hetzelfde effect hebben gedurende $3\frac{1}{2}$ uur. Door de relatief betere doorlatendheid van de drainsleuf zullen hier aanzienlijk grotere drukvervallen optreden, die voor een snelle afvoer van het water naar de drains zorgdragen.

Een nauw verband tussen afvoer en grondwaterstand midden tussen de drains is kort na of tijdens een regenbui niet te verwachten. Dit blijkt, wanneer de opbolling van de grondwaterstand wordt uitgezet tegen de afvoer bij een oplopende grondwaterstand (fig. 37a). Wordt echter hetzelfde gedaan voor een dalende grondwaterstand dan groeperen de punten zich om een bepaalde lijn (fig. 37b). De hogere grondwaterstanden zijn hierbij weggelaten, omdat de daarbij geregistreeerde afvoeren te klein zijn geweest. In fig. 37b verschillen de punten vóór 30 oktober aanmerkelijk van die van ná deze datum. De enige verklaring hiervoor is, dat zich in de drains verstoppingen hebben voorgedaan, die bij de grote afvoeren op 18 en 20 oktober zijn verwijderd. Zowel voor de punten vóór als ná 20 oktober blijkt een goed verband te bestaan tussen de afvoer en de opbolling van de grondwaterstand. In figuur 37b is ook het verband aangegeven, zoals dit berekend is volgens verg. 5.5. De afvoer blijkt aanmerkelijk groter te zijn dan volgens de theorie te verwachten is.

FIG. 37.

Verband tussen afvoer en opbolling van de grondwaterstand midden tussen de drains bij stijgende (links) en dalende (rechts) grondwaterstand. In de rechter figuur geven de open cirkels de metingen vóór 20 oktober, de overige punten de metingen na deze datum. De dikke lijn geeft het verband volgens verg. 5.5.

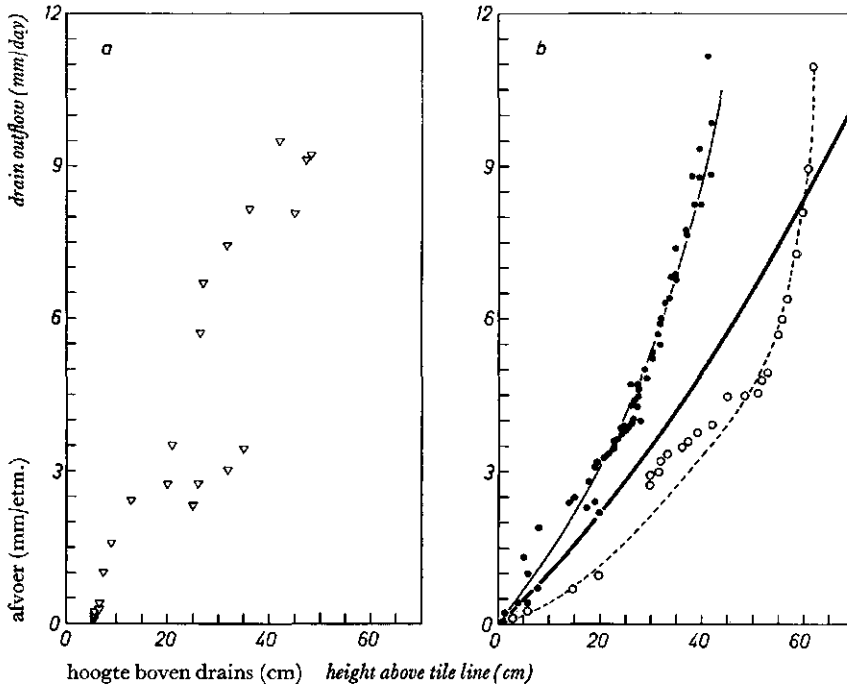


FIG. 37.

Relation [between drain outflow and height of water table midway between tile lines for rising (left hand figure) and falling water table (right hand figure)]. In the right hand figure open signs refer to data before Oct. 20, black signs to data after Oct. 20. The thick line indicates the relation according to eq. 5.5.

Eensdeels is dit een gevolg van de waarschijnlijk grotere doorlatendheid van de bovengrond. Om de optredende afvoeren te bereiken zou de bovengrond echter een doorlaatfactor van ruim 2 m/etm. moeten hebben. Waarschijnlijk heeft verder een groter deel van de stroming door de bovengrond plaats dan door de formules van HOOGHOUTD wordt aangegeven. Deze verschillen duiden er echter wel op, dat de doorlaatfactor van de bovengrond niet zonder meer mag worden gelijkgesteld aan die, welke in de ondergrond wordt gemeten.

Hetzelfde verschijnsel zien we ook voor de, in aantal veel geringere, afvoeren van de percelen II en III (fig. 38). Hier is het theoretisch verband aangegeven voor het geval, waarbij van de 114 m 44 m rechtstreeks op de sloten afwatert. Bij hogere afvoeren blijkt de theoretische opbolling ook hier groter te zijn dan de werkelijke.

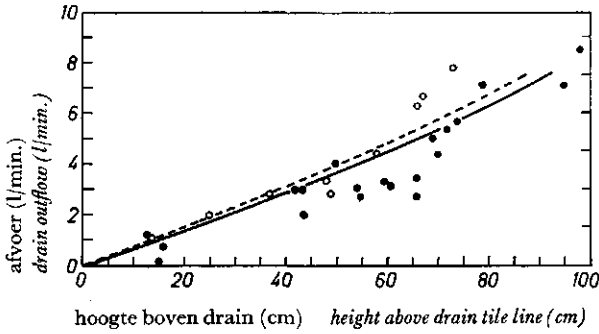


FIG. 38.

Als fig. 37 voor de percelen II (●) en III (○). Het verband volgens verg. 5.5 is voor perceel II aangegeven als (—) en voor perceel III als (- - -)

FIG. 38.

The same as fig. 37 for parcels II (●) and III (○). The relation according to e.g. 5.5 for parcel II has been indicated by (—) and for parcel III by (- - -)

Uit bovengenoemde waarnemingen blijkt, dat de werkelijke afvoer bij dezelfde grondwaterstand groter is dan de theoretische. Hieruit volgt, dat de drainafstand ruimer kan worden genomen dan uit de formules wordt berekend.

f. De te verwachten grondwaterstanden

Zoals reeds in par. 5a opgemerkt werd, was de maand januari natter dan normaal. Het is dan ook de vraag, hoe vaak dergelijke hoge standen zijn te verwachten. Om hiervan een indruk te krijgen, is als benadering een rechtlijnig verband tussen afvoeren grondwaterstand aangenomen, hetwelk voor perceel I aan de hand van fig. 37 werd vastgesteld als:

$$S = 0,02 m, \quad (5.8)$$

Verder is de neerslagverdeling aangenomen, zoals die door VISSER (189) wordt gekarakteriseerd. De te verwachten neerslag kan dan worden weergegeven door:

$$r = at^{-b} + r_g \quad (5.9)$$

Hierin is:

r de neerslag in m,

t de tijd in dagen,

r_g een gemiddelde neerslag van 2 mm/dag,

a en b constanten.

Gemakshalve is hierbij verondersteld, dat de grootste neerslag op de eerste dag valt. Dit is echter niet strikt noodzakelijk.

Voor de éénmaal per 10 winters te verwachten „maatgevenderegenbui” volgendan uit tabel 2 van bovengenoemd artikel voor de constanten a en b de waarden 0,019 en 1,75. Voor het geval dat deze bui éénmaal per 100 winters valt, zijn de waarden resp. 0,025 en 1,50.

De grondwaterstandsverhoging h door deze regenbuien kan dan worden bepaald.

Immers is volgens VISSER (189):

$$dS = (at^{-b} + r_g - s_g - 0,02 h) dt \quad (5.10)$$

Hierin stelt s_g een gemiddelde afvoer van 2 mm/etm. voor. Dan geldt:

$$dS = (at^{-b} - 0,02 h) dt \quad (5.11)$$

Daar echter $dS = L dh$ is, als L het effectief bergend vermogen is, geldt:

$$dh = \frac{1}{L} (at^{-b} - 0,02 h) dt \quad (5.12)$$

of:

$$dh = (At^{-b} - Bh) dt \quad (5.13)$$

Hieruit volgt voor h :

$$h = Ae^{-Bt} \int_0^t e^{Bt} t^{-b} dt + m_g e^{-Bt} \quad (5.14)$$

als m_g de bij de gemiddelde afvoer behorende opbolling van de grondwaterstand is.

Berekening van verg. 5.14 voor bovengenoemde waarden voor a en b en voor $L = 0,05$ (perceel I), geeft het in figuur 39 weergegeven resultaat.

FIG. 39.

Te verwachten grondwaterstand midden tussen de drains op perceel I eens per 10 winters en eens per 100 winters, berekend uit verg. 5.14

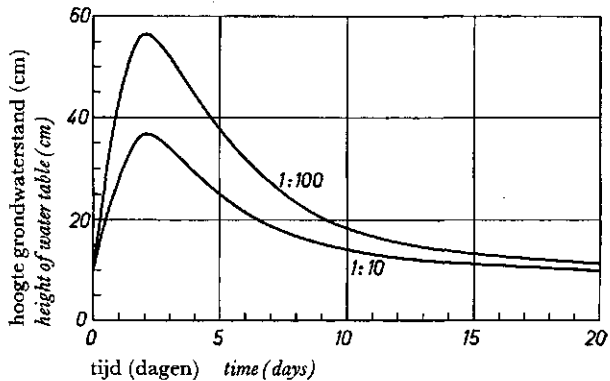


FIG. 39.

Height of groundwater table midway between tile lines which can be expected once in 10 years and once in 100 years, calculated with the aid of eq. 5.14

Eénmaal per 10 winters zou men dus een opbolling van 37 cm mogen verwachten. Het drainagesysteem zal echter zwaarder kunnen worden belast dan door de in verg. 5.9 weergegeven neerslag wordt aangegeven, omdat de grootste neerslag niet op de eerste dag hoeft te vallen.

Voor de percelen II en III zijn geen hoge waarden van de afvoer gemeten. Hier kan echter ook de constante factor in de verg. 5.8 op andere wijze worden bepaald, nl. uit de grondwaterstands daling in perioden, waarin geen neerslag valt. Dan moet gelden (zie o.a. 67):

$$h_t = h_0 e^{-Bt} \quad (5.15)$$

waarin h_0 en h_t de hoogte van de grondwaterstand resp. op $t = 0$ en $t = t$ is. In fig. 40 is een aantal grondwaterstanden op perceel II uitgezet tegen de tijd, in perioden, waarin de drainuitmondningen onder water stonden. Uit de door de punten ge-

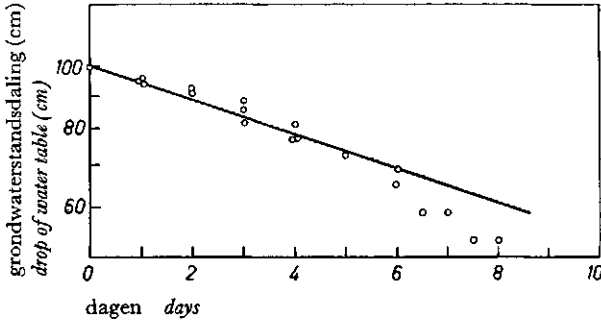


FIG. 40.

Daling van de grondwaterstand op perceel II in tijden, dat de drainuitmondning onder water stond

FIG. 40.

Fall of the groundwater table on parcel II in periods in which the tile outlet was below the water level in the ditch

trokken lijn blijkt, dat $B = 0,06$ moet zijn. In deze perioden zou dus gelden bij $L = 0,04$ op perceel II:

$$S = 0,06 \times 0,04 \text{ m}_0 = 0,0024 \text{ m}_0 \quad (5.16)$$

Wordt het verband tussen afvoer en grondwaterstand bij benadering weergegeven door verg. 5.6 dan levert invullen van de betreffende waarden van perceel II ($K = 0,25 \text{ m/etm.}$, $L = 0,04$, $d = 2,15$ en $l = 30 \text{ m}$):

$$\frac{8 Kd}{l^2} = 0,005 \quad (5.17)$$

In perioden, waarin de drainuitmondningen boven water liggen, worden echter bij deze hoge grondwaterstanden grotere afvoeren gemeten dan de theoretische (zie fig. 36). Het onder water staan van de drains heeft dus een nadelige invloed op de afstroming van water.

6. SAMENVATTING EN CONCLUSIES

De drainafstand wordt door enkele vrij eenvoudige metingen bepaald, met behulp van formules die de stroming van het water in de grond weergeven in de stationaire toestand. Omtrent de in deze formules in te zetten constanten bestaat geen eenstemmigheid, speciaal niet wat betreft de maatgevende afvoer en de daarbij toe te laten grondwaterstand. Beide factoren hebben in hun onderlinge samenhang een grote invloed op de uiteindelijke drainafstand. De veel hogere op de percelen II en III waargenomen waterstanden hadden volgens de eigenaar nog geen nadelige invloed op de opbrengst.

De diameter van de drainbuizen is van weinig belang bij de in ons land meestal toegepaste enkelvoudige drainage. Bij de samengestelde drainage kan deze diameter echter een belangrijke rol spelen. De verschillen tussen de diverse formules, die de stroming van het water in de buizen weergeven, worden echter overtroffen door de vormafwijking en de onzekerheid die bestaat over de toelaatbare dichtslibbing van de drains. Doorgaans zal men voldoende zeker zijn als de stromingsformules voor gewone buizen worden gereduceerd met 50 %.

Bij drainage op hellende terreinen wordt een groot deel van het water door de bouwvoor of over het oppervlak naar de drainsleuf afgevoerd, zodat geen verband tussen afvoer en grondwaterstand hoeft te bestaan.

Omdat de afvoer sterk wisselt met de tijd zijn continue metingen gewenst. In de winter 1955/1956 werden afvoer- en grondwaterstandsmetingen met registrerende apparatuur verricht op een drietal percelen lichte kleigrond. Uit de resultaten blijkt, dat er een goed verband bestaat tussen afvoer en grondwaterstand midden tussen de drains bij een dalende grondwaterstand. Bij stijgende grondwaterstand is dit verband veel minder duidelijk als gevolg van de snellere afvoer van het water dicht bij de drains. De afvoer neemt na enige vertraging t.o.v. de neerslag snel tot zijn maximum toe, terwijl hij in veel minder snel tempo afneemt.

De werkelijke afvoer was op alle drie percelen groter dan de theoretisch berekende bij dezelfde grondwaterstand midden tussen de drains. Gedeeltelijk kan dit een gevolg zijn van de grotere doorlatendheid van de grond boven de drains. Doen deze beter doorlatende lagen aan de stroming mee, dan vindt een groter deel van de afvoer door de grond boven de drains plaats dan uit de theorie volgt. Als gevolg hiervan is het thans gebruikte drainagecriterium van een afvoer van 7 mm/etm. bij een grondwaterstand van 50 cm beneden maaiveld op bouwland aan de veilige kant.

Afvoeren van 10 mm of meer kwamen op perceel I op 10 dagen voor. Op de percelen II en III konden geen hoge afvoeren worden gemeten i.v.m. de te hoge slootwaterstanden.

Getracht is een benaderende berekening te geven van de te verwachten grondwaterstanden door een lineair verband tussen afvoer en grondwaterstand aan te nemen. Voor perceel I blijken de aldus berekende grondwaterstanden laag te zijn. Op de percelen II en III wordt de afvoer echter in sterke mate belemmerd door de vollopen-de sloten.

SUMMARY

SOME ASPECTS OF THE WATER GOVERNMENT IN AGRICULTURAL SOILS

INTRODUCTION

Although rainfall is equally distributed throughout the year under the climatological conditions prevailing in the Netherlands, evapotranspiration during winter is very small. In this period a surplus of water occurs and drainage of most agricultural soils is necessary. During summer, however, evapotranspiration exceeds precipitation and a shortage of water occurs especially in light-textured soils.

The amount of water which can be held by the soil is largely dependent on the depth of drainage. Lowering the water table by drainage effects an increase of the accessibility of the soil to air but, as a consequence, water will become less easily available. If possible, the water table must not be lowered so far that water deficiency is likely to occur. Thus the lower limit of depth of drainage is determined by the water requirements of crops. On the other hand the upper limit is determined by the requirement that air should easily penetrate into the soil and the outflux of carbon dioxide is not hampered.

A rational limit for the maximum depth of drainage is given by the demand that the water stored in the soil which becomes available to the crop during the growing season, together with the water supplied by precipitation and influx of water from subsoil is sufficient for a good crop production. In this thesis a theoretical treatment of the problem of the depth of the water table is given. Further a comparison is made with experiments in this field found in literature.

For determining maximum depth of drainage the water requirements of crops, the uptake of water from the root zone and the supply from subsoil have been discussed. To get an idea about the upper limit of depth of drainage the demand of crops for air and the soil properties which affect physical processes of air supply to the soil must be known.

In the Netherlands drain spacings are generally calculated with the aid of formulae which comprise a drainage coefficient, the thickness of permeable layers and the depth of groundwater table midway between drains. A comparison between the supposed drainage coefficient and the actual drain-outflow is only possible if reliable outflow measurements are available over a long period. The author developed apparatuses with which drain outflow can be recorded. A description of these apparatuses and the results of some measurements with them are given in the last chapter.

WATER REQUIREMENTS OF CROPS

A brief discussion of the methods of evaluating evapotranspiration is given. The water requirements of crops are expressed in terms of the potential evapotranspiration calculated according to Penman. An empirical reduction factor to calculate allowable

water deficiency as compared with potential evapotranspiration is then introduced. This factor is found to be .75 for most arable crops and 1.0 for grassland. The allowable water deficiency is for the main part due to incomplete covering of the soil surface during the early growing stage of the crops. In this criterion potential evapotranspiration is taken over the period in which potential evapotranspiration exceeds precipitation. Further it has been assumed that the water requirements of crops only depend on potential evapotranspiration.

Water will be taken up in a much smaller degree in the lower layers of the soil than in the upper layers. This is due to a better development of roots in the latter zones. In case the groundwater table is at such a depth that no influence on root growth takes place the maximum depth of water uptake is about 120 cm for arable crops and about 40 cm for grassland. From several experiments referred to in this chapter it is evident that in the case of arable crops the water uptake decreases proportionally with the depth. At the surface a moisture content of about wilting point can be reached. At the lower boundary of the root zone the soil remains at field capacity. In the case of grassland the uptake down the entire depth of the root zone reaches the wilting point of the soil. The same holds for soils with shallow layers in which roots cannot penetrate. If a groundwater table is present at a smaller depth the flow of water from subsoil into the rootzone depends on the depth of the water table, the evapotranspiration and the capillary conductivity of the soil. If the latter factor is known a relation between height above water table and moisture tension can be calculated.

AIR REQUIREMENTS OF CROPS AND AERATION OF THE SOIL

For all the many experiments carried out in this field our knowledge about the air requirements of crops is very incomplete. It is a well-known fact that aeration of the soil is necessary for the outflow of carbon dioxide produced by the roots, by other organisms and by chemical reactions in the soil. Lundegaardh states that at a depth of 15 cm the CO_2 -content of the soil must be less than 1 %.

The production of carbon dioxide in the soil depends mainly on soil temperature and moisture content. If the activity is restricted to the upper layers of the soil, an air content of about 10 % is sufficient for aeration. Normally this is the case in spring when the soil is at field capacity.

Supply of air to the soil is mainly caused by diffusion. Because several factors in aeration are not exactly known, only the steady state of diffusion can be used to calculate the content of CO_2 in the soil. From experiments found in literature a linear relation between diffusion coefficient and fraction of air-filled pores in the soil has been deduced. If the air content of the soil is less than about 13 % the diffusion coefficient is practically zero. The decrease of activity with depth has been correlated with the amount of roots and bacteria in the soil. For homogeneous soils a relation between depth and activity has been found which can be used to calculate the depth of water table.

ESTIMATION OF THE MOST FAVOURABLE DEPTH OF GROUNDWATER TABLE

The methodology of determination of the most suitable depth of drainage is discussed. The relation between yield and depth of groundwater table depends on the wetness or dryness of the year. If a mean depth of water table is used, no account is taken of the influence of fluctuations in water level. To find out whether a water deficiency occurred during a certain year the actual water uptake by the soil must be known. This is only possible when starting from moisture characteristics of the soil.

In case no sub-irrigation is applied the water table will drop to a lower level during the growing season of the crops. Then the depth of drainage must be such that the amount of water available to the crops is, for instance, in 9 out of 10 years equal or larger than $0.75 E_T$ in the case of arable crops and E_T in the case of grassland. To calculate the amount of available water in the soil, a method is developed to determine the water supply by the subsoil. The upper limit of depth of drainage is such that the upper 20 cm of the soil has an air content of at least 13%. If it is not possible to comply with the water requirements of crops at this depth of drainage a water deficiency must be tolerated or sub-irrigation or sprinkling must be applied.

In spring, shallow water tables have a detrimental effect on the yield of grassland. Because of the very high water requirement of this crop sub-irrigation must be applied to get maximum yields, even in heavy-textured soils.

In the case of sub-irrigation on grassland the depth of the water table can be calculated from evapotranspiration, capillary conductivity of the soil and the relation between yield and soil moisture tension according to a method developed by Makkink. For arable crops the depth of the water table in the case of sub-irrigation can be deduced from evapotranspiration, soil moisture content and production of CO_2 from the demand that the CO_2 -content of the soil at a depth of 15 cm remains below 1%. For this purpose graphs are given for the CO_2 -content at various depths in the soil. These graphs comprise various courses of soil moisture.

The same criterion for the CO_2 -content in the soil has been used to determine the optimum air-content of the soil in the case of sprinkling. The optimum soil moisture content depends on the activity of the soil and ranges from 10% to 22% by volume.

DRAINAGE

The methods of determining drain spacings are described. In the Netherlands generally the formulae of Hooghoudt are used. The drainage coefficient is taken 7 mm/day at an allowable depth of water table midway between tile lines of 50 and 40 cm below the surface in arable land and grassland respectively. Smaller and larger drainage coefficients, however, have been proposed by other investigators.

A description has been given of a recording drain outflow meter and a groundwater level recorder. With these apparatuses some measurements have been made on three parcels of a light clay soil with drain spacings of 17,30 and 30 m respectively. On the first parcel the spacing agrees with the spacing calculated according to the

above mentioned formulae. The actual drain spacings on the other parcels is about twice the theoretical spacing.

Groundwater levels have been recorded midway between tile lines. On parcel I the minimum depth of the water level never exceeded a depth of 50 cm below the surface. On parcels II and III the water level reached to 10 cm below the surface.

A comparison of the actual storage capacity of the soil and the storage according to the moisture sorption curve of the soil has been made. In general the first one is one-half to two-thirds of the latter value. This is caused by entrapped air.

A certain lag in time between the moment that rainfall starts and the beginning of drain outflow has been observed. The same holds for the rise in the groundwater table. The lag in time for the latter phenomenon is about twice the first.

The relation between height of water table midway between tile lines and the drain outflow is very loose with a rising water table. In the case of a falling water table, however, a good relation has been found. At a shallow depth of the water table midway between tile lines the actual drain outflow is much larger than the theoretical value. Probably this is due to the higher permeability of the upper layers of the soil and the quicker drainage of rain falling near the drain ditches.

If the drain outlets are below the water level in the ditches, a retardation in outflow and in the drop of the water table have been observed.

LITERATUUR

- *1. ABRAMOVICH, D. I. *Met. Abstracts and Bibl.* **1** (1950) 754.
 2. ADDENS, N. N. Groningse volksalmanak 1952, 90-122.
 3. ALBRECHT, F. *Archiv für Meteor. Geophys. und Bioklim.* **B 2** (1950) 1-38.
 *4. ALPAT'EV, A. M. *Met. Abstracts and Bibl.* **4** (1953) 1280.
 5. ANDERSON, E. R. *Geol. Survey Circular* **229** (1952) 71-119.
 6. ANWEISUNG — fur die Planung, Ausführung und Unterhaltung von Dränanlagen, Berlin 1941.
 7. A. S. A. E. *Agr. Eng.* **34** (1953) 472-480 en 485.
 8. ASLYNG, H. C. AND K. J. KRISTENSEN Kgl. Vet. og Landbohøjsk Aarskrift (1953) 1-50.
 9. ATANASIU, N. *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **42** (87) (1948) 103-120.
 10. ——— *Ber. des deutschen. Wetterd. in der U.S.-Zone* **32** (1952) 9-13.
 11. BAIER, W. *Ibid.* **6** (1952) 37-53.
 12. ——— *Zeitschr. Akker- und Pflanzenbau* **98** (1954) 429-452.
 13. BAUMANN, H. *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **46** (91) (1949) 176-190.
 14. ——— *Zeitschr. Acker- und Pflanzenbau* **93** (1951) 497-513.
 15. BAVEL, C. H. M. VAN *Soil Sci.* **72** (1951) 33-46.
 16. BAVEL, C. H. M. VAN AND D. KIRKHAM *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **13** (1948) 90-96.
 17. BAVEL, C. H. M. VAN AND T. WILSON *Agr. Eng.* **33** (1952) 417-419.
 18. BAVER, L. D. *Soil Physics.* John Wiley and Sons, New York, 1947.
 19. BAVER, L. D. AND R. B. FARNSWORTH *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **5** (1940) 45-48.
 20. BLACKBABY, J. H. *Engineering* **137** (1934) 77-78.
 21. BLANEY, H. F. AND W. D. CRIDDLE *U.S.D.A. Soil Cons. Service S.C.S.-T.P.* **96** (1950).
 22. BLAUW, A. H. *Verh. Kon. Ned. Acad. van Wetensch. A'dam, 2e Sectie* **37** (1938) 1-91.
 23. BLOEMEN, G. *Maandblad Landb. Voorld.* **8** (1951) 387-390.
 24. BONACKER, G. *Proefschr. Königsberg* 1928.
 25. BOUMANS, J. H. *Landbk. Tijdschr.* **65** (1953) 82-104.
 26. BROUWER, W. *Landw. Jahrb.* **63** (1926) 1-81.
 27. ——— *Schriften der R.K.T.L. Heft* **49** (1953).
 28. BROWNING, G. M. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **11** (1946) 517-521.
 29. BUCKINGHAM, E. *U.S.D.A. Bur. of Soils Bull.* **25** (1904).
 *30. BUDYKO, M. I. *Met. Abstracts and Bibl.* **1** (1950) 721.
 31. CANNON, W. A. *Carnegie Inst. of Washington Publ.* **368** (1925).
 32. CHILDS, E. C. *J. of Sci. Instruments* **17** (1939) 93-94.
 33. ——— *J. Agr. Sci.* **33** (1943) 136-146.
 34. CHILDS, E. C. AND N. COLLIS-GEORGE *Proc. Roy. Soc. of London* **A 201** (1950) 392-405.
 35. CHRISTENSEN, H. R. *Soil Sci.* **57** (1944) 381-391.
 36. CLEMENTS, F. E. *Carnegie Inst. of Washington Publ.* **315** (1921).
 37. COLE, J. S. *U.S.D.A. Techn. Bull.* **636** (1938).
 38. COLE, J. S. AND O. R. MATTHEWS, *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **18** (1954) 247-252.
 39. CONCLUSIONS — of the informal meeting on physics in agriculture, *Neth. J. of Agr. Sci.* **4** (1956) 95-97.
 40. DEEMTER, J. J. VAN *Versl. Landbk. Ond.* **56.7** (1950).
 41. DONNAN, W. W. *Proc. Soil. Sci. Soc. Amer.* **11** (1946) 131-136.
 42. DONNAN, W. W. AND H. F. BLANEY, *Drainage Investigations in Imperial Valley, Washington* 1954.
 43. DREIBRODT, L. *Zeitschr. Acker- und Pflanzenbau*, **95** (1952) 353-359.

* Referaat

44. DUIN, R. H. A. VAN *Landbk. Tijdschr.* **66** (1954) 240-243.
 45. ——— *Proefschr. Wageningen*, 1956.
 46. DUIN, R. H. A. VAN, EN D. W. SCHOLTE UBING, *Landbk. Tijdschr.* **67** (1955) 795-802.
 46a. DUIN, R. H. A. VAN, AND D. A. DE VRIES, *Neth. J. of Agr. Sci.* **2** (1954) 168-175.
 47. EDEN, A., G. ALDERMAN, C. J. L. BAKER, H. H. NICHOLSON AND D. H. FIRTH *J. Agr. Sci.* **41** (1951) 191-197.
 *48. EGOROV, N. I. *Meteor. Abstracts and Bibl.* **3** (1952) 922.
 49. ENGELHARDT, J. H. *Landbk. Tijdschr.* **42** (1930) 413-467.
 50. ENGLUND, F. *Trans Danish Acad. of Techn. Sci. A.T.S.* **3** (1951).
 51. ERNST, L. F. *Med. Landb. Proefst. en Bodemk. Inst. Groningen*, 1950.
 52. ——— *Landb. Proefst. en Bodemk. Inst. T.N.O. Groningen, Rapport IV* (1954).
 53. FEILBERG, A. UND C. L. *Kgl. Vet. og. Landbohøjsk. Aarskrift* (1928) 37-56.
 54. ——— *Ibid.* (1932) 14-21.
 55. FEILBERG, C. L. *Ibid.* (1938) 185-203.
 56. FEILBERG, C. L. ET M. BORCH *Ibid.* (1951) 93-108.
 57. FLODKVIST, H. *Sveriges Geologisen Undersökning Serie C, nr. 371* (1936).
 58. FRANKE, A. *Afvoer door drainageleidingen. Rapport Drainage Studiegroep* 1955.
 59. FRECKMANN, W. UND H. BAUMANN, *Bodenk. und Pflanzenernahrung* **2** (47) (1937) 127-166.
 60. GESECKE, F. *Blanck Handbuch der Bodenlehre Bd 6* (1932) 253-342.
 61. GLIEMEROTH, G. *Zeitschr. Acker- und Pflanzenbau* **95** (1954) 21-46.
 62. GOEDEWAAGEN, M. A. J. *Het Wortelstelsel der landbouwgewassen, 's-Gravenhage*, 1942.
 63. GUSTAFSON, Y. *Acta. Agricult. Suecana* **2** (1946) 1-157.
 64. HARMER, P. M. *Michigan Agr. Ept. Station. Special Bull.* **314** (1944).
 65. HARROLD, L. L. *Agr. Eng.* **36** (1955) 669-672.
 66. HEESSEN, H. C. VAN *Afd. Onderz. Cult. Dienst. Voordracht* 86. (1955).
 67. HELLINGA, F. *Afvoer van polders en stroomgebieden. Afd. Cultuurtechniek van de Landbouwhogeschool, Wageningen* 1953.
 68. HEYNDRIKX, G. A. *Med. Landb. Hogeschool en Opz. Stat. v. d. Staat te Gent* **19** (1954) 271-309.
 69. HOFMAN, E. *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **56** (1952) 68-72.
 70. HOOGHOUTD, S. B. *Versl. Landbk. Ond.* **42** (1936) 449-541.
 71. ——— *Ibid.* **43** (13) **B** (1937) 461-677.
 72. ——— *Ibid.* **46** (1940) 515-707.
 73. ——— *Versl. Techn. Bijeenk. Hydr. Comm. T.N.O.* **1-6** (1952) 56-63.
 74. HUDIG, J. EN H. WELT *Versl. Landbk. Onderz.* **10** (1911) 123-244.
 75. IRMAY, S. *Trans. Amer. Geoph. Union* **35** (1954) 463-468.
 76. ISERMAYER, H. *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **56** (1952) 26-38.
 77. JANERT, H. *Der Kulturtechniker* **33** (1930) 19-38.
 78. KEEN, B. A. *The physical properties of the soil. Longmans Green, London* 1951.
 79. KENDALL, R. G. *Land drainage, Faber and Faber, London* 1950.
 80. KIRKHAM, D. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **5** (1941) 65-68.
 81. ——— *Ibid.* **10** (1945) 56-68.
 82. ——— *Ibid.* **13** (1948) 54-59.
 83. ——— *Trans. Amer. Geoph. Union* **30** (1949) 369-386.
 84. ——— *Ibid.* **32** (1951) 422-442.
 85. ——— *Am. Soc. for testing materials. Techn. publ.* **163** (1955).
 86. KIRKHAM, D. AND J. W. DE ZEEUW *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **16** (1952) 286-293.

87. KMOCH, H. G. *Zeitschr. Acker- und Pflanzenbau* **95** (1952) 363-375.
 88. KOEFF, H. *Ber. des deutschen Wetterd. in der U.S. Zone* **32** (1952) 34-37.
 89. ——— *Landw. Forschung* **5** (1953) 54-62.
 90. ——— *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **61** (1953) 29-45.
 91. ——— *Zeitschr. Acker- und Pflanzenbau* **98** (1954) 289-312.
 92. ——— *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **64** (1954) 138-146.
 93. ——— *Ibid.* **67** (1954) 262-270.
 94. KOHNKE, H. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **11** (1946) 64-67.
 95. KOZENY, J. *Trans. 6th Comm. Int. Soc. of Soil Sci. Vol. A.* (1932) 42-67.
 96. LEHANE, J. J. AND W. J. STAPLE *Canad. J. of Agr. Sci.* **33** (1953) 265-273.
 97. LEMON, E. R. AND A. E. ERICKSON *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **16** (1952) 160-162.
 98. LUNDEGAARDH, H. *Der Kreislauf der Kohlensäure in der Natur.* Fischer, Jena 1924.
 99. ——— *Klima und Boden in ihrer Wirkung auf das Pflanzenleben.* 4e Aufl. Fischer, Jena 1954.
 100. LUTHIN, J. N. AND R. E. GASKELL *Trans. Am. Geoph. Union* **31** (1950) 595-602.
 101. MAASLAND, M. *Water Cons. and Irr. Comm. Lecton. N.S.W. March* 1955.
 102. MAGERS, H. *Pflanzenbau* **2** (1929) 472-544.
 103. MAKKINK, G. F. *Verslag C.I.L.O.* (1951) 58-63.
 104. ——— *Gest. Med. C.I.L.O. nr* **6** (1953).
 105. ——— *Verslag C.I.L.O.* (1954) 115-120.
 106. ——— *Landbk. Tijdschr.* **67** (1955) 267-283.
 107. ——— *Ibid.* **67** (1955) 713-731.
 108. MAKKINK, G. F. AND H. D. J. VAN HEEMST, *Neth. J. of Agr. Sci.* **4** (1956) 67-72.
 109. MARCIANO, J. J. AND G. EARL HARBECK JR. *Geol. Survey Circ.* **229** (1952) 46-70.
 110. MASGLEE, J. A. *Rapport Rvk. „Het Eendennest“.* Cult. Dienst Utrecht 1949.
 111. MAZEE, W. M. *Techn. Afd. T.N.O. Rapport T.A.* **145** (1943).
 112. MCDERMOTT, N. AND J. D. IVINS *N. A. A. S. Quart. Review* **27** (1955) 106-108.
 113. MEYER, L. UND G. SCHAFFER *Landw. Forschung* **6** (1954) 81-95.
 114. MICHAEL, G. UND W. BERGMANN *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **65** (1954) 180-194.
 115. MINDERHOUD, J. W. *Stichting tot Ontw. van Komgrondengeb. Overzicht* (1954) 34-42.
 *116. MOKKAVEEV, M. *Meteor. Abstracts and Bibl.* **1** (1950) 752.
 117. MOLEN, W. H. VAN DER *Landbk. Tijdschr.* **65** (1953) 105-113.
 118. ——— *Afvoermetingen in de Noordoost Polder. Rapport Drainage Studiegroep* 1955.
 119. MOORE, R. E. *HILGARDIA* **12** (1939) 383-426.
 120. MOREL, R. AND A. RICHER *Ann. Agron. Paris* **4** (1953) 687-715.
 121. MYERS, H. E. *J. Amer. Soc. of Agronomy* **28** (1936) 106-114.
 122. NEAL, J. H. *Minnesota Agr. Expt. Sta. Techn. Bull.* **101** (1934).
 123. NELLER, J. R. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **8** (1943) 341-344.
 124. NICHOLSON, H. H. *J. Agr. Sci.* **24** (1934) 349-367.
 125. ——— *Agr. Progress* **24** (1949) 112-115.
 126. ——— *Rep. 13th Int. Hort. Congress London* **2** (1953) 904-912.
 127. NICHOLSON, H. H., G. ALDERMAN AND D. H. FIRTH *J. Agr. Sci.* **41** (1951) 149-163.
 128. NICHOLSON, H. H. AND D. H. FIRTH *Ibid.* **43** (1953) 95-104.
 129. PAYNE, D. *Agr. Progress* **27** (1952) 155-166.
 130. PEARL, R. T. *Min. of Agr. London Techn. Bull.* **4** (1954).
 131. PEERLKAMP, P. K. *Versl. Techn. Bijeenk. Hydr. Comm. T.N.O. 1-6* (1952) 177-183.
 132. PENMAN, H. L. *J. Agr. Sci.* **30** (1940) 437-462 en 570-581.

* *Referaat*

133. PENMAN, H. L. *Proc. Roy. Soc. of London A* **193** (1948) 120-145.
 134. ——— *J. of Soil Sci.* **1** (1949) 74-89.
 135. ——— *Proc. 13th Int. Hort. Congress* **2** (1953) 913-924.
 136. ——— *Neth. J. of Agr. Sci.* **4** (1956) 9-29.
 137. PENMAN, H. L. AND R. K. SCHOFIELD *Symposia Soc. Exp. Biol.* **5** (1951) 115-129.
 138. PENNINGSFELD, F. *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **50** (1950) 135-164.
 139. PETERSON, J. B. *Soil Sci.* **70** (1950) 175-185.
 *140. POPOV, O. V. *Meteor. Abstracts and Bibl.* **4** (1953) 1244.
 141. PRYTZ, K. *Ingeniørsvidenskabelige Skrifter A* **27** (1931).
 142. RANEY, W. A. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **14** (1949) 61-65.
 143. REIMANN, E. G., C. A. VAN DOREN AND R. S. STAUFFER *Ibid* **10** (1945) 41-46.
 144. RICHARDS, L. A. *Physics* **1** (1931) 318-333.
 145. RICHARDS, L. A. AND D. C. MOORE *Trans. Amer. Geoph. Union* **33** (1952) 531-539.
 146. RICHARDS, L. A. AND C. H. WADLEIGH *Agronomy*. Vol. II. Chapter III. New York 1952.
 147. RICHARDS, L. A. AND B. D. WILSON *J. Amer. Soc. of Agron.* **28** (1936) 427-431 en 583-588.
 148. RICHARDS, S. J. AND L. V. WEEKS *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **17** (1953) 206-209.
 149. ROE, H. B. *Minnesota Agr. Expt. Sta. Bull* **330** (1936).
 150. ROMELL, L. G. *Medd. fran Statens Skogsförsöksanstalt* **19** (1922) 125-361.
 151. ——— *Ann. Agron.* **5** (1935) 372-384.
 152. ROTHE, J. *Landw. Jahrb.* **59** (1924) 453-490.
 153. ——— *Der Kulturtechniker* **32** (1929) 155-169.
 154. ROTHE, J. UND A. PHILIPP *Ibid.* **36** (1932) 466-498.
 155. ROZANSKY, L. *Trans. 6th Comm. Int. Soc. Soil Sci. Vol. B* (1937) 635-662.
 156. RIJKOORT, P. J. *K.N.M.I. R-III-143* (1954).
 157. RUSSELL, E. W. *J. Roy. Agr. Soc. of England* **114** (1953) 107-119.
 158. RUSSELL, J. L. *J. Agr. Sci.* **24** (1934) 544-573.
 159. RUSSELL, M. B. *Agronomy Vol. II Chapter IV*. New York 1952.
 160. RUSSELL, E. J. AND A. APPLEYARD *J. Agr. Sci.* **7** (1915) 1-48.
 161. SALTER, R. M. *Science* **91** (1940) 391-398.
 162. SCHAFFER, G. *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **67** (112) (1954) 219-230.
 163. SCHILFGAARDE, J. VAN, D. KIRKHAM AND R. K. FREVERT *Iowa Agr. Expt. Sta. Res. Bull.* **436** (1956).
 164. SEEGERER, A. *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **61** (106) (1953) 251-260.
 165. SLATYER, R. O. *Neth. J. of Agr. Sci.* **4** (1956) 73-76.
 166. SMITHONIAN *Physical Tables*. 9th ed. Washington 1954.
 167. STAPLE, W. J. AND J. J. LEHANE *Canad. J. of Agr. Sci.* **34** (1954) 329-342.
 168. ——— *Ibid.* **34** (1954) 460-468 en 552-564.
 169. STOLP, D. W. EN J. J. WESTERHOF *Cultuurtechniek 's-Gravenhage* 1954. p. 20-48.
 170. SUTTON, O. G. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **75** (1949) 335-350.
 171. SVERDRUP, H. U. *J. Marine Res.* **1** (1937) 3-14.
 172. TAYLOR, S. A. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.* **14** (1949) 55-61.
 173. ——— *Soil Sci.* **73** (1952) 217-226.
 173a. THIJSSSEN, H. A. C., C. T. DE WIT, E. VAN VOLLENHOVEN, H. J. TIMMERS AND L. ADMIRAAL *Neth. J. of Agr. Sci.* **2** (1954) 209-214.
 174. THORNTHWAITTE, C. W. *The Geogr. Rev.* **38** (1948) 55-94.
 175. THORNTHWAITTE C. W. AND J. R. MATHER *Drexel. Inst. of Techn. Publ. in Climat.* **VII-1** (1955).
 176. TURCH, L. *Ann. Agron.* **A 6** (1955) 5-131.
 177. UHLIG, S. *Ber. des deutschen Wetterd. in der U.S.-Zone Bd 4* (1950) nr. 30.
 178. ——— *Zeitschr. Acker- und Pflanzenbau* **93** (1951) 513-522.
 179. VEIHMAYER, F. J. AND A. H. HENDRICKSON *Trans. Amer. Geoph. Union* **36** (1955) 425-448.
 180. VERHOEVEN, B. *Proefschr. Wageningen*, 1953.

* Referaat

181. VERINK, J. B. EN W. C. VISSER *Maandbl. Landb. voorld.* **9** (1952) 73-77.
 182. VERSLAGEN *en Med. v. d. Dir. v. d. Landb.* **1** (1917).
 183. VISSER, W. C. *Landbk. Tijdschr.* **53** (1941) 495-502.
 184. ——— *Med. Dir. v. d. Tuinbouw* **11** (1948) 351-355.
 185. ——— *Trans. 4th. Int. Congress of Soil Sci.* **2** (1950) 51-54.
 186. ——— *Versl. Landbk. Onderz.* **56. 9** (1950).
 187. ——— *Versl. Techn. Bijeenk. Hydr. Comm. T.N.O.* **1-6** (1952) 35-54.
 188. ——— De grondslag voor de keuze van de buiswijdte bij enkelvoudige en samengestelde drainage. Cult. Dienst, Utrecht 1953.
 189. ——— *Landbk. Tijdschr.* **65** (1953) 66-81.
 190. ——— Waterbeheersing in de Ver. Staten. Rapport C.O.P. 1954. Hfdst. 2.
 191. VOORT, M. VAN DER *Landbk. Tijdschr.* **67** (1955) 481-491.
 192. WEAVER, J. E. Root development of field crops. Mc Graw Hill, New York 1926.
 193. WEISZENBERG, H. *Zeitschr. Pfl. Düngung und Bodenk.* **66** (1954) 227-229.
 194. WERNER, O. *Nebraska Potato Improvement Assoc. 17th ann. rep.* (1936) 39-55.
 195. WESSELING, J. *Neth. J. of Agr. Sci.* **2** (1954) 254-259.
 196. WESSELING, J. EN C. L. VAN SOMEREN Enkele opmerkingen t.a.v. het gebruik van de formules voor de bepaling van de buisdiameter bij drainage. Rapport Drainage Studiegroep 1955.
 197. WESSELING, J. AND W. R. VAN WIJK *Neth. J. of Agr. Sci.* **3** (1955) 106-119.
 198. WESTERHOF, J. J. *Cultuurtechniek 's-Gravenhage* 1954 p. 126-150.
 199. WESTRA, H. L. A. EN W. C. VISSER *Maandbl. Landb. voorld.* **9** (1952) 200-204.
 200. WIJK, W. R. VAN, AND D. A. DE VRIES *Neth. J. of Agr. Sci.* **2** (1954) 105-120.
 201. WIND, G. P. *Verslag C.I.L.O.* (1954) 126-132.
 202. ——— *Neth. J. of Agr. Sci.* **3** (1955) 60-70.
 203. ——— *Ibid.* **3** (1955) 259-264.
 204. WIT, C. T. DE Vochtspanning, Vochtvoorraad en vochtverplaatsing in de grond. Voordracht C.O.L.N. 1952.
 204a ——— De invloed van de onregelmatigheden bij de stootvoegen op de stroomsnelheid in drainbuizen. In druk.
 205. WOERD, D. VAN DER *Landbouvoortlichting* **10** (1953) 137-143.
 206. WURMBACH, H. *Wiss. Archiv für Landw.* **10** (1934) 484-532.
 207. WYCKOFF, R. D. AND H. G. BOTSET *Physics* **7** (1936) 325-345.
 208. ZAVADIL, J. *Trans. 6th Comm. Int. Soc. Soil Sci.* **Vol. B** (1937) 127-136.
 209. ZEEUW, J. W. DE *Cultuurtechniek, 's-Gravenhage* 1954. p. 95-125.
 210. ZUNKER, F. *Der Kulturtechniker* **31** (1928) 39-131.