

BIJDRAGE TOT DE KENNIS VAN EENIGE NATUUR- KUNDIGE GROOTHEDEN VAN DEN GROND

6. BEPALING VAN DE DOORLATENDHEID IN GRONDEN VAN DE TWEEDE
SOORT; THEORIE EN TOEPASSINGEN VAN DE KWANTITATIEVE STROOMING
VAN HET WATER IN ONDIEP GELEGEN GRONDLAGEN, VOORAL IN VERBAND
MET ONTWATERINGS- EN INFILTRATIEVRAAGSTUKKEN

DOOR

S. B. HOOGHOUT

(Ingezonden 26 November 1937)

HOOFDSTUK I

Inleiding

In een vorige publicatie (1) werd er reeds terloops de aandacht op gevestigd (blz. 215 en 216), dat in gronden *met* een structuur in de natuurlijke ligging (= gronden van de tweede soort) de doorlatendheid bepaald moet worden in den grond ter plaatse en met daartoe geschikte methoden. In deze publicatie, evenals in een vroegere publicatie (2), werden daartoe twee mogelijkheden genoemd, n.l.:

- a. door middel van pompproeven (z.g. boorgatenmethode) en
- b. door middel van grondwaterstands- en debietmetingen (z.g. grondwaterstands-debietmethode).

In eerst genoemde publicatie (blz. 224) werd er echter tevens reeds de aandacht op gevestigd (3), dat bij beide methoden gebruik moet worden gemaakt van theoretisch afgeleide betrekkingen, waarvan nog geen controle door rechtstreeksche proefnemingen onder nauwkeurig bekende omstandigheden had plaats gevonden. Voor beide methoden zijn dan ook sedert ongeveer 1934 controle-proefnemingen aangezet. De resultaten van de proefnemingen, die betrekking hebben op het uitwerken en controleeren van de boorgatmethode, zijn reeds gepubliceerd (4). Ook zijn reeds eenige resultaten van de metingen in verband met de grondwaterstands-debietmethode gepubliceerd in de Transactions of the Third International Congress of Soil Science te Oxford (5). Deze laatste proefnemingen zijn nog niet beëindigd. Anderzijds zijn deze proefnemingen echter reeds zoover gevorderd, dat het mij gewenscht voorkomt

deze publicatie over de theorie van de kwantitatieve strooming van het water door ondiepe grondlagen niet langer uit te stellen; vooral ook in verband met het belang, dat de kennis en de toepassingsmogelijkheid van deze theorie voor de practijk kan hebben.

In deze publicatie zullen de resultaten van de tot heden verrichte contrôle-metingen alleen in zooverre besproken worden als ter illustratie van de theorie noodig is. De publicatie van de resultaten van de contrôlemetingen zal niet eerder geschieden, voordat deze metingen geheel zijn afgesloten, hetgeen nog wel eenige jaren in beslag zal nemen.

Het essentieele van de in deze publicatie behandelde theorie bestaat hierin, dat het verval in het grondwater wordt aangegeven door de helling van het phreatisch oppervlak, zooals deze in grondwaterstandsbuizen wordt bepaald, die over vrijwel hun geheele lengte voorzien zijn van gaatjes. Hierbij wordt dus de potentiaal van het water in de verticale richting constant verondersteld, hetgeen, zooals we zullen zien, geoorloofd is. Verder wordt gewoonlijk aangenomen, tenzij uitdrukkelijk anders is vermeld, dat bij de ontwatering per m² overal evenveel water wordt afgevoerd en bij infiltratie per m² evenveel water wordt verbruikt, hetgeen eveneens geoorloofd is.

Verder kan hier nog worden opgemerkt, dat het voor de toepassing van de theorie noodzakelijk is te weten, waar zich de ondoorlatende laag in het profiel bevindt of m.a.w. vanaf welke diepte de strooming van het water door den grond naar de drains, greppels, slooten, enz. te verwaarloozen is ten opzichte van de strooming van het water door de daarboven gelegen lagen. Ook mag de ondoorlatende laag zich niet te diep onder den bodem van de greppels, onder de drains, enz. bevinden; nl. niet dieper dan voorloopig hoogstens 2 m onder de drains, resp. onder den greppelbodem. Bij de toepassing op slooten en kanalen mag echter de ondoorlatende laag hoogstens 1 à 2 maal de doorsnede onder den bodem daarvan voorkomen. Ligt de ondoorlatende laag dieper dan moet bovendien het feit in aanmerking worden genomen, dat de doorsnede van de watervoerende laag naar den bodem van de slooten en kanalen zich vernauwt (zie hieronder). Een uitzondering daarop vormt de berekening van de doorlatendheid van den grond met behulp van de z.g. grondwaterstand-debietlijnen ($Q : m_0$ -lijnen, enz.) van begreppelde of gedraineerde terreinen, waarbij ook een onbekende of een zeer diepe ligging van de ondoorlatende laag geen moeilijkheden biedt. Ofschoon dus *niet alle gevallen* door de in de volgende hoofdstukken behandelde theorie kunnen worden omvat, zoo zal dit voor vele gevallen wel zoo zijn.

Alleen dus in die gevallen, waarin de ondoorlatende laag zeer diep ligt en waarbij het doel van de berekening dus niet de doorlatendheid van den grond is, maar b.v. de waterafvoer of de optredende grondwaterstanden, enz.,

kan de z.g. potentiaaltheorie hulp bieden. Men vergeete echter niet, dat in heterogene gronden — en dat is bij de hier beschouwde gevallen vrijwel regel — deze theorie vrijwel niet kan worden toegepast; nog afgezien van andere bezwaren om deze methode voor de berekening van de kwantitatieve strooming van het water in ondiep gelegen grondlagen, waarom het hier gaat, toe te passen. Anderzijds laat de potentiaaltheorie berekeningen toe, die ook uit landbouwkundig oogpunt van belang zijn, zooals b.v. kwelberekeningen (47); berekening van de kwel van water uit kanalen; berekening van de grondwaterstanden, die zullen optreden, indien de waterstanden in kanalen en beken wordt verlaagd; berekening van afvoer (of toevoer) van water door (uit) kanalen en slooten en de daartusschen optredende grondwaterstanden, waarbij de ondoorlatende laag zich op iedere willekeurige diepte kan bevinden, enz. Ik heb gemeend het geven van voorbeelden van deze berekeningen tot een volgende publicatie te moeten uitstellen; temeer daar de methoden van berekening anders zijn.

De bedoeling van deze publicatie is verder tweërlei.

In de eerste plaats wil deze publicatie een handleiding zijn voor diegenen, die zich in deze vraagstukken dieper willen inwerken. Voor deze lezers zijn hoofdstuk II en IV bedoeld, waarin een overzicht is gegeven van de oplossingen, die de theorie kan geven ten opzichte van de ontwatering resp. de infiltratie van gronden. In hoofdstuk III is verder aangegeven op welke wijze men de, voor de uit te voeren berekeningen, noodzakelijke gegevens bepaalt; hoe deze gegevens het beste worden benut; wat uit deze gegevens zonder verdere berekeningen is af te leiden en hoe ten slotte de berekeningen zelf moeten worden uitgevoerd.

In de tweede plaats wil deze publicatie echter ook vooral aan diegenen, die hetzij minder tijd ter beschikking hebben dan wel de wiskundige scholing ontbreekt om de bovengenoemde hoofdstukken te kunnen lezen, een indruk geven van wat deze theorie eigenlijk beoogt en welk inzicht zij kan geven in allerlei praktische vraagstukken als b.v. bij ontwatering: de invloed van den drainafstand, de draindiepte, de doorlatendheid van de drainsleuf, de dikte van de watervoerende laag, het al of niet de voorkeur hebben van drains boven greppels, enz. en bij infiltratie: de invloed van den greppelafstand, de doorlatendheid en de capillaire stijghoogte van den grond, de dikte van de watervoerende laag, het peil van het water in de greppels, enz. Voor deze lezers is in de eerste plaats hoofdstuk VI bedoeld, waarin aan de hand van een tweetal hoofdtypen van ontwatering een antwoord op deze vraagstukken — zij het dan ook indirect — zal getracht worden te geven en waarbij het gebruik van differentiaal- en integraalrekening is vermeden. Verder is in hoofdstuk V

de mogelijkheid van de toepassing van vereenvoudigde berekeningen uiteengezet, met de foutenmogelijkheden, die bij de toepassingen van deze vereenvoudigde berekeningen kunnen ontstaan. Hierbij kan echter worden opgemerkt, dat deze vereenvoudigde berekeningen in elk geval in staat zijn een beeld te geven van de kwestie, waarom het gaat, terwijl in vele gevallen zelfs ook in kwantitatief opzicht daarmede bevredigende resultaten kunnen worden verkregen. Ten slotte kan deze laatste groep belangstellenden verder nog die gedeelten van hoofdstuk III worden aanbevolen, waarin uiteengezet wordt, wat men uit de verkregen gegevens (nl. uit de grondwaterstands-debietlijnen) zonder verdere berekeningen direct kan afleiden. Een uitvoerige inhoudsopgave aan het slot van dit artikel maakt het overigens gemakkelijk die gedeelten uit te kiezen, waarvoor men belangstelling heeft.

HOOFDSTUK II

Ontwatering

I. Homogene gronden

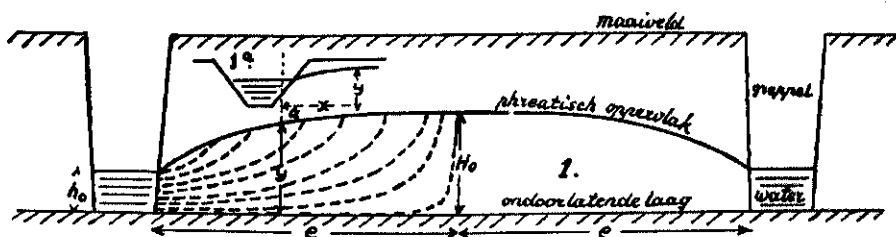
A. De ondergrond is ondoorlatend

§ 1. AFLEIDING VAN DE VERGELIJKING, GELDIG BIJ EEN REGENVAL KLEINER DAN DE „CRITISCHE REGENVAL”

Zooals reeds in hoofdstuk I is opgemerkt, vormt voor gronden van de tweede soort (= gronden met een structuur in de natuurlijke ligging) de methode, die uitgaat van grondwaterstanden midden tusschen drains, greppels, enz. en het debiet van drains, greppels, enz., een uitstekend middel om de doorlatendheid van deze gronden te bepalen. Zonder nadere toelichting zal het immers duidelijk zijn, dat er tusschen de twee genoemde grootheden (dus grondwaterstand en debiet) een verband moet bestaan, dat mede afhankelijk is van de doorlatendheid van den grond en van enkele andere factoren, zooals b.v. den onderlingen afstand van de drains, van de greppels, enz. Voor een homogenen grond (6) en onder eenvoudige omstandigheden is door verschillende onderzoekers (b.v. door ROTHE, maar vooral door DISERENS (7) reeds dit verband nagegaan. We zullen dit verband hieronder afleiden:

Stel b.v., dat 2 greppels van gelijke diepte in een homogenen grond aanwezig zijn; dat de bodem van deze greppels gevormd wordt door de ondoorlatende laag en dat de onderlinge afstand 20 meter bedraagt (zie figuur 1) (8), terwijl het debiet Q wordt uitgedrukt in m^3 per eenheid van tijd en per strekkenden meter en van één zijde komend (dimensies $l^2 t^{-1}$). Verder kan worden aan-

genomen, dat de regen, die links van het midden tusschen de greppels valt door de linker greppels en de regen, die rechts van het midden valt, door de rechter greppels zal worden afgevoerd. Dit beteekent, dat per m^2 op alle



Figuur 1 en 1a

afstanden van de greppel evenveel water wordt afgevoerd. Hiernit volgt dus, dat door de doorsnede y op den afstand x van den greppel vloeit:

$$q_x = Q \frac{e-x}{e} \quad (9)$$

Deze hoeveelheid bedraagt volgens de wet van DUPUIT-DARCY:

$$q_x = yV = ykI = yk \frac{dy}{dx} \quad (2)$$

waarin V de snelheid van het water (dimensies lt^{-1}) door de doorsnede y (dus uitgedrukt in een laag water, die deze doorsnede passeert) voorstelt, k de doorlaatfactor van de wet van DUPUIT-DARCY is en I het verval (zie de in noot 1 genoemde literatuur blz. 228—230) aangeeft.

De vergelijking 1 in de vergelijking 2 ingevuld geeft:

$$Q \frac{e-x}{e} = ky \frac{dy}{dx}$$

Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_0$ tot $y = y$ ontslaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} ky^2 - \frac{1}{2} kh_0^2 \quad (3)$$

Bevindt zich geen water in de greppels, dan luidt de vergelijking natuurlijk als volgt:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} ky^2 \quad (3a)$$

Gewoonlijk meet men echter alleen den grondwaterstand midden tusschen de greppels ($x = e$). Noemt men de hoogte van het phreatisch oppervlak midden tusschen de greppels en boven den bodem van de greppels (= boven de ondoorlatende laag) H_0 dan gaat de vergelijking 3 dus over in:

$$Q = \frac{k (H_0^2 - h_0^2)}{e} \quad (4)$$

Wil men het debiet uitdrukken als de schijf water, die per tijdseenheid uit den grond wordt afgevoerd (dimensies lt^{-1}), zoo behoeft men slechts te bedenken, dat deze schijf water $S = \frac{Q}{e}$, zoodat na invulling in vergelijking 4 ontstaat:

$$S = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{e^2} \quad (5)$$

Het spreekt wel van zelf, dat men een soortgelijke vergelijking kan opstellen, wanneer men uitgaat van de vergelijking 3a, waarbij dan de factor h_0^2 uit de vergelijkingen verdwijnt.

We zullen nu met een getallenvoorbeeld de vergelijkingen nader toelichten. In de eerste plaats moet dan worden opgemerkt, dat de doorlaatfactor k wordt uitgedrukt in meters water per 24 uur (zie ook de in noot 1 genoemde literatuur). Hieruit volgt dat Q moet worden uitgedrukt in m^3 per 24 uur (S in m per 24 uur). Gewoonlijk geeft men het debiet van drains en greppels aan in liters per uur per 100 m drain, waarbij dus een omrekening moet plaats vinden ¹⁾. Zijn b.v. in het te beschouwen land greppels aanwezig van 80 cm diepte en 200 m lengte en liggen deze op een onderlingen afstand van 10 m, terwijl de grond onder den greppelbodem ondoorlatend is; is verder het debiet (totale afvoer van de greppels) 100 l per uur, staat 10 cm water in de greppels en is de grondwaterstand midden tusschen de greppels 40 cm onder het maaiveld of dus $80 - 40 = 40$ cm boven het vlak van den bodem van de greppels, dan zijn dus in de juiste eenheden uitgedrukt:

$$Q = \frac{100}{1000} \cdot 24 \text{ m}^3 \text{ per 24 uur per 200 m van 2 zijden komend of dus } \frac{100}{1000} \cdot \frac{24}{2 \cdot 200} \text{ m}^3 \text{ per 24 uur per strekkenden meter en van één zijde komend.}$$

Verder is $h_0 = 0,1$ m; $H_0 = 0,4$ m (H_0 en h_0 moeten in meters worden aangeven) en $e = \frac{10}{2} = 5$ m, zoodat volgens de vergelijking 4

$$\frac{100}{1000} \cdot \frac{24}{2 \cdot 200} = \frac{k(0,4^2 - 0,1^2)}{5} \text{ of } k = 0,2 \text{ m p. 24 uur.}$$

Met dit voorbeeld is dus tevens aangegeven, hoe de doorlatendheid van den grond volgens deze methode uit de gegevens (in dit geval dus bij een homogenen grond en met een ondoorlatende laag onder de greppels) kan worden berekend.

¹⁾ Practischer is het echter het debiet aan te geven in mm per 24 uur, daar men dan ook direct vergelijkbare waarden met den regenval (eveneens in mm per 24 uur) verkrijgt.

§ 2. OMSCHRIJVING VAN DE GEVALLEN, WAARONDER DE VERGELIJKINGEN
IN § 1 ONTWIKKELD OOK GELDIG ZIJN

In de eerste plaats moet worden opgemerkt, dat onder dezelfde voorwaarde van homogeniteit en ondoorlatende laag deze berekeningen ook zijn toe te passen op drains (h_0 = hoogte water boven den drain), slooten, kanalen; zij het ook, dat deze formules alleen geldig zijn, als de maximale afvoer (de grondwaterstand heeft dan midden tusschen de greppels, drains, enz. juist het maaiveld bereikt) van dezelfde orde is als de maximale hoeveelheid neerslag (= critische regenval), die moet worden afgevoerd. Is dit niet het geval dan zijn deze formules in het algemeen alleen geldig in perioden, waarin deze critische regenval (zie § 5) niet wordt overschreden.

Hierbij kan worden opgemerkt, dat bij drains het water alleen bij de stootvoegen in de drains komt. Op een drainreeks van b.v. 100 m komen echter reeds zooveel stootvoegen voor, dat practisch gesproken een drainreeks zich gedraagt als een geperforeerde buis; nog afgezien van het feit, dat de drainbuizen vaak nog bedekt zijn met een laagje turfmoel en de drainsleuf vaak een veel grootere doorlatendheid bezit dan den omringenden grond, waardoor drains in drainsleuven de beteekenis krijgen van greppels, waarin het water nu door een buisleiding op den bodem wordt weggevoerd.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat deze formules ook gelden in perioden, *waarin geen regen valt*, en wel afvoer van water optreedt, zooals verder hieronder ook nog experimenteel zal worden bewezen. In de afgeleide vergelijkingen komt immers de factor tijd niet voor. Met het debiet wordt de snelheid van afvoer bedoeld op een bepaald moment, d.w.z. bij een bepaalden stand van het phreatisch oppervlak. Feitelijk is het dus noodzakelijk het debiet te meten door in een oneindig kleinen tijd de hoeveelheid water te meten, die uit de drains, enz. stroomt en deze om te rekenen op een hoeveelheid, die zou worden afgevoerd, indien de snelheid gedurende 24 uur gelijk gebleven was. In werkelijkheid is voor deze meting een halve tot eenige minuten noodig. Het zal echter duidelijk zijn, dat in dat geval het phreatisch oppervlak practisch nog niet veranderd is, waardoor de afgeleide betrekkingen dan ook *steeds geldig zijn*, d.w.z. dat steeds mag worden verondersteld, dat per m^2 op alle afstanden van de greppels, drains, enz. evenveel wordt afgevoerd.

§ 3. NADERE BESCHOUWING VAN HETGEEN IMPLICIET BIJ DE AFLEIDING
VAN DE VERGELIJKINGEN IS AANGENOMEN

We zullen nu eens exact nagaan, wat eigenlijk impliciet behalve de homogeniteit van den grond en de ligging van de ondoorlatende laag bij de afleiding van de behandelde formules is verondersteld.

In de *eerste* plaats is dan verondersteld, dat de wet van DUPUIT-DARCY volkomen juist is. Deze wet is door verschillende onderzoekers en ook door schrijver dezes (zie de in noot 1 genoemde literatuur) gecontroleerd en met groote benadering juist bevonden.

In de *tweede* plaats is aangenomen, dat de hydrodynamische potentiaal van het water in vertikale richting constant is, daar in dat geval het verval $I = \frac{dy}{dx}$, d.w.z. in ieder punt wordt aangegeven door de helling van het phreatisch oppervlak. Onder de hydrodynamische potentiaal verstaat men de som van den druk in het water (uitgedrukt in cm water van 4° C) en de hoogte boven een willekeurig horizontaal vlak. Nemen we in ons geval als horizontaal vlak den bovenkant van de ondoorlatende laag, die verondersteld is horizontaal te loopen (zie figuur 1), dan is dus de potentiaal in vertikale richting constant, wanneer in ieder punt van de vertikale doorsnede de druk gelijk is aan de lengte van de kolom water van dit punt tot het phreatisch oppervlak. Is dit het geval, dan beteekent dit, dat het water alleen in horizontale richting stroomt. Dit is gemakkelijk in te zien door de stroomrichting van het water in 2 componenten, n.l. in een y -richting (hier vertikaal) en in een x -richting (hier horizontaal) onder te verdeelen. Beschouwen we een vierkant in de watervoerende laag gelegen in een vlak loodrecht de greppels, drains, enz., dan moet per tijdseenheid evenveel water in dit vierkant stroomen als er uitstroomt, daar anders een luchtledig zou ontstaan.

Dit wordt uitgedrukt door de vergelijking:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

waarin v_x en v_y stroomsnelheden van het water in de x - en y -richting voorstellen. Daar verder volgens de wet van DUPUIT-DARCY

$$\begin{aligned} \oint v_x &= -k \frac{\partial p}{\partial x} \text{ en } \oint v_y = -k \frac{\partial p}{\partial y}, \text{ is dus:} \\ \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

De vergelijking 7 is de bekende vergelijking van LA PLACE voor een tweedimensionale strooming, die ook bij zeer veel andere problemen optreedt. Op grond van deze vergelijking, en door de z.g. randvoorwaarden te beschouwen, kan men de strooming van het water in sommige gevallen berekenen. Hier zullen we echter van een andere methode gebruik maken, die in de voor ons belangrijke gevallen vrijwel steeds kan worden toegepast (zie hoofdstuk I).

Is nu $\frac{\delta p}{\delta y} = 0$, dan wordt de stroomsnelheid alleen bepaald door

$$v_x = k \frac{\delta p}{\delta x} = k \frac{d y}{d x} \quad (10).$$

In het beschouwde geval en eveneens in alle nog te beschouwen gevallen is de aanname, dat $\frac{\delta p}{\delta y} = 0$, niet geheel juist. De stroombanen van het water moeten den vorm hebben als in figuur 1 door de gestippelde lijnen is aangegeven. Bedenkt men echter, dat de figuur geen juisten indruk geeft, in zooverre de vertikale doorsnede in een grooteren maatstaf is geteekend als de horizontale doorsnede, of m.a.w., dat de doorsnede van de watervoerende laag klein is ten opzichte van de horizontale doorsnede, dan is de afwijking van de horizontale richting toch zoo gering, dat de fout, daardoor veroorzaakt, klein zal zijn. De grootte van deze fout kan niet berekend worden. Ook daarvoor was het absoluut noodzakelijk de noodige proefnemingen te verrichten om de juistheid van de formules te controleeren. In § 6 van dit hoofdstuk zal echter met een experiment worden aangetoond, dat de ontwikkelde formules met voldoende benadering juist zijn, wanneer de verhouding van de vertikale tot de horizontale doorsnede van de watervoerende laag 1 : 5 is, waaruit volgt, dat ook bij nog kleinere verhoudingen nog een voldoende juist resultaat zal worden verkregen.

In de *derde* plaats kan worden opgemerkt, dat we het debiet, per strekkenden meter en van één zijde komend, berekend hebben door het debiet van de geheele greppel te deelen door tweemaal de lengte daarvan. Hiermede is dus aangenomen, dat van de linker helft van de greppel evenveel water is afgevoerd als van de rechter helft rechts van de greppel. In verband met de relatief groote lengte van de drains, greppels, enz. mag dit echter gemiddeld genomen zeker worden aangenomen.

Verder hebben we verondersteld, dat het debiet per strekkenden meter van de greppels op alle afstanden van de sloot, waarin de greppels uitmonden, overal hetzelfde is. Dit is in een homogenen grond het geval, wanneer de grondwaterstand midden tusschen de drains, greppels, enz. boven het vlak van de drains of boven den bodem van de greppels, enz. — dus niet onder het maai-veld (11) — overal dezelfde is, evenals natuurlijk de waterstanden in de greppels of boven de drains. In vele gevallen zal dit inderdaad zoo zijn. Er komen echter ook meerdere gevallen voor, waarbij de grondwaterstand midden tusschen de greppels, drains, enz. en boven het vlak door den bodem van de greppels, boven het vlak van de drains, enz. naar de sloot, waarin de greppels of drains enz. uitmonden, steeds minder hoog boven genoemd vlak komt te staan. Dit kan óf veroorzaakt worden door een grooten rechtstreekschen afvoer van

water naar de sloot zelf óf door een toename van de doorlatendheid van den grond naar de sloot toe óf door beide oorzaken. In sub 1 A § 7 van dit hoofdstuk zal echter het geval behandeld worden, waarbij in een homogenen grond (of homogeen veronderstelden grond) met een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot toe (beschouwd dus ten opzichte van de ondoorlatende laag) rekening is gehouden.

In de *vierde* plaats is bij de afleiding van de vergelijking verondersteld, dat de wanden van de greppels, slooten, kanalen, zuiver vertikaal zijn en is met den onderlingen afstand daarvan de afstand van deze loodrechte wanden bedoeld. Indien noodig of gewenscht, kan men voor den onderlingen afstand van deze greppels, slooten, kanalen, enz. den afstand van de vertikale vlakken in rekening brengen, die men midden tusschen de kantlijn van den bodem en de waterlijn in de greppels, enz. en evenwijdig aan de lengterichting van deze greppels, enz. kan oprichten (zie figuur 1a, waarin dus x gerekend is vanaf een dergelijk vlak a). De fout, die gemaakt wordt, doordat de greppelwand, enz. in werkelijkheid niet vertikaal is, is echter zoo klein, dat zij verder buiten beschouwing kan worden gelaten ¹⁾. Is de breedte van de greppels op de waterlijn klein ten opzichte van hun onderlingen afstand, dan kan voor den onderlingen afstand eenvoudig de afstand van de middellijnen van de greppels, enz. worden genomen.

In een *vijfde* plaats is aangenomen, dat een horizontale strooming in de capillaire laag niet optreedt of althans te verwaarloozen is. Uit de resultaten van de in § 6 te bespreken metingen zal echter blijken, dat de horizontale strooming in de capillaire laag even sterk is als in de watervoerende laag onder het phreatisch oppervlak (12). Deze proefnemingen zijn echter verricht in een zandgrond en *hier vindt zoowel in de capillaire laag als in de laag onder het phreatisch oppervlak de waterbeweging volledig plaats in capillaire ruimten*. Bij klei-, leem-, en dergelijke gronden, dus in het algemeen in gronden met een structuur in de natuurlijke ligging (gronden van de tweede soort), vindt de strooming onder het phreatisch oppervlak voor verreweg het grootste gedeelte plaats in niet-capillaire gangen of althans in gangen van een dusdanige doorsnede, dat de capillaire stijghoogte daarvan te verwaarloozen is. De strooming, die nog in de capillairen plaats vindt, valt daartegen in het niet. De doorsnede van deze capillairen is zoo klein en de strooming door deze capillairen daardoor zoo langzaam, dat zij te verwaarloozen is ten opzichte van de strooming in de niet-capillaire ruimten. In deze gronden zal echter in de capillaire laag — voor zoover daarvan ten gevolge van den uitermate grilligen vorm van het capillaire oppervlak nog gesproken kan worden — de horizontale strooming uit den aard

¹⁾ Ook de extra weerstand, die bij het uitvloeien van water in greppels met niet loodrechte wanden optreedt, kan worden verwaarloosd.

der zaak alleen in de capillairen kunnen optreden, daar de niet-capillaire samenhangende ruimten niet met water gevuld zijn. *Dit wil dus zeggen, dat practisch voor alle gronden van de tweede soort de bovenbegrenzing van het watervoerend profiel gevormd wordt door het phreatisch oppervlak, zoodat voor deze gronden met de capillaire laag geen rekening behoeft te worden gehouden.* Voor zandgronden — dus in het algemeen voor gronden van de eerste soort (d.w.z. gronden met een éénkorrelstructuur) — moeten de afgeleide vergelijkingen op die wijze worden aangevuld, dat men bij de h_0 - en H_0 -waarden de capillaire stijghoogte van den grond onder de natuurlijke omstandigheden optelt. In dat geval zijn de vergelijkingen ook weer — zie ook hoofdstuk IV, II A § 1 — voor deze gronden geldig. Nu zal het meerdere malen voorkomen, dat h_0 en H_0 bij optelling van de capillaire stijghoogte boven het maaiveld uitkomen, hetgeen natuurlijk onmogelijk is. Het spreekt wel vanzelf, dat in dat geval andere vergelijkingen moeten worden opgesteld, daar in dat geval de dikte van de watervoerende laag op alle afstanden van de greppels, drains, enz. constant is en zich dus uitstrekt van het maaiveld tot de ondoorlatende laag. Is b.v. de capillaire stijghoogte van een zandgrond in de natuurlijke omstandigheden 50 cm = 0,5 m en zijn h_0 en H_0 (phreatisch oppervlak) resp. b.v. 0,5 en 0,8 m en ligt de ondoorlatende laag op 1 m diepte onder het maaiveld, dan zal het duidelijk zijn, dat h_0 en H_0 (capillair oppervlak) hoogstens 1,0 m kunnen zijn. De vergelijking, die voor dit geval hieronder zal worden ontwikkeld, berust hierop, dat we het verval in het water blijven aangeven door de helling van het phreatisch oppervlak in ieder punt, maar dat de dikte van de watervoerende laag in dat geval op alle afstanden van de greppels, drains, enz. constant is en gelijk is aan den afstand h in meters, dien de ondoorlatende laag onder het maaiveld ligt. In dat geval stroomt door een vertikale doorsnede op een afstand van x van de greppels, drains, enz.:

$$q_x = Q \frac{e-x}{e} = kh \frac{dy}{dx} \quad (8)$$

Na integratie van $x = 0$ tot $x = x$ en $y = h_0$ tot $y = y$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = kh (y - h_0) \quad (9)$$

Voor $x = e$ is $y = H_0$, zoodat

$$Q = \frac{2 kh (H_0 - h_0)}{e} \quad (10)$$

of dus

$$S = \frac{Q}{e} = \frac{2kh (H_0 - h_0)}{e^2} \quad (11)$$

Feitelijk is het nog noodig in dit geval een correctie aan te brengen, daar het water slechts onder den waterspiegel in de greppels kan vloeien. Deze correctie is echter zoo klein, dat zij hier verder onbesproken zal blijven, temeer daar ontwatering bij zandgronden niet belangrijk is. Om dezelfde reden is er ook korthedshalve van afgezien om voor de andere nog te bespreken mogelijkheden van ontwatering telkens het geval te bespreken, dat de dikte van de capillaire laag het watervoerend profiel verhoogt tot het maaiveld. Dit zal echter wel — althans gedeeltelijk — bij de infiltratie (zie hoofdstuk IV) geschieden, daar infiltratie juist voor zandgronden belangrijk is.

Ten slotte is in de zesde plaats verondersteld, dat de ondoorlatende laag in de richting loodrecht de greppels, enz., horizontaal ligt. In ons vlak land zal dit wel steeds het geval zijn, waarom er dan ook van afgezien is de vergelijkingen te ontwikkelen voor het geval dit niet het geval zou zijn. De afleiding van de vergelijkingen verandert overigens niet alleen daardoor, dat y ook nog een functie van x is en dus y (bij bepaalde x) = $H_0 f(x)$ moet worden gesteld, maar ook doordat de grens van de stroomgebieden van de afzonderlijke greppels, enz. niet meer midden tusschen de greppels, enz. kan worden aangenomen.

§ 4. VOOR- EN NADEELEN VAN DE BEPALING VAN DE DOORLATENDHEID VAN DEN GROND MET DE REEDS BESPROKEN EN NOG TE BESPREKEN VERGELIJKINGEN

Zooals reeds eerder is opgemerkt, zal men, wanneer een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot aanwezig is, hiermede relatief gemakkelijk rekening kunnen houden, wanneer men slechts de doorlatendheid in de richting naar de sloot als constant aanneemt. Gewoonlijk zal dit laatste het geval zijn en mocht dit eens niet het geval zijn, zoo zal men er vaak bewust geen rekening mee houden, daar men gewoonlijk de gemiddelde doorlatendheid van een groot gebied wil bepalen. Past men immers de reeds ontwikkelde vergelijkingen toe op 3 drains op 10 onderlingen afstand en 200 m lengte, dan wordt direct de gemiddelde doorlatendheid van een gebied van $3.10.200 = 6000 \text{ m}^2$ berekend. Er bestaat tot heden geen andere methode, die in staat is de gemiddelde doorlatendheid over een dergelijk groot oppervlak in eens te bepalen. Deze methode voor de bepaling van de doorlatendheid is dan ook zeker de beste methode. Denkt men er verder aan, dat de doorlatendheid ook een uitstekende maat voor de structuur is en dat er verder vrijwel geen physische grootheid bestaat — althans tot heden — die zich in dergelijke gronden als een betrouwbaar gemiddelde over een dergelijk groot gebied laat bepalen (afgezien misschien van het volumegewicht) dan zal het belang van deze methode ook in dat opzicht beter naar voren komen.

Een nadeel van deze methode is echter, dat alleen de doorlatendheid van deze gronden bepaald kan worden *onder* het phreatisch oppervlak. Voor ontwateringsvraagstukken is dat van minder belang, daar de doorlatendheid van de boven het phreatisch oppervlak gelegen lagen slechts zelden een rol speelt. Het verval in deze lagen is 1, d.w.z., dat het regenwater hier in het algemeen vertikaal naar beneden zakt. Dit verval is veel grooter dan hetgeen in het water onder het phreatische oppervlak optreedt. De doorlatendheid van deze lagen boven het phreatisch oppervlak moet dan ook wel zeer klein zijn, zullen zij van belang zijn voor de ontwatering. Een doorlaatfactor van 0,01 m per 24 uur betekent immers bij een verval 1 nog een afvoer van 10 mm per 24 uur (zie in dit verband ook hoofdstuk VI, sub B).

Iets anders is het echter als men de doorlatendheid wil beschouwen als een maat voor de structuur. Voor de bouwvoor is deze structuur op deze manier dan ook niet te bepalen, daar de grondwaterstand in het algemeen niet zoo hoog zal stijgen. Voor de bouwvoor moeten dan ook andere methoden worden toegepast.

Een verder nadeel van deze methode is nog, dat zij voor de berekening van de doorlatendheid alleen te gebruiken is in begreppeld of gedraineerd land. Voor zoover dit niet het geval is, kan echter de doorlatendheid van den grond, op een betrouwbare wijze door middel van de boorgatenmethode (lit. zie noot 4) worden bepaald, zij het dan ook, dat meerdere metingen volgens deze methode moeten worden verricht om een betrouwbaar gemiddelde te verkrijgen.

Tenslotte mag in dit verband nog even worden opgemerkt, dat, naast de mogelijkheid om de doorlatendheid van den grond uit de daarvoor benodigde gegevens te berekenen, de ontwikkelde en nog te ontwikkelen vergelijkingen en beschouwingen vooral van belang zijn om een dieper inzicht te verkrijgen in allerlei vraagstukken, zooals deze bij ontwatering en infiltratie voorkomen.

§ 5. DE CRITISCHE REGENVAL

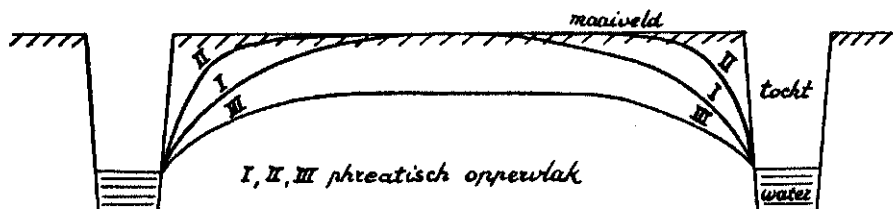
Zooals reeds in § 1 is opgemerkt, zijn de ontwikkelde en nog te ontwikkelen vergelijkingen alleen geldig, wanneer in het algemeen de regenval, of feitelijk het gedeelte, dat niet verdampt of door de planten wordt opgenomen (overtollige neerslag), kleiner is dan de critische regenval.

Om nu duidelijk te doen uitkomen, wat met den critischen regenval bedoeld wordt, veronderstellen we eens, dat we de hoeveelheid water willen berekenen, die voor 2 tochten van b.v. 3 m diepte, waarin 1,2 m water staat, en op 1000 m onderlingen afstand liggen, wordt afgevoerd, wanneer kan worden aangenomen, dat de grond onder den bodem van de tochten ondoorlatend is, terwijl de doorlatendheid van den homogenen grond daarboven 1 m per 24 uur bedraagt en natuurlijk verder geen slooten, drains of greppels daar tusschen in het land

aanwezig zijn. Reikt de grondwaterstand in het midden tusschen de 2 tochten (= H_0) juist tot het maaiveld, dus is $H_0 = 3$ m, dan is dus volgens de afgeleide vergelijkingen de maximale afvoer bereikt, *d.w.z. een afvoer, die zoodanig is, dat overal per oppervlakte eenheid evenveel wordt afgevoerd*. Deze hoeveelheid heb ik den „critischen regenval” of zoo men wil den „critischen afvoer” genoemd. Deze maximale afvoer per 24 uur bedraagt:

$$S = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{e^2} = \frac{1(3^2 - 1,2^2)}{500^2} = \pm 0,00003 \text{ m} = 0,03 \text{ mm per 24 uur.}$$

De bovenberekende hoeveelheid is zeer gering en, afgezien van een zeer droge periode, zeer gering ten opzichte van den regenval. Vormen nu de tochten de eenigste ontwateringsmogelijkheid en bevinden zich dus geen detail-ontwateringssytemen in den grond tusschen de tochten, dan zal het duidelijk zijn, dat ook, wanneer de grondwaterstand na een droge periode midden tusschen de tochten juist tot het maaiveld reikt en verder een volledige welving in het phreatisch oppervlak aanwezig zou zijn (lijn I, figuur 2. Zooals we verder hieronder zullen zien, zal dit nooit optreden, daar de verdamping in een droge periode altijd groot zal zijn ten opzichte van de hoeveelheid water,



Figuur 2

die durch den Grund nach den tochten zu können werden abgeführt), ist dieses phreatisch oppervlak unmittelbar bei einem Regenschauer zu werden abgeplattet. Das Wasser würde dann immers auf dem Land kommen zu stehen und die Röhre über dem phreatisch oppervlak bis zum maaiveld von aus dem Mitten beginnen auf zu füllen, d.w.z. das phreatisch oppervlak würde werden abgeplattet. Hieraus folgt, daß das Veral in dem Wasser mitten zwischen den tochten kleiner wird. Das Veral ist Null, wenn das phreatisch oppervlak da ein horizontales Flak ist geworden, während daarentegen Flak bei den tochten das phreatisch oppervlak steiler geht verlaufen oder das Veral größer wird. Diese Veränderungen in dem Veral wollen nichts anders sagen als daß nun per oppervlakte einheit nicht mehr overall evenveel wird abgeführt und wohl wird, mehr in dem Mitten, viel minder, bei den tochten, viel mehr abgeführt. Eine Berechnung von der Hoeffelheit Wasser, die nun nach den tochten wird abgeführt, kann nicht mehr werden gemacht, solange ein stationärer Zustand auftritt oder veronderstelt wird auf

te treden, waarop niet verder zal worden ingegaan. De totale hoeveelheid water, die door den grond naar de tochten wordt afgevoerd, is echter grooter dan bij den critischen afvoer het geval is.

Het zal duidelijk zijn, dat in een dergelijk geval, als boven is beschreven, het phreatisch oppervlak tot op zekeren afstand van de kanalen een hangkromme naar deze kanalen zal vertoonen en op verderen afstand een horizontaal verloop zal hebben (zie figuur 2, lijn II). Men drukt dat ook wel uit door te zeggen, dat het phreatisch oppervlak tot op zekeren afstand onder invloed van deze kanalen staat. Stel nu b.v., dat op een zeker moment het phreatisch oppervlak verloopt volgens de lijn II in figuur 2. Komt er nu een droge periode, dan zal het horizontale gedeelte van het phreatisch oppervlak tusschen de 2 kanalen eerst kleiner worden of m.a.w. de invloed van de kanalen wordt tot een grooteren afstand van de kanalen op het phreatisch oppervlak merkbaar. Nu zal er echter in een droge periode haast altijd verdamping optreden. Gezien nu de geringe hoeveelheid water, die op grooteren afstand van de kanalen door den grond naar de kanalen kan worden afgevoerd, zal deze verdamping reeds spoedig groot zijn ten opzichte van deze hoeveelheid. Het gevolg daarvan zal zijn, dat het phreatisch oppervlak overal evenveel daalt. Hierdoor wordt het hoogteverschil tusschen den waterstand in de kanalen en midden tusschen de kanalen kleiner, hetgeen verhindert, dat de invloed van den tocht zich verder begint uit te strekken. Het phreatisch oppervlak krijgt dan een vorm als in figuur 2 door de lijn III is aangegeven. Treedt er nu een hevige regen op, dan zal het phreatisch oppervlak weer tot het maaiveld stijgen, waarbij de invloed van het kanaal op het phreatisch oppervlak zich des te minder ver zal uitstrekken, naarmate de regenval grooter is; naarmate de doorlatendheid kleiner is; naarmate de dikte van de watervoerende laag kleiner is en naarmate de waterstand in de kanalen hooger is. Anderzijds zal het duidelijk zijn, dat in een droge periode de invloed van het kanaal zich onder overigens gelijke omstandigheden des te verder zal uitstrekken, naarmate de verdamping kleiner is (13). Experimenteel is een dergelijk gedrag van het phreatisch oppervlak in een soortgelijk geval bevestigd op het ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder op de niet van een detailontwatering voorziene vakken, grenzende aan den tocht.

Verder spreekt het vanzelf, dat bij greppels en drains, door den veel kleineren onderlingen afstand, de critische regenval gewoonlijk lang niet bereikt wordt. Is dit wel het geval, dan beteekent dit dus, dat in regenrijke perioden hier zeer hooge grondwaterstanden zullen optreden, er water over den grond stroomt en dat dus in deze periode, meer midden tusschen deze greppels of drains, minder water door den grond wordt afgevoerd dan vlak bij deze greppels of drains.

§ 6. CONTROLEPROEFNEMINGEN VAN DE ONTWIKKELDE VERGELIJKINGEN

a. Inleiding

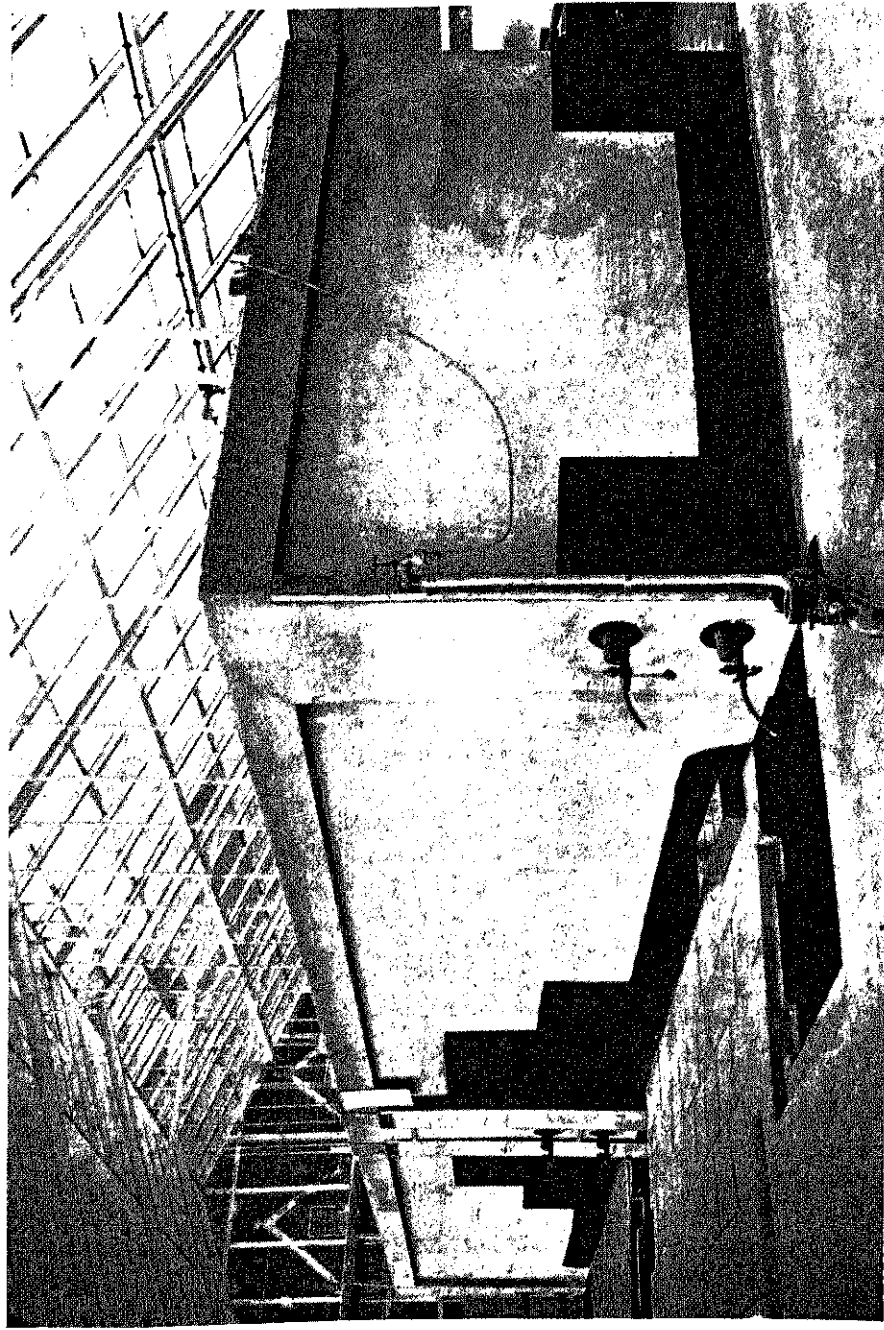
We zullen nu met een enkel voorbeeld van de daartoe in het laboratorium genomen proefnemingen de geldigheid van de ontwikkelde vergelijkingen 3a tot en met 5 bewijzen. Een uitvoerige beschrijving van deze proefnemingen zal later geschieden, daar deze — zooals reeds is medegedeeld — nog niet zijn beëindigd.

Het zal duidelijk zijn, dat voor een exacte contrôle van de afgeleide vergelijkingen alle omstandigheden exact bekend moeten zijn. Verder blijkt uit de formules, dat alle gegevens, behalve de doorlaatfactor k , gemakkelijk te bepalen zijn en dus de factor k kan worden berekend. Bedenken we nu, dat deze formules voor *alle* gronden gelden en dus ook voor zandgronden geldig zijn, zoo volgt hieruit, dat de contrôle van deze vergelijkingen *in zandgronden* moet geschieden, daar van dezen grond de doorlaatfactor op het laboratorium (zie de in noot 1 genoemde literatuur) *op een andere wijze* exact kan worden bepaald en de aldus verkregen doorlaatfactor op de omstandigheden (poriënvolume, luchtgehalte en temperatuur van het water), zooals deze bij de proefnemingen heerschen, kan worden omgerekend. Daar het verder noodzakelijk is een samenhangende serie waarnemingen in een niet te lang tijdsbestek te kunnen beëindigen, is een zeer doorlatende zandgrond gekozen, n.l. een rivierzand met een $k_{10:35}$ -factor van 34,4 m per 24 uur.

Behalve, dat het noodzakelijk is, dat de omstandigheden, waaronder de bepalingen geschieden, exact bekend moeten zijn, is het gewenscht, dat de grond volkomen homogeen is om althans voorloopig complicaties met zekerheid uit te stellen.

b. Korte beschrijving van den bak met toebehooren, waarin de metingen zijn uitgevoerd

Om deze contrôle-proefnemingen te kunnen verrichten, is een groote cementen bak van $2 \times 2 \times 10$ m in de kas van het Bodemkundig Instituut gebouwd. In dezen bak zijn in het midden en aan de korte zijwanden en evenwijdig daarmede (dus loodrecht op de lengterichting van den bak) telkens een 4-tal drains op hoogten van rond 0, 30, 60 en 90 cm boven den bodem aangebracht. Deze buizen hebben een diameter van 6 cm. Zij bestaan binnen den bak uit geperforeerde koperplaat en steken aan weerszijden buiten den bak uit. Aan de eene zijde zijn zij afgesloten met een afschroefbaren dop, terwijl zij aan de andere zijde voorzien zijn van kranen. Tusschen deze 3 series drainreeksen van telkens 4 buizen boven elkaar, evenwijdig de lengterichting van den bak en juist



Bak in de kas van 'het Bodenkundig Instituut te Groningen voor het verrichten van kwantitatieve onderzoeken betreffende waterafvoer naar druin, enz.

in het midden daarvan, zijn 24 grondwaterstandsbuizen geplaatst op verschillende afstanden van deze drainbuizen; o.a. is telkens 1 buis geplaatst vlak tegen iedere serie van 4 boven elkaar gelegen drainbuizen. De gebogen vorm van het phreatisch oppervlak, wanneer één of meer der drainbuizen water afvoeren, is op deze wijze nauwkeurig te bepalen. Ook deze grondwaterstandsbuizen, die tot den bodem van den bak reiken, en geen zand bevatten en ruim 2 m lang zijn, bestaan uit *over hun geheele lengte* geperforeerde koperen buizen met een diameter van 4 cm. Nevenstaande foto geeft een indruk van dezen bak en zijn uitrusting, waarnaar verder mag worden verwezen.

c. Korte beschrijving van de vulling van den bak met rivierzand; bepaling van het volumegewicht en van het poriënvolume en het luchtvrĳe poriënvolume van den grond

De bovenstaande bak is nu gevuld met rivierzand. Dit vullen geschiedde in gedeelten, waarbij het zand tegelijkertijd met water werd verzadigd en telkens werd aangestampt. Het zand, dat in den bak werd gebracht, werd telkens in gedeelten (30 kg met een nauwkeurigheid van 20 à 30 gram) gewogen. Hierbij werd ook telkens een goed mengmonstertje van dat gedeelte genomen, zoodat daardoor het vochtgehalte van de geheele hoeveelheid zand met groote nauwkeurigheid kon worden bepaald, terwijl zeer goede monsters werden verkregen, waarin de doorlaatfactor en de capillaire stijghoogte op een wijze, zooals deze in de in noot 1 genoemde literatuur is aangegeven, kon worden bepaald. Toen dan ook de bak tot vrijwel den bovenrand met zand gevuld was, was daarmee dus tevens het gewicht van het droge zand (bij 105° C) bekend (nl. 63 024 kg) en kon dus het volumegewicht worden berekend, daar uit den aard der zaak ook het volume bekend was, dat het zand innam. Met behulp van het soortelijk gewicht (2,649) was daarmee ook het poriënvolume (38,3 Vol. % of 0,383 gedeelte) bekend.

Om nu het volume van den grond te bepalen, dat tijdens de metingen met water gevuld was (= luchtvrĳe poriënvolume), werd eerst het water in den bak volledig afgelaten en daarna de kranen van de drains gesloten, zoodat alleen nog de capillaire laag boven den bodem van den bak met water was verzadigd. Daarna werd de bak weer tot een bepaalden grondwaterstand (+ 170 cm boven den bodem van den bak) met leidingwater gevuld, dat daarvoor eerst een nauwkeurige watermeter (maximale fout 2 %) passeerde, waardoor de hoeveelheid gebruikt water dus bekend was. Dit inlaten van water geschiedde langzaam en wel op deze wijze, dat via een lange dunne looden buis het water gebracht werd in een bak van 50 bij 50 cm, voorzien van een

geperforeerde bodem, die aan de eene zijde boven op het zand in den bak was geplaatst en waarbij voorzorgen waren getroffen, dat slechts weinig water kon verdampen. Het water krijgt daardoor de gelegenheid langzaam naar beneden te zakken, zich over het zand te verdeelen en de lucht zooveel mogelijk voor zich uit te drijven. Tevens heeft het water daardoor nog gelegenheid zooveel mogelijk de temperatuur van de omgeving aan te nemen, hetgeen vooral 's zomers van belang is in verband met het feit, dat het koude water meer lucht kan bevatten en dit bij verwarming kan vrijkomen, waardoor het luchtgehalte van het zand noodeloos zou worden verhoogd. Is nu de bak met water tot een bepaalden grondwaterstand gevuld, dan wordt iederen dag de grondwaterstand in alle grondwaterstandsbuizen opgenomen. Deze grondwaterstanden worden gemeten met behulp van hevels, waarvan het opgaande been vóór den bak van glas is, zoodat deze tot op mm's afgelezen kunnen worden; zie foto blz. 476. Zoolang de kranen van de drainbuizen gesloten blijven, zijn de grondwaterstanden in alle buizen practisch gelijk. De onderlinge verschillen (gewoonlijk hoogstens 2 mm; maximaal 4 mm) die dan optreden tusschen den hoogsten en laagsten grondwaterstand, geven de foutengrenzen van de bepaling van de grondwaterstanden aan. Verder blijkt, dat de gemiddelde grondwaterstand van alle buizen zich van dag tot dag (de kranen van de drainbuizen zijn gesloten) iets kan wijzigen. Dit zal vermoedelijk moeten worden verklaard door een verschil in luchtdruk en in temperatuur van de lucht. Het is ten minste opvallend hoe met de verandering van het weer ook de grondwaterstanden in den bak veranderen. Deze veranderingen zijn slechts klein en niet meer dan eenige cm's en voor de metingen zelf overigens van geen belang.

Is nu gedurende eenige dagen waargenomen, dat de grondwaterstanden zich hebben ingesteld en om een evenwichtsstand schommelen, dan kan met de eigenlijke metingen worden begonnen. Alvorens echter op deze metingen in te gaan, moet worden opgemerkt, dat op den dag, waarop met deze metingen wordt begonnen, de waterstand in alle grondwaterstandsbuizen nog eens is afgelezen en de gemiddelde stand hieruit is berekend. Deze standen worden aangegeven in meters boven den bodem van den bak, die dus de ondoorlatende laag vormt. Op 22 October 1936 was deze gemiddelde stand in het te bespreken voorbeeld (zie tabel I) 1,631 m. Daar zich nu ook weer eenzelfde capillaire laag boven het phreatisch oppervlak bevindt als voor de vulling met water, is het zand in den bak over een laag van 1,631 m met water gevuld. Daar de afmetingen van den bak bekend zijn, is dus op eenvoudige wijze de inhoud van het zand te berekenen, die met water werd gevuld; afgezien van een zeker luchtgehalte. Hiervan moet echter worden afgetrokken de inhoud van de drains en de inhoud van de grondwaterstandsbuizen voor

zoover ze met water zijn gevuld. Het resterende volume zand bedroeg in dit geval 32 431 l.

De hoeveelheid water, die gebruikt is, is dus op den watermeter afgelezen. Ook deze hoeveelheid moet worden verminderd met den inhoud van de drainbuizen en den inhoud van de grondwaterstandsbuizen, voor zoover zij met water zijn gevuld. Deze hoeveelheid bedroeg in dit geval 7441 l.

Het volumepercentage (μ) van het zand, dat met vrij beweegelijk water gevuld werd, bedroeg hier dus:

$$\mu = \frac{7441}{32431} \cdot 100 = 22,9 \text{ Vol. } \%$$

Hierbij moet worden opgeteld de hoeveelheid hangwater, die in het zand bij het afvloeien van het water is achtergebleven. Deze hoeveelheid (*Wha*) (zie de in noot 1 genoemde literatuur) bedroeg hier 6,5 Vol. %, waarbij tevens nog een geringe temperatuurscorrectie is aangebracht, daar de grootheid *Wha* nog iets blijkt af te hangen van de temperatuur van het water, waarop hier niet verder zal worden ingegaan.

In totaal is dus $22,9 + 6,5 = 29,4$ Vol. % of 0,294 gedeelte met water gevuld, zoodat het spannings- en luchtvrije poriënvolume dus 0,294 gedeelte bedraagt. Het poriënvolume van het zand is 38,3 Vol. % of 0,383 gedeelte, zoodat de doorlaatfactor bij 10° C uit den op andere wijze in veelvoud bepaalden doorlaatfactor (waarschijnlijke fout van het gemiddelde is hier kleiner dan 1,0 %) kan worden berekend. Deze factor bij 10° C en een luchtvrije poriënvolume van 35 Vol. % is 34.4, zoodat deze doorlaatfactor bij een p en p_0 waarde van resp. 0,383 en 0,294 gedeelte en bij 10° C, berekend met de formule

$$k_{10:p:p_0} = k_{10:35} \frac{0,65^3 p_0^3}{(1-p)^3 0,35^3}$$

22,6 m per 24 uur bedraagt.

De later uit de gegevens van de proefnemingen berekende doorlaatfactor, die in verband met de wisselende temperatuur van het water in den bak ook steeds op 10 °C werd omgerekend, moet hiermede dus overeenkomen.

d. Uitvoering van de metingen

Blijkens de vergelijkingen 3 a tot 5 moet de berekende doorlaatfactor gedurende de geheele meting constant blijven. Dat wil dus zeggen, dat, wanneer men b.v. de kraan van 1 drain opent en op gezette tijden het debiet en de grondwaterstanden bepaald, uit de bijbehorende waarden van H_0 , h_0 en het debiet steeds dezelfde doorlaatfactor moet worden berekend.

De metingen zijn nu zoo uitgevoerd, dat — nadat gedurende eenige dagen is geconstateerd, dat de grondwaterspiegel zich heeft ingesteld en de grondwaterstand in alle buizen nog eens is afgelezen — de kraan van een bepaalde drainbuis zoover wordt geopend, dat het debiet zoo groot is, dat gedurende enkele dagen een volledige serie waarnemingen kan worden verricht. Direct daarop wordt het debiet bepaald. Dit geschiedt door een bak gedurende een aantal seconden (30—90) onder de kraan te houden. De hoeveelheid water (gewoonlijk 2—4 l) wordt tot op 10 c.c. nauwkeuring afgelezen, terwijl het aantal seconden met behulp van een stophorloge tot in tienden van seconden wordt bepaald. De nauwkeurigheid van deze metingen ligt in elk geval binnen 2 %. Op gezette tijden, b.v. om de 1 à 2 uur, wordt nu telkens opnieuw de waterstand in de grondwaterstandsbuizen, evenals het debiet, bepaald, terwijl zoo nu en dan ook de temperatuur vna het water wordt opgenomen. Deze metingen worden nu zoo lang voortgezet, totdat de grondwaterspiegel zich slechts weinig meer boven het vlak van de drains bevindt of dus totdat de H_0 - en h_0 -waarden vrijwel haar minimum hebben bereikt. Daarna wordt de kraan van den betreffenden drain gesloten en gedurende eenige dagen de grondwaterstand gecontroleerd, waarna alle drains worden geopend, zoodat al het water — afgezien van het capillaire water en het hangwater — uit den bak vloeit. De kranen van de drains worden daarna weer gesloten, de bak opnieuw met water gevuld, enz.

e. Berekening van den doorlaatfactor

In het gegeven geval werd de kraan van den onderste drain midden in den bak geopend. Daar de zijwanden van den bak aan weerszijden hiervan 5 meter verwijderd zijn, komt dit dus overeen met het geval, dat drains op 10 m onderlingen afstand in een homogenen grond aanwezig zijn, waarbij de drains op de ondoorlatende laag liggen. In tabel I zijn de verkregen gegevens vermeld. Het debiet is daarbij dus omgerekend in m^3 per 24 uur per strekkenden meter en van één zijde komend. Wordt dus L liters in t seconden afgevoerd, dan is het debiet in m^3 per strekkenden meter per 24 uur van één zijde komend:

$$Q = \frac{L \cdot 86400}{t \cdot 1,993 \cdot 1000 \cdot 2}$$

daar de breedte van den bak 1,993 m bedraagt.

De doorlaatfactor wordt met behulp van de onderstaande vergelijking ($e = 5$ m) en van de bijeenhoorende waarden van H_0 , h_0 en Q berekend:

$$Q = \frac{k (H_0^2 - h_0^2)}{5} \quad \text{of} \quad k = \frac{5 Q}{(H_0^2 - h_0^2)}.$$

De H_0 -waarden zijn berekend als gemiddelden van de waterstanden in de buizen 1 en 24 (vlak tegen de zijwanden), terwijl de waterstand in buis 13 (vlak tegen den middensten drain) de h_0 -waarde aangeeft. Hierbij kan worden opgemerkt, dat de grondwaterstanden in de buizen 1 en 24 niet altijd precies gelijk zijn. Dit wordt veroorzaakt door geringe heterogeniteiten, die waarschijnlijk bij de vulling van den bak in het zand op de een of andere wijze zijn ontstaan. Deze verschillen zijn overigens slechts klein en kunnen verder buiten beschouwing blijven.

f. Bespreking van de verkregen cijfers

In Tabel I zijn, zooals reeds werd opgemerkt, de resultaten van de metingen weergegeven. De afstanden van de buizen 1 en 24 tot de zijwanden van den bak (deze wanden liggen op 5 m van de middenste drainbuizen) is zoo gering, evenals de veranderingen in de grondwaterstanden ter plaatse, dat de grondwaterstanden vlak tegen deze zijwanden gelijk genomen kunnen worden aan die in de buizen 1 en 24.

Uit de waarden van H_0 , h_0 en Q zijn de doorlaatfactoren berekend, waarbij is aangenomen, dat de horizontale strooming in de capillaire laag nul is (op één na laatste kolom). Hieruit blijkt, dat afgezien van de eerste waarnemingen na het openen van de kraan, waarbij de grondwaterstanden nog niet op het debiet zijn ingesteld (zie hieronder), de doorlaatfactor zeer snel toeneemt met een dalend phreatisch oppervlak; nl. van 25,5 tot ± 170 . De oorzaak daarvan is, dat de capillaire laag *wel* in het watervoerende profiel moet worden opgenomen, daar het duidelijk zal zijn, dat de dikte van de watervoerende laag bij kleiner wordende H_0 - en h_0 -waarden des te meer verschillend is, naarmate de capillaire laag al dan niet bij de watervoerende laag wordt bijgeteld. In de laatste kolom van Tabel I is de capillaire laag medegerekend, zooals deze uit de stijghoogte bij een poriënvolume van 35 Vol. % is berekend; d.w.z., dat deze waarde (0,175 m) dus telkens bij de H_0 - en h_0 -waarden is bijgeteld. Het blijkt nu, dat de doorlaatfactoren vrijwel constant zijn geworden, daar de veranderingen, die de doorlaatfactoren nu nog vertoonen door andere oorzaken moeten worden verklaard, waarop zal worden teruggekomen. *Hieruit volgt dan ook met zekerheid, dat de horizontale strooming in de capillaire laag niet alleen niet te verwaarloozen is, maar zelfs even sterk is als in de laag onder het phreatisch oppervlak, d.w.z. dus alleen beheerscht wordt door de grootte van den doorlaatfactor.*

De bovengenoemde kleine veranderingen, die de doorlaatfactor ook nog blijft vertoonen, wanneer de capillaire laag in het watervoerend profiel is opgenomen, worden veroorzaakt door het feit, dat wel het *gemiddelde* luchtgehalte

TABEL I

Geopend werd de drain midden op den bodem van den bak
De drainafstand bedraagt 10 meter
De doorlaatfactor, bij 10° C en bij $p_o = 29,4$ %, bedraagt 22,6 m per 24 uur

Datum	Uur	Temp. in °C	Grondwaterstand in m boven den bodem van den bak				Q in m ³ per 24 uur per strekken- den meter en van één zijde komend	K zonder capil- laire laag	K met capillaire laag
			Buis 1	Buis 24	Gem. buis 1 en 24 = H_o	Buis 13 = h_o			
16/10 '36	—	—	1,680	1,680	1,680	1,681	—	—	—
17/10 '36	—	—	1,668	1,669	1,669	1,670	—	—	—
19/10 '36	—	—	1,674	1,676	1,675	1,677	—	—	—
20/10 '36	—	—	1,662	1,662	1,662	1,663	—	—	—
22/10 '36	9 u 21 ¹⁾	13,5	1,628	1,630	1,629	1,631	3,115	—	—
22/10 '36	10 u 21	—	1,491	1,499	1,495	1,286	2,962	25,5 ²⁾	22,6 ²⁾
22/10 '36	11 u 21	—	1,351	1,337	1,344	1,127	2,742	25,6	22,4
22/10 '36	12 u 21	—	1,276	1,268	1,272	1,058	2,610	26,2	22,8
22/10 '36	13 u 21	—	1,181	1,177	1,179	0,968	2,474	27,3	23,5
22/10 '36	14 u 21	—	1,105	1,101	1,103	0,875	2,349	26,0	22,1
22/10 '36	15 u 26	13,2	1,018	1,003	1,011	0,789	2,206	27,6	23,1
22/10 '36	16 u 21	—	0,941	0,922	0,932	0,715	2,140	29,9	24,7
22/10 '36	17 u 21	—	0,867	0,853	0,860	0,638	1,977	29,7	24,1
23/10 '36	8 u 40 ²⁾	—	—	—	—	—	—	—	—
23/10 '36	9 u 40	13,2	0,304	0,287	0,296	0,139	0,801	58,6	32,5
23/10 '36	10 u 40	—	0,273	0,259	0,266	0,117	0,702	61,5	32,1
23/10 '36	11 u 40	—	0,248	0,236	0,242	0,101	0,622	64,3	31,8
23/10 '36	13 u 40	—	0,212	0,193	0,203	0,079	0,493	70,5	31,5
23/10 '36	15 u 50	—	0,170	0,153	0,162	0,063	0,386	86,5	33,1
23/10 '36	17 u 40	—	0,146	0,129	0,138	0,055	0,311	97,2	34,5
23/10 '36	22 u 40	13,5	0,103	0,088	0,096	0,040	0,183	120,2	33,6
24/10 '36	8 u 00	—	0,060	0,050	0,055	0,032	0,0686	171,5	34,2
24/10 '36	10 u 00	—	0,055	0,047	0,051	0,030	0,0578	169,9	31,9
28/10 '36	gem.	13,4	—	—	—	—	—	gem.	23,3
1/11 '36	—	—	0,120	0,120	0,120	—	gem. bij 10° C	—	25,8
	—	—	0,132	0,133	0,133	—	—	—	—

Hieruit volgt:

Grootste afwijking van bepaalde $k_{10/p}$ -waarden = 14 %.

" " " het gemiddelde = 22 %.

Hoogste waarde 34,5 of bij 10° C 31,4.

1) De kraan van de drainbuis werd om 9 u 21 geopend.

2) Gedurende den nacht van 22 op 23 October werd de kraan iets gesloten om den grondwaterstand 's nachts niet te sterk te doen dalen. Om 8 u 05 werd de kraan weer geheel geopend. Per abuis zijn de metingen hier pas vlak na de geheele opening van de kraan verricht en dus waardeloos.

3) De instelling van den grondwaterstand op het debiet gaat hier snel, doordat de drainafstand klein is. Een uur na de opening van de kraan is deze instelling reeds bereikt.

van de geheele laag tot den aanvangsgrondwaterstand (in tabel I b.v. 1,631 m enz.) boven den bodem van den bak bekend is, maar niet het feit, of dat luchtgehalte op *alle* hoogten boven den bodem van den bak even groot is. Het zal duidelijk zijn, dat, wanneer dit luchtgehalte niet overal dezelfde is, dit luchtgehalte naar diepere lagen in den bak zal afnemen; o.a. in verband met het feit, dat hier de lucht onder een hooger en druk staat en de oplosbaarheid in water grooter wordt, naarmate de druk grooter is. Anderzijds is het echter zeer onwaarschijnlijk, dat in de dieptste lagen in den bak het luchtgehalte nul zou zijn. Daar met de afname van het luchtgehalte de doorlatendheid toeneemt, zal het duidelijk zijn, dat de op 10° C omgerekende doorlaatfactor van de onderste lagen (dus bij kleine H_o - en h_o -waarden berekend) kleiner moet zijn dan 50,0, daar dit de doorlaatfactor is, wanneer het luchtgehalte nul is. Rekenen we de hoogste gevonden waarden van Tabel I en II (ook voor de waarnemingen vermeld in Tabel II, zie blz. 485, 486, geldt iets dergelijks) n.l. resp. 34,6; 36,5 en 30,3 om op een temperatuur van het water van 10° C dan vinden we resp. 31,4; 28,9 en 29,8. Deze waarden zijn dus inderdaad vrijwat kleiner dan 50,0. ¹⁾

Verder zal het duidelijk zijn, dat de berekende doorlaatfactoren bij de hoogste H_o - en h_o -waarden slechts weinig van de doorlaatfactoren mogen afwijken, zooals deze uit den op een andere wijze bepaalde doorlaatfactor en het *gemiddelde* luchtgehalte bij een temperatuur van 10° C. van het water zijn berekend. De laag, waardoor het water stroomt, is immers dan nog slechts weinig verschillend van de laag, waarvan het gemiddelde luchtgehalte is bepaald. Zoowel uit Tabel I als II blijkt, dat de op 10° C omgerekende doorlaatfactoren bij de hoogste H_o - en h_o -waarden slechts weinig verschillen van de uit het gemiddelde luchtgehalte berekende doorlaatfactoren, zooals het onderstaande tabelletje ook doet zien:

Geopend werd drain:	k (10 : p_o) gemiddeld luchtgehalte (berekend uit $k_{10/35}$)	k (10 : p_o) uit de hoogste H_o - en h_o -waarden	Afwijking in % op k tweede kolom
middenste, onderste. .	22,6	20,8	8,0
oostelijke, " . .	24,5	23,4	4,5
westelijke, " . .	21,3	21,8	2,3

De afwijking bedraagt maximaal 8 % en ligt binnen de foutengrenzen. Afgezien van het bovenstaande zijn de afwijkingen van de gemiddelde k -

¹⁾ Om dit experimenteel nader te onderzoeken, zullen ook nog waarnemingen worden gedaan, waarbij de bak slechts voor een klein gedeelte met water wordt gevuld, zoodat het luchtgehalte van deze onderste lagen nu wel goed bekend is.

factoren ten opzichte van den gemiddelden doorlaatfactor, uit k (10 : 35) en het gemiddelde luchtgehalte berekend, resp. 14; 6,5 en 25 % en zijn ook op zich zelf beschouwd dus nog niet groot, evenmin als de maximale afwijking in iedere reeks k -factoren van het gemiddelde; nl. resp. 22; 9,3 en 22 %. De doorlaatfactor van gronden in de natuurlijke ligging varieert immers van k -waarden van kleiner dan 0,01 tot meer dan 10 m p. 24 uur, zoodat een afwijking van zelfs 25 % van de berekende waarde, indien zij zou zijn voorgekomen, niet groot zou zijn.

Ten slotte kan nog worden opgemerkt, dat na het openen van de kraan van de drainbuis, of na het verder openstellen van deze kraan, de toestand niet direct zoo is, dat overal per oppervlakte-eenheid evenveel water wordt afgevoerd. Het zal duidelijk zijn, dat eerst vlak bij de betreffende drainbuis veel meer water wordt afgevoerd dan op groteren afstand daarvan, terwijl pas na eenigen tijd de toestand zoo wordt, dat per oppervlakte-eenheid overal evenveel wordt afgevoerd. De grondwaterspiegel heeft dus in deze eerste periode een afgeplattten vorm analoog aan dien in het geval, waarbij de critische regenval wordt overschreden of de verdamping of het watergebruik door de planten overheerscht. In de voorgaande paragraaf is reeds opgemerkt, dat in dit geval meer water naar de drains wordt afgevoerd, dan in het geval, waarbij de grondwaterstand midden tusschen de drains (slooten, enz.) dezelfde is, maar de afgeleide vergelijkingen geldig zijn en dus per oppervlakte-eenheid overal evenveel wordt afgevoerd. Dit blijkt nu ook uit het feit, dat de in deze periode berekende doorlaatfactoren bij de proefnemingen in den bak te hoog zijn of, wat hetzelfde is, het debiet hooger is dan het volgens de afgeleide vergelijkingen mag bedragen.

Op het land zelf zijn de drains natuurlijk nooit afgesloten en kan men dus iets dergelijks, als boven is beschreven, hoogstens verwachten na een hevige regenbui. Zooals echter in hoofdstuk III verder zal worden uiteengezet, worden dergelijke waarnemingen nooit voor berekeningen gebruikt, waarom we dit verschijnsel (nl. dus, dat het debiet Q niet is ingesteld op den grondwaterstand midden tusschen de drains, of m.a.w. niet overal evenveel water wordt afgevoerd) verder buiten beschouwing kunnen laten; afgezien natuurlijk van die gevallen, waarbij de critische regenval wordt overschreden.

Om nu te laten uitkomen, dat ook de drainafstand goed in de afgeleide vergelijkingen tot uiting komt, zijn in Tabel II de resultaten vermeld van een serie metingen, waarbij nu de onderste drains tegen den oostelijken resp. tegen den westelijken zijwand van den bak zijn geopend. Dit komt dus overeen met het geval, dat in een homogenen grond drains op $2 \times 9,94 = 19,88$ m onderlingen afstand aanwezig zijn en waarbij de drains op de ondoorlatende

TABEL IIa

Geopend oostelijke drain op den bodem van den bak

Drainafstand $2 \times 9,94 = 19,88$ meterDoorlaatfactor, bij 10°C en bij $p_0 = 30,2\%$, 24,5 m per 24 uur

Datum	Uur	Tempe- ratuur in $^{\circ}\text{C}$	Grondwaterstand in m boven den bodem van den bak		Q in m^3 per 24 uur per strekken meter en van één zijde komend	k zonder capillaire laag	k met capillaire laag
			Buis 1 $= h_0$	Buis 24 $= H_0$			
10/9 '36	—	—	1,613	1,614	—	—	—
14/9 '36	—	—	1,609	1,610	—	—	—
15/9 '36	9 u 15 ¹⁾	19,5	1,601	1,602	6,345	—	—
15/9 '36	11 u 15	—	0,952	1,505	5,238	38,3 ⁴⁾	33,5 ⁴⁾
15/9 '36	13 u 15	—	0,747	1,341	4,546	36,9	31,2
15/9 '36	15 u 15	19,5	0,584	1,199	3,985	36,1	30,2
15/9 '36	17 u 15	—	0,463	1,083	3,494	36,2	29,5
15/9 '36	19 u 15	—	0,363	0,944	3,056	39,9	31,6
15/9 '36	21 u 15	19,5	0,281	0,846	2,673	41,7	31,8
16/9 '36	8 u 15 ²⁾	—	0,404	0,595	0,788	41,0	30,4
16/9 '36	10 u 15	19,5	0,168	0,556	1,934	68,4 ⁵⁾	46,1 ⁵⁾
16/9 '36	12 u 30	—	0,109	0,498	1,467	61,7 ⁵⁾	39,2 ⁵⁾
16/9 '36	14 u 15	—	0,083	0,458	1,224	59,9	36,4
16/9 '36	16 u 15	19,5	0,065	0,416	1,033	60,8	35,2
16/9 '36	18 u 15	—	0,057	0,376	0,882	63,5	35,1
17/9 '36	8 u 15	—	0 ³⁾	0,201	0,384	94,6	34,5
17/9 '36	10 u 35	19,5	0	0,181	0,342	103,9	35,4
17/9 '36	12 u 15	—	0	0,169	0,312	108,6	35,4
17/9 '36	14 u 16	—	0	0,156	0,273	111,5	34,4
17/9 '36	16 u 15	19,5	0	0,145	0,251	118,8	34,8
17/9 '36	18 u 15	—	0	0,136	0,243	130,4	36,5
18/9 '36	8 u 20	—	0	0,087	0,126	165,1	32,9
18/9 '36	10 u 20	—	0	0,080	0,117	181,8	33,8
19/9 '36	gem.	19,5	0,001			gem.	33,4
21/9 '36	—	—	0,110		gem. bij 10°C		26,1
23/9 '36	—	—	0,119				
26/9 '36	—	—	0,122	gem. alle buizen			
28/9 '36	—	—	0,128				
29/9 '36	—	—	0,127				

Grootste afwijking van bepaalde $k_{10/p} = 6,5\%$." " " het gemiddelde = $9,3\%$.Hoogste waarde 36,5 en bij 10°C 28,4.

1) De kraan van de drainbuis werd om 9 u 15 geopend.

2) Gedurende den nacht, van 15 op 16 September werd de kraan iets gesloten, om den grondwaterstand 's nachts niet te sterk te doen dalen. Na de aflezingen werd om 8 u 15 de kraan weer geheel geopend.

3) De grondwaterstand is hier niet meer af te lezen, maar is practisch nul.

4) en 5) De grondwaterstand heeft zich nog niet geheel op het debiet ingesteld.

TABEL IIb

Geopend westelijke drain op den bodem van den bak
 Drainafstand $2 \times 9,94 = 19,88$ meter
 Doorlaatfactor, bij 10°C en bij $p_0 = 28,8\%$, $21,3$ m per 24 uur

Datum	Uur	Tempe- ratuur in $^{\circ}\text{C}$	Grondwater- stand in m hoven den bodem van den bak		Q in m ³ per 24 uur per strekken meteren van één zijde komend	k zonder capil- laire laag	k met capillaire laag
			Buis 1 = H_0	Buis 24 = h_0			
10/11 '36	—	—	1,588	1,588	—	—	—
11/11 '36	—	—	1,575	1,576	—	—	—
12/11 '36	—	—	1,597	1,598	—	—	—
13/11 '36	—	—	1,580	1,580	—	—	—
14/11 '36	—	—	1,554	1,556	—	—	—
16/11 '36	—	—	1,579	1,580	—	—	—
17/11 '36	—	—	1,576	1,578	—	—	—
18/11 '36	9 u 20 ¹⁾	—	1,574	1,575	6,081	—	—
18/11 '36	11 u 20	10,5	1,459	0,828	4,628	31,9 ⁴⁾	27,6 ⁴⁾
18/11 '36	13 u 20	—	1,397	0,624	3,953	25,2	21,4
18/11 '36	15 u 20	11,0	1,204	0,488	3,482	28,6	23,4
18/11 '36	17 u 20	—	1,098	0,383	3,055	28,7	21,8
19/11 '36	8 u 05 ²⁾	—	0,671	0,387	1,041	34,4	26,0
19/11 '36	10 u 05	11,0	0,630	0,159	1,798	48,1 ⁵⁾	34,1 ⁵⁾
19/11 '36	12 u 20	—	0,572	0,110	1,405	44,3	29,3
19/11 '36	14 u 05	—	0,527	0,091	1,202	44,4	28,3
19/11 '36	16 u 05	—	0,483	0,077	1,032	45,1	27,8
19/11 '36	18 u 05	—	0,440	0,065	0,918	48,2	28,5
20/11 '36	8 u 30	10,5	0,240	0 ³⁾	0,426	73,5	29,9
20/11 '36	10 u 30	—	0,224	0	0,376	74,4	29,0
20/11 '36	12 u 30	—	0,204	0	0,347	82,8	30,5
20/11 '36	14 u 30	—	0,189	0	0,300	83,4	29,2
20/11 '36	16 u 45	—	0,174	0	0,279	91,5	30,3
gem.		10,8			gem. bij 10°C	gem. 27,3	26,7

Grootste afwijking van bepaalde $k_{10/p} = 25\%$.

" " " het gemiddelde = 22% .

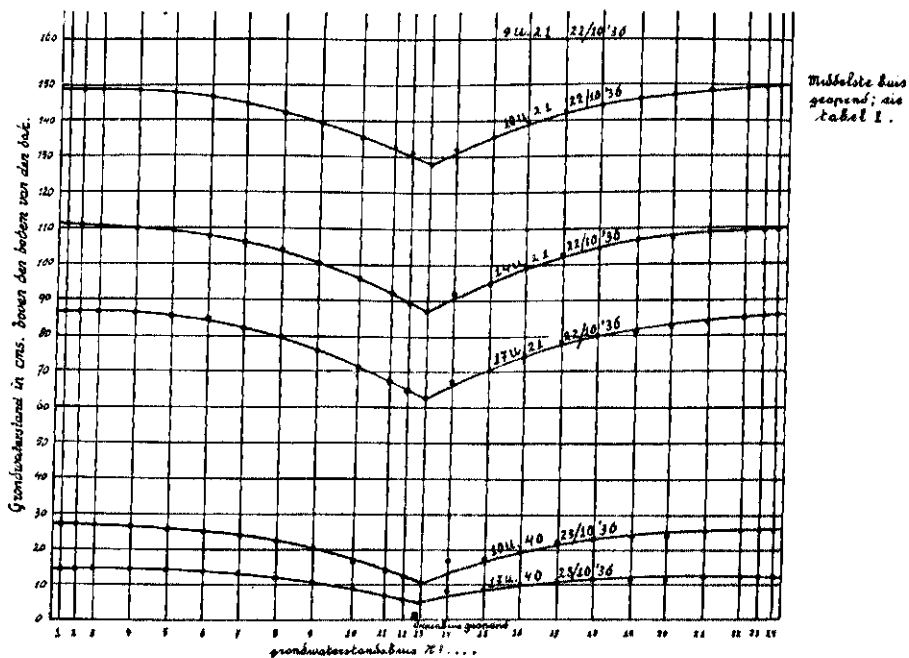
Hoogste waarde 30,5 en bij $10^{\circ}\text{C} = 29,8$.

1) De kraan van de drainbuis werd om 9 u 20 geopend.

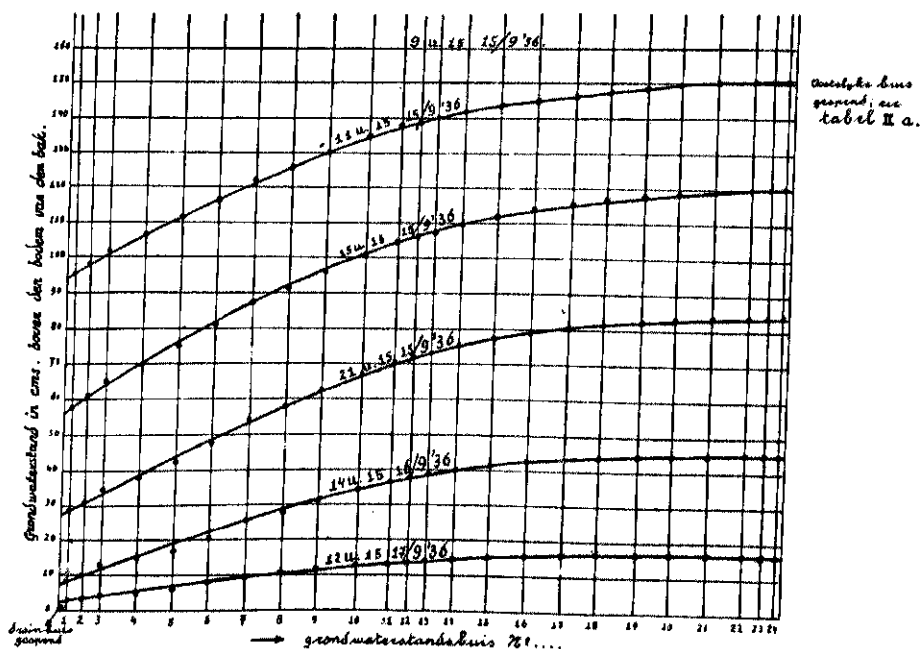
2) Gedurende den nacht van 18 op 19 November werd de kraan iets gesloten, om den grondwaterstand 's nachts niet te sterk te doen dalen. Na de aflezing werd de kraan om 8 u 05 weer geheel geopend.

3) De grondwaterstand is hier niet meer af te lezen, maar is practisch nul.

4) en 5) De grondwaterstand heeft zich nog niet geheel op het debiet ingesteld.



Figuur 3



Figuur 4

laag (hier dus den bodem van den bak) liggen. Daar ook nu de hoeveelheid water bekend is, welke noodig is geweest om de bak tot een bepaalden grondwaterstand met water te vullen, kan op soortgelijke wijze de doorlaatfactor uit dezen factor bij 10°C en een luchtvrĳe poriĳenvolume van 35 Vol. % ($k_{10:35}$ -waarde) worden berekend, als dit in het vorige geval uitvoerig is aangegeven. Deze waarden zijn in Tabel II aangegeven, evenals de verdere gegevens en de berekende doorlaatfactoren. Voor deze k -factoren kunnen analoge opmerkingen gemaakt worden als over de in Tabel I aangegeven k -factoren, waarnaar kan worden verwezen. Hier kan echter nog worden opgemerkt, dat blijkens de resultaten ook de drainafstand op de juiste wijze in de afgeleide betrekkingen tot uiting is gebracht.

Tenslotte is in figuur 3 en 4 het phreatisch oppervlak aangegeven, zooals deze uit de waterstanden in de 24 grondwaterstandsbuizen bij enkele afzonderlijke waarnemingen is afgeleid (een gedeelte van het cijfermaterieel is aangegeven in Tabel I en IIa). Hieruit blijkt dus, dat inderdaad het phreatisch oppervlak tusschen 2 drains, enz., indien deze water afvoeren, een bollen vorm heeft. Door berekening zou verder kunnen worden aangetoond, dat de vorm van het experimenteel bepaalde phreatisch oppervlak binnen de foutengrenzen overeenkomt met den vorm (ellips of gedeelte daarvan), die het volgens de vergelijkingen zou moeten hebben. Korthedshalve is er van afgezien, deze berekeningen hier uitvoerig weer te geven.

§ 7. ER IS EEN HANGKROMME VAN HET PHREATISCH OPPERVAK NAAR DE SLOOT, ENZ., WAARIN DE DRAINS OF GREPPELS UITMONDEN

Tenslotte dient in dit verband (nl. homogenen of homogeen gedachten grond; de grond onder de drains, enz. is ondoorlatend) nog besproken te worden het geval, dat het phreatische oppervlak een niet te verwaarloozen hangkromme naar de sloot heeft. Zooals in een vorige paragraaf (nl. § 3) besproken is, wordt bij de toepassing van de afgeleide formules aangenomen, dat over de geheele lengte van de drains, greppels, enz. de grondwaterstand zich midden tusschen de drains, greppels, enz. op overal dezelfde hoogte boven de drains, resp. boven den bodem van de greppels, enz. bevindt. Het is echter mogelijk, dat deze hoogte eerst langzaam en daarna steeds sneller afneemt, naarmate de afstand tot de sloot kleiner wordt. In dit geval bestaat er dus een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot. Deze hangkromme bestaat wel is waar steeds; de lengte van het gekromde deel is echter vaak zoo gering (nl. afhankelijk van den afstand van de drains en van de doorlatendheid van den grond; gewoonlijk zal deze hangkromme zich niet verder uitstrekken dan over 15 tot hoogstens 25 m), dat haar invloed te verwaarloozen is, te meer daar

alleen vlak bij de sloot grootere afwijkingen van de hoogte van het phreatisch oppervlak in vergelijking met deze hoogte op grootere afstanden van de sloot voorkomen.

Nemen we echter eens aan, dat een dergelijke hangkromme bestaat, die over de geheele lengte van de drains optreedt (14). De oorzaak van een dergelijke hangkromme kan liggen in het feit, dat de sloot rechtstreeks een belangrijke hoeveelheid water afvoert of zal gezocht moeten worden in het feit, dat de grond in doorlatendheid toeneemt, naarmate de afstand van de sloot kleiner is. Feitelijk hebben we echter in het laatste geval te maken met een heterogene grond. Vaak zal men echter eenvoudig veronderstellen, dat de grond homogeen is en op deze wijze een soort gemiddelde doorlaatfactor (nl. een soort effectieve doorlaatfactor; zie hoofdstuk V) voor de geheele te beschouwen strook tusschen de drains of greppels berekenen. In sub II D van dit hoofdstuk zal bij de bespreking van heterogene gronden daarop worden teruggekomen. Door welke oorzaak overigens deze hangkromme ontstaat, is voor de berekening op zich zelf van geen belang, zoolang we den grond als homogeen beschouwen, daar in iedere doorsnede loodrecht de drains of greppels, enz., de hoeveelheid water, die naar de drains of greppels toevloeit, bepaald wordt door het verhang van het phreatisch oppervlak en door den vorm van de doorsnede door de watervoerende laag.

In figuur 5 is voor twee drainreeksen in perspectief aangegeven, welke vorm het phreatische oppervlak heeft. Ter verduidelijking zijn hierin ook 2 dwarsdoorsneden geteekend.

In iedere doorsnede loodrecht de drains geldt de formule 4, nl.:

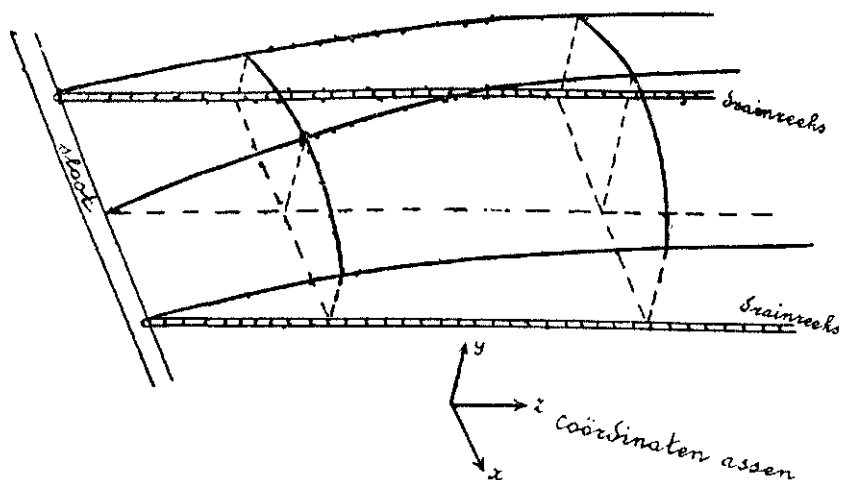
$$Q = \frac{k (H_o^2 - h_o^2)}{e}$$

Dit debiet Q zal nu echter voor iedere doorsnede verschillend zijn. Noemen we nu z de afstand in meters tot de sloot, dan zijn dus in dit geval H_o en h_o functies van z . Zijn deze functies van z bekend, dan kan het totaal debiet — dus de hoeveelheid, die uit den drain in de sloot vloeit — berekend worden. Beschouwen we eens een doorsnede evenwijdig de drains en midden tusschen deze drains zooals figuur 6 aangeeft (de drain is hierin duidelijkheidshalve horizontaal geteekend), dan zien we, dat de kromme, die het verloop van het phreatisch oppervlak aangeeft, een relatief zwak gebogen lijn is. De functie daarvan zal vaak met voldoende benadering zijn aan te geven door de functie:

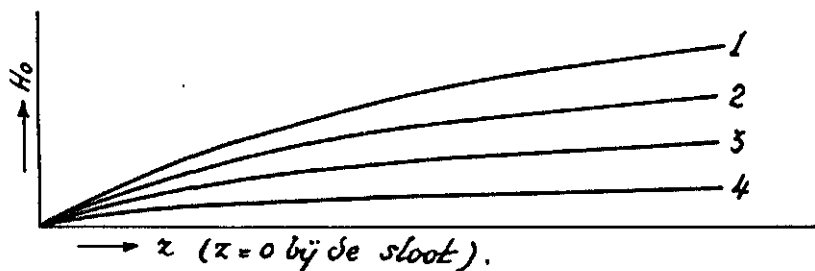
$$H_o = az^b \quad (12)$$

waarin a en b constanten zijn. Ook, wanneer een andere functie moet worden gebruikt, gaat de afleiding van de vergelijking op analoge wijze, waarom dan

ook met bovengenoemde functie als voorbeeld mag worden volstaan. Verder is op te merken, dat $H_0 = 0$ indien $z = 0$ (15).



Figuur 5



Figuur 6

Nu zal op eenzelfde afstand van de sloot de grondwaterstand midden tusschen de drains — afhankelijk van den regenval, het waterverbruik door de planten, de waterafvoer en de verdamping — voortdurend in hoogte wisselen. Dit beteekent dus, dat dit op alle afstanden van de sloot het geval is of m.a.w. de curve van fig. 6 zal de standen 1, 2, 3, enz. kunnen aannemen. Het ligt voor de hand, dat de functie van iedere krommen alleen in zooverre zal veranderen, dat het rechterlid met een factor veranderd, welke factor onafhankelijk is van z (16). Stellen we deze factor

bij den hoogsten te beschouwen grondwaterstand 1 en bij een lagere ligging α , dan is algemeen:

$$H_o = a \alpha z^b \quad (13)$$

Verder zal natuurlijk ook voor h_o een dergelijke functie bestaan (bevindt zich geen water boven de drains dan vervallen de termen van de nog te ontwikkelen vergelijkingen, waarin h_o voorkomt). Ook deze functie zal gewoonlijk een dergelijken vorm hebben als de functie 13; alleen treden hierin nu de factoren α_1 en c en d op, zoodat:

$$h_o = c \alpha_1 z^d. \quad (14)$$

Het debiet nu, dat door een doorsnede loodrecht de drains en van de dikte dz naar de drains stroomt, bedraagt dus:

$$dQ = \frac{k (H_o^2 - h_o^2) dz}{e} \quad (15)$$

De vergelijking 13 en 14 in de vergelijking 15 ingevuld, geeft:

$$dQ = \frac{k}{e} (a^2 \alpha^2 z^{2b} - c^2 \alpha_1^2 z^{2d}) dz \quad (16)$$

De hoeveelheid water, die dus uit den drain in de sloot vloeit en van één zijde afkomstig is, bedraagt dus, na integratie van $Q = 0$ tot $Q = Q$ en $z = 0$ tot $z = z$:

$$Q = \frac{k}{e} \left(\frac{a^2 \alpha^2 z^{2b+1}}{2b+1} - \frac{c^2 \alpha_1^2 z^{2d+1}}{2d+1} \right) \quad (17)$$

Beschouwen we het debiet, dat van 2 zijden komt en dus in werkelijkheid de hoeveelheid water per tijdseenheid is, die uit de drains vloeit, zoo is dit debiet dus:

$$Q' = \frac{2k}{e} \left(\frac{a^2 \alpha^2 z^{2b+1}}{2b+1} - \frac{c^2 \alpha_1^2 z^{2d+1}}{2d+1} \right) \quad (18)$$

of, wanneer, zooals in onderstaande voorbeeld, $a = c$ en $b = d$:

$$Q' = \frac{2ka^2 z^{2b+1} (\alpha^2 - \alpha_1^2)}{e (2b+1)} \quad (19)$$

Uit het bovenstaande blijkt dus, dat het voorkomen van een hangkromme van het praetisch oppervlak geen moeilijkheden voor de berekening biedt, hetgeen dan ook de voornaamste reden is, waarom de bovenstaande berekening

werd uitgevoerd. We zullen nu aantonen, dat we deze berekeningen belangrijk kunnen vereenvoudigen, zoodat men het met voorkomen van een hangkromme vrijwel nooit rekening behoeft te houden. Daartoe zullen we een getallen-voorbeeld kiezen. Heeft men b. v. drains op 20 m onderlingen afstand en is de functie $H_0 = f(z)$ voor den hoogsten grondwaterstand ($\alpha = 1$) gelijk aan $H_0 = 0,03 z^{0,5}$ en de functie $h_0 = f(z)$ gelijk aan $h_0 = \frac{0,03}{3} z^{0,5}$ (dus $\alpha' = \frac{1}{3}$), waarbij dus eenvoudigheidshalve maar is aangenomen, dat $a = c$ en $b = d$, daar dit voor hetgeen we willen aantonen toch geen verschil maakt, en bedraagt $z = 200$ m en $Q = 20$ m³ p. 24 uur, dan is dus volgens vergelijking 19:

$$20 = \frac{2k \cdot 0,03^2 \cdot 200^2}{10 \cdot 2} \cdot \left(1 - \frac{1}{9}\right) \text{ of } k = 6,25 \text{ m p. 24 uur} \quad (17)$$

Stel nu, dat grondwaterstandsbuizen geplaatst waren op 20,80, 140 en 200 m van de sloot boven de drains en midden tusschen de drains, dan zou H_0 voor deze afstanden hebben bedragen resp. 0,134; 0,268; 0,355 en 0,424 m boven het vlak van de drains en h_0 resp. 0,045; 0,089; 0,118 en 0,141 m. Had men nu eenvoudig het gemiddelde genomen van alle H_0 - en h_0 -waarden, dan was voor H_0 en h_0 resp. gevonden 0,295 en 0,098. Bij de toepassing van de vergelijking 4 was dan voor k gevonden:

$$\frac{20}{2.200} = \frac{k(0,295^2 - 0,098^2)}{10} \text{ of } k = 6,46 \text{ m p. 24 uur.}$$

Om deze overeenstemming zoo goed mogelijk te houden, moet men de H_0 - en h_0 -waarden vlak bij de sloot niet mederekenen. We zien dit direct in, wanneer we het *juiste* gemiddelde van *alle* H_0 - en h_0 -waarden eens berekenen. Deze zijn resp.:

$$H_0 = \frac{\int_{z=0}^{z=z} a \alpha z^b \cdot dz}{z} = \frac{a \alpha z^{b+1}}{z(b+1)} \text{ resp. } h_0 = \frac{\int_{z=0}^{z=z} a \alpha_1 z_b \cdot dz}{z} = \frac{a \alpha_1 z^{b+1}}{z(b+1)}$$

Ingevuld in de vergelijking 4 ontstaat:

$$\frac{Q'}{2z} = \frac{ka^2 z^{2b+2} (\alpha^2 - \alpha_1^2)}{e(b+1)^2 \cdot z^2}$$

of na eenige omwerking:

$$Q' = \frac{2ka^2 z^{2b+1} (\alpha^2 - \alpha_1^2)}{e(b+1)^2}$$

Nu is b altijd kleiner dan 1, zoodat we een kleine fout maken wanneer we voor $(b + 1)^2$ schrijven $2b + 1$, waarmede dus weer de vergelijking 19 verkregen is. Daar b_1 in het gegeven voorbeeld 0,5 is, zien we dus dat de fout $\frac{1}{8}$ bedraagt van de juiste k -waarde verkregen met de vergelijking 19, dus grooter dan boven is berekend, nl. 6,46 inplaats van 6,25 of met slechts $\pm 3\%$ verschil.

De oorzaak van bovengenoemd verschil van $\frac{1}{8}$ met de juiste waarde ligt in het feit, dat we in het laatste geval eerst een gemiddelde hebben genomen en dit daarna pas in het kwadraat hebben gebracht, terwijl bij de vergelijking 19 dit in de juiste volgorde heeft plaats gevonden, nl. eerst in het kwadraat brengen, terwijl pas na de sommeering een gemiddelde berekend is. Berekent men dan ook de gemiddelden van alle waarden van H_0^2 en h_0^2 (b.v.

de gemiddelde waarden van H_0^2 is $\frac{\int_0^z a^2 \alpha^2 z^{2b} \cdot dz}{z} = \frac{a^2 \alpha^2 z^{2b+1}}{z(2b+1)}$, enz.)

dan wordt de juiste vergelijking 19 na invulling van deze gemiddelde waarden in de vergelijking 4 weer gevonden. Analooch hiermede is het natuurlijk ook mogelijk om de, met behulp van de in de grondwaterstandsbuizen op verschillende afstanden van de sloot gevonden, waarden eerst in het kwadraat te brengen en daarna pas een gemiddelde te berekenen. In het algemeen zal het verschil zoo klein zijn, dat dit niet noodig is. Om misverstand te voorkomen kan hier nog even worden opgemerkt, dat als de grond onder den drain doorlatend is en de ligging van de ondoorlatende laag onbekend is, we dus alleen het gemiddelde van de grondwaterstanden op de verschillende afstanden van de sloot kunnen berekenen, daar H_0 nu niet bekend is en we dus ook geen kwadraat hiervan kunnen berekenen (zie sub B van dit hoofdstuk).

Tenslotte kan men nog de vraag stellen, welke fout men maakt, wanneer slechts op één afstand van de sloot een grondwaterstand is bepaald en toch in werkelijkheid een hangkromme aanwezig is. In het gegeven geval zou men deze buizenreeks waarschijnlijk op ongeveer het midden van drainreeks — dus op 100 m — of op misschien 80 m uit de sloot hebben geplaatst en daar dus de grondwaterstanden hebben bepaald. In het gegeven voorbeeld, zou men dan een doorlaatfactor berekend hebben van resp. 6,25 en 7,82 m per 24 uur. Ook hieruit blijkt, dat het verschil met de juiste waarde (in het gegeven voorbeeld 6,25) relatief klein is en in vele gevallen te verwaarloozen zal zijn; ook al doet men beter — zie hieronder — deze hangkromme wel te bepalen.

Ook voor heterogene gronden (bedoeld wordt heterogeen in vertikale richting), die men dus als heterogeen wil behandelen, geldt iets dergelijks

als boven voor homogene of homogeen gedachte gronden is afgeleid. Wel zal men beter doen in ieder geval de hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot te bepalen door op verschillende afstanden van de sloot grondwaterstandsbuizen te plaatsen en dan de gemiddelde waarden van H_0 en h_0 te berekenen, zooals dat boven bij het getallenvoorbeeld nader is aangegeven. Ditzelfde geldt in sterkere mate voor homogeen gedachte gronden, die echter in werkelijkheid in horizontale richting heterogeen zijn; d.w.z. van afstand tot afstand van de sloot veranderen, waardoor de grondwaterstanden op verschillende afstanden van de sloot ongelijk zijn en niet meer een direct verband met den afstand van de sloot optreedt. Bepaalt men in dergelijke gronden slechts op één afstand van de sloot de H_0 - en h_0 -waarden, dan heeft men de mogelijkheid juist een veel grootere dan wel een veel kleinere waarde dan de gemiddelde waarde te bepalen, waardoor natuurlijk grootere fouten kunnen optreden (zie in dit verband ook sub II D van dit hoofdstuk). Daar men gewoonlijk niet weet of, en eventueel in welke mate, de grond in horizontale richting heterogeen is, verdient het in elk geval aanbeveling grondwaterstandsbuizen op verschillende afstanden uit de sloot te plaatsen en de gemiddelde waarden van H_0 en h_0 hieruit af te leiden of, wanneer de ligging van de ondoorlatende laag onbekend is, de gemiddelde waarden van de grondwaterstanden boven de drains, enz. te berekenen (zie sub B van dit hoofdstuk en hoofdstuk III).

B. De ondergrond is doorlatend

§ 1. DE AFLEIDING VAN DE VERGELIJKING

We zullen dus nu het geval bespreken, dat de grond onder de drains tot de ondoorlatende laag dezelfde doorlatendheid heeft als de grond boven het vlak van de drains resp. boven den bodem van de greppels.

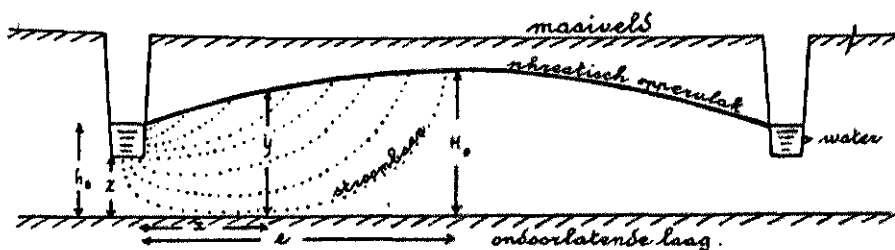
Voor de berekening is, zooals reeds in hoofdstuk I is opgemerkt, gemakkelijk toegankelijk het geval, dat de ondoorlatende laag zich op niet te groote diepte onder het vlak van de drains bevindt, of, wat op hetzelfde neerkomt, de grond op niet te groote diepte onder het vlak van de drains een zoo kleine doorlatendheid krijgt, dat de strooming daarin naar de drains ten opzichte van de strooming in de daarboven gelegen lagen naar de drains verwaarloosd kan worden. Deze ondoorlatende laag kan echter des ondanks nog op relatief groote diepte liggen; afhankelijk van den onderlingen afstand van de te beschouwen ontwateringssystemen en de natte omtrek daarvan. Opgemerkt kan echter worden (zie hoofdstuk III, E, § 1, b), dat, wanneer het gaat om de berekening van de doorlatendheid uit de daarvoor benodigde gegevens, de ligging van de ondoorlatende laag onbeperkt diep onder het maaiveld kan zijn,

zonderdat de berekeningen daardoor onmogelijk worden. Dit kan echter beter aldaar behandeld worden.

In figuur 7 is het geval geteekend, waarbij de ondoorlatende laag niet te diep onder het vlak van de greppels ligt; tevens zijn in deze tekening de vorm van de stroombanen van het water aangegeven.

Ligt nu de ondoorlatende laag niet te diep onder het vlak van den bodem van de greppels resp. onder de drains, dan zal het drukverlies van de vertikaal gerichte component klein zijn ten opzichte van dit verlies voor de horizontaal gerichte component of m.a.w. we kunnen het verval I blijven aangeven door $\frac{dy}{dx}$,

wanneer we de greppel eenvoudig doorgetrokken denken tot de ondoorlatende laag. We moeten dus de waarden van y , H_0 en h_0 van de formules 3 tot en met 5 rekenen *vanaf de ondoorlatende laag*, zooals ook in figuur 7 is aangegeven. Daar dit laatste ook geldt voor het geval, dat de grond onder den bodem van de



Figuur 7

greppels ondoorlatend is, kan dus in het algemeen als stelregel worden vastgesteld, dat de waarden y , H_0 en h_0 *vanaf de ondoorlatende laag* moeten worden gerekend.

Bevindt zich boven de drains of in de greppels geen water, dan wordt h_0 gelijk aan den afstand van de ondoorlatende laag tot het vlak van de drains of tot op den bodem van de greppels.

Uit de figuur 7 blijkt verder, dat we in de vergelijkingen 3 tot 5, wanneer deze op dit geval worden toegepast, nog een correctie kunnen aanbrengen, die vaak verwaarloosd kan worden. Deze correctie heeft alleen betrekking op het gedeelte van de stroombanen, dat door de laag grond *onder* het vlak van de drains of *onder* den bodem van de greppels stroomt. Heeft men greppels met een bodembreedte b en noemt man de diepte van de ondoorlatende laag onder den bodem van de greppels r , dan is voor den halven greppelafstand ¹⁾

¹⁾ • Onder greppelafstand verstaan we hier den afstand van greppelwand tot greppelwand; zie sub I A, § 3, van dit hoofdstuk.

de verlenging van de stroombanen gemiddeld $0,5 r + 0,5 b$. Het gedeelte van alle stroombanen, dat door de laag onder den bodem van de greppels stroomt en in den greppelbodem uitmondt, is ongeveer $\frac{r}{h_0}$, zoodat de correctie van dus wordt: ¹⁾

$$\frac{r (r + b)}{2h_0} \quad (20)$$

waarbij $b = 0$, indien drains worden beschouwd. De vergelijking 4, wordt in dit geval dus:

$$Q = \frac{k (H_0^2 - h_0^2)}{e + \frac{r}{2h_0} (r + b)} \quad (21)$$

en de vergelijking 5:

$$S = \frac{k (H_0^2 - h_0^2)}{e (e + \frac{r}{2h_0} (r + b))} \quad (22)$$

§ 2. CONTROLEWAARNEMINGEN VAN DE OPGESTELDE VERGELIJKINGEN

De contrôle van de voor dit geval geldende vergelijkingen kan ook nu weer uitsluitend met behulp van den reeds besproken cementen bak enz. in de kas van het Bodemkundig Instituut geschieden. Daar de inrichting van deze bak reeds vroeger is besproken (zie I A § 6) kan direct het resultaat van de metingen worden medegedeeld.

In dit geval zijn ook zoowel waarnemingen verricht, waarbij de kraan van den bovensten drain van de middenste reeks als van resp. de oostelijke en de westelijke reeks is geopend. Het centrum van deze drainbuizen bevindt zich $\pm 0,93$ m en de onderkant 0,90 m boven den bodem van den bak (= ondoorlatende laag). Genoemde gevallen komen dus resp. overeen met het geval, dat in een homogenen grond drains op 10 m en resp. $2 \cdot 9,94 = 19,88$ m onderlingen afstand aanwezig zijn en waarbij de ondoorlatende laag zich op $\pm 0,90$ m onder den onderkant van de drains bevindt.

De berekening van den doorlaatfactor, met behulp van de op een andere wijze bepaalden $k_{10:35}$ -factoren, met behulp van p - en p_0 -waarden en van de vergelijking op blz. 479 genoemd, geschiedt op dezelfde wijze als reeds vroeger (zie I A § 6) is besproken, terwijl voor de berekening van

¹⁾ Feitelijk treedt er contractie van de stroombanen op, daar ten slotte alle stroombanen uit moeten monden in de drains of greppels, enz.; zie ook hoofdstuk I. Indien de ondoorlatende laag niet te diep ligt, kan deze contractie worden verwaarloosd.

dezen doorlaatfactor uit het debiet en de H_0 - en h_0 -waarden ook nu weer de vergelijking 4 of de gecorrigeerde vergelijking 4 (nl. de vergelijking 21) is gebruikt. In dit geval wordt dus H_0 en h_0 gerekend vanaf de ondoorlatende laag. Verder is nu steeds de capillaire laag in het watervoerende profiel opgenomen, daar uit de vroeger besproken metingen de noodzakelijkheid daarvan reeds is bewezen.

In tabel III en IV zijn de resultaten van deze metingen medegedeeld, terwijl hierin ook alle verdere gegevens zijn vermeld. In de op één na laatste kolom zijn de doorlaatfactoren aangegeven, zooals deze met behulp van de vergelijking 4 zijn berekend, wanneer de capillaire laag in het doorstromingsprofiel is opgenomen, maar geen correctie is aangebracht door het feit, dat de drains in werkelijkheid niet op de ondoorlatende laag liggen.

Uit de medegedeelde cijfers zien we, dat de k -factoren vrijwel constant blijven, afgezien dan van die factoren, die berekend zijn uit Q , H_0 - en h_0 -waarden, die nog niet op elkaar waren ingesteld, of m.a.w. berekend waren uit die waarden, waarbij nog niet per oppervlakte-eenheid evenveel water werd afgevoerd (zie I A, § 6).

In de laatste kolom is de gecorrigeerde vergelijking 4, nl. de vergelijking 21, voor de berekening van den doorlaatfactor gebruikt. In dit geval is echter een gemiddelde correctie voor alle k -factoren aangebracht, daar de verschillen toch klein zijn. Blijkens de vergelijking 20 is het bedrag, waarmede e moet worden vermeerderd voor de waarnemingen, die om 9.30 (tabel III) zijn verkregen, 0,30 en die om 23 uur werden verkregen 0,46 m of dus gemiddeld 0,38 m.

De factor e is dus $\frac{5,38}{5,00} = 1,076$ maal te klein genomen en ook de doorlaatfactor dus evenveel te klein berekend. De doorlaatfactoren in de op één na laatste kolom in Tabel III zijn dan ook met dezen gemiddelden correctiefactor vermenigvuldigd. De aldus verkregen doorlaatfactoren zijn in de laatste kolom vermeld.

Uit Tabel III blijkt dus, dat b.v. de gemiddelde k -factor in Tabel III bij $12,3^\circ \text{ C}$ 24,2 m per 24 uur bedraagt of dus omgerekend op 10° C 22,7 m per 24 uur. Volgens de andere methode werd een doorlaatfactor bij 10° C van 22,4 m per 24 uur verkregen, zoodat de afwijking in 'dit geval zelfs zeer klein, nl. slechts 1,3 % is. Ook de variaties van de doorlaatfactoren, zooals deze uit de cijfers zijn berekend, die in verloop van tijd zijn waargenomen, zijn in dit geval slechts klein. De grootste berekende factor bij $12,3^\circ \text{ C}$ bedroeg nl. 25,6 m per 24 uur (afwijking 5,8 % van den gemiddelden factor) en de kleinste 23,4 (afwijking 3,3 % van den gemiddelden k -factor).

Verder kan nog worden opgemerkt, dat in dit geval de correctie van den doorlaatfactor voor het feit, dat in werkelijkheid de drains niet op de ondoorlatende laag liggen, slechts klein is. De gemiddelde doorlaatfactor bij 10° C ,

TABEL III

Geopend werd de drain midden in den bak op ± 90 cm boven den bodem van den bak

De drainafstand bedraagt 10 m

De doorlaatfactor bij 10°C en bij $p_0 = 29,3\%$ bedraagt 22,4 m per 24 uur

Datum	Uur	Temp. in $^{\circ}\text{C}$	Grondwaterstand in m boven den bodem van den bak				Q in m^3 per 24 uur per strekken meter en van één zijde komend	K met capil- laire laag	K met capil- laire laag met correctie
			Buis 1	Buis 24	Gem. buis 1 en 24 $= H_0$	Buis 13 $= h_0$			
25/3 '36	—	—	1,705	1,705	1,705	1,705	—	—	—
26/3 '36	—	—	1,703	1,704	1,704	1,704	—	—	—
27/3 '36	—	—	1,688	1,687	1,688	1,688	—	—	—
28/3 '36	—	—	1,670	1,671	1,671	1,671	—	—	—
30/3 '36	—	—	1,719	1,719	1,719	1,720	—	—	—
31/3 '36	—	—	1,702	1,703	1,703	1,703	—	—	—
1/4 '36	—	—	1,688	1,689	1,689	1,689	—	—	—
2/4 '36	8 u 30 ¹⁾	—	1,716	1,716	1,716	1,717	3,105	24,9 ²⁾	28,8 ²⁾
2/4 '36	9 u	12,5	1,627	1,610	1,619	1,453	2,827	21,8	23,4
2/4 '36	9 u 30	—	1,573	1,557	1,565	1,384	2,606	21,9	23,5
2/4 '36	10 u	12,5	1,518	1,497	1,508	1,333	2,449	22,0	23,7
2/4 '36	10 u 30	—	1,464	1,442	1,453	1,285	2,283	22,0	23,7
2/4 '36	11 u	—	1,417	1,395	1,406	1,244	2,138	22,0	23,7
2/4 '36	11 u 30	—	1,375	1,350	1,363	1,207	2,008	22,1	23,8
2/4 '36	12 u	—	1,333	1,312	1,323	1,174	1,878	22,1	23,8
2/4 '36	12 u 30	—	1,289	1,276	1,283	1,143	1,717	23,7	25,5
2/4 '36	13 u	—	1,250	1,240	1,245	1,118	1,633	22,2	23,9
2/4 '36	13 u 30	—	1,220	1,212	1,216	1,093	1,536	23,6	25,3
2/4 '36	14 u	12,0	1,193	1,187	1,190	1,093	1,440	22,9	24,6
2/4 '36	14 u 30	—	1,170	1,165	1,168	1,054	1,346	22,7	24,4
2/4 '36	15 u	—	1,143	1,139	1,141	1,033	1,238	22,5	24,2
2/4 '36	15 u 30	—	1,129	1,125	1,127	1,023	1,173	22,1	23,8
2/4 '36	16 u	—	1,108	1,105	1,107	1,007	1,089	22,1	23,8
2/4 '36	16 u 30	—	1,089	1,085	1,087	0,993	1,010	21,8	23,4
2/4 '36	17 u	12,0	1,070	1,065	1,068	0,980	0,921	22,3	24,0
2/4 '36	17 u 30	—	1,051	1,045	1,048	0,968	0,843	22,3	24,0
2/4 '36	19 u	—	1,003	0,992	0,998	0,937	0,623	23,8	25,6
2/4 '36	21 u	—	0,957	0,948	0,953	0,914	0,412	23,8	25,6
2/4 '36	23 u	—	0,928	0,923	0,926	0,900	0,270	—	—
	gem.	12,3					gem.	22,5	24,2
3/4 '36	—	—	0,948	0,948	omgerekend op 10°C			21,1	22,7
4/4 '36	—	—	0,962	0,963					
5/4 '36	—	—	0,963	0,963					

Afwijking niet resp. wel gecorrigeerden k -factor (kolom 9 resp. 10) van gemiddelden berekenen $k_{10/p}$: p_0 -waarde resp. 5 en 1 %.

Maximale afwijking van één waarneming van het gemiddelde = 5,8 %.

Correctiefactor = 1,076.

¹⁾ De kraan van de drainbuis werd om 8 u 30 geopend.

²⁾ De grondwaterstand is nog niet op het debiet ingesteld.

zoals deze zonder correctie is berekend, bedraagt 21,1 m per 24 uur (afwijking 5 %), terwijl na het aanbrengen van de correctie 22,7 m per 24 uur werd gevonden.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat de ondoorlatende laag zich dus op rond 0,9 m (= r) onder de drains bevindt, terwijl de halve drain-afstand (e) van het in tabel III behandelde geval 5 m bedraagt en de verhouding van $e : r$ dus is als 5 : 0,9. Verder blijkt de gecorrigeerde vergelijking 4, nl. de vergelijking 21, met groote benadering juist te zijn, terwijl in het gegeven geval de correctie slechts klein is. Hieruit volgt dan ook, dat indien de ondoorlatende laag zich bij denzelfden drainafstand veel dieper onder het vlak van de drains zou hebben bevonden, de vergelijking 4 en zeker 21 nog steeds met voldoende benadering juist zou zijn geweest. Vermoedelijk zal bij een ligging van de ondoorlatende laag van 2 m en mogelijk nog meer onder de drains de vergelijking 21 nog steeds met voldoende benadering juist zijn. Misschien kan de ondoorlatende laag nog dieper onder het vlak van de drains liggen, zonder dat de vergelijking 21 te sterk afwijkende waarden heeft. Veiligheidshalve lijkt het mij echter gewenscht ook de vergelijking 21 niet meer toe te passen, wanneer de ondoorlatende laag zich dieper dan 2 m onder het vlak van de drains bevindt, of althans te bedenken, dat dan grootere fouten mogelijk zijn ¹⁾.

Soortgelijke resultaten als de bovenbeschrevenen zijn verkregen, wanneer de kraan van de westelijke bovenste en de oostelijke bovenste drainbuis werd geopend, waarvoor naar Tabel IV mag worden verwezen. Om de overeenstemming tusschen de met de vergelijking 21 berekende gemiddelde doorlaatfactoren en de met behulp van $k_{10} : 35$, enz. berekende doorlaatfactoren nog eens duidelijk tot uiting te brengen, zijn deze in het onderstaande tabelletje nog eens aangegeven.

Geopend werd de kraan van de drainbuis:	k bij 10°C berekend uit $k_{10} : 35$ en p en p_0	k bij 10°C berekend met behulp van vergelijking 21 en Q , h_0 , H_0 en e	Afwijking van de waarden in kolom 3 in % op de waarden in kolom 2
middenste, bovenste . .	22,4	22,7	1,3
westelijke, " . .	21,0	22,5	7,1
oostelijke, " . .	22,4	20,7	7,8

In overeenstemming met het feit, dat de watervoerende laag nu veel minder sterk verschilt van de laag, waarvoor het gemiddelde luchtgehalte is bepaald, als dat het geval was bij de vroeger besproken proefnemingen (zie I A § 6),

¹⁾ In een volgende publicatie zal ik hierop terugkomen.

blijkt hier de afwijking van de op 2 wijzen bepaalde doorlaatfactoren kleiner dan 10 % te zijn, zoodat de overeenstemming dus voortreffelijk is.

Verder blijkt uit de tabel IV, dat ook de variaties in de doorlaatfactoren, zooals die uit de, van tijd tot tijd verkregen, gegevens werden berekend, klein zijn. Ook de afwijking van de niet gecorrigeerde doorlaatfactoren van de met behulp van de $k_{10:35}$ -waarden, enz. berekende doorlaatfactoren is slechts

TABEL IVa

Geopend oostelijken drain op ± 90 cm boven den bodem van den bak

Drainafstand is $2 \times 9,94 = 19,88$ meter

De doorlaatfactor bij 10°C en $p_o = 29,3$ % bedraagt 22,4 m per 24 uur (18)

Datum	Uur	Tempe- ratuur in $^\circ \text{C}$	Grondwaterstand in m boven den bodem van den bak		Q in m ³ per 24 uur per strek- kenden meter en van één zijde komend	k met capillaire laag van 17,5 cm	k met capillaire laag met correctie
			Buis 1 = h_o	Buis 24 = H_o			
4/1 '37	—	—	1,633	1,636	—	—	—
8/1 '37	—	—	1,600	1,602	—	—	—
9/1 '37	—	—	1,593	1,594	—	—	—
11/1 '37	9 u 15 ¹⁾	6,5	1,602	1,603	4,963	—	—
11/1 '37	10 u 15	—	1,195	1,574	3,415	28,7 ²⁾	29,8 ³⁾
11/1 '37	11 u 15	—	1,118	1,533	2,763	22,1 ³⁾	23,0 ³⁾
11/1 '37	12 u 15	—	1,076	1,489	2,359	19,9 ³⁾	20,7 ³⁾
11/1 '37	13 u 30	—	1,038	1,426	2,067	18,4	19,1
11/1 '37	14 u 15	—	1,023	1,397	1,900	18,2	18,9
11/1 '37	15 u 15	—	1,006	1,359	1,653	17,1	17,8
11/1 '37	16 u 15	—	0,993	1,323	1,491	16,8	17,5
11/1 '37	17 u 15 ²⁾	6,5	0,979	1,289	1,387	17,0	17,7
12/1 '37	8 u 20	—	0,970	1,089	0,504	17,5	18,2
12/1 '37	10 u 20	—	0,911	1,066	0,702	19,8 ³⁾	20,6 ³⁾
12/1 '37	12 u 20	6,7	0,902	1,040	0,564	17,7	18,4
12/1 '37	13 u 45	—	0,898	1,023	0,500	17,5	18,2
12/1 '37	15 u 45	—	0,8915	0,999	0,419	17,2	17,9
12/1 '37	17 u 40	—	0,887	0,978	0,357	17,6	18,3
	gem.	6,6			gem. omgerekend op 10°C	17,5 19,9	18,2 20,7

Afwijking al dan niet gecorrigeerde gemiddelde k-waarde van $k_{10/p}$ -waarde is 7,6 %, resp. 11,2 %.

Grootste afwijking van het gemiddelde = 5,1 %.

Correctiefactor = 1,04.

¹⁾ Om 9 u 15 werd de kraan van den drain geopend.

²⁾ De kraan werd gedeeltelijk dichtgedraaid en den volgenden morgen na de aflezingen weer vol geopend.

³⁾ Grondwaterstanden nog niet ingesteld op debiet.

TABEL IVb

Geopend westelijke drain op ± 90 cm boven den bodem van den bak

Drainafstand is $2 \times 9,94 = 19,88$ meter

De doorlaatfactor bij 10°C en bij $p_o = 28,7\%$ bedraagt 21,0 m per 24 uur

Datum	Uur	Tempe- ratuur in $^\circ \text{C}$	Grondwaterstand in m boven den bodem van den bak		Q in m^3 per 24 uur per strek- kenden meter en van één zijde komend	k met capillaire laag van 17,5 cm	k met capillaire laag met correctie
			Buis 1 $= h_o$	Buis 24 $= H_o$			
5/12 '36	—	—	1,575	1,577	—	—	—
8/12 '36	—	—	1,531	1,533	—	—	—
0/12 '36	—	—	1,517	1,517	—	—	—
10/12 '36	—	—	1,523	1,525	—	—	—
12/12 '36	—	—	1,553	1,554	—	—	—
14/12 '36	8 u 25 ¹⁾	4,5	1,571	1,572	4,657	—	—
14/12 '36	9 u 25	—	1,509	1,181	3,005	30,6 ²⁾	31,8 ²⁾
14/12 '36	10 u 30	—	1,463	1,110	2,472	23,8 ²⁾	24,8 ²⁾
14/12 '36	11 u 30	—	1,432	1,077	2,173	21,3 ²⁾	22,0 ²⁾
14/12 '36	12 u 30	—	1,400	1,052	1,879	19,1	19,9
14/12 '36	13 u 30	—	1,369	1,035	1,678	18,1	18,8
14/12 '36	14 u 30	—	1,321	1,023	1,527	18,0	19,7
14/12 '36	15 u 30	—	1,297	1,011	1,402	18,3	19,0
14/12 '36	18 u 30	5,0	1,268	1,003	1,262	18,1	18,8
14/12 '36	17 u 30 ²⁾	—	1,242	0,993	1,161	17,9	18,6
15/12 '36	9 u 35	—	1,108	1,037	0,325	18,2	18,9
15/12 '36	10 u 35	—	1,100	0,958	0,815	23,2 ²⁾	24,1 ²⁾
15/12 '36	11 u 35	5,5	1,090	0,952	0,657	19,8	20,6
15/12 '36	12 u 35	—	1,068	0,946	0,506	17,4	18,1
15/12 '36	14 u 35	—	1,044	0,943	0,401	16,9	17,6
15/12 '36	16 u 35 ²⁾	—	1,024	0,937	0,352	17,4	18,1
16/12 '36	9 u	—	0,965	0,939	0,116	19,6	20,4
16/12 '36	11 u	5,0	0,959	0,913	0,238	23,2 ²⁾	24,1 ²⁾
16/12 '36	13 u	—	0,952	0,910	0,202	17,2	17,9
16/12 '36	15 u	—	0,945	0,907	0,189	20,1	20,9
16/12 '36	17 u	—	0,9375	0,9045	0,141	21,3	22,2
gem.		5,0	—	—	gem.	18,6	19,3
				ontgerekend op 10°C		21,6	22,5

Afwijking al dan niet gecorrigeerde gemiddelde k-waarde van $k_{10/p}$ -waarde is 7,1 %, resp. 2,8 %.

Grootste afwijking van het gemiddelde = 14,5 %.

Correctiefactor = 1,04.

1) Om 8 u 25 werd de kraan van den drain geopend.

2) De kraan werd gedeeltelijk dichtgedraaid en den volgende morgen na de aflezingen weer vol geopend.

3) Grondwaterstand nog niet ingesteld op debiet.

Kleinste gemiddelde verschil tusschen H_o en h_o is 2,6 cm op 10 m of dus het gemiddelde verval 0,0026.

klein, waaruit dus blijkt, dat bij verwaarloozing van deze correctie slechts een kleine fout zou zijn gemaakt.

Samengevat blijkt, dat de gecorrigeerde vergelijking 4, nl. de vergelijking 21, met meer dan voldoende benadering juist is, terwijl ook de vergelijking 4 onder de omstandigheden van de proefnemingen nog slechts geringe fouten geeft. De gecorrigeerde vergelijking 4, nl. de vergelijking 21, is dan ook waarschijnlijk nog geldig, indien de ondoorlatende laag veel dieper onder het maaiveld ligt dan dit bij de proefnemingen het geval was. Voorloopig is het echter gewenscht de vergelijking 21 niet meer toe te passen, indien de diepte van de ondoorlatende laag onder de drains (= r) meer dan 2 m bedraagt, of althans er dan op te rekenen, dat grootere fouten mogelijk zijn.

§ 3. ER IS EEN HANGKROMME VAN HET PHREATISCH OPPERVLAK NAAR DE SLOOT, WAARIN DE GREPPELS OF DRAINS, ENZ. UITMONDEN

Is er een hangkromme in het phreatisch oppervlak naar de sloot, waarin de greppels, drains, enz. uitmonden, dan is de behandeling van dit geval gelijk aan het geval, dat de grond onder den bodem van de greppels, drains, enz. ondoorlatend is. De vergelijkingen zijn immers niet of nauwelijks veranderd, indien de correctie voor het feit, dat in werkelijkheid de drains niet op de ondoorlatende laag liggen resp. de greppels niet in werkelijkheid tot de ondoorlatende laag zijn doorgetrokken, enz., wordt aangebracht. Ik meen dan ook naar het reeds behandelde geval, waarbij de bodem van de greppels gevormd wordt door den bovenkant van de ondoorlatende laag resp. de grond onder de drains ondoorlatend is (zie I A § 7), te mogen verwijzen.

II. *Heterogene gronden*

A. Inleiding

In het voorafgaande gedeelte van dit hoofdstuk zijn dus de vergelijkingen ontwikkeld en besproken, zooals ze bij homogene of homegeen gedachte gronden (19) kunnen voorkomen. Voor de meeste Nederlandsche gronden moet echter rekening worden gehouden met het feit, dat de grond niet homogeen is, maar dat de doorlatendheid verticaal in het profiel, dan wel in horizontale richting, verandert. Daartoe moeten nieuwe vergelijkingen worden ontwikkeld. We zullen hieronder nu stap voor stap de homogeniteit van den grond laten vallen en wel beginnen met de behandeling van het geval, dat de doorlatendheid van den grond met de diepte onder het maaiveld verandert; dus dat de grond in vertikale richting (y -richting) heterogeen, in horizontale richting daarentegen

nog homogeen is. Daarna zal het geval besproken worden, dat de grond ook heterogeen wordt in de lengterichting van de drains (z-richting), waarbij tevens de invloed van een belangrijken rechtstreekschen afvoer naar de sloot in aanmerking zal worden genomen. Ten slotte zou nog het geval behandeld moeten worden, dat de grond ook in de horizontale richting loodrecht de drains (x-richting) heterogeen is. Dit geval is hoogstens slechts van ondergeschikt belang, daar de afstand van de drains, greppels, enz. klein is en zal dan ook niet verder besproken worden (20). Ook het geval, dat de grond in de z-richting heterogeen is, zal alleen in bijzondere gevallen van zooveel belang zijn, dat het noodzakelijk is hiermede rekening te houden (zie sub II D van dit hoofdstuk). De heterogeniteit in de *verticale* richting zal echter daarentegen van zeer groot belang blijken te zijn, daar zij de ligging van den grond in het profiel aangeeft en daarmede in groote lijnen ook de structuur van den grond in deze lagen, terwijl zij verder van groot belang is voor het effect van de drainage in verband met drainafstand en draindiepte. Ook in dit geval zal nagegaan worden, wat men eigenlijk bereikt, wanneer men de vereenvoudigde vergelijkingen toepast; dat wil zeggen de grond dus als homogeen beschouwt. Dit laatste is om 2 redenen van belang. In de eerste plaats nl. om met behulp van de gegeven methode (grondwaterstand-debietmethode) door zoo mogelijk 1 cijfer (of althans door zoo weinig mogelijk cijfers) toch de grond van een bepaald terrein te kunnen karakteriseeren. In de tweede plaats echter ook om aan diegenen, die deze methode van onderzoek zouden willen gebruiken, met behulp van allereenvoudigste berekeningen toch cijfers te geven, waaraan zij houvast kunnen hebben. Dit laatste gedeelte zal echter in hoofdstuk V worden behandeld, waarnaar verwezen kan worden.

Ten slotte kan nog worden opgemerkt, dat vele opmerkingen, die bij de behandeling van de homogene gronden zijn gemaakt, ook gelden voor de heterogene gronden, zoo b.v. over den critischen regenval, enz. Korthedshalve kan hierop echter niet worden teruggekomen.

Voor de afleiding van de vergelijkingen voor heterogene gronden behoeven geen andere veronderstellingen worden gemaakt, dan reeds bij de homogene gronden zijn aangenomen. Hieruit volgt tevens, dat, daar de geldigheid van de vergelijkingen voor homogene gronden reeds is bewezen, ook de vergelijkingen voor de heterogene gronden met een zelfde benadering juist zullen zijn afgezien van het voorbehoud, dat bij enkele vergelijkingen bij haar afleiding is gemaakt. Ook deze vergelijkingen zullen voor enkele hoofdtypen experimenteel worden gecontroleerd. Deze contrôlemetingen zijn nog niet verricht. Zooals reeds is opgemerkt, zullen deze onderzoeken echter later geschieden en de resultaten daarvan in een latere publicatie worden aangegeven.

B. De ondergrond is ondoorlatend

§ 1. ALGEMEENE OPMERKINGEN

Het zal duidelijk zijn, dat principieel het vraagstuk is opgelost op welke wijze een verandering van de doorlatendheid van den grond met de diepte onder het maaiveld (of beter met de hoogte boven de ondoorlatende laag) in rekening is te brengen, wanneer het slechts gelukt de volgende gevallen op te lossen, nl.:

- I. De grond onder het maaiveld bestaat uit scherp begrensde lagen; in iedere laag is de grond echter homogeen. In dit geval verandert de doorlatendheid dus sprongsgewijze (discontinue) met de diepte onder het maaiveld.
- II. De doorlatendheid van den grond verandert geleidelijk (continue) met de diepte onder het maaiveld.

Zijn de twee bovengenoemde gevallen opgelost, dan zal het duidelijk zijn, dat ook combinaties van deze gevallen op te lossen zijn, waarbij dus in één of meer lagen de doorlatendheid bovendien nog op een continue wijze verandert. Hierop zal echter korthedshalve slechts in een enkel geval kunnen worden ingegaan.

§ 2. AFLEIDING VAN DE VERGELIJKINGEN

- α In het watervoerend profiel komen scherp begrensde lagen voor, d.w.z. de doorlatendheid verandert sprongsgewijze, terwijl de grond in iederen laag op zich zelf homogeen is*

a. Inleiding

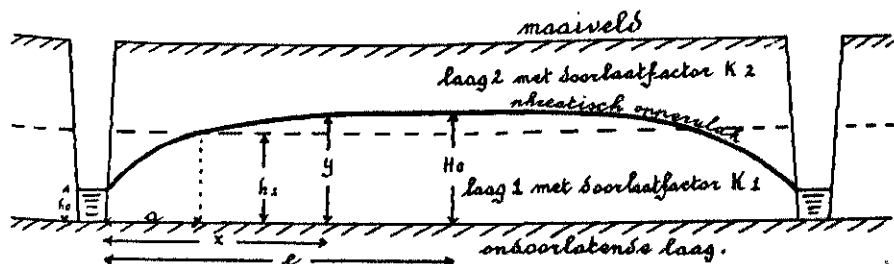
Het zal duidelijk zijn, dat, wanneer het phreatisch oppervlak zich midden tusschen de drains, enz. nog in de onderste laag bevindt, de geheele waterbeweging zich in deze onderste laag afspeelt en daar deze onderste laag op zich zelf homogeen is, kunnen hiervoor dus de vergelijkingen voor homogene gronden worden toegepast. Anders wordt dit, wanneer het phreatisch oppervlak zich midden tusschen de drains, enz. in de bovenste laag bevindt. In dit geval komt dus de heterogeniteit van den grond tot uiting. Hier zijn verder 2 gevallen mogelijk, nl., dat het water boven de drains of in de greppel, enz. zich bevindt:

1. In de onderste laag (zie figuur 8) en
2. In de bovenste laag (zie figuur 9).

b. Er komen 2 lagen in het profiel voor

1. Afleiding van de vergelijking, indien h_0 kleiner is dan h_1

We zullen beginnen met het in de inleiding genoemde geval 1 (zie figuur 8), waarbij dus het water in de greppel, resp. boven den drain, enz. zich in de onderste laag bevindt of dus, waarbij h_0 kleiner is dan h_1 . Daar we ook het



Figuur 8

geval, dat meerdere lagen in het watervoerend profiel voorkomen, in oogen-schouw zullen nemen, zullen we enkele grootheden steeds op dezelfde wijze aangeven. De onderste laag boven den boden van de greppels resp. boven het vlak van de drains, enz. zal altijd laag 1 en de doorlaatfactor daarvan k_1 en de afstand van den bovenkant tot het vlak van de drains h_1 genoemd worden. De daarop volgende laag heet laag 2; de doorlaatfactor k_2 en de afstand van den bovenkant van dit vlak tot het vlak van de drains h_2 , enz. (21).

Beschouwen we nu eerst het geval 1 (zie figuur 8), dan is dus, wanneer x kleiner is dan a en y kleiner is dan h_1

$$q_x = \frac{Q(e-x)}{e} = y k_1 \frac{dy}{dx} \quad (23a)$$

of geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_0$ tot $y = y$:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_1 y^2 - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \quad (23)$$

Deze vergelijking is dus dezelfde als de vergelijking 3. Zij geldt echter nu alleen van $x = 0$ tot $x = a$ en van $y = h$ tot $y = h_1$.

Voor $x = a$ en $y = h_1$ is dus:

$$Q \left(a - \frac{a^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_1 h_1^2 - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \quad (24)$$

Voor x grooter dan a en y grooter dan h_1 is:

$$q_x = \frac{Q(e-x)}{e} = h_1 k_1 \frac{dy}{dx} + (y-h_1) k_2 \frac{dy}{dx} \quad (25)$$

waarin dus de eerste term achter het gelijkteken de strooming volgens de wet van DUPUIT-DARCY in de laag 1 en de tweede term deze strooming door laag 2, voor zoover deze in het stroomingsprofiel is opgenomen, aangeeft.

Noemen we nu $n_1 = \frac{k_2}{k_1}$ (evenals bij de k -factoren zal ook in de indices

van de factoren n steeds eenzelfde regelmaat heerschen, zoodat $n_2 = \frac{k_3}{k_2}$, $n_3 = \frac{k_4}{k_3}$, enz.) dan is dus na eenige verandering de vergelijking 25 te schrijven als:

$$\frac{Q(e-x)}{e} = y k_2 \frac{dy}{dx} + h_1 (1-n_1) k_1 \frac{dy}{dx} \quad (26)$$

Geïntegreerd van $x = a$ tot $x = x$ en van $y = h_1$ tot $y = y$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) - Q \left(a - \frac{a^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_2 y^2 + h_1 (1-n_1) k_1 y - \frac{1}{2} k_2 h_1^2 - h_1^2 (1-n_1) k_1 \quad (27)$$

Deze vergelijking geldt alleen van $x = a$ en $y = h_1$ tot $x = e$ en $y = H_0$.

Vullen we nu de vergelijking 24 in de vergelijking 27 in, dan ontstaat na eenige vereenvoudiging de volgende vergelijking, die dus voor het geheele bereik van x en y geldig is:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_2 y^2 + h_1 (1-n_1) k_1 y + \frac{1}{2} k_1 h_1^2 (n_1-1) - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \quad (28)$$

In verband met den vorm van het phreatisch oppervlak kan worden opgemerkt, dat indien de doorlatendheid van de bovenste laag het grootste is, het phreatisch oppervlak, in vergelijking met dit oppervlak in een overeenkomstig geval in een homogenen grond, afgeplat is. Is daarentegen de doorlatendheid in de ondersten laag het grootste, dan zal het gedeelte van het phreatisch oppervlak, dat zich in laag 2 bevindt, sterker gekromd zijn, dan dit in een homogenen grond het geval zou zijn.

Verder zal voor $x = e$ en $y = H_0$ de vergelijking 28 overgaan in:

$$Q = \frac{2}{e} \left(\frac{1}{2} k_2 H_0^2 + h_1 (1-n_1) k_1 H_0 + \frac{1}{2} k_1 h_1^2 (n_1-1) - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \right) \quad (29)$$

Indien we het debiet in een laag water (meters per etmaal) uitdrukken, ontstaat uit vergelijking 29 de vergelijking:

$$S = \frac{Q}{e} = \frac{2}{e^2} \left(\frac{1}{2} k_2 H_0^2 + h_1 (1-n_1) k_1 H_0 + \frac{1}{2} k_1 h_1^2 (n_1-1) - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \right) \quad (30)$$

Tenslotte zal de term met h_0 verdwijnen, wanneer geen water boven de drains of in de greppels staat.

Vullen we in vergelijking 29 voor $H_0 = h_1 + m'_0$ in, waarin m'_0 den grondwaterstand midden tusschen de greppels, drains enz. en boven den bovenkant van laag 1 voorstelt, dan ontstaat:

$$Q = \frac{2h_1 k_1 H_0 - k_1 h_1^2 - k_1 h_0^2 + k_2 m_0'^2}{e} \quad (29a)$$

waarin dus alleen in den eersten term H_0 blijft staan. Zooals we later zullen zien is deze vergelijking weer het eenvoudigste type voor een serie vergelijkingen, die voor de berekening voor de doorlaatfactoren uit de $Q : m_0$ -lijn worden gebruikt (zie Hoofdstuk III, E). Ook de nog te ontwikkelen vergelijkingen voor 2 of meer lagen in het profiel zijn op een soortgelijke wijze te schrijven. Met dit eene voorbeeld zal echter worden volstaan.

2. De afgeleide vergelijkingen voldoen aan de te stellen eischen.

In de eerste plaats kan worden opgemerkt, dat de vergelijking 28 overgaat in de vergelijking 3 (of 23), wanneer $k_1 = k_2$ of $n_1 = 1$. De middenste termen achter het gelijktteken worden 0, terwijl, daar $k_1 = k_2$, voor den doorlaatfactor weer de letter k kan worden geschreven.

In de tweede plaats blijkt, dat de kromme van het phreatisch oppervlak bij het punt, waar $x = a$ en $y = h_1$ geen knik vertoont, maar de beide curven hier vloeiend in elkaar over gaan. In dit punt is immers zoowel volgens de vergelijking 23a als volgens de vergelijking 25 de waarde van $\frac{dy}{dx}$:

$$\left. \frac{dy}{dx} \right|_{\substack{y = h_1 \\ x = a}} = \frac{Q(e - a)}{eh_1 k_1}.$$

In de derde plaats zullen we nagaan, wat er geschiedt, wanneer k_2 steeds groter wordt ten opzichte van k_1 . Het zal duidelijk zijn dat dan — daar n_1 steeds groter wordt — de vergelijking 28 tenslotte over zal gaan in de vergelijking:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_2 y^2 - h_1 n_1 k_1 y + \frac{1}{2} n_1 k_1 h_1^2 \quad (31)$$

Gemakkelijk is nu in te zien, dat dit beteekent, dat de ondoorlatende laag op de hoogte h_1 boven den bodem van de greppels is gekomen of m. a. w., dat de strooming in de onderste laag (laag 1) nul is geworden. Dit blijkt direct,

wanneer we in de vergelijking 31 voor y de waarde schrijven: $y = h_1 + u$. Ingevuld blijft van de vergelijking 31 over:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_2 u^2 \quad (32)$$

hetgeen niets anders wil zeggen, dan dat de ondoorlatende laag nu op h_1 meters boven den bodem van de greppels, enz., ligt en zich geen water meer in de greppels bevindt, enz. Ook dit laatste is juist, daar we immers zijn uitgegaan van het geval, dat de waterspiegel in de greppels, resp. boven de drains, enz. zich in de laag 1 bevindt of h_0 gelijk of kleiner is dan h_1 .

Wordt ten slotte in de vierde plaats de grond in de laag 1 steeds meer doorlatend ten opzichte van de doorlatendheid in de laag 2 dan zal de horizontale waterbeweging in de bovenste laag nul of althans te verwaarloozen zijn ten opzichte van de strooming in de tweede laag (de vertikale doorlatendheid van deze laag kan natuurlijk niet nul zijn, daar in het beschouwde geval dan geen overtollige neerslag meer door den grond zou kunnen worden afgevoerd). In dit geval is dus n_1 zeer klein en te verwaarloozen, waardoor de vergelijking 28 overgaat in:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = h_1 k_1 y - \frac{1}{2} k_1 h_1^2 - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \quad (33)$$

De vergelijking 33 zou men ook afleiden, wanneer men veronderstelde, dat de laag 2 alleen in verticale richting doorlatend was of de overtollige neerslag hierdoor verticaal — dus met een verval 1 — passeerde en dus de strooming in horizontale richting alleen in de laag 1 zou optreden. Daar immers h_0 kleiner is dan h_1 , zal het phreatisch oppervlak op een afstand a van de greppel of den drain, enz., den bovenkant van laag 1 snijden. Tot dit punt geldt dus weer gewoon de vergelijking 23, die voor $x = h_1$ en $y = a$ overgaat in de vergelijking 24. Voor de waarden van x grooter dan a en voor de waarden van y grooter dan h_1 geldt, daar in horizontaalste richting alleen laag 1 doorstroomd wordt:

$$q_x = Q \left(\frac{e-x}{e} \right) = k_1 h_1 \frac{dy}{dx} \quad (34)$$

Geïntegreerd van $x = a$ tot $x = x$ en van $y = h_1$ tot $y = y$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) - Q \left(a - \frac{a^2}{2e} \right) = h_1 k_1 y - h_1^2 k_1 \quad (35)$$

De vergelijking 24 hierin ingevuld geeft:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = h_1 k_1 y - h_1^2 k_1 + \frac{1}{2} k_1 h_1^2 - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \quad (36)$$

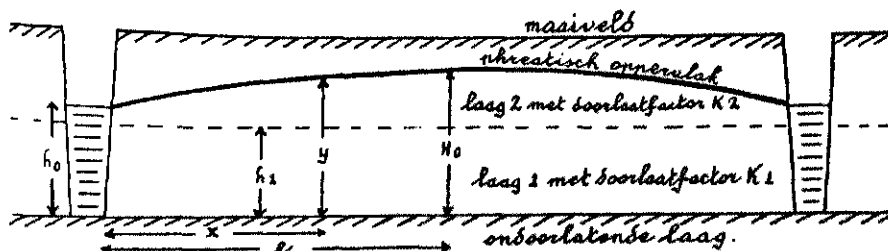
Na vereenvoudiging ontstaat hieruit de vergelijking 33.

Uit het bovenstaande volgt dus, dat de ontwikkelde vergelijking aan de te voren stellen eischen voldoet. Ook bij de nog te ontwikkelen vergelijkingen blijkt dit steeds het geval te zijn. Hierop zal dan ook niet meer worden teruggekomen.

3. Afleiding van de vergelijking, indien h_0 groter is dan h_1

Beschouwen we nu het geval, dat het water in de greppels of boven de drains, enz. zich in de bovenste laag bevindt, d. w. z., dat h_0 groter is dan h_1 , dan zien we uit figuur 9, dat voor alle waarden van x en y geldt:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = k_1 h_1 \frac{dy}{dx} + (y - h_1) k_2 \frac{dy}{dx} \quad (37)$$



Figuur 9

Na integratie van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_0$ tot $y = y$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_2 y^2 + h_1 (1 - n_1) k_1 y - h_1 (1 - n_1) k_1 h_0 - \frac{1}{2} k_2 h_0^2 \quad (38)$$

Het zal duidelijk zijn, dat in dit geval h_0 niet 0 kan worden, maar minstens gelijk aan h_1 moet zijn.

Voor den grondwaterstand midden tusschen de greppels, drains, enz., waar dus $x = e$ en $y = H_0$, gaat de vergelijking 38 over in de vergelijking:

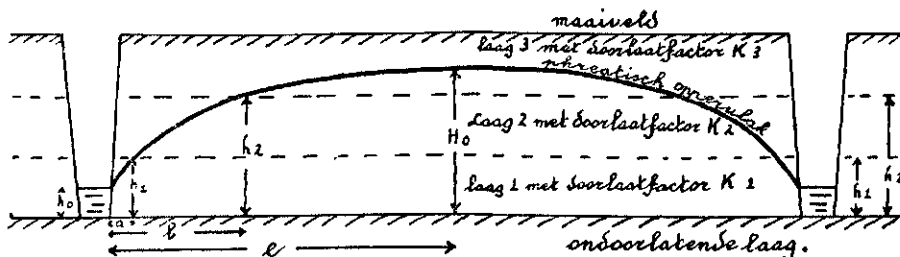
$$Q = \frac{2}{e} \left(\frac{1}{2} k_2 H_0^2 + h_1 (1 - n_1) k_1 H_0 - h_1 (1 - n_1) h_0 k_1 - \frac{1}{2} k_2 h_0^2 \right) \quad (39)$$

c. Er komen 3 lagen in het profiel voor

1. Afleiding van de vergelijking voor het geval dat h_0 kleiner is dan h_1

Komen er 3 lagen in het profiel voor, dan zijn er 3 gevallen mogelijk. We zullen beginnen met te veronderstellen, dat het water in de greppels resp. boven de drains zich in de eerste laag bevindt, d. w. z., dat h_0 kleiner is dan h_1 .

Dit geval is weergegeven in figuur 10. In de tekening is, wat den vorm van het phreatisch oppervlak betreft, verondersteld, dat de doorlatendheid van laag tot laag onder het maaiveld afneemt. Voor de afleiding van de vergelijking heeft dit geen beteekenis. Daar de afleiding van deze vergelijking op analoge



Figuur 10

wijze geschiedt, als die van de vergelijking voor 2 lagen, zal deze afleiding hier in verkorten vorm worden aangegeven.

Voor de waarden van $x = 0$ tot $x = a$ en voor de waarden van $y = h_0$ tot $y = h_1$ geldt weer:

$$Q \left(a - \frac{a^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_1 h_1^2 - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \quad (40)$$

Voorts de waarden van $x = a$ tot $x = b$ en de waarden van $y = h_1$ tot $y = h_2$ geldt:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = h_1 k_1 \frac{dy}{dx} + (y-h_1) k_2 \frac{dy}{dx} \quad (41)$$

Geïntegreerd van $x = a$ tot $x = b$ en van $y = h_1$ tot $y = h_2$ ontstaat na vereenvoudiging:

$$Q \left(b - \frac{b^2}{2e} \right) - Q \left(a - \frac{a^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_2 h_2^2 + h_1 (1-n_1) k_1 h_2 - \frac{1}{2} k_2 h_1^2 - h_1^2 (1-n_1) k_1 \quad (42)$$

Vullen we de vergelijking 40 in de vergelijking 42 in, dan ontstaat:

$$Q \left(b - \frac{b^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_2 h_2^2 + h_1 (1-n_1) k_1 h_2 + \frac{1}{2} k_1 h_1^2 (n_1-1) - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \quad (43)$$

Voor de waarden van x grooter dan b en de waarden van y grooter dan h_2 geldt:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = h_1 k_1 \frac{dy}{dx} + (h_2-h_1) k_2 \frac{dy}{dx} + (y-h_2) k_3 \frac{dy}{dx} \quad (44)$$

waarin de 3 termen achter het gelijkteken de strooming in de eerste, tweede en derde laag volgens de wet van Dupuit-Darcy aangeven. Geïntegreerd van $x = b$ tot $x = x$ en van $y = h_2$ tot $y = y$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) - Q \left(b - \frac{b^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} y^2 k_3 + h_1 k_1 (1 - n_1) y + h_2 k_2 (1 - n_2) y - \frac{1}{2} h_2^2 k_3 - h_1 h_2 k_1 (1 - n_1) - h_2^2 k_2 (1 - n_2) \quad (45)$$

Vullen we de waarde van $Q \left(b - \frac{b^2}{2e} \right)$ uit de vergelijking 43 in de vergelijking 45 in, dan ontstaat na vereenvoudiging de volgende vergelijking, die dus voor het geheele gebied van x en y geldig is:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} y^2 k_3 + h_1 k_1 y (1 - n_1) + h_2 k_2 y (1 - n_2) + \frac{1}{2} h_2^2 k_2 (n_2 - 1) + \frac{1}{2} h_1^2 k_1 (n_1 - 1) - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \quad (46)$$

Staat er geen water in de greppels of boven de drains, enz. dan is dus $h_0 = 0$ en vervalt dus de term, waarin h_0 voorkomt. Voor het geval, dat de grondwaterstand midden tusschen de greppels, drains, enz. wordt bepaald en waarbij dus $x = e$ en $y = H_0$, gaat de vergelijking 46 over in:

$$Q = \frac{2}{e} \left(\frac{1}{2} H_0^2 k_3 + h_1 k_1 H_0 (1 - n_1) + h_2 k_2 H_0 (1 - n_2) + \frac{1}{2} h_2^2 k_2 (n_2 - 1) + \frac{1}{2} h_1^2 k_1 (n_1 - 1) - \frac{1}{2} k_1 h_0^2 \right) \quad (47)$$

Tenslotte is het debiet ook nog weer uit te drukken als een schijf water (S) in meters per 24 uur. Daar $S = \frac{Q}{e}$ is dus deze vergelijking zeer eenvoudig uit de vergelijking 47 af te leiden.

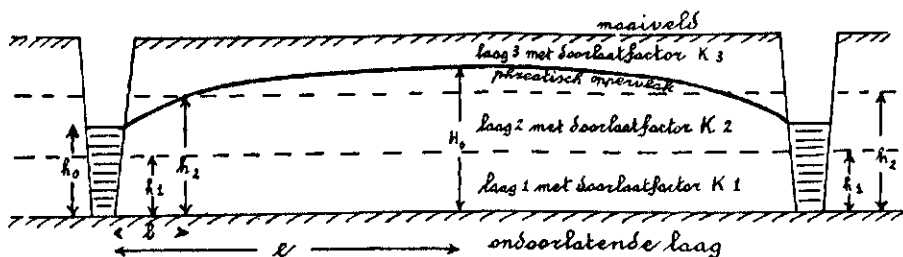
2. Afleiding van de vergelijking voor het geval, dat h_0 kleiner is dan h_2 , maar grooter is dan h_1

Bevindt de waterspiegel in de greppels of boven de drains, enz. zich in de middenste laag (laag 2; zie figuur 11) dan geldt blijkbaar, dat van $x = 0$ tot $x = b$ en $y = h_0$ tot $y = h_2$:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = k_1 h_1 \frac{dy}{dx} + k_2 (y - h_1) \frac{dy}{dx} \quad (48)$$

Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = b$ en van $y = h_0$ tot $y = h_2$ ontstaat:

$$Q \left(b - \frac{b^2}{2e} \right) = k_1 h_1 h_2 + \frac{1}{2} k_2 h_2^2 - h_1 h_2 k_2 - k_1 h_1 h_0 - \frac{1}{2} k_2 h_0^2 + h_1 k_2 h_0 \quad (49)$$



Figuur 11

Voor de waarden van x grooter dan b en voor de waarden van y grooter dan h_2 geldt:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = k_1 h_1 \frac{dy}{dx} + k_2 (h_2 - h_1) \frac{dy}{dx} + k_3 (y - h_2) \frac{dy}{dx} \quad (50)$$

Na integratie van $x = b$ tot $x = x$ en van $y = h_2$ tot $y = y$ ontstaat na vereenvoudiging en na invulling van de vergelijking 49:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} y^2 k_3 + h_1 k_1 y (1 - n_1) + h_2 k_2 y (1 - n_2) + \frac{1}{2} h_2^2 k_2 (n_2 - 1) + k_1 h_1 h_0 (n_1 - 1) - \frac{1}{2} k_2 h_0^2 \quad (51)$$

Het zal duidelijk zijn, dat in dit geval h_0 niet kleiner dan h_1 en niet grooter dan h_2 kan zijn. Ook nu weer kunnen we, indien de grondwaterstand midden tusschen de greppels, drains, enz. wordt beschouwd, in de vergelijking 51 voor x en y resp. invullen e en H_0 , hetgeen hier korthedshalve niet verder zal worden uitgevoerd.

3. Afleiding van de vergelijking voor het geval, dat h_0 grooter is dan h_2

Bevindt ten slotte de waterspiegel in de greppels of boven de drains, enz. zich in de derde laag, m.a.w. is h_0 grooter dan h_2 , dan geldt voor de geheele laag:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = k_1 h_1 \frac{dy}{dx} + k_2 (h_2 - h_1) \frac{dy}{dx} + k_3 (y - h_2) \frac{dy}{dx} \quad (52)$$

Na integratie van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_0$ tot $y = y$ ontstaat, na vereenvoudiging:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_3 y^2 + h_1 k_1 y (1 - n_1) + h_2 k_2 y (1 - n_2) + h_1 k_1 h_0 (n_1 - 1) + h_2 k_2 h_0 (n_2 - 1) - \frac{1}{2} k_3 h_0^2 \quad (53)$$

In dit geval moet dus h_0 of gelijk of grooter zijn dan h_2 . Voor den grondwaterstand midden tusschen de greppels, drains, enz. moet dus voor x en y in de vergelijking 53 weer resp. e en H_0 worden ingevuld, enz.

d. Er komen meer dan 3 lagen in het profiel voor

Komen er meer dan 3 lagen in het watervoerend profiel voor, dan kan men daarvoor op analoge wijze de vergelijkingen opstellen. Reeds bij een nadere beschouwing van de reeds opgestelde vergelijkingen zal men deze vergelijkingen zonder meer kunnen opschrijven, daar de vergelijkingen een gelijksoortige bouw hebben. Ik zal hier deze gevallen niet nader beschouwen; te meer daar de vergelijkingen voor meer dan 3 lagen in het profiel wel niet vaak gebruikt zullen worden. De berekeningen worden immers des te tijdroovender, naarmate het aantal te beschouwen lagen in het profiel toeneemt, terwijl bovendien voor de toepassing daarvan steeds des te meer gegevens ter beschikking moeten staan.

e. Bespreking van de gegevens, waarover men voor de toepassing van de vergelijkingen moet beschikken

Aan het slot van sub d werd opgemerkt, dat hoe meer lagen men in het profiel beschouwt des te grooter het aantal gegevens moet zijn om de vergelijkingen te kunnen oplossen. Het is immers bekend, dat alleen een vergelijking met 1 onbekende direct is op te lossen. Voor een vergelijking met 2 onbekenden zijn 2 van elkaar onafhankelijke vergelijkingen noodig, enz. Beschouwen we nu b.v. eens vergelijking 47 en willen we de doorlaatfactoren van de verschillende lagen berekenen, dan zijn er dus in deze vergelijking 3 onbekenden, nl. k_1 , k_2 , k_3 . De factoren Q , e , H_0 , h_0 , h_1 en h_2 zijn bekend, waarbij er om gedacht moet worden, dat n_1 en n_2 resp. de verhouding aangeven van $\frac{k_2}{k_1}$ en $\frac{k_3}{k_2}$.

De bedoelde vergelijking is dus op te lossen, indien bij 3 verschillende debietwaarden de 3 daarbij behorende waarden van H_0 en h_0 bekend zijn. Op welke wijze deze gegevens het beste verkregen kunnen worden, zal bij de bespreking van de $Q-H_0$ - en $Q-h_0$ -lijnen (zie hoofdstuk III) besproken worden. Hier

kan worden volstaan met op te merken, dat op zich zelf 3 willekeurige waarnemingen van Q , h_0 en H_0 , waarbij deze zooveel mogelijk verschillend moeten zijn, voldoende zijn. De grootst mogelijke nauwkeurigheid wordt dan echter niet bereikt.

Verder spreekt het vanzelf, dat ook b.v. de factor Q of H_0 berekend kan worden. In dit geval moeten echter alle andere factoren bekend zijn. De k -waarden kan men bepalen met behulp van pompproeven en zoover het zandgronden mochten zijn door een andere reeds vaker genoemde methode in het laboratorium. De factoren Q en h_0 moeten dan echter worden aangenomen, indien men de factor H_0 wil berekenen. Dit laatste beteekent dus, dat men den grondwaterstand midden tusschen de greppels, drains, enz. kan berekenen, indien men daarvoor b.v. een maximale hoeveelheid overtollig regenwater aanneemt, die door den grond naar de greppels, drains, enz. moet worden afgevoerd. Tevens moet dan nog de hoogte van den waterstand in de greppels of boven de drains worden aangenomen. Hierbij moet worden opgemerkt, dat altijd iets water in de greppels achterblijft en boven de drains ook vaak water (althans bij hogere grondwaterstanden) voorkomt. Schrijver dezes heeft althans zelfs in overigens goed doorlatende kleigronden (nl. te Nieuwolda) water boven de drains waargenomen. Natuurlijk kan men bij de bovenbedoelde berekeningen $h_0 = 0$ stellen en daarmee dezen factor uit de vergelijkingen laten verdwijnen; men moet dan echter niet vergeten, dat men daardoor tot gunstiger resp. veel gunstiger resultaten *kan* komen als in werkelijkheid zullen voorkomen. Dit gelijk nul stellen van h_0 is dan ook alleen geoorloofd, indien men voorzorgen neemt, dat de drainsleuven goed doorlatend zijn en blijven (zie hoofdstuk VI), zoodat men een goede waarborg heeft, dat h_0 hetzij nul of hoogstens te verwaarloozen klein zal blijven.

f. Enkele opmerkingen over de toepassing van de ontwikkelde vergelijkingen

Verder moeten hier over de toepassing van de ontwikkelde vergelijkingen nog de volgende opmerkingen worden gemaakt; zie ook hoofdstuk III en hoofdstuk V.

In de eerste plaats zal men natuurlijk deze vergelijkingen gebruiken, wanneer er werkelijk 2 of meer duidelijk te onderscheiden lagen in het profiel voorkomen.

In de tweede plaats *kan* men deze vergelijkingen ook toepassen, wanneer in het profiel geen scherp te onderscheiden lagen voorkomen, maar de doorlatendheid b.v. geleidelijk met de diepte onder het maaiveld afneemt, enz. Neemt men immers 2 lagen aan, dan berekent men met de betreffende verge-

lijking een soort gemiddelde k -factor, nl. den effectieven factor (zie hoofdstuk V) van deze twee lagen. Dit kan gewenscht zijn, wanneer men b.v. de verbetering van de doorlatendheid van den grond (verbetering van de structuur) wil nagaan, zooals deze in verloop van tijd is opgetreden en in het betreffende terrein 2 of meer detailontwateringssystemen van verschillende diepte (resp. op verschillende diepte) aanwezig zijn. Zijn b.v. greppels van 60 cm en drains op 100 cm diepte aanwezig, dan zal men door de volgende 2 lagen te kiezen, nl. 0—60 en 60—100 cm, in elk geval een goede vergelijking tusschen de uitwerking van deze greppels en drains kunnen verkrijgen. Het spreekt wel vanzelf, dat men daarbij van denzelfden grondwaterstand (b.v. 20 cm onder het maaiveld, enz.) moet uitgaan, terwijl het van het profiel afhangt of men de ondoorlatende laag op 100 cm onder het maaiveld mag aannemen. Door de keuze van de laag van 60—100 cm onder het maaiveld is reeds aangegeven, dat in het bedoeld geval dit als mogelijk is verondersteld. Blijkt echter deze laag dieper dan 100 cm te liggen dan moet dit in rekening worden gebracht door het totaal geleidingsvermogen voor water voor den grond dieper dan 100 cm onder het maaiveld in de vergelijkingen in te voeren (zie hoofdstuk III, E). Ten slotte kan het ook mogelijk zijn, dat uit de $Q-m_0$ -lijnen blijkt, dat men de grond onder den bodem van de greppels verhoudingsgewijze als ondoorlatend mag beschouwen, enz. waarop hier niet verder kan worden ingegaan, maar waarvoor verwezen wordt naar hoofdstuk III, E.

In dit verband kan verder nog worden opgemerkt, dat, wanneer b.v. in een profiel 2 lagen voorkomen of worden verondersteld, men zoowel voor k_1 als k_2 *positieve* waarden moet berekenen. Vindt men voor k_2 een negatieve waarde, dan wijst dit er op, dat men de ligging van de ondoorlatende laag verkeerd heeft aangenomen. De vaststelling van de ligging van deze ondoorlatende laag of dus het vlak, waaronder men de strooming van het water naar de greppels, enz. mag verwaarloozen ten opzichte van de strooming van het water in de daarboven gelegen laag, is een van de moeilijkste punten bij de toepassing van deze vergelijkingen. Indien deze ligging niet blijkt uit den aard van het profiel zelf, kunnen echter de $Q : m_0$ -lijnen aanwijzingen geven, waarvoor naar hoofdstuk III mag worden verwezen.

g. De geldigheid van de ontwikkelde vergelijkingen

Ten slotte moet nog worden opgemerkt, dat de ontwikkelde vergelijkingen steeds geldig zullen zijn, wanneer de doorlatendheid van laag tot laag onder het maaiveld afneemt, of wat op hetzelfde neerkomt, de doorlatendheid van laag tot laag boven de ondoorlatende laag (hier het vlak van de drains, enz.) toeneemt. Dit is echter niet steeds het geval, wanneer in het profiel een slechter doorlatende laag voorkomt boven een beter doorlatende laag. In het laatste

geval zullen de vergelijkingen alleen geldig zijn, wanneer de doorlatendheid in meters per 24 uur van de bedoelde slechter doorlatende laag grooter is dan de maximale hoeveelheid overtollige regenwater eveneens uitgedrukt in meters per 24 uur, die moet worden afgevoerd (regenbuien). Is dit niet het geval, dan zal boven de beschouwde slechter doorlatende laag een tweede grondwaterspiegel (= schijnspiegel) gevormd worden of althans de vorm van het phreatisch oppervlak daardoor beïnvloed worden, zoodat de hoeveelheid water, die door deze laag naar de daaronder voorkomende laag wordt aangevoerd, kleiner is dan deze maximale hoeveelheid overtollig regenwater bedraagt. Dergelijke gevallen komen echter zelden voor en wanneer ze voorkomen (b.v. gronden met een knikkige laag in het profiel), treedt deze laag vaak boven het phreatisch oppervlak op en hindert een eventueele schijnspiegel niet; zie overigens hoofdstuk VI, sub II A.

Ook wanneer de grond onder de drains doorlatend is of de doorlatendheid geleidelijk in het profiel verandert, kunnen dergelijke opmerkingen worden gemaakt, waarop bij de bespreking van die gevallen niet zal worden teruggekomen.

β In het profiel komen geen scherp begrensde lagen voor ; de doorlatendheid verandert geleidelijk

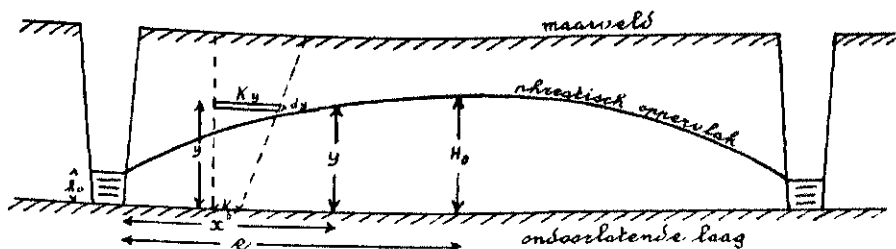
a. Inleiding

Komen we nu tot het geval, dat de doorlatendheid geleidelijk met de diepte onder het maaiveld verandert, dan beteekent dit dus, dat de doorlaatfactor van laag tot laag volgens de één of andere functie met de diepte onder het maaiveld verandert of — daar voor de berekeningen gewoonlijk gerekend wordt vanaf de ondoorlatende laag (hier dus het vlak van de drains, de laag onder den bodem van de greppels, enz.) — een functie van de hoogte boven de ondoorlatende laag is. Nu spreekt het vanzelf, dat allerlei functies mogelijk zijn; zoo kan b.v. de doorlaatfactor veranderen volgens de logarithme, den wortel, de eerste macht, de tweede macht, enz. van de hoogte boven de ondoorlatende laag. De oplossing van al dergelijke gevallen is principieel steeds dezelfde. Volstaan zal dan ook worden met in enkele gevallen deze vergelijkingen op te stellen.

b. Afleiding van de vergelijking, indien de doorlaatfactor lineair met de hoogte boven het vlak van de drains toeneemt

In de eerste plaats zullen we het geval kiezen, dat de doorlaatfactor k , lineair met de hoogte boven het vlak van de drains, boven den bodem van de

greppels, enz. (= de ondoorlatende laag) toeneemt. Dit beteekent dus, dat de doorlaatfactor in een oneindig dun laagje boven het vlak van de drains, enz.



Figuur 12

het kleinste is en een waarde heeft van b.v. k_0 . Op een hoogte y daarboven is dus de doorlaatfactor (zie figuur 12) blijkbaar

$$k_y = k_0 + ay \quad (54)$$

waarin a een constante is.

Beschouwen we nu eens de hoeveelheid water, die door een oneindig dun laagje ter dikte dy op een hoogte y boven het vlak van de drains, enz. op een afstand x van den drain, enz. stroomt, dan is deze hoeveelheid gelijk aan:

$$dq_x = Vdy = k_y I dy \quad (55)$$

en dus de hoeveelheid, die door het geheele watervoerende profiel op een afstand x van den drain, enz. stroomt:

$$q_x = \int_{y=0}^{y=y} k_y I dy = \int_{y=0}^{y=y} (k_0 + ay) I dy = k_0 I y + \frac{1}{2} a I y^2 \quad (56)$$

De berekening gaat nu op de bekende wijze verder, nl.:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = k_0 I y + \frac{1}{2} a I y^2 \quad (57)$$

of daar $I = \frac{dy}{dx}$:

$$\frac{Q (e-x)}{e} = k_0 y \frac{dy}{dx} + \frac{1}{2} a y^2 \frac{dy}{dx} \quad (58)$$

Geïntegreerd van $y = h_0$ tot $y = y$ en van $x = 0$ tot $x = x$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_0 y^2 + \frac{1}{6} a y^3 - \frac{1}{2} k_0 h_0^2 - \frac{1}{6} a h_0^3 \quad (59)$$

Indien geen water boven de drains of in de greppels enz. staat, wordt $h_0 = 0$ en vervallen dus de termen, waarin h_0 voorkomt. Voor het geval de grondwaterstand *midden* tusschen de drains of greppels beschouwd wordt, waarbij dus $x = e$ en $y = H_0$, gaat de vergelijking over in:

$$Q = \frac{2}{e} \left(\frac{1}{2} k_0 H_0^2 + \frac{1}{6} a H_0^3 - \frac{1}{2} k_0 h_0^2 - \frac{1}{6} a h_0^3 \right) \quad (60)$$

en dus:
$$S = \frac{Q}{e} = \frac{2}{e^2} \left(\frac{1}{2} k_0 H_0^2 + \frac{1}{6} a H_0^3 - \frac{1}{2} k_0 h_0^2 - \frac{1}{6} a h_0^3 \right) \quad (61)$$

c. Afleiding van de vergelijking voor het geval de doorlaatfactor volgens de functie $k_y = k_0 + ay^b$ toeneemt

In de tweede plaats zal ook de vergelijking worden afgeleid voor het geval de doorlaatfactor volgens de functie

$$k_y = k_0 + ay^b \quad (62)$$

met de hoogte boven het vlak van de drains, enz. toeneemt, daar deze functie waarschijnlijk in verschillende gevallen toegepast kan worden. In de vergelijking 62 stellen a en b constanten door.

Blijkbaar is nu de hoeveelheid water, die door het watervoerend profiel op een afstand x van den drain, enz. stroomt:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} \int_{y=0}^{y=y} (k_0 + ay^b) I dy = k_0 I y + \frac{ay^{b+1}}{b+1} I \quad (63)$$

Daar $I = \frac{dy}{dx}$, ontstaat dus na invulling daarvan een vergelijking, die na integratie van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_0$ tot $y = y$ geeft:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_0 y^2 + \frac{ay^{b+2}}{(b+1)(b+2)} - \frac{1}{2} k_0 h_0^2 - \frac{ah_0^{b+2}}{(b+1)(b+2)} \quad (64)$$

Ook nu zijn hieruit weer de vergelijkingen op te stellen voor het geval $x = e$ en $y = H_0$ enz., zooals dit voor de vergelijking 59 heeft plaats gevonden, enz.

d. Algemeene oplossing van het geval, dat de doorlaatfactor volgens een willekeurige functie met de hoogte boven het vlak van de drains, enz., verandert

Zooals reeds boven is opgemerkt, kan de opstelling van de vergelijking voor iedere bekende functie van k en y op dezelfde wijze, als boven is aan-

gegeven, geschieden. Is deze functie onbekend, dan kan men echter deze functie ontwikkeld denken in een reeks van de algemeene gedaante:

$$k_y = k_0 + ay + by^2 + cy^3 + dy^4 + ey^5 + \text{enz.} \quad (65)$$

Deze functie 65 heeft bovendien het voordeel, *dat zij steeds is toe te passen*; dus ook wanneer men niet weet op welke wijze de doorlatendheid in het profiel verandert, wat immers in de meeste gevallen het geval zal zijn. Op welke wijze dit overigens het beste kan geschieden zal bij de bespreking van de $Q : m_0$ -lijnen besproken worden (zie onder hoofdstuk III, E). Hier kan worden volstaan met de opmerking, dat de toepassing van vergelijking 65 principieel steeds mogelijk moet zijn, wanneer men de functies van $Q = f(H_0)$ en $Q = f(h_0)$ bepalen kan in den vorm van krommen in een $Q : H_0$ - en $Q : h_0$ -diagram.

De opstelling van de vergelijking, gaat weer op precies dezelfde wijze, als in de vorige gevallen is besproken.

De hoeveelheid water, die door het profiel stroomt op een afstand x van den drain of greppel, enz. is dus:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{x} = \int_{y=h_0}^{y=e-x} (k_0 + ay + by^2 + cy^3 + dy^4 + ey^5 + \text{enz.}) \, dy =$$

$$k_0 Iy + \frac{1}{2} a Iy^2 + \frac{1}{3} b Iy^3 + \frac{1}{4} c Iy^4 + \frac{1}{5} d Iy^5 + \frac{1}{6} e Iy^6 + \text{enz.} \quad (66)$$

Bedenken we, dat $1 = \frac{dy}{dx}$ en integreeren we, na invulling daarvan, de vergelijking 66 van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_0$ tot $y = y$, dan ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_0 y^2 + \frac{1}{2.3} a y^3 + \frac{1}{3.4} b y^4 + \frac{1}{4.5} c y^5 + \frac{1}{5.6} d y^6 + \frac{1}{6.7} e y^7 + \text{enz.}$$

$$- \frac{1}{2} k_0 h_0^2 - \frac{1}{2.3} a h_0^3 - \frac{1}{3.4} b h_0^4 - \frac{1}{4.5} c h_0^5 - \frac{1}{5.6} d h_0^6 - \frac{1}{6.7} e h_0^7 - \text{enz.} \quad (67)$$

Voor den grondwaterstand midden tusschen de drains of greppels gaat de vergelijking 67, daar hier $x = e$ en $y = H_0$, over in:

$$Q = \frac{2}{e} \left(\frac{1}{2} k_0 H_0^2 + \frac{1}{6} a H_0^3 + \frac{1}{12} b H_0^4 + \frac{1}{20} c H_0^5 + \frac{1}{30} d H_0^6 + \frac{1}{42} e H_0^7 + \text{enz.} \right.$$

$$\left. - \frac{1}{2} k_0 h_0^2 - \frac{1}{6} a h_0^3 - \frac{1}{12} b h_0^4 - \frac{1}{20} c h_0^5 - \frac{1}{30} d h_0^6 - \frac{1}{42} e h_0^7 + \text{enz.} \right) \quad (68)$$

Hieruit is weer de vergelijking voor S op te stellen door te bedenken, dat $S = \frac{Q}{e}$.

e. Eenige opmerkingen in verband met de toepassing van deze vergelijkingen

Beschouwen we nu in de eerste plaats de algemeene vergelijking 67 of 68, dan zal het duidelijk zijn, dat het aantal termen, dat men kiest, zal afhangen van de nauwkeurigheid, waarmede men de doorlatendheid wil bepalen. In het algemeen zal men dit aantal echter zoo klein mogelijk kiezen. Het maximale aantal te beschouwen termen wordt echter mede bepaald door den vorm van de $Q - H_0$ - en de $Q : h_0$ -lijnen (zie hoofdstuk III, E). Het zal verder duidelijk zijn, dat hoe meer termen men kiest, hoe meer onbekenden men in de vergelijking 67 of 68 krijgt. De te beschouwen vergelijking kan men dan ook alleen oplossen, indien men evenveel onafhankelijke Q -waarden met daarbijbehorende H_0 - en h_0 -waarden kent, als men termen wil of moet beschouwen. De $Q : H_0$ - en $Q : h_0$ -lijnen zijn nu niets anders dan de lijnen, die de continue verandering van H_0 resp. h_0 met Q aangeven. Op deze lijnen zal men deze punten kunnen kiezen en wel steeds paarsgewijze 2 punten, op iedere lijn één, bij dezelfde Q -waarden. Kiest men b.v. 7 punten dan zijn dus bij 7 Q -waarden de H_0 - en h_0 -waarden uit de genoemde lijnen af te lezen en kan men dus de vergelijking 68 met 7 termen, waarin de factor H_0 , en met 7 termen, waarin de term h_0 , voorkomt, oplossen of m.a.w. is de vergelijking 65 dan tot 7 termen bekend. Afhankelijk van den loop van deze $Q : H_0$ - en $Q : h_0$ -lijnen (b.v. meer of minder gebogen) zal men het aantal termen — dus het aantal punten op deze lijnen — zoo groot moeten nemen, dat ook de tusschenliggende punten, die men nu met de vergelijking 68 kan berekenen, met de verlangde nauwkeurigheid benaderd worden.

De boven beschreven methode is echter zeer tijdroovend. We zullen in hoofdstuk III, E een andere, gemakkelijker methode toepassen, waarnaar mag worden verwezen.

C. De ondergrond is doorlatend

§ 1. ALGEMEENE OPMERKINGEN

Is de grond onder de drains, onder den bodem van de greppels, enz. doorlatend, of m.a.w. kan de doorlatendheid daarvan niet verwaarloosd worden ten opzichte van de doorlatendheid van de daarbovengelegen laag, dan kunnen we de doorlatendheid van deze laag op soortgelijke wijze in aanmerking nemen, als dit ook bij de homogene gronden in het overeenkomstige geval is geschied en wel onder soortgelijke beperkende voorwaarden, waarvoor naar de beschouwing daarover bij homogene gronden verwezen mag worden (22)

Ook nu moeten daarvoor de y , H_0 - en h_0 -waarden gerekend worden vanaf

de ondoorlatende laag. Met homogene gronden hebben deze gevallen echter dit verschil, dat de doorlatendheid van de laag onder den bodem van de greppels of onder de drains, enz. kleiner dan wel grooter kan zijn dan van den grond daarboven. Beide gevallen komen voor, ofschoon in de meeste gevallen de doorlatendheid van de laag onder den bodem van de greppels, enz. wel kleiner zal zijn dan van de daarboven gelegen laag.

De doorlatendheid van de laag onder de drains, enz. zal men gewoonlijk als homogeen moeten beschouwen, tenzij men de doorlatendheid daarvan op een andere wijze — b.v. met pompproeven in boorgaten van verschillende diepten (lit. zie noot 4) — heeft bepaald. Uit de grondwaterstand-debiet-waarnemingen zijn uit den aard der zaak geen conclusies over den aard van deze eventuele heterogeniteit te trekken, daar alleen afvoer van water optreedt zoolang de grondwaterstand midden tusschen de drains boven het vlak van de drains, enz. ligt.

Alvorens nu voor enkele gevallen na te gaan hoe de vergelijkingen zullen luiden, zal eerst nog een opmerking worden gemaakt over de plaats in het profiel, waar zich de ondoorlatende laag bevindt; uitvoeriger zal hierop bij de bespreking van de $Q : H_0$ - en $Q : h_0$ -lijnen (zie hoofdstuk III) worden teruggekomen.

Voor kleigronden van voldoende dikte kan men vaak aannemen, dat de grond onder de drains ondoorlatend is, of feitelijk juister uitgedrukt, dat deze grond als ondoorlatend ten opzichte van den grond boven de drains is op te vatten, tenzij de hooger gelegen lagen knikkig zijn en de dieper gelegen lagen goed doorlatend zijn. De grondwaterspiegel zal immers meestal niet of nauwelijks onder de drains dalen en wanneer dit voorkomt, zullen de veranderingen van den grond (namelijk scheurvorming enz.) gering zijn t.o.z. van de veranderingen, die in den grond boven de drains sedert de drainage zijn opgetreden. Bevinden zich greppels, die over het algemeen minder diep zijn, in deze gronden, dan hangt het van de structuur van het profiel af, of men den grond onder den bodem van de greppels als doorlatend dan wel als ondoorlatend moet beschouwen. In zwaardere gronden zal de ondoorlatende laag daar beginnen, waar de grond pappig en (of) sterk plastisch wordt. Bevindt zich echter bij kleigronden onder de drains een laag darg of b.v. zand, dan moet door afboren van het profiel worden vastgesteld, waar de ondoorlatende laag optreedt. Als een ondoorlatende laag kan in dat geval gelden: een nieuwe kleilaag, een zavellaag, een keileemlaag, enz.

Lichtere gronden zal men meestal als doorlatend moeten opvatten, zodra ze koolzure kalk bevatten en het humusgehalte niet al te klein is; afwijkende gevallen daarvan zijn ons echter ook bekend. Bij gedraineerde of begreppelde gronden geeft verder de vorm van de $Q : H_0$ -lijnen een indruk, waar de ondoor-

latende laag zich bevindt, waarvoor naar hoofdstuk III kan worden verwezen.

We zullen nu voor enkele gevallen de vergelijkingen ontwikkelen, indien de grond onder den bodem van de greppels of de drains, enz. als doorlatend moet worden opgevat.

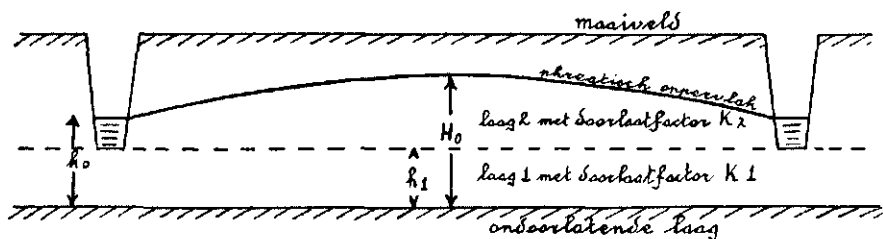
§ 2. DE DOORLATENDHEID IN HET PROFIEL BOVEN HET VLAK VAN DE DRAINS OF DEN BODEM VAN DE GREPPELS, ENZ., VERANDERT SPRONGSGEWIJZE

a. Het profiel bestaat uit een homogene laag boven en onder de drains, enz.

Het eenvoudigste geval is wel, dat de grond boven en onder de drains, enz. homogeen is, maar iedere laag een verschillende doorlatendheid bezit. Dit geval is aangegeven in figuur 13.

Bij de behandeling van het geval bij homogene gronden (zie aldaar), dat de ondergrond doorlatend is, is reeds opgemerkt, dat alle waarden van y , h_0 en H_0 gerekend moeten worden vanaf de ondoorlatende laag. Uit de figuur 13 blijkt direct, dat we hier te doen hebben met het geval, dat 2 op zich zelf homogene lagen in het profiel voorkomen, zoodat de afgeleide vergelijkingen 38 en 39 geldig zijn, daar immers h_0 altijd grooter of hoogstens gelijk aan h_1 (zie fig. 13) kan zijn. De vergelijkingen 28, 29 en 30 kunnen hier dus niet worden toegepast.

Wil men verder een correctie aanbrengen voor het feit, dat de drains in werkelijkheid niet op de ondoorlatende laag liggen of de greppels niet tot de ondoorlatende laag reiken, enz., zoo kan worden opgemerkt, dat deze



Figuur 13

correctie niet alléén afhangt van de diepteligging (r) van de ondoorlatende laag onder de drains of onder den bodem van de greppels, enz. In dit geval zal ook van invloed zijn de verhouding van de gemiddelde doorlatendheid van de laag onder de drains, resp. onder den bodem van de greppels, enz., tot de gemiddelde doorlatendheid van het geheele watervoerende profiel. Daar deze

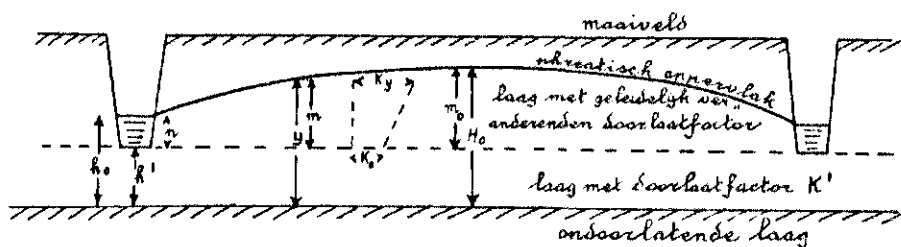
correctie steeds op soortgelijke wijze berekend wordt, zal deze correctie aan het slot van § 3 worden behandeld, waarnaar mag worden verwezen.

b. Het profiel bestaat boven den bodem van de greppels, resp. boven de drains uit 2 of meer lagen

Bestaat de laag grond boven den bodem van de greppels, resp. boven de drains uit 2 of meer lagen, dan zal het duidelijk zijn, dat men nu de vergelijkingen voor 3 of meer lagen in het profiel moet toepassen, zooals deze reeds eerder zijn afgeleid. Ook nu moet men de y -, H_0 - en h_0 -waarden rekenen vanaf de ondoorlatende laag; de laag onder de drains enz. tot de ondoorlatende laag heeft dus de doorlatendheid k_1 en de dikte h_1 . Verder moet men ook nu erom denken, dat h_0 steeds grooter of hoogstens gelijk kan zijn aan h_1 .

§ 3. DE DOORLATENDHEID VAN DEN GROND VERANDERT GELEIDELIJK

Beschouwen we nu het geval, dat de doorlatendheid van den grond boven den bodem van de greppels, boven de drains, enz. geleidelijk verandert en nemen we verder aan, dat de grond onder den bodem van de greppels, onder de drains, enz. tot de ondoorlatende laag homogeen is en een doorlaatfactor k' heeft, dan vormt de afleiding van deze vergelijking een combinatie van het geval, dat de doorlatendheid sprongsgewijs en geleidelijk in het profiel verandert. Dit geval is aangegeven in figuur 14. Bedenken we, dat h_0 altijd grooter of hoogstens gelijk kan zijn aan h' , dan is dus de afleiding voor de vergelijking — indien we b.v. aannemen, dat de doorlatendheid in de laag boven den bodem



Figuur 14

van de greppels, boven de drains, enz. lineair met de hoogte daarboven verandert — als volgt:

In de eerste plaats is blijkbaar:

$$k_y = k_0 + a(y - h') \quad (69)$$

waarin a weer een constante is en k_0 de doorlatendheid van een oneindig dun laagje vlak boven den bodem van de greppels, boven de drains, enz., voorstelt.

Door een doorsnede y op een afstand x van de greppels, drains enz. stroomt dus:

$$q_x = Q \left(\frac{e-x}{x} \right) = h' k' I + \int_{y=h'}^{y=y} (k_o + a(y-h')) I dy = h' k' I + k_o I y + \frac{1}{2} a y^2 I - a h' y I - k_o I h' - \frac{1}{2} a (h')^2 I + a (h')^2 I \quad (70)$$

Daar $I = \frac{dy}{dx}$, ontstaat hieruit na integratie van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_o$ tot $y = y$ en na vereenvoudiging:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = h' k' y + \frac{1}{2} k_o y^2 + \frac{1}{6} a y^3 - \frac{1}{2} a h' y^2 - k_o h' y - \frac{1}{2} a (h')^2 y + a (h')^2 y - h' k' h_o - \frac{1}{2} k_o h_o^2 - \frac{1}{6} a h_o^3 + \frac{1}{2} a h' h_o^2 + k_o h' h_o + \frac{1}{2} a (h')^2 h_o - a (h')^2 h_o \quad (71)$$

Verder kunnen we, indien de grondwaterstand midden tusschen de greppels, drains, enz., beschouwd wordt, voor $x = e$ en voor $y = H_o$ invullen, enz.

Stellen we in de vergelijking 71 $y = m + h'$ en $h_o = n + h'$, waarin m en n dus resp. de hoogte van den grondwaterspiegel tusschen resp. boven de drains en gerekend van het vlak door de drains, enz. voorstelt, dan ontstaat na invulling:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = k' h' (m-n) + \frac{1}{2} k_o (m^2 - n^2) + \frac{1}{6} a (m^3 - n^3) \quad (71a)$$

of voor $x = e$ en $m = m_o$:

$$Q = \frac{1}{e} \left\{ 2 k' h' (m_o - n) + k_o (m_o^2 - n^2) + \frac{1}{3} a (m_o^3 - n^3) \right\}, \quad (71b)$$

waarin dus m_o de grondwaterstand midden tusschen de drains, enz. en gerekend van af het vlak door de drains, voorstelt.

De vergelijking 71 a en 71 b zijn ook rechtstreeks af te leiden, indien men bedenkt, dat (zie hoofdstuk III):

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = k' h' (m-n) + \int_{m=n}^{m=m} \int_{m=o}^{m=m} (k_o + am) dm \quad (71c)$$

of voor $x = e$ en $m = m_o$:

$$Q = \frac{2}{e} k' h' (m_o - n) + \frac{2}{e} \int_{m=n}^{m=m_o} \int_{m=0}^{m=m} (k_o + am) dm \quad (71d)$$

Uit de vergelijkingen 71 c en 71 d zijn zonder meer de vergelijkingen 71 a en 71 b door uitvoering van de integratie te verkrijgen. Dit laatste type van vergelijking zal bij de practische berekening van de doorlatendheid uit de $Q : m_0$ en $Q : n$ -lijnen veelvuldig worden toegepast, waarvoor naar hoofdstuk III mag worden verwezen.

Het spreekt verder vanzelf, dat ook andere functies van k_y en y kunnen worden ingevuld. Zou men de algemeene functie willen invoeren, die dus hier moet luiden:

$$k_y = k_0 + a(y-h') + b(y-h')^2 + c(y-h')^3 + \text{enz.},$$

$$\text{of } k_y = k_0 + a m + b m^2 + c m^3 + \text{enz.},$$

dan is het resultaat dus direct door de toepassing van de vergelijking 71 c of 71 d te verkrijgen. Deze oplossing is dus veel eenvoudiger dan de oplossing, zooals deze bij de afleiding van vergelijking 71 is toegepast. Deze laatst genoemde oplossing is hier dan ook alleen medegedeeld om te laten uitkomen, dat men volgens beide methoden tot hetzelfde resultaat komt.

Tenslotte zullen we hier volledigheidshalve nog de correctie beschouwen, die men kan aanbrengen voor het feit, dat de drains in werkelijkheid niet op de ondoorlatende laag liggen of de greppels niet tot de ondoorlatende laag reiken.

In de voorgaande paragraaf is reeds opgemerkt, dat in dit geval, behalve de ligging van de ondoorlatende laag onder de greppels, drains, enz. — en bij greppels bovendien de bodembreedte van de greppels — ook nog van belang is de verhouding van den gemiddelden doorlaatfactor van de laag onder den bodem van de greppels, onder de drains, enz. tot den gemiddelden doorlaatfactor van het geheele watervoerende profiel.

De correctie, waarmede de factor e op dezelfde wijze moet worden vergroot als dit reeds bij de homogene gronden is aangegeven (zie aldaar), bedraagt blijkbaar ongeveer, indien de gemiddelde doorlaatfactor van het geheele watervoerend profiel K en van de laag onder de drains resp. onder den bodem der greppels k is:

$$\text{correctie} = \frac{rk}{2Kh_0}(r+b) \quad (72)$$

waarin b weer de breedte van den greppelbodem en r de diepte van de ondoorlatende laag onder den bodem van de greppels, onder de drains enz., uitgedrukt in meters, voorstelt. Bij drains vervalt natuurlijk de factor b .

Hierbij kan worden opgemerkt, dat deze correctie in elk geval verwaarloosd kan worden, wanneer de doorlatendheid met de diepte onder het maaiveld afneemt, hetgeen ook onmiddellijk uit de functie van de correctie blijkt. Wil

men deze correctie toch aanbrengen, resp. *moet* men deze correctie aanbrengen, dan moet eerst met behulp van de vergelijking van 2 lagen in het profiel (nl. één laag onder en één laag boven de drains, enz.) de gemiddelde doorlaatfactor van de laag onder de drains, enz. (feitelijk is dit een effectieve doorlaatfactor van deze laag; zie hoofdstuk III) worden berekend evenals met de vergelijking voor homogeen gedachte gronden de gemiddelde doorlaatfactor van het geheele watervoerende profiel. Met behulp van deze doorlaatfactoren moet dan de correctie worden bepaald en nu nogmaals de berekening worden uitgevoerd met de vergelijking, die men wil of moet beschouwen en waarin dus de factor e met dit bedrag is gecorrigeerd. Men denke er daarbij om, dat in de vergelijkingen, waarin het debiet is uitgedrukt als een schijf water (S), die in 24 uur wordt afgevoerd en waarin dus de factor e^2 voorkomt, slechts 1 maal de correctie wordt aangebracht. De factor e^2 wordt dus : e ($e \div$ correctie). Onder den greppelafstand verstaan we hier den afstand van de naar elkaar toegekeerde greppelwanden en dus niet den afstand van de middellijnen van de greppels.

D. Er treedt een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot, waarin de drains of greppels uitmonden, op

Treedt er een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot — dus in de z -richting op (zie afdeling I A, § 7 van dit hoofdstuk) — dan kunnen allerlei gevallen voorkomen. Zoo kan de doorlatendheid van den grond met de diepte onder het maaiveld geleidelijk dan wel sprongsgewijs veranderen, waarbij in het laatste geval weer 2 of meer lagen in het profiel kunnen voorkomen; de grond onder de greppels, drains, enz. kan al of niet doorlatend zijn, enz. Het spreekt wel vanzelf, dat al deze gevallen onmogelijk hier behandeld kunnen worden. We zullen hier moeten volstaan met 2 principieel verschillende gevallen te beschouwen. We kunnen dit des te eerder doen, omdat ook nu deze hangkromme zelden in aanmerking behoeft te worden genomen en we gewoonlijk kunnen volstaan met het gemiddelde te nemen van de grondwaterstanden op verschillende afstanden van de sloot en zelfs nog geen groote fouten behoeven te maken, wanneer we slechts den grondwaterstand beschouwen op één afstand van de sloot, nl. ongeveer in het midden tusschen de sloot en het andere uiteinde van den drain. Alleen indien het phreatisch oppervlak op onregelmatige wijze met den afstand van de sloot verandert ten gevolge van een pleksgewijze verandering van de doorlatendheid, is het natuurlijk gewenscht het gemiddelde te berekenen van meerdere grondwaterstanden op verschillende afstanden van de sloot (zie ook I A § 7 van dit hoofdstuk).

De twee bovengenoemde principieel verschillende gevallen zijn de volgende:

- a. De doorlatendheid van den grond verandert wel met de hoogte boven het vlak van de drains resp. boven den bodem van de greppels, enz. (dus wel in de *y*-richting), maar deze doorlatendheid is op alle afstanden van de sloot in overeenkomstige lagen dezelfde of wordt als constant beschouwd d.w.z. een eventueele heterogeniteit in de *z*-richting wordt *niet* in rekening gebracht.
- b. De hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot wordt veroorzaakt door een toenemende doorlatendheid van den grond naar de sloot en deze heterogeniteit moet in rekening worden gebracht.

§ 1. DE DOORLATENDHEID IN OVEREENKOMSTIGE LAGEN IS OP ALLE AFSTANDEN VAN DE SLOOT DEZELFDE OF WORDT ALS ZOODANIG VERONDERSTELD

Het zal duidelijk zijn, dat in het geval *a* de hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot ontstaan kan, doordat

- a. veel water rechtstreeks (dus niet via de drains of de greppels, enz.) naar de sloot wordt afgevoerd en
- b. de doorlatendheid naar de sloot toeneemt, welke verandering we verder niet willen beschouwen (in het laatste geval wordt dus de gemiddelde verandering van de doorlatendheid op alle afstanden van de sloot met de hoogte boven de ondoorlatende laag bepaald).

Deze hangkromme (dus in begreppeld of gedraineerd land) zal zich meestal slechts over een bepaalden, niet grooten afstand uit de sloot in het land uitstrekken, wanneer de hangkromme alleen kan ontstaan door een rechtstreeksche afvoer naar de sloot. Men kan dit gemakkelijk aantoonen door tevens de hoeveelheid te berekenen, die rechtstreeks naar de sloot kan worden afgevoerd en men zal daarbij direct inzien, dat, naarmate de grond beter doorlatend is, de drainafstand grooter is, de ligging van de ondoorlatende laag dieper onder het maaiveld is en de waterstand van de sloot dieper ligt ten opzichte van den waterstand in de greppels, boven de drains, enz., de hangkromme zich verder in het land uitstrekt. Gewoonlijk zal de doorlatendheid van den grond naar de sloot moeten toenemen, indien de hangkromme zich over een groot gedeelte of over de geheele lengte van de drainreeksen, greppels, enz. zal uitstrekken.

Het lijkt mij niet noodig een voorbeeld van geval *a* hier te behandelen en wel, omdat in de eerste plaats een dergelijk geval uitvoerig is behandeld in een „Mededeeling over grondwaterstand- en debietwaarnemingen op een

gedraineerd perceel zwaren kleigrond te Nieuwolda, 1935". Bedoelde mededeeling is wel is waar niet gedrukt, maar is aan verschillende belangstellenden reeds toegezonden en zal op aanvraag gaarne ter beschikking worden gesteld. Hierin is tevens de rechtstreeksche afvoer naar de sloot nagegaan en verder aangetoond dat men met vrijwel even groote nauwkeurigheid met het gemiddelde van alle grondwaterstanden op verschillende afstanden uit de sloot kan volstaan (zie ook sub I A, § 7 van dit hoofdstuk).

In de tweede plaats is de behandeling van dit geval vrijwel analoog met een dergelijk, reeds behandeld, geval, waarbij de grond echter homogeen is of als volkomen homogeen is beschouwd, terwijl in de derde plaats dergelijke gevallen bovendien practisch van weinig belang zijn.

§ 2. DE DOORLATENDHEID IN OVEREENKOMSTIGE LAGEN IS OP ALLE AFSTANDEN VAN DE SLOOT NIET DEZELFDE

In het geval *b*, waarbij dus een verandering van de doorlatendheid van den grond naar de sloot in aanmerking moet worden genomen, moet de afhankelijkheid van het debiet met den afstand van de sloot bekend zijn. Dit beteekent dus, dat we niet kunnen volstaan met alleen de hoeveelheid water te meten, die uit de drainreeks in de sloot vloeit, maar dat ook bekend moet zijn, wat elk deel van de drainreeks afvoert. Principeel zou dit kunnen geschieden door b.v. op 0, 20, 40, 60, 80 enz. meter uit de sloot een watermeter in de drainreeks in te schakelen, zoodat daarmede bekend zou zijn, wat de hoeveelheid water is, die door het stuk van de drainreeks van 0—20, 20—40, 40—60, 60—80, enz. meter van de sloot wordt afgevoerd, zoodat m.a.w. van al die gedeelten het debiet bekend zou zijn. Nu zijn deze stukken zoo klein, dat voor iedere stuk de doorlatendheid in de *z*-richting als constant is te beschouwen. Het debiet per strekkenden meter per 24 uur van één zijde komend is voor ieder stuk dus te berekenen door het debiet van dit stuk door $2 \cdot 20 = 40$ te deelen en eventueel op m^3 per 24 uur om te rekenen. Voor iedere stuk kan dan op de gewone manier de verandering van de doorlatendheid met de hoogte boven de ondoorlatende laag worden bepaald. Is b.v. de grond onder de drains ondoorlatend dan is b.v. — wanneer ook de opbouw van het profiel zich daarvoor leent — met behulp van de algemeene vergelijking 68 dus na te gaan hoe groot de constanten in de algemeene vergelijking

$$k_y = k_0 + ay + by^2 + cy^3 + dy^4 + \text{enz.}$$

voor iedere gedeelte van de drainreeks zijn. Om dit te kunnen uitvoeren moeten ook de grondwaterstanden op ieder gedeelte van de drainreeks bekend zijn, hetgeen dus mogelijk is door midden op iedere gedeelte grondwaterstands-buizen, midden tusschen en boven de drains, te plaatsen en hierin dagelijks de

waterstanden te bepalen, evenals het debiet van iedere gedeelte, zoodat voor iedere gedeelte de $Q : H_0$ - en $Q : h_0$ -lijnen zijn op te stellen, die immers, zooals reeds eerder is opgemerkt en in hoofdstuk III nader zal worden aangetoond, het meest geschikte uitgangsmateriaal voor dergelijke berekeningen vormen. In het gegeven geval wil dat dus b.v. zeggen, dat op 10, 30, 50, 70, 90, enz. meter uit de sloot grondwaterstandsbuizen midden tusschen en boven de drains zouden moeten worden geplaatst.

Om nu de verandering van de doorlatendheid na te gaan, kunnen we b.v. in het genoemde geval den gemiddelden doorlaatfactor (of, zooals we later zullen zien, beter den schijnbaren doorlaatfactor genoemd) van de laag van 0—10, 10—20, 30—40 enz. meter boven het vlak van de drains voor iedere stuk berekenen en deze onderling vergelijken.

Het zal duidelijk zijn, dat deze schijnbare doorlaatfactoren (k_{sch}) in het gegeven geval te berekenen zijn met de vergelijking:

$$k_{sch} = \frac{\int_{h_1}^{h_2} (k_0 + ay + by^2 + cy^3 + \text{enz.}) dy}{h_2 - h_1}.$$

of:

$$k_{sch} = \frac{k_0 h_2 + \frac{1}{2} a h_2^2 + \frac{1}{3} b h_2^3 + \frac{1}{4} c h_2^4 + \text{enz.} - k_0 h_1 - \frac{1}{2} a h_1^2 - \frac{1}{3} b h_1^3 - \frac{1}{4} c h_1^4 + \text{enz.}}{h_2 - h_1} \quad (73)$$

waarin h_1 en h_2 de afstanden van den onderkant resp. den bovenkant van de laag, waarvan we den schijnbaren doorlaatfactor willen berekenen, tot — in dit geval — het vlak van de drains of, algemeener uitgedrukt, tot de ondoorlatende laag voorstellen.

Het spreekt vanzelf, dat behalve de algemeene vergelijking 65 ook andere vergelijkingen kunnen worden toegepast, al naar de structuur van het profiel verlangt of het doel, dat men zelf wil bereiken. Het is niet mogelijk hierop nader in te gaan. Wel moet nog even worden opgemerkt, dat eenzelfde oplossingsmethode natuurlijk ook moet worden toegepast, wanneer de doorlatendheid van den grond van afstand tot afstand van de sloot op een onregelmatige wijze verandert en men deze veranderingen zou willen nagaan. Gewoonlijk zal deze verandering niet in aanmerking worden genomen, daar men gewoonlijk juist zoo weinig mogelijk cijfers gebruikt om de structuur van den grond in het profiel (door zijn doorlatendheid dus) aan te geven. In een enkel geval zou het van belang kunnen zijn de verandering van de doorlatendheid met een toenemenden afstand van de sloot na te gaan, nl. om eens een indruk te krijgen van den invloed van een sloot op den naburigen grond, wanneer

deze sloot reeds zeer lang in dit land aanwezig is geweest. Hierdoor zou men tevens een indruk krijgen van de te verwachten verbetering van de doorlatendheid van den grond in begreppeld land vlak naast de greppel in verhouding tot deze verbetering van meer midden tusschen deze greppels gelegen grond. Bij drains zullen deze verschillen in elk geval kleiner moeten zijn.

HOOFDSTUK III

De $Q : H_0$ -, de $Q : h_0$ -lijnen en dergelijke lijnen, die den samenhang van het debiet met den grondwaterstand in lijnen tot uiting brengen en wat hieruit kan worden afgeleid of berekend

A. Bepaling van den grondwaterstand en het debiet

In de eerste plaats dient nu dieper op het vraagstuk te worden ingegaan op welke wijze men het beste de gegevens bepaald, die noodig zijn voor het toepassen van de reeds ontwikkelde of nog te ontwikkelen vergelijkingen; waarvoor dus in het algemeen debiet- en grondwaterstandsmetingen moeten worden verricht. We zullen daarbij in de eerste plaats ingaan op de vraag op welke wijze men het beste den grondwaterstand en het debiet bepaald en daarna nagaan op welke wijze men het beste van deze gegevens gebruik kan maken.

§ 1. BEPALING VAN DEN GRONDWATERSTAND

Bij de bepaling van grondwaterstanden dient men te bedenken, dat men de ligging van het phreatisch oppervlak wil bepalen, zooals deze werkelijk op het moment is, waarop de meting wordt uitgevoerd. De grondwaterstandsbuizen, die men daarvoor in den grond brengt, dienen aan dezen eisch zooveel mogelijk te voldoen. Grondwaterstandsbuizen nu bestaan uit een geperforeerde buizen, die van onderen met stoppen zijn afgesloten en die ontwikkeld zijn met een grof soort weefsel om het binnendringen van gronddeeltjes te voorkomen. Men meet nu de ligging van het phreatisch oppervlak door den waterstand in deze buis te meten en uit te drukken t.o.z. van den bovenkant van de buis, t.o.z. van het maaiveld ter plaatse, enz. Impliciet heeft men daardoor echter tevens aangenomen, dat de ligging van het phreatisch oppervlak in den grond om de buis ook steeds overeenkomt met de ligging van het wateroppervlak in de buis. Dit behoeft echter niet zoo te zijn, in welk geval de grondwaterstandsbuis een zekere — wat ik genoemd heb — „traagheid” bezit. Dit probleem heb ik echter reeds in een vroegere publicatie besproken (zie de in noot 1 vermelde literatuur, waarnaar kan worden verwezen). Hier

moge echter nog eens worden herhaald, dat men de snelst reageerende buizen verkrijgt, door de doorsnede niet te groot te nemen (voor kleigronden b.v. van $\pm 2,5$ tot 4 cm inwendige doorsnede), deze buizen over de geheele lengte te voorzien van niet te kleine gaatjes (b.v. op 5 cm afstand 4 gaatjes rondom de buis) tot ± 30 à 40 cm onder het maaiveld en deze buizen te omwikkelen met een sterk doch goed doorlatend weefsel. Bij het in den grond brengen van deze buizen wordt voorgeboord met een boor van een iets grootere doorsnede, dan de uitwendige doorsnede van de buis bedraagt (23). Men plaatst dan de buis in dit gat en trapt den grond goed om de buis vast. De buis wordt daarna afgesloten door een gemakkelijk afneembare stop. De prijs van een dergelijke buis behoeft per strekkende meter in geen geval hooger te zijn dan f 1,00. De lengte van de buis kiest men niet langer dan noodig is, d.w.z. in het algemeen niet langer dan 1,5 à 2 m. Verder dient men wel te bedenken, dat ook de beste grondwaterstandsbuizen op goede werking gecontroleerd dienen te worden. Heeft men b.v. een enkele buis, die een afwijkende waarde geeft, zoo kan men de goede werking van deze buis zeer eenvoudig controleeren door het zich daarin bevindende water er uit te pompen en na te gaan in hoeveel tijd de waterstand in de buis zich weer instelt. De daarvoor benodigde tijd mag in het algemeen niet meer dan 2 dagen bedragen; overigens wordt ook in dit opzicht verwezen naar hetgeen daarover in de aangehaalde publicatie reeds is vermeld. Verder is het eveneens noodzakelijk ieder jaar alle buizen uit den grond te halen, schoon te maken, eventueel te herstellen en opnieuw te plaatsen in een nieuw te maken boorgat op een kleinen afstand van het oude boorgat.

Opmerkelijk is het, dat men vaak zoo weinig zorg besteedt aan het bepalen van grondwaterstanden, terwijl daarentegen het debiet dan vaak met de uiterste zorg wordt gemeten. Opmerkelijk is dit, omdat in wezen slechts de grondwaterstand de *eenige* werkelijke primaire grootheid is in tegenstelling met het debiet, dat, hoe nuttig ook, slechts van secundaire beteekenis is, wanneer het de bedoeling is, het effect van een bepaalde ontwatering na te gaan. Dit wordt direct duidelijk, wanneer men slechts bedenkt, dat het eenige doel van ontwatering (b.v. drainage) is *den grondwaterspiegel* te verlagen en daardoor tevens de indroging en scheurvorming van den grond te bevorderen. Of het debiet klein of groot is, komt slechts in de tweede plaats in aanmerking. Wat geeft b.v. een zeer groot debiet als er een sterke kwel is en de grondwaterstand zeer hoog blijft? Hieruit volgt dan ook, dat, wanneer men door omstandigheden slechts één grootheid kan bepalen, men hiervoor den grondwaterstand moet kiezen, indien het althans de bedoeling is het effect van de gebruikte ontwateringssystemen na te gaan; debietmetingen alléén kunnen in dit opzicht tot geheel verkeerde conclusies leiden.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat de meting van de grondwaterstanden niet te vroeg in den morgen moet worden uitgevoerd om mogelijke complicaties (Lisse-effect) zooveel mogelijk uit te sluiten. Het beste is overigens hiervoor een bepaalden tijd te kiezen, waarop deze metingen steeds moeten worden verricht *onafhankelijk van den aard van het weer*.

§ 2. BEPALING VAN HET DEBIET

Het meten van het debiet kan het eenvoudigste geschieden door gedurende een korten tijd een maatkan onder de uitmonding van drains of greppels te houden en de hoeveelheid opgevangen water om te rekenen in m³ per 24 uur of in liters per uur per 100 drain of nog beter in den vorm van een laag water (in mm), die per 24 uur wordt afgevoerd, waarbij dus verondersteld wordt, dat het debiet gedurende 24 resp. gedurende één uur dezelfde waarde behoudt. Uit den aard der zaak dient de bepaling van het debiet ongeveer gelijktijdig met de bepaling van de grondwaterstanden te geschieden.

Waren de grondwaterstandsbuizen ideaal, d.w.z. gaven zij op ieder willekeurig moment de juiste ligging van het phreatisch oppervlak in den grond aan, zoo is de bovenbeschreven meting van het debiet voor het genoemde doel — nl. voor de toepassing in de aangegeven vergelijkingen — *zeer zeker de beste*. Voor de toepassing in de aangegeven vergelijking heeft men feitelijk het debiet — d.w.z. de snelheid, waarmede het water uit de drains, enz. stroomt — in een oneindig kleinen tijd nodig, waarop reeds eerder de aandacht is gevestigd. De waarheid is echter, dat de grondwaterstandsbuizen — althans in klei- en dergelijke gronden — vrijwel nooit ideaal zijn en dus vrijwel steeds een zekere traagheid vertoonen. Begint het b.v te regenen, dan zal in normale gevallen het debiet van de drains, enz., daarop vrij wat sneller reageeren dan de grondwaterstanden. Vooral na een voorafgaande drogere periode heeft men dus de kans in de grondwaterstandsbuis een waterstand te meten, die niet bij het gemeten debiet behoort. In verband hiermede kan men dan ook de vraag stellen of ook voor het aangegeven doel het niet beter zou zijn het debiet continue te meten. Afgezien van de hooge kosten, die dergelijke metingen met zich meebrengen, is dit voor het beoogde doel niet noodig; in elk geval zouden de metingen in dat geval toch nog moeten worden uitgevoerd op een wijze als boven is aangegeven. Ook al moge het zoo zijn, dat op regendagen aan de metingen van het debiet op de boven beschreven wijze — tenzij het natuurlijk eenige dagen achtereen geregend heeft — in verband met de gemeten grondwaterstanden weinig waarde toe te kennen is, zoo blijven er toch voldoende goede metingen over, wanneer men slechts de debiet- en grondwaterstandsmetingen elken dag gedurende een voldoende lange periode heeft verricht.

B. Enkele beschouwingen over de $Q : H_0$ -; de $Q : h_0$ - en dergelijke lijnen; de constructie van deze lijnen

§ 1. INLEIDING

Laat ons eens veronderstellen, dat we een volkomen homogenen grond hebben en dat geen water boven de drains, in de greppels, enz. voorkomt en de ondergrond ondoorlatend is, dan geldt hiervoor dus de vergelijking:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k y^2$$

Hebben we dus op een bepaalden dag het debiet en den grondwaterstand midden tusschen de drains of greppels bepaald, dan zijn dus Q , x , y en e bekend en kan dus k worden berekend. Aan de waarnemingen van één dag kunnen echter — zooals reeds is opgemerkt — groote fouten kleven en men doet dan ook beter een gemiddelde van meerdere waarnemingen in aanmerking te nemen. Men kan zich echter afvragen op welke wijze dit het beste is uit te voeren. Het zal nu spoedig blijken, dat de $Q : H_0$ -lijnen daarvoor het aangewezen materiaal zijn.

Beschouwen we in het bovengenoemde geval den grondwaterstand midden tusschen de drains, zoodat $x = e$ en $y = H_0$, dan gaat de bovengenoemde vergelijking over in de vergelijking

$$Q = \frac{k H_0^2}{e}$$

Uit deze vergelijking volgt, dat Q een functie is van H_0^2 , daar alle andere factoren constanten zijn. Stel nu eens, dat voor bovengenoemden volkomen homogenen grond telkens bij een ander debiet gelijktijdig de H_0 -waarden waren bepaald, dan zouden dus de punten, die men zou verkrijgen door de bijeenhoorende waarden van Q en H_0 uit te zetten in een diagram, waarop op de x -as de H_0 -waarden en op de y -as de Q -waarden zijn uitgezet, op een gebogen lijn van den tweeden graad en van de functie $Q = \text{constante} \cdot H_0^2$ liggen. Deze punten zouden zelfs zuiver op deze lijn liggen, indien aan de metingen van het debiet en den grondwaterstand geen fouten zouden kleven. Zou men echter bij homogene gronden de *experimenteel* verkregen waarden van Q en H_0 in een diagram uitzetten, dan zouden deze punten min of meer op de besproken curve liggen, afhankelijk van de grootte van de gemaakte fouten. Dit wil dus zeggen, dat de punten een zekere spreiding vertoonen.

§ 2. DE CONSTRUCTIE VAN DE $Q : H_0$ -($Q : M_0$)-LIJNEN, INDIEN DE ONDERGROND ONDOORLATEND IS EN GEEN WATER BOVEN DE DRAINS OF IN DE GREPPELS VOORKOMT

Bij de constructie van deze lijnen, uit waarnemingen op het veld verkregen, blijkt echter spoedig, dat we bepaalde voorzorgsmaatregelen in acht moeten nemen.

Zooals reeds eerder is uiteengezet kunnen foutieve metingen worden verkregen door de traagheid van de grondwaterstandsbuizen. Als voorbeeld is reeds genoemd, dat men in het algemeen — afgezien van zeer goed doorlatende gronden — niet moet verwachten, dat tijdens een regenval de waterstanden in de grondwaterstandsbuizen even snel zullen stijgen als het phreatisch oppervlak in den grond. Iets analoogs, zij het dan ook juist het omgekeerde, treedt bij vorst op. De grondwaterstanden dalen dan zeer snel (24) en ook dan kan de traagheid der buizen fouten geven. Teekent men dan ook de $Q : H_0$ -lijnen (hetzelfde geldt natuurlijk ook voor de later te bespreken $Q : h_0$ -lijnen enz.) dan moet men met de volgende waarnemingen voorzichtig zijn (eventueel weglaten), nl.:

1. De waarnemingen verricht in de eerste regendagen na een droge periode. De kans om fouten te maken is hier des te grooter, naarmate de droge periode langer is geweest.
2. De waarnemingen verkregen op een dag, waarop — in vergelijking met voorgaande dagen — een groote neerslag is gevallen; één en ander afhankelijk van den tijd van waarneming ten opzichte van den tijd, waarin de regen gevallen is.
3. De waarnemingen verricht in of vlak na een vorstperiode.
4. De waarnemingen verricht in een periode van zeer sterke verdamping en groot waterverbruik. Dergelijke waarnemingen zijn alleen in den zomer te verwachten, dus niet in den tijd, waarin de grondwaterstands- en debietmetingen voor het genoemde doel de meeste waarde hebben (zie ook hieronder).

De overige waarnemingen kan men gewoonlijk zonder meer benutten, tenzij er natuurlijk redenen bestaan om aan de juistheid van de waarnemingen te twifelen. Ervaring wijst hierin overigens spoedig genoeg den weg. Eén aanwijzing mag hier echter nog gegeven worden. Het zal immers duidelijk zijn, dat hoe grooter het debiet is, hoe hooger de grondwaterstand midden tusschen de drains, greppels, enz. moet zijn. Treft men dus bij waarnemingen gevallen aan, waarbij bij een stijgend debiet de grondwaterstand daalt of gelijk blijft, dan moet men uit den aard der zaak met deze waarnemingen

voorzichtig zijn; de waarnemingen op de daarop volgende dagen leeren reeds spoedig in welke mate dergelijke waarnemingen foutief zijn, hetgeen dus blijkt uit het feit of deze punten nog vallen binnen de begrenzen de stippellijnen, die door de meest buitenwaarts gelegen punten kunnen worden getrokken (zie diagram 1), waarbij de lijn tusschen de stippellijnen de $Q : H_0$ -lijn aangeeft.

Alvorens nu in te gaan op de foutengrenzen van deze $Q : H_0$ -lijnen of op de periode, waarin de grondwaterstands- en debietwaarnemingen het beste kunnen worden verricht, moet eerst nog een andere opmerking worden gemaakt.

Het zal duidelijk zijn, dat de H_0 -waarden alleen bekend zijn, wanneer de ligging van de ondoorlatende laag bekend is, daar immers de H_0 -waarden steeds vanaf de ondoorlatende laag moeten worden gerekend. Is de ondergrond ondoorlatend, dan vormt de bodem van de greppels of het vlak van de drains tevens de ondoorlatende laag, zoodat hier direct de $Q : H_0$ -lijn zou zijn op te stellen. In het algemeen is dit niet het geval en wel, doordat óf een profielstudie nog niet is verricht, óf doordat men juist uit den vorm van de $Q : H_0$ -lijnen een aanwijzing hoopt te verkrijgen, waar de ondoorlatende laag zich bevindt. De H_0 -waarden zijn dus dan nog niet bekend. Wel zijn daarentegen bekend de grondwaterstand onder het maaiveld of onder den bovenkant van de buis, enz. Deze waarden verschillen alleen in een constant bedrag van de H_0 -waarden en zijn voor het aangegeven doel dan ook volkomen gelijkwaardig. Geeft men b.v. de grondwaterstanden op onder het maaiveld en ligt de ondoorlatende laag L meter onder het maaiveld en de grondwaterstand midden tusschen de greppels of drains M_0 meter, dan is in dit geval

$$M_0 = L - H_0,$$

waarin L een constant bedrag voorstelt.

Uit het bovenstaande volgt dan ook, dat men slechts zelden de $Q : H_0$ -lijnen zal opstellen, maar gewoonlijk dus de $Q : M_0$ -lijnen. Daar echter de factor M_0 slechts in een constant bedrag van den factor H_0 verschilt, bezit de $Q : M_0$ -lijn alle eigenaardigheden van de $Q : H_0$ -lijn, daar men immers door een enkele lijn te trekken, wanneer de ligging van de ondoorlatende laag bekend is, van het bovengenoemde diagram een zuiver $Q : H_0$ -diagram kan maken. Het is daarvoor voldoende om loodrecht de x -as een lijn te trekken bij het punt, dat de bovenkant van de ondoorlatende laag voorstelt. De horizontale afstanden van deze lijn tot de $Q : M_0$ -lijn geven de H_0 -waarden aan. Iets dergelijks geldt ook voor de $Q : h_0$ -lijnen, waarbij nu de waterstand onder het maaiveld (of onder een ander vast vlak) nl. N , op de x -as van het diagram wordt aangegeven. In dit geval is $N = L - h_0$ en worden dus $Q : N$ -lijnen verkregen, die dezelfde eigenschappen hebben als de $Q : h_0$ -lijnen.

In het nevenstaande diagram 1 is de $Q : M_0$ -lijn aangegeven van de 10 m strooken van één der greppelvakken van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder. De benodigde gegevens zijn mij door den Directeur van den Wieringermeerpolder, den Heer Ir. SMEDING, welwillend ter beschikking gesteld, waarvoor hierbij gaarne mijn dank wordt gebracht. De punten geven dus de bijeenhoorende waarden van Q en M_0 aan. In dit diagram zijn ook de boven besproken begrenzendende stippellijnen getrokken, terwijl de volgetrokken lijn midden tusschen de stippellijnen de $Q : M_0$ -lijn aangeeft. In dit diagram zijn de punten weggelaten, die om één van de bovengenoemde redenen sterk afwijkend waren. Hierbij kan worden opgemerkt, dat op dit proefveld in vrijwel alle gevallen (ruim 100) deze $Q : M_0$ -lijnen waren op te stellen, ondanks dus een zeker aantal afwijkende punten (zie sub 1 van deze paragraaf).

Een indruk van de foutengrenzen geven de afwijkingen van de stippellijnen van de $Q : M_0$ -lijn (volgetrokken lijn), in zooverre tenminste zeer gemakkelijk een indruk wordt verkregen van de maximale fout van één enkele meting door punten van de stippellijnen te vergelijken met punten van de $Q : M_0$ -lijn zelf, waarbij men er wel verdacht op moet zijn, dat bij grootere Q -waarden de fouten in de x -richting vele malen kleiner zijn dan in de y -richting. Welke fout de $Q : M_0$ -lijn zelf heeft- d.w.z. wat dus de gemiddelde fout van de waarnemingen is — kan in het algemeen moeilijk berekend worden. Met behulp van de methode van de kleinste kwadraten kan men immers deze fout alleen berekenen, wanneer de functie van de $Q : M$ -lijn bekend is en dit zal slechts zelden het geval zijn. Alleen in een volkomen homogenen grond, die streng genomen onder de drains, enz. ook nog ondoorlatend moet zijn, of, indien de $Q : M_0$ -lijn in één of ander diagram kennelijk een rechte lijn is, zou men deze fout kunnen berekenen. In een zuiveren vorm komen deze gevallen vrijwel nooit voor. Men moet zich dan ook in het algemeen tevreden stellen met de fouten, die bij de metingen in de kas van het Instituut verkregen zijn en met de maximale fouten van één enkele meting door punten op de stippellijnen en op de $Q : M_0$ -lijnen te vergelijken, waardoor men een indruk verkrijgt van de foutengrens van de uit de $Q : M_0$ -lijnen afgeleide gegevens. Het spreekt verder vanzelf, dat ook de fouten, die men bij de meting van het debiet en bij de bepaling van de waterstanden in de grondwaterstandsbuizen kan maken, mede in de spreiding der punten tot uiting komen.

Ten slotte mag op een systematische fout nog attent worden gemaakt. Deze fout is echter alleen van belang, wanneer begreppeld terrein wordt beschouwd. Deze fout betreft nl. de verdamping van water uit de greppels zelf, waardoor een te laag debiet wordt gemeten. Nu zal echter in de perioden, waarin de waarnemingen gewoonlijk worden verricht (zie hieronder), deze fout gewoonlijk

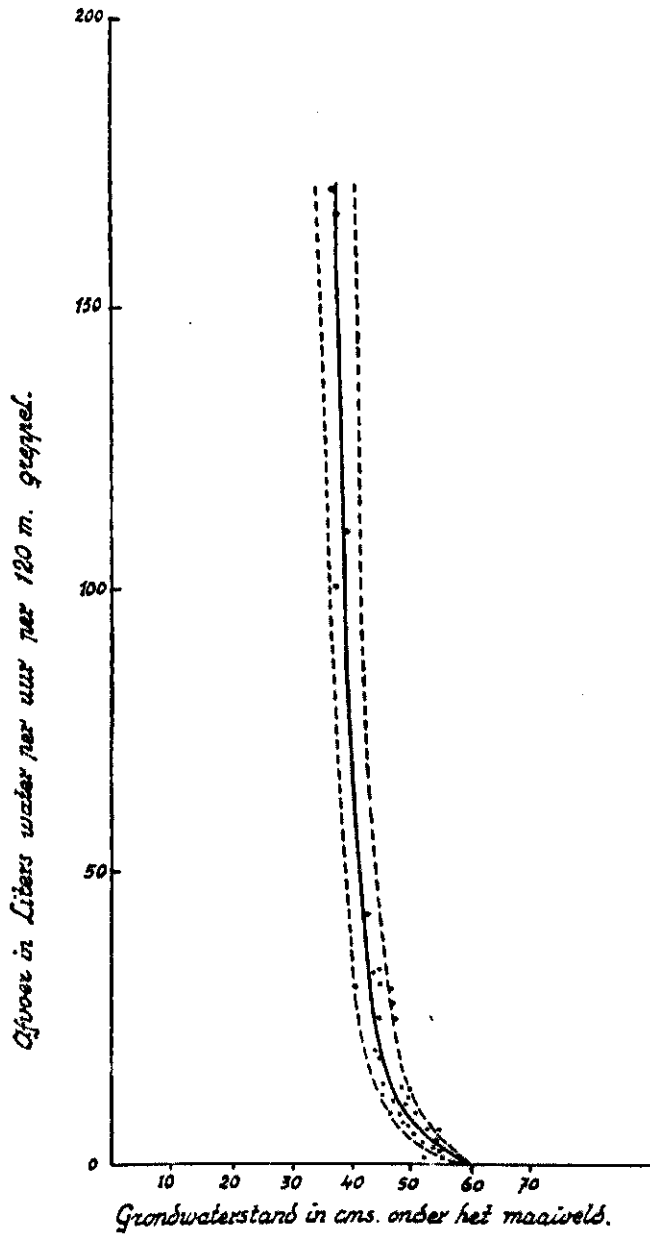


Diagram 1

klein zijn, terwijl bovendien de invloed op hooge Q-cijfers steeds klein zal zijn. Bij kleinere debietwaarden kan deze fout echter grooter worden. In het algemeen zal men dan ook de beste, lage debietcijfers krijgen op dagen met een geringe verdamping.

Tenslotte kan in dit verband nog worden opgemerkt, dat men voor de constructie van de Q : M₀-lijn dus zooveel mogelijk punten noodig heeft. Wordt het debiet en de grondwaterstand éénmaal per dag gemeten, dan moet deze periode liefst eenige maanden groot zijn. De periode, die daarvoor het beste geschikt is, ligt tusschen de maanden October tot Mei; afhankelijk van het weer. Dat deze periode de meest geschikte is, komt doordat:

- a. De grondwaterstanden de hoogste waarden in deze periode bereiken, de verdamping het geringste is en dus de kans om bruikbare gegevens te krijgen het grootste is. Anderzijds moet men er echter wel om denken, dat ook waarnemingen bij kleinere debietwaarden en dus bij diepere grondwaterstanden van belang zijn. In de genoemde periode komen echter dergelijke gevallen gewoonlijk ook wel voor.
- b. De structuurveranderingen en de daaraan verbonden veranderingen van de doorlatendheid het geringste zijn. Alleen in tijden van hevige vorst, die diep in den grond indringt (alleen de veranderingen in de grondlagen beneden den hoogsten grondwaterstand zijn van belang), kan dit anders zijn en moet men 2 perioden, nl. één voor en één na de vorst onderscheiden. De eventueele invloed van de vorst op den grond is uit de Q : M₀-lijnen (zie D) direct af te leiden. De groote structuur-veranderingen in de diepere lagen van den grond treden echter alleen in den zomer op, als door de verdamping en een groot waterverbruik de grond begint in te drogen en te scheuren. Vooral bij jonge nog waterrijke zware gronden is dat het geval.

§ 3. DE CONSTRUCTIE VAN DE Q : H₀- EN Q : h₀- (OF Q : M₀- EN Q : N-) LIJNEN, INDIEN DE ONDERGROND NIET DOORLATEND IS EN ZICH BOVEN DE DRAINS (25), RESP. IN DE GREPPELS WATER BEVINDT

Bevindt zich water boven de drains en is ook nu den grond onder de drains ondoorlatend en boven de drains homogeen, dan luidt de vergelijking:

$$Q = \frac{k (H_0^2 - h_0^2)}{e},$$

wanneer ook nu de grondwaterstand midden tusschen de drains wordt beschouwd.

In bovengenoemd geval hangt dus Q, behalve van H₀, ook nog van h₀ af. De Q : H₀-lijn van een dergelijk geval *behoeft* in een Q : H₀-diagram niet een zuiver tweedegraadskromme van het type Q = constante · H₀² te zijn, daar de vorm van deze lijn ook bepaald wordt door het verloop van de Q : h₀-lijn.

Een teekenend voorbeeld daarvan leveren de $Q : H_0$ - en $Q : h_0$ -lijnen, die uit de waarnemingen in den bak (tabel I tot IV) zouden kunnen worden construeerd. Het lijkt mij niet noodig deze lijnen hier weer te geven, daar het duidelijk zal zijn, dat de $Q : H_0$ - en $Q : h_0$ -lijn van deze waarnemingen beide naar dezelfde 2 punten moet verlopen, nl. naar het punt waar H_0 en h_0 beide nul zijn en naar het beginpunt, waarbij H_0 en h_0 immers ook gelijk zijn, daar we van een horizontaal phreatisch oppervlak zijn uitgegaan. Op het veld zal men echter vaak het geval aantreffen, dat de beide lijnen eenzelfde vorm hebben (de functies $Q = f(H_0)$ en $Q = f(h_0)$ of dus $Q = f(M_0)$ en $Q = f(N)$ verschillen slechts in een constante), zoodat in het aangegeven geval de $Q : H_0$ - resp. $Q : M_0$ -lijn weer een zuiver tweedegraadscurve van de bovenaangegeven gedaante zou zijn. Zekerheid hiervan heeft men echter niet, tenzij natuurlijk is gebleken, dat de vorm van beide lijnen inderdaad gelijk is. Op de constructie van de betreffende lijnen en voor de berekeningen heeft dit natuurlijk geen invloed. Men kan immers ook door kunstmatig ingrijpen de h_0 - (resp. N -)waarden naar willekeur, zonder dat dit invloed heeft op het resultaat van de berekening, veranderen. Wel kunnen nu niet altijd meer uit den vorm van deze lijnen gevolgtrekkingen worden afgeleid, wat betreft de ligging van de ondoorlatende laag enz., waarop in de volgende paragraaf zal worden teruggekomen.

De constructie van de $(Q : M_0)$ -lijnen (26) gaat ook nu op dezelfde wijze, Voor de $Q : N$ -lijnen zet men op de x -as de waterstanden boven de drains, gemeten vanaf het maaiveld of een ander vast vlak, af. Dat er een verband tusschen Q en N zal bestaan (tenzij men natuurlijk kunstmatig ingrijpt) volgt ook reeds hieruit, dat ook de waterstand boven de drains des te hooger zal zijn, naarmate het debiet (afvoer regenwater) grooter is. Trekt men in het aldus verkregen diagram een loodlijn op de x -as bij het punt, dat den bovenkant van de ondoorlatende laag aangeeft, dan zal ook hier de horizontale afstanden links van deze loodlijn tot de $Q : N$ -lijnen de h_0 -waarden aangeven.

Verder zal bij greppels, slooten, enz. de stand van het water hierin vrijwel constant zijn. In dat geval zal dus h_0 een constante zijn en vervalt dus uit den aard der zaak de constructie van de $Q : h_0$ -lijn, of dus van de $Q : N$ -lijn, terwijl de vorm van de $Q : H_0$ -lijn (of dus $Q : M_0$ -lijn) daardoor niet meer zal worden beïnvloed. In het gegeven geval is immers: $\frac{kh_0^2}{e} = \text{constant}$.

Ook zal het duidelijk zijn, dat de $Q : h_0$ -lijn ($Q : N$ -lijn) een des te kleiner invloed op den vorm van de $Q : H_0$ -lijn ($Q : M_0$ -lijn) zal hebben, naarmate h_0 kleiner is ten opzichte van H_0 , zoodat de invloed daarvan verwaarloosd kan worden, wanneer h_0 in verhouding maar klein genoeg is.

Als een voorbeeld van de constructie van de $Q : M_0$ - en $Q : N$ -lijnen zijn

in diagram 2 deze lijnen van de 10 m strooken van een gedraineerd perceel Dr_2 van het ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder in een bepaald geval weergegeven. Ook dit diagram is slechts als een voorbeeld bedoeld, zoodat het feit, of in dit geval de grond homogeen dan niet homogeen en of de ondergrond al of niet doorlatend is, niet in aanmerking is genomen.

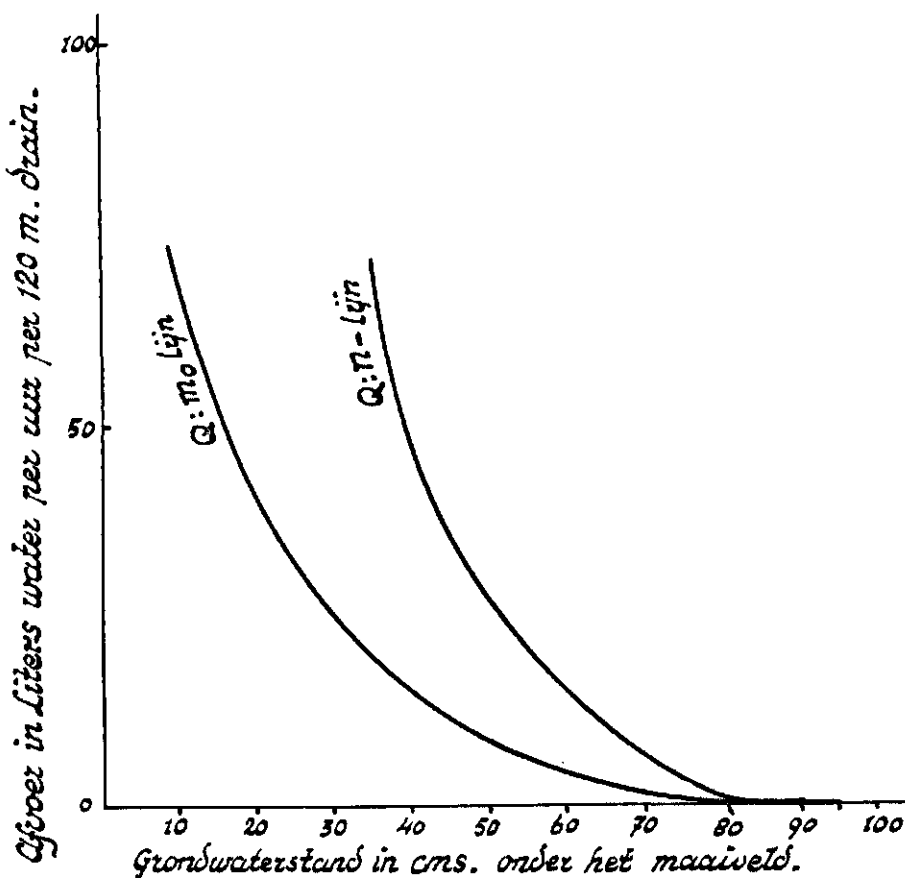


Diagram 2

- § 4. DE CONSTRUCTIE VAN DE $Q : M_0$ - EN $Q : N$ -; DE $Q : m_0$ - EN $Q : n$ -; DE $Q : m'_0$ EN $Q : n'$ -LIJNEN, INDIEN DE ONDERGROND DOORLATEND IS EN ER ZICH AL OF NIET WATER BOVEN DE DRAINS, RESP. IN DE GREPPELS BEVINDT.

Is de ondergrond doorlatend, dan zijn de H_0 - en h_0 -waarden *alleen* bekend, wanneer de ligging van de ondoorlatende laag bekend is. Wanneer deze ligging

niet op overtuigende wijze blijkt uit den opbouw van het profiel, zal men zelfs niets anders dan de $Q : M_0$ - en $Q : N$ -lijnen kunnen construeeren. De constructie van deze lijnen blijft dezelfde; alleen kan de constructie van de $Q : N$ -lijnen vervallen, wanneer N , b.v. de waterstand in slooten en greppels, enz., constant of vrijwel constant is en dus onafhankelijk is van het debiet.

In dit geval verdient het verder aanbeveling uit de $Q : M_0$ - en $Q : N$ -lijnen de $Q : m$ - en de $Q : n$ -lijnen te construeeren, waarin m_0 en n resp. de grondwaterstanden midden tusschen de drains, greppels enz., resp. boven de drains, in de greppels enz., gerekend van het vlak van de drains, den bodem van de greppels enz., voorstellen (27). De voor deze lijnen benoodigde punten halen we het eenvoudigste uit de reeds geconstrueerde $Q : M_0$ - en $Q : N$ -lijnen. Tenslotte zal het nut kunnen hebben uit de $Q : M_0$ - en $Q : N$ -lijnen de $Q : m'_0$ - en de $Q : n'$ -lijnen te construeeren in het geval er water in de greppels of boven de drains blijft staan op het moment, dat geen water meer uit de greppels of drains vloeit, of dus wanneer het debiet Q juist nul is geworden. De m'_0 - en de n' -waarden geven ook nu de grondwaterstanden midden tusschen de drains, greppels, resp. boven de drains, in de greppels, enz. aan; zij worden echter nu gerekend vanaf het horizontale vlak, dat men door den grondwaterspiegel boven de drains, resp. door den waterspiegel in de greppel, enz. kan brengen op het moment dat het debiet ($= Q$) juist gelijk nul is geworden. Deze lijnen kunnen ook geconstrueerd worden voor het geval de grond onder de drains, enz. *ondoordlatend* is (§ 3) en waarbij, bij $Q = 0$, nog water boven de drains of in de greppels staat. De constructie van deze lijnen verandert daardoor niet.

C. Beschouwing over hetgeen de vorm van de $Q : H_0$ - ($Q : m_0$) en de $Q : H_0^2$ - ($Q : m_0^2$)-lijnen kan leeren

§ 1. INLEIDING

Reeds in sub B en ook reeds eerder is opgemerkt, dat de $Q : H_0$ - en de $Q : h_0$ -lijnen het aangewezen materiaal vormen voor de te maken berekeningen. Behalve voor dit doel kan echter ook alleen uit deze en dergelijke lijnen de *verandering* van de doorlatendheid in het profiel worden berekend, terwijl zij verder in het algemeen ook een eenvoudig en duidelijk inzicht geven in de veranderingen, die in de doorlatendheid van den grond in den loop der tijden zijn opgetreden. Voor deze laatste punten moge echter naar sub D en E verwezen worden.

De constructie van de bovengenoemde $Q : H_0$ - en $Q : h_0$ -lijnen zijn echter, zooals reeds eerder is opgemerkt, alleen uit te voeren, wanneer de ligging van de *o* doorlatende laag bekend is, daar immers de H_0 -, h_0 -waarden gerekend

worden vanaf de ondoorlatende laag. Het spreekt natuurlijk vanzelf, dat men ook door een profielonderzoek kan nagaan, hoe het profiel is opgebouwd en waar zich de ondoorlatende laag kan bevinden. In een groot aantal gevallen zal men daaruit echter geen vaststaande conclusies kunnen trekken, waar zich deze ondoorlatende laag bevindt, of — wat meestal juister zal zijn — waar deze laag kan worden verondersteld, zonder dat daardoor niet te verwaarlozen fouten ontstaan. We zullen nu echter hier onder aantoonen, dat ook de vorm van de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen over de ligging van de ondoorlatende laag of althans over het feit of de ondergrond af of niet doorlatend is, waardevolle inlichtingen kan verschaffen.

De $Q : m_0$ -resp. de $Q : m_0^2$ -lijnen worden uit de $Q : M_0$ -lijnen verkregen door met behulp van de daaruit te ontnemen punten deze $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen te construeeren in diagrammen, waarop op de ordinaat Q en op de abscis resp. m_0 of m_0^2 zijn afgezet en waarbij dus onder m_0 verstaan wordt de hoogte van de grondwaterspiegel midden tusschen de drains, greppels, enz. gerekend vanaf het vlak door de drains, resp. gerekend vanaf den bodem van de greppels, enz., Deze laatste diagrammen zijn immers óók steeds te construeeren, indien de ondergrond doorlatend is en de ligging van de ondoorlatende laag onbekend is.

Verder spreekt het vanzelf, dat, wanneer er water boven de drains, resp. in de greppels, enz. staat, we onder N dus moeten verstaan den grondwaterstand boven de drains of in de greppels, enz. onder het maaiveld; voor den afstand van deze grondwaterstand boven het vlak van de drains, boven den bodem van de greppels, enz. ~~zullen~~ ^{hebben} we de letter n ingevoerd, zoodat de $Q : M_0$ - en $Q : N$ -diagrammen zijn om te vormen tot de $Q : m_0$ - en de $Q : n$ -diagrammen. Noemen we ook nu den afstand van de ondoorlatende laag tot het vlak van de drains, den bodem van de greppels, enz., r , dan is dus:

$$H_0 = r + m_0 \quad (74)$$

$$h_0 = r + n \quad (75)$$

Uit de vergelijkingen 74 en 75 volgt dus, dat, indien geen water boven de drains resp. in de greppels, enz. staat, d.w.z. $n = 0$ en de ondergrond doorlatend is, h_0 dus niet nul wordt, maar gelijk wordt aan een constante waarde, nl. gelijk r . Het spreekt vanzelf, dat dit alleen geldt, zoolang m_0 grooter is dan nul.

We zullen nu zoo systematisch mogelijk den invloed van een al of niet voorkomen van een doorlatende laag onder de drains, enz. en van de wijze van verandering van de doorlatendheid in het profiel op den vorm van deze $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen nagaan. We zullen daardoor achtereenvolgens verschillende gevallen beschouwen, waarbij de grond onder de drains, enz. on-

doorlatend, resp. doorlatend is en waarbij onderscheid moet worden gemaakt tusschen de gevallen, dat $n = 0$ of te verwaarloozen klein is; resp. dat n niet te verwaarloozen klein is.

§ 2. DE VORM VAN DE $Q : m_0$ - EN $Q : m_0^2$ -LIJNEN

α De grond onder de drains is ondoorlatend; $n = 0$ of te verwaarloozen klein

a. De grond is homogeen

Is de ondergrond ondoorlatend, $h_0 = 0$ en is de grond boven de drains ¹⁾ homogeen, dan geldt de vergelijking:

$$Q = \frac{kH_0^2}{e} = \frac{km_0^2}{e} \quad (76)$$

daar in dit geval $H_0 = m_0$. In dit geval, evenals in alle nog te beschouwen

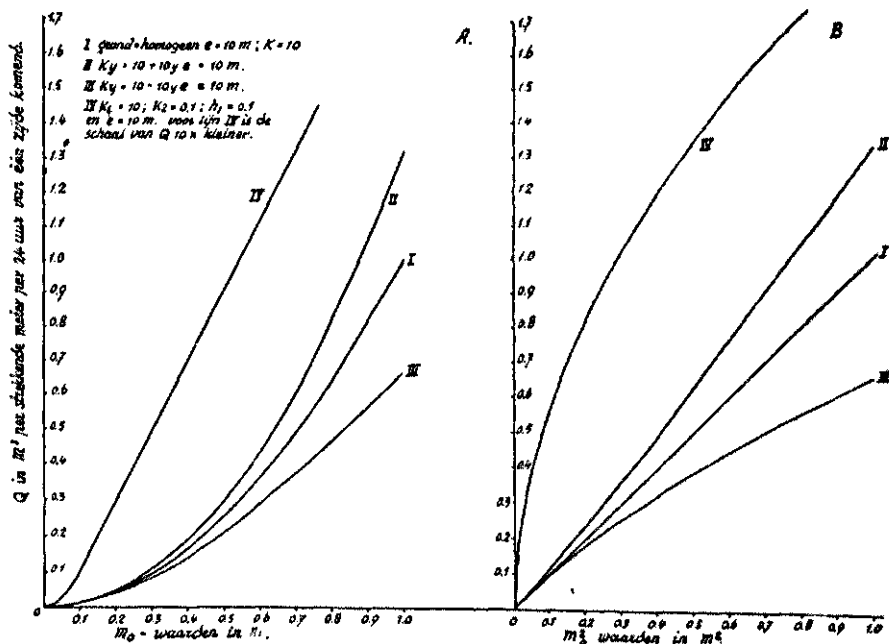


Diagram 3

gevallen, waarbij de ondergrond ondoorlatend is, zouden we dus evengoed de $Q : H_0$ - en de $Q : H_0^2$ -lijnen kunnen beschouwen. Daar dit laatste in het alge-

¹⁾ Deze en de volgende afleidingen gelden natuurlijk ook voor greppels, enz. In het vervolg zal dit stilzwijgend verder worden aangenomen, tenzij anders in den tekst is vermeld.

meen niet mogelijk is, wanneer de ondergrond doorlatend is, — in tegenstelling met de $Q : m_0$ - en de $Q : m_0^2$ -lijnen, die steeds kunnen worden toegepast —, zal daarom dan ook in alle gevallen van de $Q : m_0$ - en de $Q : m_0^2$ -lijnen gesproken worden.

In het gegeven geval moet dus in een $Q : m_0$ -diagram een tweedegraads kromme ontstaan, waarbij dus de kromme naar de Q -as ombuigt. In een $Q : m_0^2$ -diagram ontstaat een rechte lijn. In diagram 3 is een dergelijke $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijn (nl. de lijnen I) geteekend voor het geval $e = 10$ m; $k = 10$ m per uur, waardoor dus $Q = m_0^2$ wordt.

In dit geval blijkt dus de $Q : m_0$ -lijn naar de Q -as om te buigen. We kunnen dit exacter als volgt uitdrukken, nl., dat de tangens van den hoek, die de raaklijn aan de $Q : m_0$ -lijn maakt, steeds grooter wordt, naarmate m_0 grooter wordt, hetgeen wil zeggen, dat $\frac{d^2Q}{dm_0^2}$ positief is, immers:

$$Q = \frac{km_0^2}{e}; \text{ dus } \frac{dQ}{dm_0} = \frac{2m_0k}{e} \text{ en } \frac{d^2Q}{dm_0^2} = \frac{2k}{e} = \text{positief, daar } k \text{ en } e \text{ positief zijn.}$$

Op soortgelijke wijze is aan te toonen, dat de $Q : m_0^2$ -lijn een rechte lijn is. In dit geval moet $\frac{dQ}{d(m_0^2)}$ constant zijn en $\frac{d^2Q}{d(m_0^2)^2} = 0$ zijn. Dit volgt ook uit de vergelijking, daar immers $Q = \frac{km_0^2}{e}$ of, wanneer $u = m_0^2$ wordt gesteld: $Q = \frac{ku}{e}$ en dus $\frac{dQ}{du} = \frac{k}{e} = \text{constant}$ en $\frac{d^2Q}{du^2} = 0$.

b. De doorlatendheid neemt met een toenemende hoogte, boven de drains, enz. toe

Neemt de doorlatendheid met de hoogte boven de drains toe, dan kunnen we den invloed daarvan bestudeeren door slechts één willekeurig geval te beschouwen, daar alle andere gevallen overeenkomstige resultaten zullen geven. Hiervoor kiezen we dan ook het eenvoudigste geval, nl. dat:

$$k_y = k_0 + ay$$

De vergelijking wordt dan in dit geval:

$$Q = \frac{k_0 H_0^2 + \frac{1}{3} a H_0^3}{e} = \frac{k_0 m_0^2 + \frac{1}{3} a m_0^3}{e} = \frac{k_0 u + \frac{1}{3} a u^{\frac{3}{2}}}{e} \quad (77)$$

$$\text{In dit geval is dus } \frac{dQ}{dm_0} = \frac{2k_0 m_0 + a m_0^2}{e} \text{ en } \frac{d^2Q}{dm_0^2} = \frac{2k_0 + 2am_0}{e}$$

¹⁾ Ook nu is $u = m_0^2$ genomen, hetgeen in vervolg steeds zal geschieden.

Beide waarden zijn positief. In het $Q : m_o$ -diagram worden dus naar de Q -as omgebogen lijnen verkregen.

Verder is

$$\frac{dQ}{du} = \left(k_o + \frac{1}{2} a u^{\frac{1}{2}} \right) \frac{1}{e} \text{ en } \frac{d^2Q}{du^2} = \frac{au^{-\frac{1}{2}}}{4e}.$$

Beide quotiënten zijn positief, hetgeen dus wil zeggen, dat in het $Q : m_o^2$ -diagram naar de Q -as omgebogen lijnen zullen optreden. In diagram 3 stellen de lijnen II dit geval voor, indien $e = 10$, $k = 10$ en $a = 10$.

Hierbij kan worden opgemerkt, dat het teeken van $\frac{d^2Q}{du^2}$ blijkbaar beheerscht wordt door het teeken van de constante a in de vergelijking $k_y = k_o + ay$, dat hier dus positief is. Verder zal door differentiatie ook nooit een negatief teeken kunnen ontstaan daar — hoe de functie $k_y = k_o + a/(y)$ ook mag luiden — in elk geval de term met de constante a in de uiteindelijk verkregen vergelijking steeds een andere macht zal hebben dan de 1ste of 2de macht en alleen dus deze term bij de tweede differentiatie overblijft.

c. De doorlatendheid neemt af met een toenemende hoogte boven het vlak van de drains, enz.

In het geval, dat de doorlatendheid met een toenemende hoogte boven het vlak van de drains afneemt, zal de kromme in het $Q : m_o$ -diagram nog naar de Q -as zijn gebogen; in het $Q : m_o^2$ -diagram buigt echter deze lijn naar de m_o^2 -lijn om. Ook nu kunnen we volstaan met één voorbeeld, daar alle andere gevallen zich soortgelijk gedragen.

Is immers $k_y = k_o - ay$, dan is:

$$Q = \frac{k_o H_o^2 - \frac{1}{3} a H_o^3}{e} = \frac{k_o m_o^2 - \frac{1}{3} a m_o^3}{e} = (k_o u - \frac{1}{3} a u^{\frac{3}{2}}) \frac{1}{e} \quad (78)$$

$$\text{In dit geval is dus } \frac{dQ}{dm_o} = \frac{2k_o m_o - am_o^2}{e} \text{ en } \frac{d^2Q}{dm_o^2} = \frac{2k_o - 2am_o}{e}.$$

Beide waarden zijn positief, daar immers uit het feit, dat k_y niet negatief kan worden, volgt, dat k_o grooter moet zijn dan ay of dus k_o grooter moet zijn dan am_o .

Verder is $\frac{dQ}{du} = \left(k_o - \frac{1}{2} a u^{\frac{1}{2}} \right) \frac{1}{e} = \text{positief}$ en $\frac{d^2Q}{du^2} = -\frac{1}{4e} a u^{-\frac{1}{2}} = \text{negatief}$. Hieruit volgt dus, dat $\frac{d^2Q}{du^2}$ negatief is, hetgeen dus, zooals reeds is opgemerkt, beteekent, dat de $Q : m_o^2$ -lijn naar de m_o^2 -as is omgebogen.

In diagram 3 stellen de lijnen III dit geval voor, indien $e = 10$ m en $k_y = 10 - 10 y$.

d. De grond vlak boven de drains is in verhouding veel beter doorlatend dan op grootere hoogte daarboven

Uit het voorgaande en ook uit de beschouwing van diagram 3 volgt, dat de $Q : m_0$ -lijn bij gelijke m_0 -waarde des te steiler zal verlopen, naarmate de doorlatendheid sneller met de hoogte boven het vlak van de drains toeneemt. Omgekeerd zal deze lijn des te vlakker vormen gaan aannemen, naarmate de doorlatendheid sneller met de hoogte boven het vlak van de drains afneemt. We kunnen dit het gemakkelijkste aantonen door het profiel te verdeelen in twee lagen, nl. een zeer goed doorlatende dunne laag vlak boven de drains en daarboven een dikkere laag met een in verhouding veel kleinere doorlatendheid. Daar in dit geval $n = 0$, geldt dus de vergelijking 29, waarbij dus weer voor H_0 , m_0 is ingevuld:

$$Q = (k_2 m_0^2 + 2 h_1 (1-n_1) k_1 m_0 + k_1 h_1^2 (n_1-1)) \frac{1}{e} \quad (79)$$

en

$$Q = (k_2 u + 2 h_1 (1-n_1) k_1 u^{\frac{1}{2}} + k_1 h_1^2 (n_1-1)) \frac{1}{e} \quad (80)$$

Hieruit volgt, dat, wanneer k_1 groot is ten opzichte van k_2 en daar $n_1 = \frac{k_2}{k_1}$, de termen met k_2 kunnen worden verwaarloosd, zoodat

$$Q = \frac{2 h_1 k_1 m_0 - k_1 h_1^2}{e} \quad (81)$$

Hieruit volgt, dat de $Q : m_0$ -lijn des te meer tot een rechte lijn moet naderen, naarmate dus k_1 grooter is ten opzichte van k_2 of dus naarmate de termen met k_2 beter kunnen worden verwaarloosd. Nu is de bovenstaande vergelijking alleen geldig, indien m_0 grooter is dan h_1 . Voor de m_0 -waarden kleiner dan h_1 geldt eenvoudig $Q = \frac{k_1 m_0^2}{e}$, daar dan de geheele strooming in de onderste laag plaats vindt. Op grond hiervan zullen we dan ook $Q : m_0$ -lijnen kunnen verwachten, die voor de waarden van m_0 kleiner dan h_1 naar de Q -as zijn omgebogen om daarna des te meer tot een rechte lijn te naderen, naarmate k_1 grooter is dan k_2 .

We kunnen dit ook inzien door de differentiaalquotienten te beschouwen. Immers:

$$\frac{dQ}{dm_0} = \frac{2 k_2 m_0 + 2 h_1 (1-n_1) k_1}{e} \text{ en } \frac{d^2 Q}{dm_0^2} = \frac{2 k_2}{e} \quad (82)$$

Is nu k_2 klein ten opzichte van k_1 dan nadert immers $\frac{dQ}{dm_0}$ tot $2h_1k_1$, d.w.z. tot een constante waarde, terwijl $\frac{d^2Q}{dm_0^2}$ nul wordt.

Verder spreekt het vanzelf, dat de $Q:m_0^2$ -lijn naar de m_0^2 -as is omgebogen, daar immers ook nu de doorlatendheid met een toenemende hoogte boven het vlak van de drains afneemt — zij het ook nu sprongsgewijze en niet continue zooals in geval 3 — hetgeen ook volgt uit het differentiaalquotient van vergelijking 80, nl.:

$$\frac{dQ}{du} = k_2 + h_1 (1-n_1) k_1 u^{-1} = \text{positief daer } 1-n_1 \text{ positief is, en:}$$

$$\frac{d^2Q}{du^2} = -\frac{1}{2} h_1 (1-n_1) k_1 u^{-\frac{3}{2}} = \text{negatief, daer } 1-n_1 \text{ positief is.}$$

In diagram 3 geven de lijnen IV dit geval weer, wanneer $k_1 = 10$ m.p. 24 uur en $k_2 = 0,1$ m.p. 24 uur, terwijl $h_1 = 0,1$ meter. Opgemerkt kan nog worden, dat een dergelijk geval zich in de praktijk hoogstens slechts zeer zelden zal voordoen. Overigens zou een dergelijk geval ook door een profielonderzoek zeer gemakkelijk te onderkennen zijn van het onder nog te bespreken geval, waarbij de $Q:m_0$ -lijn ook tot een rechte lijn nadert, nl. waarbij de ondergrond doorlatend is en deze doorlatendheid en (of) de dikte van deze laag groot is ten opzichte van de doorlatendheid en (of) de doorsnede van het gedeelte van het watervoerend profiel boven de drains.

e. Samenvatting

In het geval de ondergrond dus *ondoorlatend* is, wordt in het $Q:m_0$ -diagram steeds een naar de Q-as omgebogen lijn verkregen. Een rechte lijn met een bij den oorsprong naar de Q-as omgebogen gedeelte wordt des te beter benaderd, naarmate de doorlatendheid sneller met de hoogte boven het vlak van de drains afneemt.

In een $Q:m_0^2$ -diagram is de $Q:m_0^2$ -lijn geheel recht, wanneer de grond homogeen is. Deze lijn buigt des te sterker naar de Q-as om, naarmate, uitgaande van dezelfde k_0 -waarden, de doorlatendheid sneller met de hoogte boven het vlak van de drains toeneemt. Deze lijn buigt naar de m_0^2 -as om, indien de doorlatendheid met de hoogte boven het vlak van de drains afneemt en wel des te sterker, naarmate uitgaande van dezelfde k_0 -waarde, deze afname sneller optreedt.

β. De grond onder de drains is ondoorlatend; n is niet gelijk nul en niet te verwaarloozen klein

Beschouwen we nu het geval, dat h_0 of dus n ($h_0 = n$ in dit geval) niet gelijk nul en niet te verwaarloozen klein is, dan kunnen we verschillende mogelijkheden onderscheiden, nl.:

a. $n = \text{constant}$

Is n constant dan is gemakkelijk aan te toonen, dat de $Q : m_0$ -en de $Q : m_0^2$ -lijnen daardoor alleen in zooverre veranderen, dat zij niet in den oorsprong, maar op een afstand n_0 (bij $Q = 0$) daarvan op de abscis beginnen. De vorm van de lijn wordt daardoor op dezelfde wijze beïnvloed als dit het geval is, wanneer de grond onder de drains doorlatend is en geen water boven de drains staat, hetgeen niets anders beduidt, dat ook nu h_0 constant is. Zooals we in sub D van dit hoofdstuk zullen zien, kunnen we met behulp van de $Q : m_0$ -lijnen en dergelijke lijnen slechts zeer weinig over den grond onder het horizontale vlak door den grondwaterstand boven de drains resp. in de greppels op het moment, dat $Q = 0$, te weten komen. We zullen den grond onder dit vlak, dat verder het 0-vlak genoemd zal worden, dan ook gewoonlijk als een geheel opvatten en dit in zijn geheel als „ondergrond” aanduiden, tenzij uitdrukkelijk anders is vermeld. Wanneer nu geen water boven de drains staat op het moment, dat geen water meer uit de drains stroomt (dus dat $Q = 0$), — hetgeen meestal het geval zal zijn — dan valt het 0-vlak met het vlak door de drains samen. Dit laatste geval is dus feitelijk slechts een bijzonder geval van het algemeene geval, dat er een constante waterlaag boven de drains staat. Het zal dan ook duidelijk zijn, dat de vorm van de $Q : m_0$ -lijn voor beide gevallen analoog moet verlopen. De invloed van een doorlatenden ondergrond (dus nu in de beteekenis van een doorlatenden ondergrond onder het 0-vlak) zal echter onder sub c ($n = 0$) worden besproken, waarnaar mag worden verwezen.

b. n is niet constant, maar verandert met Q

Is n niet constant, maar verandert zij met het debiet, hetgeen gewoonlijk bij drains het geval is, wanneer er water boven de drains voorkomt, dan zijn 2 gevallen mogelijk, nl.:

1. De functies $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$ zijn, afgezien van een constante, identiek

In de eerste plaats is het geval mogelijk, dat de functies $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$, afgezien van een constante, identiek zijn. Dit zal in vele gevallen — vooral wanneer n niet al te groot is — optreden. Is dit het geval, dan kunnen

we dus de n -waarde uit de m_0 -waarde afleiden door dit met een bepaalden factor b.v. α te vermenigvuldigen. Voor homogene gronden geldt in dit geval dus, wanneer $n = 0$ bij $Q = 0$:

$$Q = \frac{k(m_0^2 - n^2)}{e} = \frac{km_0^2(1 - \alpha^2)}{e} \quad (83)$$

waarin dus $1 - \alpha^2$ een constante is (in dit geval is H_0 en h_0 gelijk m_0 en n). De functie van Q en m_0 is dus afgezien van een constante precies dezelfde als in het geval, dat n steeds nul is. Ook voor heterogene gronden is dit steeds het geval. De $Q : m_0$ en $Q : m_0^2$ -lijnen hebben dan ook denzelfden vorm als in sub α is besproken, waarnaar kan worden verwezen.

Anderzijds spreekt het vanzelf, dat, wanneer n wel is waar op analoge wijze met Q verandert als dit voor m_0 het geval is, maar bij $Q = 0$ niet gelijk nul maar gelijk aan de waarde n_0 wordt, vergelijking 83 voor alle waarden van Q grooter dan nul geldig blijft. Op het moment, dat Q echter nul is geworden, is m_0 nu niet gelijk nul geworden, maar gelijk geworden aan n_0 ($= n$ -waarde bij $Q = 0$). Het zal dan ook wel duidelijk zijn, dat de $Q : m_0$ -lijnen in dit geval niet in den oorsprong, maar op den afstand n_0 daarvan op de m_0 -as, beginnen. Er treedt dan weer een 0-vlak op, dat niet met het vlak van de drains samenvalt. Het zal duidelijk zijn, dat de vorm van de $Q : m_0$ - en de $Q : m_0^2$ -lijnen analoog zal zijn met het geval, dat de grond onder de drains doorlatend is, waarvoor naar sub d mag worden verwezen.

Hierbij kan worden opgemerkt, dat om aan te toonen, dat de functies van $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$, afgezien van een constante, dezelfde zijn, men bij één bepaalde Q -waarde de factor bepalen kan, waarmee dus n moet worden vermenigvuldigd om de waarde van m_0 bij dezelfde Q -waarde te krijgen. Deze factor moet dan bij alle andere Q -waarden dezelfde blijven (zie b.v. sub E, § 1, γ , c, geval III van dit hoofdstuk).

2. De functies $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$ zijn niet identiek

Tenslotte kan het voorkomen, dat n niet constant is, en de functies $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$, afgezien van een constante, niet identiek zijn, hetgeen mogelijk is doordat n tenslotte een onafhankelijk veranderlijke is en dus door oorzaken, die niet in direct verband staan met Q , kunnen worden gewijzigd. In dit geval zou men in de plaats van de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen, de lijnen $Q : (m_0 - n)$ en $Q : (m_0^2 - n^2)$ kunnen beschouwen. Er kunnen dan echter allerlei complicaties voorkomen, waardoor de vorm van deze lijnen voor een vlugge oriëntatie van de onderkenning van het geval, waarmee men waarschijnlijk te maken heeft, zijn waarde voor dit doel heeft verloren. Een inzicht

van de verandering van de doorlatendheid in het profiel is dan alleen nog mogelijk door berekening.

c. Samenvatting

Indien n constant is of indien de functies $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$ afgezien van een constante identiek zijn, terwijl n bij $Q = 0$ niet gelijk nul is, zal de vorm van de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen identiek zijn aan het nog te bespreken geval (sub δ), dat de grond onder de drains doorlatend is en al of geen water boven de drains voorkomt op het moment, dat $Q = 0$. Is daarentegen in het laatste geval bij $Q = 0$ ook n gelijk nul, dan zal de vorm analoog zijn aan den vorm, die optreedt in het geval, dat de grond onder de drains ondoorlatend is en geen water boven de drains voorkomt (zie sub α).

Zijn daarentegen de functies van $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$ niet identiek, zoo kan uit den vorm van de $Q : m_0$ en $Q : m_0^2$ -lijnen *geen* conclusies meer over de verandering van de doorlatendheid van den grond in het profiel worden getrokken.

γ De grond onder de drains is doorlatend; $n = 0$

Is de grond onder de drains doorlatend, dan is h_0 dus niet meer gelijk nul. Is $h_0 = r$ (zie de vergelijking 75), dan is $n = 0$, hetgeen dus het geval is, wanneer geen water boven de drains staat. In dergelijke gevallen is dus n *niet* gelijk aan h_0 ; zie de vergelijking 75.

In sub a, d hebben we gezien, dat de $Q : m_0$ -lijn des te meer tot een rechte lijn nadert, naarmate de doorlatendheid boven het vlak van de drains sneller met deze hoogte boven dit vlak afneemt, terwijl de $Q : m_0^2$ -lijn, dan des te meer naar de m_0^2 -as ombuigt. We zullen nu aantoonen, dat een doorlatende grond onder het vlak van de drains in dezelfde richting werkt en wel des te meer, naarmate de doorlatendheid en (of) de doorsnede van de doorlatende laag onder het vlak van de drains grooter is t.o.z. van de doorlatendheid en de doorsnede van de watervoerende laag boven het vlak van de drains. Het spreekt vanzelf, dat een snelle afname van de doorlatendheid met de hoogte boven het vlak van de drains dit nog kan versterken.

Ook van dit geval zullen we verschillende voorbeelden bespreken.

a . De grond is homogeen tot de ondoorlatende laag en bestaat uit een laag onder en boven de drains

Is de grond homogeen tot de ondoorlatende laag, dan geldt dus:

$$Q = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{e}$$

of na invulling van de vergelijking 74 en 75, waarbij $n = 0$:

$$Q = \frac{2krm_0 + km_0^2}{e} \quad (84)$$

Hieruit volgt, dat wanneer m_0 klein is ten opzichte van r , de vergelijking 84 nadert tot de vergelijking:

$$Q = \frac{2krm_0}{e} \quad (85)$$

hetgeen dus wil zeggen, dat de $Q : m_0$ -lijn eerst vrijwel recht is om pas bij grootere wordende m_0 -waarden naar de Q -as om te buigen. Het zal duidelijk zijn, dat dit rechte gedeelte van de $Q : m_0$ -lijn des te grooter is, naarmate r grooter is ten opzichte van m_0 of dus naarmate de ondoorlatende laag dieper onder de drains ligt.

In diagram 4 geven de lijnen I dit geval aan, waarbij $r = 1$ meter; $e = 10$ meter en $k = 10$ m p. 24 uur.

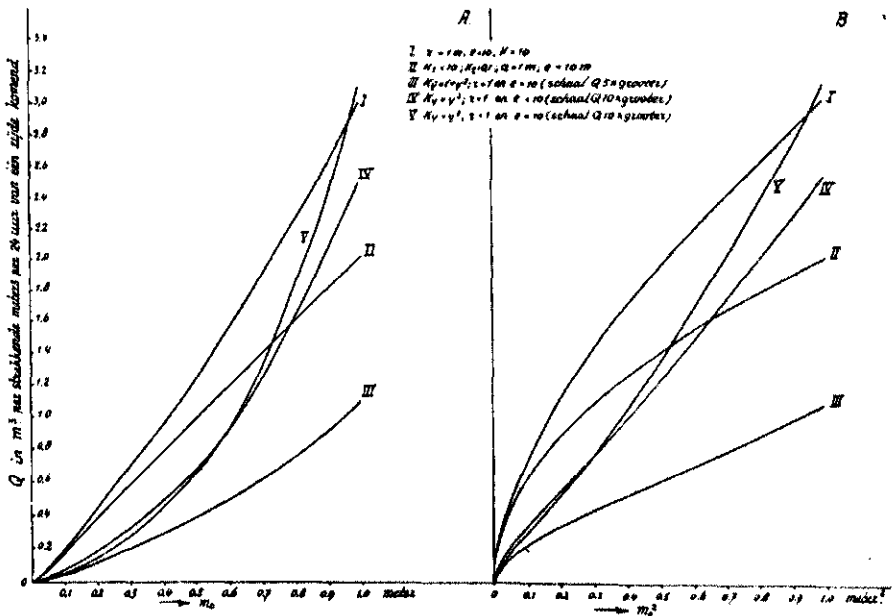


Diagram 4

We kunnen het bovenstaande ook afleiden door de differentiaalquotienten te beschouwen, nl.:

$$\frac{dQ}{dm_0} = \frac{2kr + 2km_0}{e} = \frac{2k(r + m_0)}{e} \text{ en } \frac{d^2Q}{dm_0^2} = \frac{2k}{e} = \text{positief.}$$

Is r dus groot ten opzichte van m_0 dan nadert $\frac{dQ}{dm_0}$ tot $\frac{2kr}{e} = \text{constant}$.

Omgekeerd volgt hieruit, dat wanneer m_0 groot wordt ten opzichte van r , $\frac{dQ}{dm_0}$ nadert tot $\frac{2km_0}{e}$, d.w.z. tot dezelfde waarde, waartoe $\frac{dQ}{dm_0}$ zou naderen, wanneer de grond onder de drains ondoorlatend is. Is m_0 dan ook *groot genoeg* ten opzichte van r , dan berekenen we bij verwaarloozing van de doorlatende laag onder de drains vrijwel dezelfde k -waarde, dan wanneer de doorlatende laag onder de drains wel in rekening wordt gebracht. Verder volgt hieruit, dat $\frac{dQ}{du}$ bij grotere u -waarden constant moet worden ($u = m_0^2$) of dus dat $\frac{d^2Q}{du^2}$ tot 0 moet naderen; immers:

$$Q = \frac{2kru^{\frac{1}{2}} + ku}{e}, \text{ dus } \frac{dQ}{du} = \frac{kru^{-\frac{1}{2}} + k}{e} \text{ en } \frac{d^2Q}{du^2} = \frac{-\frac{1}{2}kru^{-\frac{3}{2}}}{e} = \text{negatief.}$$

Hieruit volgt, dat hoe groter m_0 (dus u) wordt hoe meer de breuk $\frac{-\frac{1}{2}kru^{-\frac{3}{2}}}{e}$ tot 0 nadert. De $Q : m_0^2$ -lijn zal dus bij grotere m_0 -waarden tot een rechte lijn moeten naderen.

We kunnen het bovenmedegedeelde ook zoo duidelijk maken, dat de $Q : m_0$ -lijn des te meer een rechte lijn zal worden, naarmate de doorlatendheid en de doorsnede van de laag grond onder de drains tot de ondoorlatende laag groter is dan de doorlatendheid en de doorsnede van het watervoerende profiel boven de drains. We maken daartoe gebruik van de vergelijking van 2 lagen in het profiel, nl. één laag onder en één laag boven de drains. Deze vergelijking luidt (zie vergelijking 39):

$$Q = \frac{k^2 H_0^2 + 2h_1(1-n_1)k_1H_0 - 2h_1(1-n_1)h_0k_1 - k_2h_0^2}{e}$$

Indien dus k_2 klein is ten opzichte van k_1 , nadert deze vergelijking tot de volgende:

$$Q = \frac{2h_1k_1(H_0 - h_0)}{e} = \frac{2h_1k_1m_0}{e} = \frac{2k_1m_0r}{e} \quad (86)$$

daar immers $n = 0$ en $h_0 = r$. Uit de vergelijking 86 volgt dus, dat in dat geval Q evenredig wordt met m_0 en dus de $Q : m_0$ -lijn een rechte lijn moet worden.

In diagram 4 stellen de lijnen II dit geval voor, waarbij $e = 10$ meter;

$k_1 = 10$ m p. 24 uur; $k_2^* = 0.1$ meter p. 24 uur en $h_1 = r = 1$ meter. De afwijking van de rechte lijn is zoo gering, dat zij in Diagram 4 A niet tot uiting komt.

Bovenstaande vergelijking 86 is natuurlijk ook rechtstreeks af te leiden. Is immers de bovenste laag ondoorlatend in de horizontale richting (in de vertikale richting moet deze laag natuurlijk doorlatend zijn) dan is dus:

$$q_x = \frac{Q(e-x)}{e} = k_1 h_1 \frac{dy}{dx} \quad (87)$$

Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = e$ en van $y = h_0$ tot $y = H_0$ ontstaat:

$$Q = \frac{2h_1 k_1 (H_0 - h_0)}{e} \quad (88)$$

Tenslotte volgt uit het feit, dat $\frac{d^2 Q}{du^2}$ negatief is, dat de $Q : m_0^2$ -lijn naar de m_0^2 -as omhoog buigt. Deze omhoog buiging zal des te sterker zijn, naarmate r grooter is t.o.z. van m_0 en naarmate k_1 grooter is t.o.z. van k_2 .

b. De doorlatendheid van den grond neemt met een toenemende hoogte boven de ondoorlatende laag toe

In de tweede plaats zullen we het geval beschouwen, dat de doorlatendheid met een toenemende hoogte boven de ondoorlatende laag toeneemt. Dit geval komt geheel overeen met het geval, dat de grond onder de drains homogeen is en de doorlatendheid van den grond pas boven de drains met een toenemende hoogte boven de drains toeneemt; de $Q : m_0$ -lijn kan immers alleen iets mededeelen over de heterogeniteit van den grond boven het zoogenaamde 0-vlak. Daar in dit laatste geval de vergelijkingen ingewikkelder van bouw worden, heb ik voor deze beschouwingen het eenvoudigste geval n.l. het eerste geval gekozen, daar ingewikkelder gevallen zich volkomen analoog gedragen.

Neemt de doorlatendheid van den grond dus met een toenemende hoogte boven de ondoorlatende laag toe, zoo kunnen we de volgende mogelijkheden verwachten:

We hebben reeds gezien, dat, indien de grond onder de drains ondoorlatend is, een toenemende doorlatendheid boven het vlak van de drains de $Q : m_0^2$ -lijn naar de Q -as doet omhoog buigen en wel des te sterker naarmate de doorlatendheid sneller met een toenemende hoogte boven het vlak van de drains toeneemt. Verder hebben we reeds gezien, dat een doorlatende grond onder de drains juist de $Q : m_0^2$ -lijn naar de m_0^2 -as doet omhoog buigen en wel des te sterker naarmate de doorsnede en de doorlatendheid van deze laag onder de drains tot de ondoorlatende laag grooter is t.o.z. van de doorlatendheid en

de doorsnede van het watervoerend profiel boven de drains. Beide invloeden werken elkaar dus tegen. Overheerscht de invloed van den doorlatenden grond onder de drains, dan zal de $Q : m_o^2$ -lijn steeds naar de m_o^2 -as blijven ombuigen. In het andere geval zal bij kleine m_o -waarden eerst de invloed van de doorlatende laag onder de drains overwegen. Deze invloed zal bij toenemende m_o -waarden echter afnemen, terwijl ten slotte de invloed van de toenemende doorlatendheid zal overheerschen. Dit beteekent dus, dat in de $Q : m_o^2$ -lijn een buigpunt zal voorkomen. Voor kleine m_o -waarden zal de $Q : m_o$ -lijn naar de m_o^2 -as ombuigen tot het buigpunt, waarna deze lijn naar de Q -as ombuigt. Het zal duidelijk zijn, dat het eerste bolle gedeelte van de $Q : m_o$ -lijn tot het buigpunt des te kleiner is, naarmate de doorlatendheid en de doorsnede van de laag onder de drains tot de ondoorlatende laag kleiner is ten opzichte van de grootte en toename van de doorlatendheid en de doorsnede van de laag boven het vlak van de drains.

In diagram 4 geven de lijnen III, IV en V resp. het geval aan, dat $k_y = 1 + y^2$; $k_y = y^2$ en $k_y = y^3$, waarbij $e = 10$ meter en $h_o = r = 1$ meter is.

Uit de lijnen III tot V blijkt, dat de lengte van het stuk van de $Q : m_o^2$ -lijn van de oorsprong tot het buigpunt van de lijn V, de kleinste is, daar hier de invloed van de doorlatende laag onder de drains de kleinste is. De factor r is dezelfde, maar de gemiddelde doorlaatfactor van deze laag (nl. de z.g. schijnbare doorlaatfactor van deze laag, die hier ook gelijk is aan de z.g. effectieve doorlaatfactor; zie hoofdstuk V) is immers de kleinste. Verder blijkt de lijn III en IV in het $Q : m_o^2$ -diagram (Diagram IVb) vrijwel recht te zijn, afgezien van het eerste gedeelte voor kleine m_o -waarden, waar de lijn naar de m_o^2 -as ombuigt. Uit het bovenstaande volgt dan ook, dat, indien de $Q : m_o^2$ -lijn voor kleinere m_o -waarden naar de m_o^2 -as ombuigt en voor grotere m_o -waarden, hetzij vrijwel een rechte lijn wordt, hetzij een buigpunt vertoont en daarna naar de Q -as ombuigt, de doorlatendheid van den grond met een toenemende hoogte boven het vlak van de drains toeneemt (28) en wel is de invloed van een doorlatende laag onder de drains in verhouding des te grooter, naarmate het buigpunt pas bij grotere m_o -waarden optreedt (29). Hieruit volgt dus tevens, dat men de invloed van deze doorlatende laag onder de drains des te eerder mag verwaarloozen, d.w.z. de grond onder de drains als ondoorlatend mag veronderstellen, naarmate het buigpunt bij kleinere m_o -waarden optreedt en naarmate de *gemiddelde* (nl. de effectieve-) doorlatendheid van een dikkere laag boven het buigpunt wordt berekend.

Omgekeerd kan echter de doorlatendheid van den grond boven de drains toenemen, terwijl de $Q : m_o^2$ -lijn naar de m_o^2 -as blijft ombuigen. Dit zal immers optreden, wanneer het buigpunt pas bij groteren m_o -waarden op zou treden, dan waartoe de $Q : m_o$ -lijn kan worden opgesteld, waardoor het gedeelte van

de lijn dus niet bereikt wordt, waar de invloed van de toenemende doorlatendheid boven het vlak van de drains boven den invloed van de doorlatende laag onder de drains begint te overheerschen.

c. De doorlatendheid van den grond neemt met een toenemende hoogte boven de ondoorlatende laag af

Neemt de doorlatendheid met een toenemende hoogte boven de ondoorlatende laag af, of wat op hetzelfde neerkomt, neemt de doorlatendheid boven het vlak van de drains met een toenemende hoogte boven het vlak van de drains af (zie noot 28) dan wordt de invloed van een doorlatenden ondergrond verstrekt, d.w.z. dat de $Q : m_0^2$ -lijnen nog sterker naar de m_0^2 -as zullen ombuigen, dan wanneer geen ondoorlatende laag onder de drains aanwezig is.

Tenslotte mag hieronder nog een bijzonder geval besproken worden, daar dit voorkomt bij de $Q : m_0$ -lijnen van het vak Gr_2 , dat als Geval II in sub E, § 1, γ , c zal worden besproken. In dit geval blijkt namelijk, dat de $Q : m_0^2$ -lijn voor kleinere m_0 -waarden eerst naar de m_0^3 -as ombuigt (de invloed van een doorlatenden ondergrond) dan via een buigpunt naar de Q -as ombuigt (de invloed van een toenemende doorlatendheid), terwijl zij bij nog grootere m_0 -waarden tot een rechte lijn nadert. Dit wil nu zeggen, dat of de grond in de hogere lagen homogeen wordt, of de doorlatendheid weer langzaam afneemt in welk geval dus het tweede buigpunt niet bereikt wordt.

d. Samenvatting

In het algemeen blijkt dus, dat, wanneer de grond onder de drains doorlatend is, bij overheersching van dezen invloed op de doorlatendheid van den grond boven de drains, de $Q : m_0$ -lijn tot een rechte lijn nadert.

Verder blijkt, dat, wanneer de grond onder de drains doorlatend is, de $Q : m_0^2$ -lijn bij kleinere m_0 -waarden naar de m_0^2 -as ombuigt. Neemt de doorlatendheid boven de drains toe, dan kan de boven aangeduide ombuiging naar de m_0 -as via een buigpunt overgaan in een ombuiging naar de Q -as. Wordt het buigpunt in genoemd geval niet bereikt dan nadert de $Q : m_0^2$ -lijn bij grootere m_0 -waarden tot een rechte lijn. Dit laatste is ook het geval, wanneer de grond boven de drains homogeen is en de invloed van de doorlatende laag onder de drains bij hogere m_0 -waarden tenslotte klein wordt ten opzichte van den invloed van de boven de drains gelegen homogene laag. Neemt daarentegen de doorlatendheid van den grond boven de drains af, dan wordt de ombuiging naar de m_0^2 -as daardoor versterkt. Samengevat kunnen we

dus zeggen, dat ofschoon dus niet altijd met zekerheid conclusies uit den vorm van de $Q : m_0^2$ -lijnen zijn te trekken, uit dezen vorm toch in elk geval tot een begrenzing van het aantal mogelijkheden kan worden besloten.

δ. De grond onder de drains is doorlatend; n is niet nul en niet te verwaarloozen klein

Is tenslotte $n (=h_0 - r; \text{ zie vergelijking 75})$ niet nul of niet te verwaarloozen klein, dan kunnen soortgelijke gevallen onderscheiden worden als in sub β zijn genoemd voor het geval de grond onder de drains ondoorlatend is en n niet nul en niet te verwaarloozen is. De vorm van de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen zal op analoge wijze verlopen als in sub γ is beschreven, indien of n constant is of de functie $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$ afgezien van een constante identiek zijn. In deze gevallen zal immers in elk geval onder het 0-vlak een doorlatende laag aanwezig zijn. Is verder $n = n_0$ bij $Q = 0$, dan begint de $Q : m_0$ -lijn pas op een afstand n_0 van den oorsprong. De geheele laag onder het horizontale vlak (het 0-vlak) op den afstand n_0 boven het vlak van de drains komt nu in plaats van de doorlatende laag onder de drains in de sub γ behandelde gevallen. Het is ook nu voor den vorm van de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen onverschillig op welke wijze de doorlatendheid van den grond onder het 0-vlak verandert.

Zijn echter de functies $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$ afgezien van een constante niet identiek dan kunnen ook nu geen conclusies uit den vorm van de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen worden getrokken.

§ 3. DE WAARDE VAN $\frac{dQ}{dm_0}$ BIJ HET SNIJPUNT VAN DE $Q : m_0$ -LIJN MET DE m_0 -AS

Overziet men de $Q : m_0$ -lijnen, die in § 2, γ en δ zijn besproken en in diagram 4 zijn weergegeven, dan valt het op, dat de helling van de $Q : m_0$ -lijnen bij het snijpunt met de m_0 -as bij de verschillende $Q : m_0$ -lijnen zoo verschillend is. Het zal duidelijk zijn, dat deze helling weer te geven is door $\frac{dQ}{dm_0}$ bij het punt, waar $Q = 0$ en $m_0 = \text{minimaal}$ is, d.w.z., waarbij $m_0 = 0$ als geen water boven de drains of in de greppels, enz. voorkomt op het moment, dat $Q = 0$ of waarbij $m_0 = n_0$, indien water tot dezen stand boven de drains resp. in de greppels enz. voorkomt op het moment, dat $Q = 0$. We zullen nu door behandeling van verschillende gevallen aantonen, dat $\frac{dQ}{dm_0}$ bij $Q = 0$ en $m_0 = \text{minimaal}$ bepaald wordt door de doorlatendheid en de dikte van de watervoerende laag onder het 0-vlak.

α. De grond is homogeen

a. De grond is homogeen; de grond onder de drains is ondoorlatend; er komt geen water boven de drains voor

In bedoeld geval is $Q = \frac{kH_0^2}{e} = \frac{km_0^2}{e}$ of $\frac{dQ}{dm_0} = \frac{2km_0}{e}$ d.w.z. bij $Q = 0$ en dus $m_0 = 0$ is $\frac{dQ}{dm_0} = 0$. Dit beteekent dus, dat de raaklijn aan de $Q:m_0$ -lijn bij genoemd punt samenvalt met de abscis.

b. De grond is homogeen; de ondergrond is tot een bepaalde ondoorlatende laag doorlatend; er komt geen water boven de drains, enz. voor

In genoemd geval is $Q = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{e} = \frac{2krm_0 + km_0^2}{e}$ of dus $\frac{dQ}{dm_0} = \frac{2kr + 2km_0}{e}$, zoodat voor $Q = 0$ en dus $m_0 = 0$:

$$\frac{dQ}{dm_0} = \frac{2kr}{e} \quad (89)$$

De tangens van den hoek, die de raaklijn aan de $Q:m_0$ -lijn bij $Q = 0$ met de m_0 -as maakt, is dus nu niet nul, maar wordt bepaald door tweemaal het produkt van den doorlaatfactor en de dikte van de doorlatende laag onder de drains gedeeld door den halven drainafstand ($= e$).

Het product kr — dus in het algemeen het produkt van dikte en doorlaatfactor van de laag onder het 0-vlak — zal in het vervolg het totale geleidingsvermogen van deze laag worden genoemd.

c. De grond is homogeen; de grond onder de drains is ondoorlatend; er komt water boven de drains, enz. voor

1. De waterstand boven de drains is constant of althans bij $Q = 0$ niet gelijk nul

In dit geval is dus $Q = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{e} = \frac{k(m_0^2 - n^2)}{e}$ of $\frac{dQ}{dm_0} = \frac{2km_0}{e}$ of bij $Q = 0$, waarbij dus $m_0 = n_0$ wordt, is dus:

$$\frac{dQ}{dm_0} = \frac{2kn_0}{e} \quad (90)$$

In dit geval zien we, dat $\frac{dQ}{dm_o}$ behalve door e eveneens door tweemaal het produkt van den doorlaatfactor en de dikte van de laag grond — in dit geval echter onder het 0-vlak — wordt bepaald.

2. Er komt alleen water boven de drains voor, zoolang Q grooter is dan nul

Dit is, bij drains althans, het meest voorkomend geval. Ook in dit geval geldt, dat $Q = \frac{k(m_o^2 - n^2)}{e}$. Ook nu is $\frac{dQ}{dm_o} = \frac{2km_o}{e}$ (30) of daar bij $Q = 0$ ook $m_o = 0$ is, is dus bij $Q = 0$ ook $\frac{dQ}{dm_o} = 0$, zoodat dit geval overeenkomt met geval 1.

d. De grond is homogeen; de ondergrond is tot een bepaalde ondoorlatende laag doorlatend; de waterstand boven de drains is constant, resp. verandert met Q

In dit geval is $Q = \frac{k(H_o^2 - h_o^2)}{e} = \frac{2kr(m_o - n) + k(m_o^2 - n^2)}{e}$ of dus $\frac{dQ}{dm_o} = \frac{2kr + 2km_o}{e}$ en bij $Q = 0$ (waarbij $m_o = n_o = \text{constant}$ is of bij $Q = 0$ daartoe nadert):

$$\frac{dQ}{dm_o} = \frac{2k(r + n_o)}{e} \quad (91)$$

Ook nu wordt $\frac{dQ}{dm_o}$, behalve door e , weer bepaald door tweemaal het produkt van den doorlaatfactor en dikte van het totaal watervoerend profiel onder het 0-vlak, wanneer n constant is, of, — wanneer $Q = f(n)$ —, n althans in verhouding tot m_o klein is (zie noot 30). Is dit laatste niet het geval, dan wordt de waarde van $\frac{dQ}{dm_o}$, bij $Q = 0$ en $m_o = \text{minimaal}$, daardoor des te sterker beïnvloedt, naarmate m_o en n minder uiteen wijken. Men ziet dit gemakkelijk in, wanneer de functies $Q = f(m_o)$ en $Q = f(n)$ afgezien van een constante identiek zijn en dus $n = \alpha m_o$ kan worden geschreven. Dergelijke gevallen komen wel is waar bij een slecht werkende drainage voor, maar zijn uit den aard der zaak uitzonderingen. Hieronder zal op een dergelijk geval niet worden teruggekomen, maar stilzwijgend verondersteld worden, dat m_o in verhouding groot is t. o. z. van n .

Het spreekt vanzelf, dat indien $n = 0$ bij $Q = 0$ ook $\frac{dQ}{dm_0}$ bij $Q = 0$ gelijk $\frac{2kr}{e}$ wordt, daar het 0-vlak dan samenvalt met het vlak van de drains.

e. De grond is homogeen; de ondergrond is tot groote diepte doorlatend

Tenslotte kan nog het geval voorkomen, dat bij een homogenen grond de ondoorlatende laag zeer diep onder de drains ligt. In dit geval is de formule: $Q = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{e}$ niet meer geldig, daar verondersteld wordt, dat de ondoorlatende laag zoo diep ligt, dat ook geen correctie (zie hoofdstuk II, I B) meer kan worden aangebracht. Het zal echter duidelijk zijn, dat ook in dit geval $\frac{dQ}{dm_0}$ weer bepaald wordt door wat in sub α b het totale geleidingsvermogen van water van den grond onder het 0-vlak is genoemd. De tangens van den hoek die de $Q : m_0$ -lijn maakt met de abscis, in het punt waar $Q = 0$ en $m_0 =$ minimaal, bepaald dus ook nu weer dit totale geleidingsvermogen, hetgeen, zooals we later zullen zien, van buitengewoon belang is voor de berekeningen, daar nu ook die gevallen zijn op te lossen, waarbij de ondoorlatende laag zeer diep ligt (31). Het spreekt vanzelf, dat hier nu geen correctie behoeft te worden aangebracht, daar deze reeds automatisch in de grootte van $\frac{dQ}{dm_0}$ (bij $Q = 0$, enz.) tot uiting komt. Desgewenscht is dit totale geleidingsvermogen voor water uit te drukken in het product van een laag van bepaalde dikte en dus vastgelegde doorlatendheid of omgekeerd, waarbij het tevens duidelijk zal zijn, dat dit totale geleidingsvermogen *niet* zal veranderen bij diepere drainage, wanneer de ondoorlatende laag werkelijk zeer diep ligt en de grond ook in diepere lagen de zelfde doorlatendheid behoudt. Feitelijk beteekent dus de invoering van het totale geleidingsvermogen van den grond onder het 0-vlak in dit geval, dat men zich deze laag vervangen denkt door een laag grond van een bepaalde dikte en dus met een vastgestelde doorlatendheid of omgekeerd, waarbij de stroombanen horizontaal gedacht zijn en waarbij het aantal stroombanen per eenheid van doorsnede alleen afhangt van den doorlaatfactor.

Het totale geleidingsvermogen G is ook in dit geval gelijk aan: $G = kd$ en dus:

$$\frac{dQ}{dm_0} \text{ (bij } Q = 0) = \frac{2kd}{e} = \frac{2G}{e} \quad (92)$$

waarin dus k (doorlaatfactor) en d (dikte laag) zuiver fictief zijn. Ook de ondoorlatende laag op een diepte d onder het 0-vlak is een fictieve laag.

f. Samenvatting

Samengevat blijkt, dus dat $\frac{dQ}{dm_0}$, bij $Q = 0$ en $m_0 = \text{minimaal}$, behalve door e , door tweemaal het totale geleidingsvermogen van den grond onder het 0-vlak bepaald wordt. Dit blijft het geval, wanneer de ondoorlatende laag zeer diep onder het 0-vlak ligt.

β De grond is heterogeen

a. De doorlatendheid in het profiel verandert sprongsgewijze

1. Er komen 2 lagen in het profiel voor; de ondergrond is ondoorlatend; $n = 0$

In dit geval geldt voor m_0 -waarden kleiner dan h_1 , waarop het hier aankomt:

$$Q = \frac{k_1 H_0^2}{e} = \frac{k_1 m_0^2}{e}.$$

Hieruit volgt dus, dat $\frac{dQ}{dm_0} = 0$ voor $Q = 0$ en $m_0 = 0$ of m.a.w., wanneer geen water in de greppels of boven de drains voorkomt op het moment, dat $Q = 0$.

2. Er komen 2 lagen in het profiel voor; de ondergrond is tot een bepaalde, ondoorlatende laag doorlatend; $n = 0$

Er zijn hier verschillende mogelijkheden denkbaar. We zullen met één geval volstaan, nl. dat de drains liggen op het grensvlak van de beide lagen. In dit geval geldt de vergelijking ($r = h_1 = h_0$ en $n = 0$):

$$\begin{aligned} Q &= \frac{1}{e} (k_2 H_0^2 + 2h_1 (1-n_1) k_1 H_0 - 2h_1 (1-n_1) k_1 h_0 - k_2 h_0^2) \\ &= \frac{1}{e} (k_2 (H_0^2 - h_0^2) + 2h_1 (1-n_1) k_1 (H_0 - h_0)) \\ &= \frac{1}{e} (k_2 (2rm_0 + m_0^2) + 2r (1-n_1) k_1 m_0), \end{aligned}$$

zoodat: $\frac{dQ}{dm_0} = \frac{2k_2 r + 2k_2 m_0 + 2r (1-n_1) k_1}{e}$ of dus voor $Q = 0$ en $m_0 = \text{minimaal}$ (hier gelijk 0):

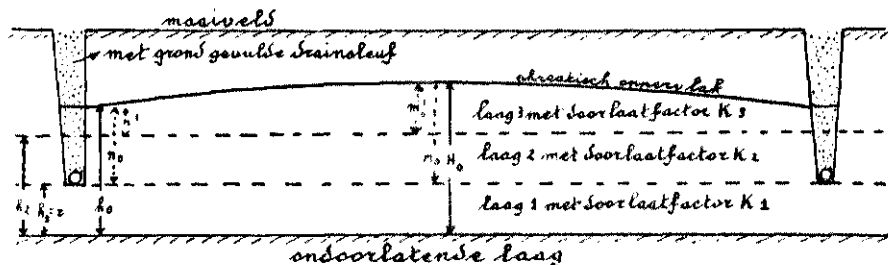
$$\frac{dQ}{dm_0} = \frac{2k_1 r}{e} \quad (93)$$

Ook nu wordt weer $\frac{dQ}{dm_o}$, behalve door e , bepaald door tweemaal het totale geleidingsvermogen ($k_1 r$) van den grond onder het 0-vlak (hier gelijk aan het vlak van de drains).

3. Er komen 3 lagen in het profiel voor; de drains liggen op de scheiding tusschen de onderste en de middelste laag; n is niet gelijk nul en bij $Q = 0$ gelijk n_o en ligt in de bovenste laag

In het geval, dat 3 lagen in het profiel voorkomen, zijn eveneens vele mogelijkheden denkbaar. We zullen hier met bovengenoemd geval volstaan. In genoemd geval geldt (zie figuur 15);

$$Q = \frac{1}{e} \left((k_3 H_o^2 + 2h_1 (1 - n_1) k_1 H_o + 2h_2 (1 - n_2) k_2 H_o - 2h_1 (1 - n_1) k_1 h_o - 2h_2 k_2 h_o (1 - n_2) - k_3 h_o^2) \right).$$



Figuur 15

Blijkens figuur 15 is $H_o = r + m_o$ en $h_o = r + n_o$, zoodat na invulling en omvorming ontstaat:

$$Q = \frac{1}{e} \left(k_3 (2 r m_o + m_o^2 - 2 r n_o - n_o^2) + 2 h_1 k_1 (1 - n_1) (m_o - n_o) + 2 h_2 k_2 (1 - n_2) (m_o - n_o) \right)$$

Zoodat:

$$\frac{dQ}{dm_o} = \frac{1}{e} (2r k_3 + 2 k_3 m_o + 2 h_1 (1 - n_1) k_1 + 2 h_2 (1 - n_2) k_2)$$

Voor $Q = 0$ is $m_o = n_o$; verder is $h_1 = r$, zoodat na invulling ontstaat:

$$\frac{dQ}{dm_o} = \frac{1}{e} (2k_3 r + 2k_3 n_o + 2rk_1 - 2rk_2 + 2h_2 k_2 - 2h_2 k_3)$$

Vullen we verder voor n_o in $n_o = h_2 - r + n'$, dan ontstaat:

$$\frac{dQ}{dm_r} = \frac{1}{e} (2k_3 n' + 2r k_1 - 2r k_2 + 2h_2 k_2)$$

Noemen we verder $h_2 - h_1 = d$, zoodat $h_2 = d + r$ en vullen we dit in de bovenstaande bergelijking in, dan ontstaat:

$$\frac{dQ}{dm_o} = \frac{1}{e} (2k_3 n' + 2r k_1 + 2d k_2) = \frac{2}{e} (r k_1 + d k_2 + n' k_3) \quad (94)$$

Ook nu blijkt weer, dat $\frac{dQ}{dm_o}$ bij $Q = 0$, behalve door e , alleen bepaald wordt door tweemaal het totale geleidingsvermogen van water van de geheele laag onder het 0-vlak.

b. De doorlatendheid verandert geleidelijk in het profiel

1. De grond onder de drains is ondoorlatend; $k_y = k_o + ay$; $n = 0$

In dit geval geldt ($H_o = m_o$):

$$Q = \frac{1}{e} (k_o H_o^2 + \frac{1}{3} a H_o^3), \text{ of } \frac{dQ}{dm_o} = \frac{1}{e} (2k_o m_o + a m_o^2), \text{ zoodat bij } Q = 0 \text{ en } m_o = 0 \text{ dus } \frac{dQ}{dm_o} = 0.$$

Hieruit volgt dus, dat in ieder geval, waarbij de grond onder de drains (of algemeen dus onder het 0-vlak) ondoorlatend is, $\frac{dQ}{dm_o} = 0$ of m.a.w. de raaklijn aan de $Q : m_o$ -lijn bij $Q = 0$ samenvalt met de abscis.

2. De grond onder de drains is ondoorlatend; $k_y = k_o + ay$; $n = n_o$ bij $Q = 0$

In dit geval geldt:

$$Q = \frac{1}{e} (k_o H_o^2 + \frac{1}{3} a H_o^3 - k_o h_o^2 - \frac{1}{3} a h_o^3)$$

of daar $H_o = m_o$ en $h_o = n$ is dus:

$$Q = \frac{1}{e} (k_o m_o^2 + \frac{1}{3} a m_o^3 - k_o n^2 - \frac{1}{3} a n^3) \text{ of dus:}$$

$$\frac{dQ}{dm_o} = \frac{1}{e} (2k_o m_o + a m_o^2), \text{ zoodat voor } Q = 0 \text{ en } m_o = \text{minimaal} = n_o$$

$$\frac{dQ}{dm_o} = \frac{1}{e} (2k_o n_o + a n_o^2) = \frac{2}{e} (k_o n_o + \frac{1}{2} a n_o^2) \quad (95)$$

Nu zal het duidelijk zijn, dat het totale geleidingsvermogen voor water (= G) van den grond onder het 0-vlak gelijk is aan:

$$G = \int_{m_o=0}^{m_o=n_o} k_y dy = \int_{m_o=0}^{m_o=n_o} (k_o + ay) dy = \int_{m_o=0}^{m_o=n_o} (k_o + am_o) dm_o = k_o n_o + \frac{1}{2} a n_o^2,$$

zoodat ook nu weer blijkt, dat $\frac{dQ}{dm_o}$ bij $Q = 0$, behalve door e , bepaald wordt door het totale geleidingsvermogen van den grond onder het 0-vlak.

3. De grond onder de drains is doorlatend; n is al of niet gelijk 0 bij $Q = 0$; $k_y =$ willekeurige functie van m

Het spreekt van zelf, dat ook voor deze gevallen steeds te bewijzen is, dat $\frac{dQ}{dm_o}$, bij $Q = 0$ en $m_o =$ minimaal, bepaald wordt door tweemaal het totale geleidingsvermogen van den grond onder het 0-vlak gedeeld door den halven drainafstand e . Ik heb gemeend verder van deze bewijsvoering te kunnen afzien.

§ 4. SAMENVATTING VAN HETGEEN IN § 3 IS BEHANDELD

1. In alle gevallen is dus te bewijzen, dat onverschillig, waar zich de ondoorlatende laag bevindt, $\frac{dQ}{dm_o}$ bij $Q = 0$ en $m_o =$ minimaal, gelijk is aan het produkt van $\frac{2}{e}$ en het totale geleidingsvermogen G van den grond onder het 0-vlak voor water, of dus

$\frac{dQ}{dm_o}$ bij $Q = 0$ en $m_o =$ minimaal $= \frac{2G}{e}$ (zie echter noot 30 en § 3, α , d).

Dit 0-vlak valt dus samen met het vlak door de drains resp. door den bodem van de greppels, enz., wanneer bij $Q = 0$ ook $m_o = 0$.

2. Is de grond onder het 0-vlak ondoorlatend, dan is $\frac{dQ}{dm_o} = 0$ bij $Q = 0$ en $m_o =$ minimaal.

3. Uit het feit, dat $\frac{dQ}{dm_o}$ bij $Q = 0$ en $m_o =$ minimaal al of niet nul is, kan besloten worden of de grond onder het 0-vlak resp. al of niet doorlatend is.

a. Is de grond onder het 0-vlak ondoorlatend dan geeft een vrijwel rechte $Q : m_o$ -lijn aan, dat de doorlatendheid van den grond vanaf dit 0-vlak zeer snel afneemt (dit geval komt vrijwel nooit voor). In alle andere gevallen buigt de lijn naar de Q -as om.

Een rechte $Q : m_o^2$ -lijn duidt dan aan, dat de grond homogeen is. Buigt de $Q : m_o^2$ -lijn naar de Q -as om, dan neemt de doorlatendheid vanaf dit

0-vlak toe, terwijl, wanneer deze lijn naar de m_o^2 -as ombuigt, de doorlatendheid juist vanaf dit 0-vlak afneemt. Ook combinaties (b.v. de doorlatendheid neemt eerst toe, wordt daarna constant of neemt daarna weer sterk af) zijn globaal uit dezen vorm af te leiden. Deze lijn nadert in de laatst genoemde gevallen bij grotere m_o -waarden tot een rechte lijn; heeft resp. een buigpunt.

b. Blijkt uit $\frac{dQ}{dm_o}$ bij $Q = 0$ en $m_o = \text{minimaal}$, dat de grond onder het 0-vlak wel doorlatend is, dan zal de $Q : m_o$ -lijn des te meer tot een rechte lijn naderen, naarmate de doorlatendheid en de dikte van de doorstroomde laag boven het 0-vlak kleiner is ten opzichte van het totale geleidingsvermogen van den grond onder genoemd 0-vlak en verder naarmate de doorlatendheid boven het 0-vlak sneller afneemt met een toenemende hoogte boven dit vlak. In alle andere gevallen buigt de $Q : m_o$ -lijn naar de Q -as om.

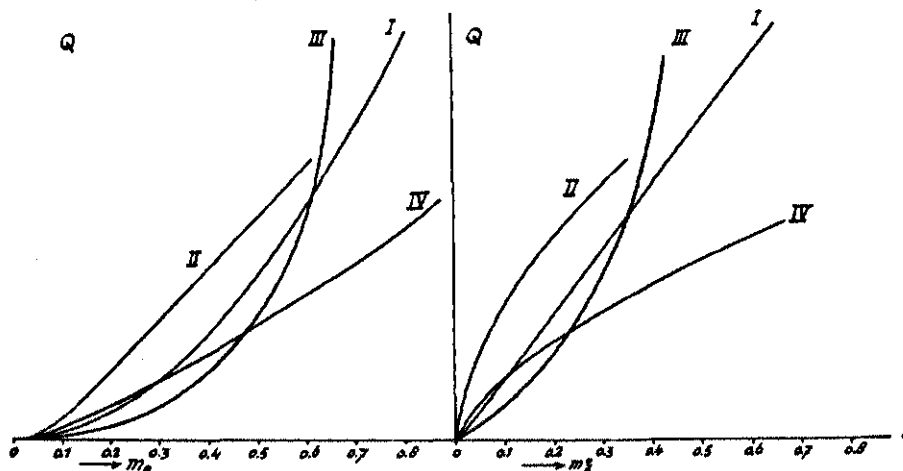
De $Q : m_o^2$ -lijn, zal bij kleinere m_o -waarden in elk geval eerst naar de m_o^2 -as ombuigen. Neemt de doorlatendheid van den grond boven genoemd 0-vlak af, dan zal deze ombuiging naar de m_o^2 -as bij grotere m_o -waarden worden voortgezet. Dit is ook het geval, wanneer het totale geleidingsvermogen voor water van den grond onder het 0-vlak een overwegenden invloed uitoefent. Welke van deze twee gevallen optreedt is dus niet uit den vorm der $Q : m_o^2$ -lijnen op te maken. In klei- en dergelijke gronden zal vaak de doorlatendheid boven het 0-vlak toenemen, zoodat men in genoemd geval waarschijnlijk met een overwegenden invloed van het totale geleidingsvermogen van den grond onder het 0-vlak te maken heeft.

Buigt daarentegen de $Q : m_o^2$ -lijn eerst bij kleiner m_o -waarden naar de m_o^2 -as om om daarna bij grotere m_o -waarden via een buigpunt naar de Q -as om te buiten, zoo is hieruit met zekerheid te besluiten, dat de doorlatendheid van den grond boven het 0-vlak toeneemt. Nadert de $Q : m_o^2$ -lijn, na bij kleine m_o -waarden naar de m_o^2 -as te zijn gebogen, bij grotere m_o -waarden zonder een buigpunt te vertoonen tot een rechte lijn, dan is of de grond boven het 0-vlak homogeen of de doorlatendheid van den grond boven het 0-vlak neemt boven het 0-vlak toe, maar het buigpunt ligt bij grotere m_o -waarden dan tot waar de $Q : m_o^2$ -lijn is te construeeren.

Heeft de $Q : m_o^2$ -lijn echter een duidelijk buigpunt, maar nadert zij na een buigpunt bij grotere m_o -waarden tot een rechten lijn, dan neemt de doorlatendheid eerst vanaf het 0-vlak toe om bij hogere m_o -waarden of constant te worden of weer langzaam af te nemen, terwijl een tweede buigpunt optreedt, wanneer deze afname bij grotere m_o -waarden snel optreedt. Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat er nog meerdere mogelijkheden denkbaar zijn. In het bovenmedegedeelde zijn echter de meest voorkomende gevallen (zie ook diagram 5) aangegeven.

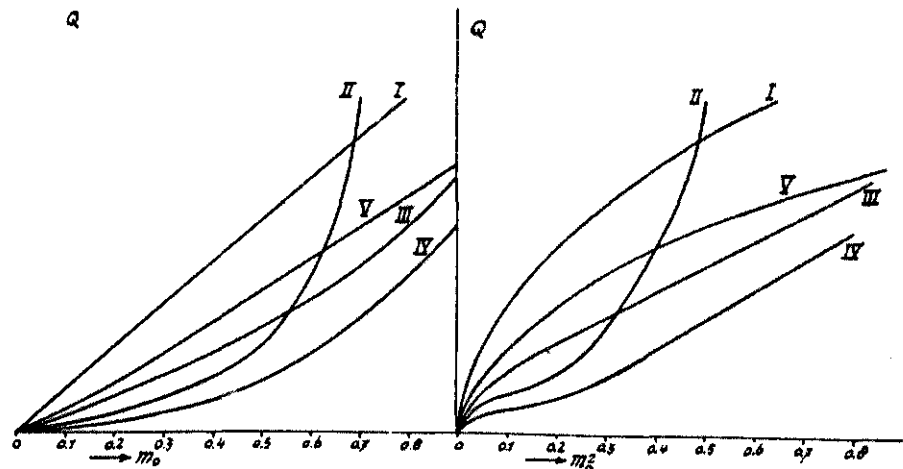
Diagram 5

Bepinning van de $Q-m_0$ en $Q-m_3$ lijnen.



Grond onder 0-vlak ondoorlatend:

- I. De grond is homogeen.
- II. De doorlatendheid van de laag grond boven het 0-vlak is veel hoger dan de daar boven liggende lagen.
- III. De doorlatendheid neemt boven het 0-vlak met de hoogte boven het 0-vlak toe of dus met de diepte onder het maaiveld af.
- IV. De doorlatendheid neemt boven het 0-vlak met de hoogte boven het 0-vlak af of dus met de diepte onder het maaiveld toe.



Grond onder 0-vlak doorlatend:

- I. De doorlatendheid en de dikte van de laag grond *onder* het 0-vlak is groot t.o.z.v. de doorlatendheid en de dikte van de laag grond *boven* het 0-vlak.
- II. De doorlatendheid van den grond neemt boven het 0-vlak toe.
- III. De grond boven het 0-vlak is homogeen of de doorlatendheid van den grond boven het 0-vlak neemt toe, maar het buigpunt ligt bij grootere m_0 -waarden, als tot waar de $Q : m_3$ lijn is op te stellen.
- IV. De doorlatendheid boven het 0-vlak neemt eerst toe om bij hogere m_0 -waarden, of constant te worden, of langzaam af te nemen.
- V. De doorlatendheid boven het 0-vlak neemt af, of de doorlatendheid neemt zoo langzaam boven het 0-vlak toe, dat de invloed van de doorlatende laag onder het 0-vlak overheerscht.

D. De $Q : M_0$ - ($Q : m_0$)-lijnen als indicatoren voor de veranderingen, die in de doorlatendheid van den grond in verloop van tijd optreden. De $Q : N$ - ($Q : n$)-lijnen als indicatoren voor de veranderingen, die in de doorlatendheid van den grond in de drainsleuven en (of) in de drainreeks zelf optreden

In Afdeeling C van dit hoofdstuk hebben we gezien, dat de vorm van de $Q : m_0$ -lijnen ons een inzicht geeft in het feit of de ondergrond al of niet doorlatend is, enz. Deze lijnen of ook de eerst opgestelde $Q : M$ - en $Q : N$ -lijnen kunnen resp. echter ook een zeer eenvoudig — zij het ook globaal — overzicht geven van de veranderingen in de doorlatendheid van den grond tusschen de greppels, drains, enz., die in verloop van tijd zijn opgetreden, resp. van de veranderingen van de doorlatendheid van den grond in de drainsleuven en (of) van de drainreeksen (nl. de stootvoegen of de buizen zelf).

§ 1. DE $Q : M_0$ - ($Q : m_0$)-LIJNEN

a. Er komt geen water boven de drains of in de greppels, enz. voor, of deze waterstand is althans in de beschouwde periode constant gebleven

We zullen nu in enkele voorbeelden het bovenstaande nagaan en wel in de eerste plaats het geval, dat geen water boven de drains, in de greppels, enz. voorkomt of, wanneer dit wel het geval is, deze waterstand in de beschouwde periode althans constant is. In dit geval zal de drainafstand ¹⁾ uit den aard der zaak steeds dezelfde zijn, daar alleen de veranderingen in de doorlatendheid van den grond op hetzelfde perceel van jaar tot jaar zullen worden nagegaan. Hieruit volgt dus, dat daar ook n gelijk nul of constant is, het debiet alleen afhankelijk zal zijn van H_0 , d.w.z. M_0 en de doorlatendheid.

Stellen we nu uit de waarnemingen van jaar tot jaar (b.v. telkens van $\pm$ October tot April) de $Q : M_0$ - of $Q : m_0$ -lijnen op, dan worden dus in de veranderingen, die deze lijnen in verloop van tijd ondergaan, tevens de veranderingen in de doorlatendheid van den grond tot uiting gebracht.

In diagram 6 zijn de $Q : m_0$ -lijnen van het op 10 m begreppelde vak Gr 2 (de greppels zijn 60 cm diep) van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder aangegeven en wel geven de lijnen I t/m V de $Q : m_0$ -lijnen aan, zooals deze zijn opgesteld uit de waarnemingen in de jaren 1930—1931, 1931—1932, 1932—1933, 1933—1934 en 1934—1935.

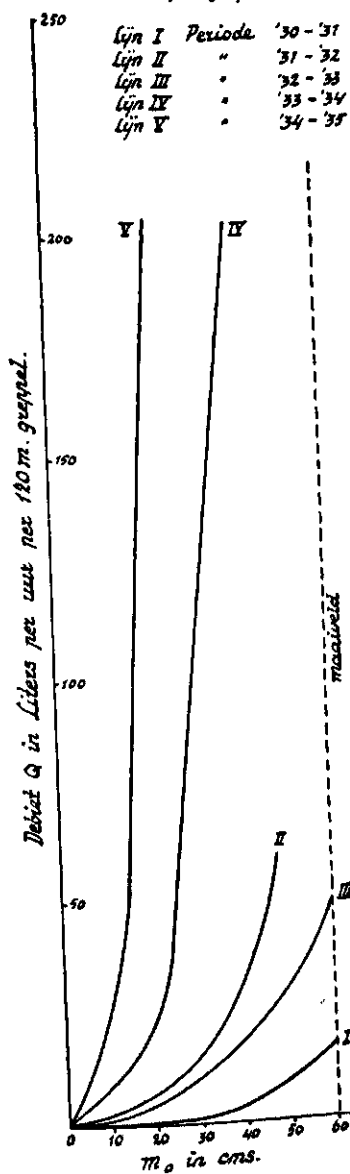
Uit deze lijnen valt in de eerste plaats op, dat niet alle $Q : m_0$ -lijnen tot het maaiveld doorloopen, hetgeen hierdoor veroorzaakt wordt, dat niet

¹⁾ Het spreekt vanzelf, dat het volgende ook geldig is voor greppels, enz.

Greppel vak Gr. 2
Greppel afstand 10 m.

Q: m₀ lijnen.

lijn I	Periode	'30 - '31
lijn II	"	'31 - '32
lijn III	"	'32 - '33
lijn IV	"	'33 - '34
lijn V	"	'34 - '35



Greppel vak Gr. 2
Greppel afstand 10 m.

Q: m₀² lijnen.

lijn I	Periode	'30 - '31
lijn II	"	'31 - '32
lijn III	"	'32 - '33
lijn IV	"	'33 - '34
lijn V	"	'34 - '35

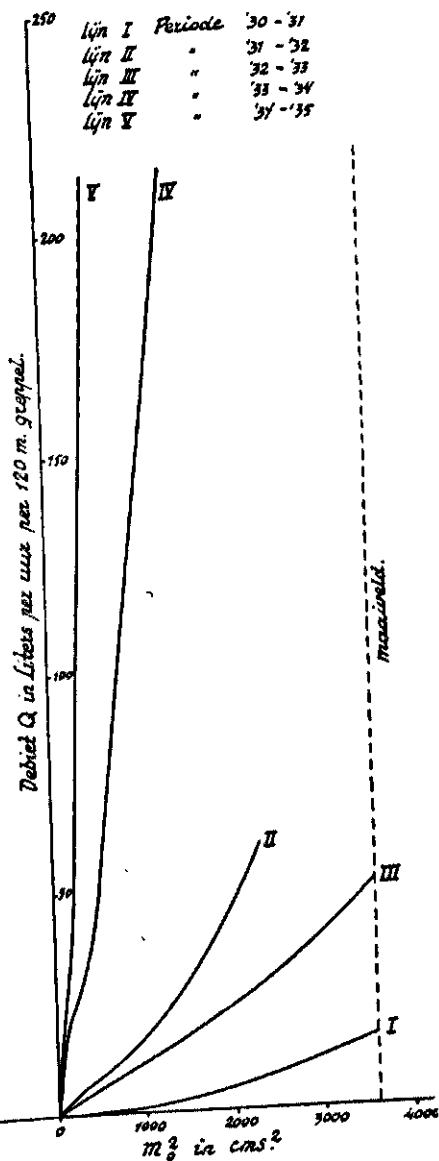


Diagram 6

in alle jaren de grondwaterstand tot het maaiveld is opgelopen en de $Q : m_0$ -lijnen uit den aard der zaak slechts tot de hoogst waargenomen grondwaterstanden onder het maaiveld (= M_0 -waarden) zijn te construeeren. Hierbij kan worden opgemerkt, dat een invloed van de vorst, die in deze jaren is opgetreden, niet bij de opstelling der $Q : m_0$ -lijnen tot uiting is gekomen en dus in elk geval slechts hoogstens veranderingen kan hebben gegeven, die binnen de foutengrenzen van de vaststelling van de $Q : m_0$ -lijnen liggen, indien de vorst althans zoo diep in den grond is doorgedrongen (32). De groote veranderingen, die in verloop van tijd zijn opgetreden, zijn dan ook op dit proefveld in de droge perioden (door indroging en scheurvorming) ontstaan.

In de gegeven vijf $Q : m_0$ -lijnen liggen nu de veranderingen van de doorlatendheid van den grond besloten. We kunnen dit gemakkelijk inzien door een bepaald punt van de ordinaat een lijn evenwijdig de abscis te trekken en vanuit de snijpunten van deze lijn met de $Q : m_0$ -lijnen loodlijnen te trekken naar de abscis. Voor al deze snijpunten is het debiet hetzelfde, terwijl de m_0 -waarden (en dus ook de M_0 -waarden) verschillend zijn. Dit kan alleen veroorzaakt zijn door een verandering van de doorlatendheid van den grond en wel is de doorlatendheid der te grooter naarmate de M_0 -waarden grooter en dus en dus de m_0 -waarden (verval!) bij hetzelfde debiet kleiner zijn. Beschouwen we dan ook de vijf $Q : m_0$ -lijnen, dan zien we, dat — uitgezonderd voor de periode 1932—1933 (lijn III) — de doorlatendheid van den grond voortdurend is toegenomen. Voor de periode 1932—1933 (lijn III) komt in vergelijking met de periode 1931—1932 (lijn II) een achteruitgang van de doorlatendheid tot uiting. Deze achteruitgang is het gevolg van hevige regens in October 1932, die den grond hebben dichtgeslagen.

b. Er komt water boven de drains voor; deze waterstand boven de drains verandert met het debiet

Als voorbeeld van dit geval zijn in diagram 7 de $Q : m_0$ -lijnen aangegeven van het op 10 m gedraineerde vak Dr 2 van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder. Boven deze drains kwam vanaf de perioden 1932—1933 water voor (in de periode 1930—1931 en 1931—1932 zijn geen N -waarden bepaald). De $Q : n$ -lijnen van deze perioden, resp. de lijnen 1, 2 en 3 zijn eveneens in dit diagram aangegeven. Hierbij kan worden opgemerkt, dat de diepte van de drains door de inklinking van den grond in verloop van tijd is verminderd. Deze veranderingen in de diepteligging zijn in verband met de groote veranderingen in de $Q : m_0$ -lijnen zoo gering, dat deze veranderingen hier buiten beschouwing kunnen worden gelaten. Verder was ook nu de invloed van de vorst niet vast te stellen.

Drainvak De. 2
 Drainafstand 10 m.
 Q: m_0 en Q: n - lijnen

lijn I	Q: m_0 lijn	Periode '30-'31.
lijn II	Q: m_0 lijn	" '31-'32.
lijn III	Q: m_0 lijn	" '32-'33.
lijn IV	Q: m_0 lijn	" '33-'34.
lijn V	Q: m_0 lijn	" '34-'35.
lijn 1	Q: n lijn	" '32-'33.
lijn 2	Q: n lijn	" '33-'34.
lijn 3	Q: n lijn	" '34-'35.

Drainvak De. 2
 Drainafstand 10 m.
 Q: m_0 lijnen.

lijn I	Q: m_0 lijn	Periode '30-'31.
lijn II	Q: m_0 lijn	" '31-'32.
lijn III	Q: m_0 lijn	" '32-'33.
lijn IV	Q: m_0 lijn	" '33-'34.
lijn V	Q: m_0 lijn	" '34-'35.

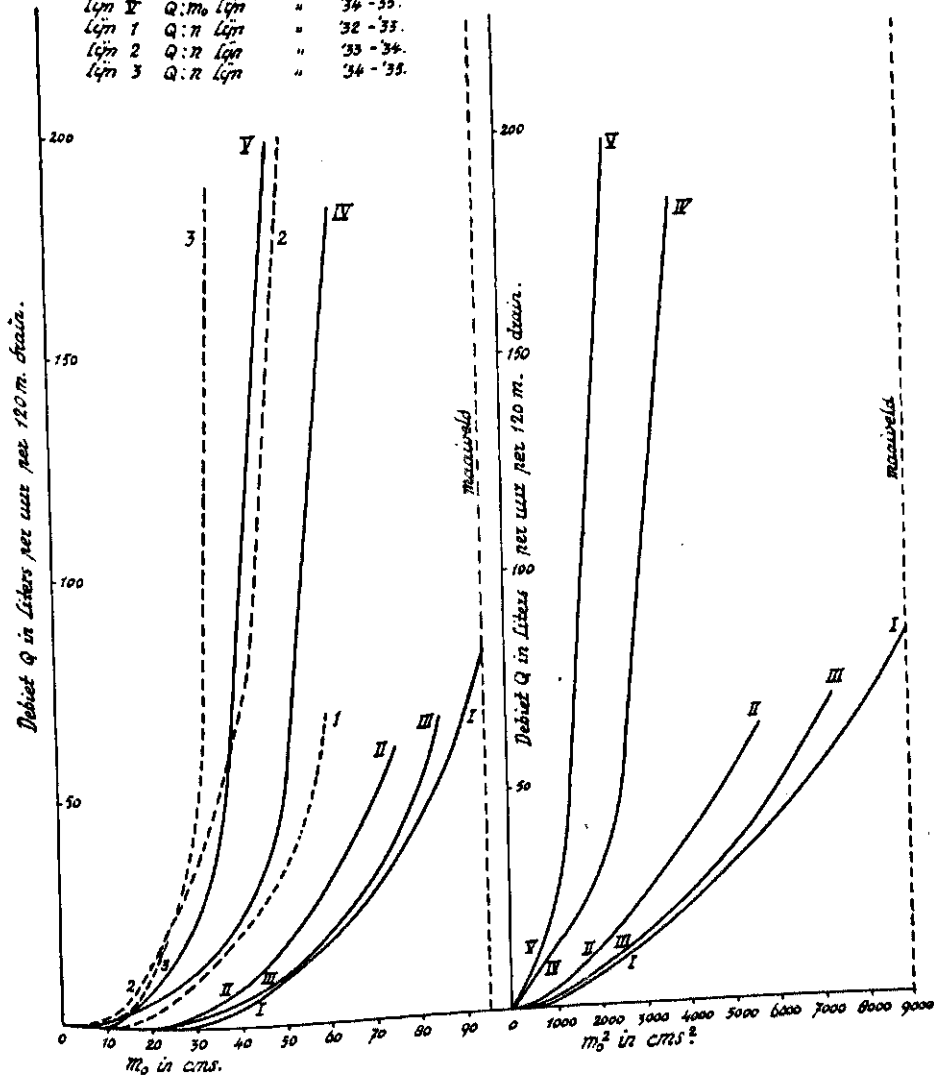


Diagram 7

Het zal duidelijk zijn, dat in dit geval het debiet behalve van de doorlatendheid en M_0 (m_0) ook nog van N (n) afhangt. Beschouwen we ook nu weer alleen de $Q : m_0$ -lijnen zonder op de $Q : n$ -lijnen te letten, dan zou men ook nu tot dezelfde conclusie komen als bij de $Q : m_0$ -lijnen van vak Gr_2 (zie sub a). Een dergelijke conclusie is echter alleen geoorloofd, wanneer de verandering van de n -waarden op zich zelf beschouwd deze veranderingen *niet* kunnen verklaren. Bij hetzelfde debiet en dezelfde m_0 -waarde is de doorlatendheid immers des te groter, naarmate n groter of dus N kleiner is. Of wat hetzelfde is, zal, bij dezelfde doorlatendheid en hetzelfde debiet, m_0 groter of dus M_0 kleiner moeten zijn, naarmate n groter of N kleiner is. Neemt nu volgens diagram 7 de m_0 -waarde in de perioden 1932 t/m 1935 af (of dus de M_0 -waarden toe), zoodat bij hetzelfde debiet dus m_0 kleiner of M_0 groter wordt, dan mag hier alleen de conclusie uit getrokken worden, dat de doorlatendheid van den grond toeneemt, wanneer in dezelfde periode de n -waarden constant zijn gebleven of zijn afgenomen resp. de N -waarden constant zijn gebleven resp. zijn toegenomen, daar bovengenoemde conclusie dan vast staat. Daar de n -waarden zijn afgenomen of de N -waarden zijn toegenomen en de veranderingen van de m_0 (M_0)-waarden daardoor dus niet verklaard kunnen worden, staat bovengaande verandering in de doorlatendheid vast.

In andere gevallen, als de boven behandelde, kan deze conclusie ook wel eens niet vast staan. Meestal zal echter boven de drains slechts weinig water voorkomen, zoodat dus meestal de veranderingen van de doorlatendheid wel met zekerheid uit de $Q : m_0$ - ($Q : M_0$ -)lijnen zijn af te leiden. Verder spreekt het vanzelf, dat wanneer de conclusie uit de $Q : m_0$ - ($Q : M_0$ -)lijnen wel vaststaat en de lijnen van de opeenvolgende perioden voor de kleinste m_0 -waarden resp. de grootste M_0 -waarden samenvallen, hieruit tevens kan worden afgeleid, dat in de eerste lagen boven de drains geen veranderingen in de doorlatendheid in de beschouwde perioden zijn opgetreden.

§ 2. DE $Q : N$ - ($Q : n$ -) LIJNEN

De $Q : N$ -lijnen geven een indruk van de veranderingen in de doorlatendheid, die in den grond in de drainsleuf, in de stootvoegen of in de drainsbuizen zelf zijn opgetreden. Is bij eenzelfde debiet de n -waarde groter of dus de N -waarden kleiner geworden, dan beteekent dit dus, dat er zich een slecht doorlatende laag in de drainsleuf heeft gevormd, of de stootvoegen tusschen de drainbuizen, of de drainbuizen zelf, iets zijn dichtgeraakt, enz. Uit diagram 7 blijkt, dat de n -waarden van de periode 1932—1933 het grootste of dus de N -waarden het kleinste zijn en sedert zijn afgenomen resp. zijn toegenomen. Daar we verder als vrijwel zeker kunnen aannemen, dat in de periode 1930—1931 en 1931—1932 (de drains werden gelegd in 1930) de

n -waarden weer kleiner resp. de N -waarden grooter zijn geweest dan in de periode 1932—1933, zoo blijkt hier dus uit, dat ook hier de hevige regens in October 1932 funest zijn geweest en dat in de volgende jaren de indroging en daardoor ontstane verbetering van de doorlatendheid van den grond op dit vak de invloed van de in October 1932 ontstane slecht doorlatende drain-sleuf slechts geleidelijk weer heeft opgeheven. Hierbij moet worden opgemerkt, dat het hier slechts de bedoeling is geweest de te trekken conclusies uit de $Q : n$ -lijnen toe te lichten en het natuurlijk niet de bedoeling kan zijn hier de resultaten van genoemd proefveld B 45 te bespreken, waarvan de vakken Gr_2 en Dr_2 slechts een klein onderdeel zijn.

E. De $Q : m_0$ - en de $Q : n$ -lijnen vormen het aangewezen uitgangsmateriaal voor de berekening van de(n) doorlaatfactor(en) van den grond

§ 1. ER TREEDT GEEN HANGKROMME VAN HET PHREATISCH OPPERVLAK NAAR DE SLOOT OP

Zooals reeds eerder is opgemerkt vormen de $Q : m_0$ - en $Q : n$ -lijnen het aangewezen uitgangsmateriaal voor de berekeningen van de(n) doorlaatfactor(en) van den grond.

In afdeeling C van dit hoofdstuk hebben we gezien, hoe uit den vorm van de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen kan worden afgeleid of de grond onder de 0-laag al dan niet doorlatend is en of de doorlatendheid naar hooger gelegen lagen in het profiel toeneemt, afneemt, dan wel gelijk blijft, terwijl ook het profiel-onderzoek zelf daarover gegevens kan verstrekken; b.v. de aanwezigheid van een ondoorlatende laag; een afnemende scheurvorming met een toenemende diepte onder het maaiveld, enz. We kunnen dan ook 2 gevallen onderscheiden, nl. dat

- a. de ligging van de ondoorlatende laag bekend is en de grond onder de drains al of niet doorlatend is en
- b. de ligging van de ondoorlatende laag onbekend is. De grond onder de drains of onder het -Ovlak is dan uit den aard der zaak doorlatend.

Verder is in ieder geval nog mogelijk, dat geen resp. wel water boven de drains, enz. voorkomt en de grond al of niet homogeen kan zijn. Zoowel van geval a als b zullen we enkele voorbeelden behandelen.

a. De ligging van de ondoorlatende laag is bekend

Is de ligging van de ondoorlatende laag bekend, dan kunnen zeer veel verschillende gevallen voorkomen. Hier zal worden volstaan met enkele voorbeelden te behandelen.

a. De grond onder het vlak van de drains is ondoorlatend; de grond is homogeen; er bevindt zich al of geen water boven de drains

Blijkt uit de $Q : m_0$ -lijn, dat de grond homogeen is en de grond onder de drains ondoorlatend is, zoo is de berekening al heel eenvoudig. In dit geval lezen we uit de $Q : m_0$ -lijn (niet uit de $Q : M$ -lijn daar hierdoor gemakkelijk vergissingen kunnen worden begaan) bij een willekeurig debiet ($= Q$) de bijbehorende m_0 -waarde af. Deze m_0 -waarde is hier gelijk aan H_0 . Bevindt zich geen water boven de drains, dan geldt de vergelijking $Q = \frac{k H_0^2}{e} = \frac{k m_0^2}{e}$ en bevindt zich bij het beschouwde debiet wel water boven de drains dan geldt de vergelijking $Q = \frac{k (H_0^2 - h_0^2)}{e} = \frac{k (m_0^2 - n^2)}{e}$ met behulp waarvan dus de doorlaatfactor is te berekenen, als we bij dezelfde Q -waarde uit de $Q : n$ -lijn de bijbehorende n -waarde hebben afgelezen.

In bovenstaand geval is impliciet verondersteld, dat op het moment, dat het debiet nul wordt ook n nul wordt. Is dit niet het geval dan kan men uit de $Q : m_0$ -lijn niet meer aflezen, dat de grond onder de drains ondoorlatend is, daar het 0-vlak nu niet meer samenvalt met het vlak van de drains. Dit geval behoort dus feitelijk tot het geval, dat de ondergrond (dit is de grond onder het 0-vlak) doorlatend is. Uit de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijn is nu bovendien niet meer zoo gemakkelijk na te gaan, dat de grond onder het 0-vlak tot de drains dezelfde doorlatendheid heeft als de grond daarboven. Is echter op de een of andere wijze gebleken, dat dit het geval is (zie ook onder sub b, ^{3, II} voor de methode om dit na te gaan) dan geldt ook nu eenvoudig:

$$Q = \frac{k (H_0^2 - h_0^2)}{e} = \frac{k (m_0^2 - n^2)}{e}, \text{ met behulp waarvan dus } k \text{ is te berekenen.}$$

b. De grond is heterogeen; de grond onder de drains is al dan niet doorlatend

1. Inleiding

Is nu blijkens den vorm van de $Q : m_0$ -lijnen de grond heterogeen, zoo kunnen we verschillende methoden voor de berekening van den doorlaatfactor volgen. Een algemeene oplossing zal onder sub α , b , 3 en verder onder sub β en γ van deze paragraaf worden behandeld.

Verder wordt dus alleen de samenhang van den doorlaatfactor in de laag *boven het 0-vlak* met de hoogte daarboven in den vorm van de $Q : m_0$ -lijnen tot uiting gebracht. Alleen van deze laag is door de $Q : m_0$ -lijnen aangegeven,

hoe het debiet verandert, wanneer m_0 toeneemt. In C, § 3 is verder aangetoond, dat $\frac{dQ}{dm_0}$ (bij $Q = 0$ en $m_0 = \text{minimaal}$) tweemaal het totale geleidingsvermogen G van de laag onder het 0-vlak gedeeld door e aangeeft. Met voldoende benadering zal men dan ook alléén dit totale geleidingsvermogen kunnen berekenen en de verandering en de juiste grootte van de doorlatendheid in de laag boven het 0-vlak. Nu spreekt het wel vanzelf, dat men iets verder kan komen, wanneer het profielonderzoek of andere redenen een aantal lagen in de watervoerende laag waarschijnlijk maakt. Men bedenke echter wel, dat zoodra de laag onder het 0-vlak niet meer als een geheel wordt beschouwd, de berekeningen afhangen van de veronderstellingen, die men — om welke redenen dan ook — heeft willen maken, tenzij natuurlijk de veronderstelde lagen ook werkelijk in het profiel aanwezig zijn. Indien het dan ook maar eenigszins mogelijk is, verdient het aanbeveling de berekeningen zoo uit te voeren, dat de laag onder het 0-vlak als één geheel wordt beschouwd (zie E, § 1, γ). Hier zullen we echter o.a. enkele gevallen bespreken, waarbij is verondersteld dat blijkens het profielonderzoek of om andere redenen de ligging van enkele lagen onder het 0-vlak met een verschillende doorlatendheid vaststaat, waarbij we echter zullen zien, dat nooit meer dan van één laag, die geheel onder het 0-vlak is gelegen, de doorlaatfactor is te berekenen.

2. Er komen in het profiel 2 of meer lagen voor; de doorlatendheid verandert sprongsgewijze

Komen er in het profiel twee of meer lagen met een verschillende doorlatendheid voor dan zijn verschillende mogelijkheden denkbaar, waarvan we hier maar enkele als voorbeelden kunnen behandelen.

In verband met hetgeen onder sub b, 1 werd medegedeeld, zal het duidelijk zijn, dat berekeningen van de werkelijk voorkomende doorlaatfactoren; en dus niet van gemiddelde doorlaatfactoren (effectieve doorlaatfactoren; zie Hoofdstuk V), bij de gegeven indeeling van het profiel alleen mogelijk zijn, wanneer, of de grond onder de drains ondoorlatend is en er geen water boven de drains staat bij $Q = 0$; of wanneer de grond onder de drains doorlatend is, de ligging van de ondoorlatende laag bekend is en de grond onder de drains homogeen is. Is dit laatste niet het geval, dan kan alleen de gemiddelde doorlatendheid van deze laatste laag berekend worden. Verder moeten de lagen, waarin het profiel verdeeld is, ook werkelijk homogeen zijn (zie Hoofdstuk V).

Is het bovenstaande het geval, dan kunnen eenvoudig de vergelijkingen voor 2 of meer lagen worden gebruikt, zooals deze in Hoofdstuk II zijn afgeleid, waarbij de keuze van de vergelijking afhangt van het feit in welke laag h_0 valt bij het te beschouwen debiet (zie aldaar). Komen nu in het profiel b.v.

3 lagen voor, dan is het voldoende om bij 3 Q-waarden ¹⁾ uit de Q : m_0 -lijnen de bijbehorende m_0 -waarden af te lezen evenals zoo noodig de n -waarden uit de Q : n -lijnen en deze waarden om te rekenen op de H_0 - en h_0 -waarden, hetgeen dus noodig is, als de grond onder de drains doorlatend is ($H_0 = m_0 + r$ en $h_0 = n + r$). Deze waarden van H_0 en h_0 worden nu in de vergelijking ingevuld, waardoor 3 vergelijkingen met in totaal hoogstens 3 onbekenden nl. k_1 , k_2 en k_3 ontstaan, waardoor deze dus berekend kunnen worden.

Meestal zal men echter de vergelijkingen voor 2 of meer lagen in het profiel toepassen om den gemiddelden (nl. den effectieven) doorlaatfactor voor deze lagen in het profiel te berekenen, zonder dat deze lagen dus in werkelijkheid voorkomen. Hierbij moet worden opgemerkt, dat in het laatste geval de berekende doorlaatfactoren gemiddelde waarden, nl. z.g. effectieve doorlaatfactoren, zijn (zie Hoofdstuk V). De beste resultaten worden verkregen door de Q-waarden en de m_0 en n -waarden zoo te kiezen, dat de H_0 -waarden resp. gelijk zijn aan h_1 , h_2 enz. en aan de hoogst waargenomen H_0 -waarde. Hierbij kan nog worden opgemerkt, dat hier de berekening van den *werkelijke* doorlaatfactor alleen mogelijk is door den doorlaatfactor als een continue veranderlijke grootte te beschouwen, hetgeen onder sub γ in enkele voorbeelden verder zal worden besproken.

We zullen nu aantonen, dat we den doorlaatfactor van meer dan 1 laag, die *geheel* onder het 0-vlak ligt, niet meer kunnen berekenen en beschouwen daarvoor in de eerste plaats het geval, dat in het profiel 3 lagen voorkomen, de drains op de scheiding tusschen de onderste en de middenste laag liggen en dat h_0 zich bevindt in de middenste laag.

In bovengenoemd geval geldt de vergelijking ($h_0 > h_1$ en $< h_2$; zie de vergelijking 51):

$$Q = \frac{1}{e} (k_3 H_0^2 + 2 h_1 k_1 H_0 (1 - n_1) + 2 h_2 k_2 H_0 (1 - n_2) + h_2^2 k_2 (n_2 - 1) + 2 k_1 h_1 h_0 (n_1 - 1) - k_2 h_0^2) \quad (96)$$

Is nu de waterstand boven de drains (n -waarde) afhankelijk van Q en bij Q = 0 eveneens gelijk 0 (het 0-vlak valt samen met het vlak van de drains), dan is dus blijkbaar:

$$H_0 = h_1 + m_0 = r + m_0 \quad (97)$$

$$h_0 = h_1 + n = r + n \quad (98)$$

De vergelijkingen 97 en 98 in de vergelijking 96 ingevuld, geeft:

¹⁾ Een waarde van H_0 moet in elk geval grooter zijn dan h_1 en één grooter dan h_2 .

$$Q = \frac{1}{e} \{ (r + m_0)^2 k_3 + 2 h_1 k_1 (r + m_0) (1 - n_1) + 2 h_2 k_2 (r + m_0) (1 - n_2) + h_2^2 k_2 (n_2 - 1) + 2 k_1 h_1 (r + n) (n_1 - 1) - k_2 (r + n)^2 \} \quad (99)$$

of

$$Q = \frac{1}{e} \{ (r + m_0)^2 k_3 - 2 h_2 k_3 (r + m_0) + h_2^2 k_3 + 2 h_2 k_2 (r + m_0) - 2 h_1 k_2 (r + m_0) - h_2^2 k_2 + 2 k_2 h_1 (r + n) - k_2 (r + n)^2 + 2 h_1 k_1 (m_0 - n) \} \quad (100)$$

Uit de vergelijking 100 volgt, dat de factor k_1 alleen in één term voorkomt, terwijl k_2 en k_3 in meerdere termen voorkomen, die gedeeltelijk de eerste, gedeeltelijk de tweede macht van m_0 bevatten. Dit beteekent dan ook, dat bij 3 verschillende Q -waarden en daarbij behoorende m_0 - en n -waarden (vergelijking 100) of H_0 en h_0 -waarden; vergelijking 96) de doorlaatfactoren k_1 , k_2 en k_3 berekend kunnen worden. De 3 Q -waarden kiezen we dus zoodanig, dat resp. $H_0 = h_1$; $H_0 = h_2$ en $H_0 = \text{maximaal}$.

In het volgende voorbeeld zullen we nu aantonen, dat de doorlaatfactoren van de lagen onder het 0-vlak *niet* meer te berekenen zijn, zoodra zich meer dan één laag geheel onder het 0-vlak bevindt. Daarvoor kiezen we het geval, dat er 3 lagen in het watervoerende profiel voorkomen en dat h_0 steeds grooter blijft dan h_2 , d.w.z. dat zich 2 lagen geheel onder het 0-vlak bevinden. Waar de drains zich bevinden is van geen belang, daar we de correctie voor het feit, dat de drains niet op de ondoorlatende laag liggen als te verwaarloozen klein zullen beschouwen.

In dit geval geldt de vergelijking (zie ook vergelijking 53)

$$Q = \frac{1}{e} \{ k_3 H_0^2 + 2 h_1 k_1 H_0 (1 - n_1) + 2 h_2 k_2 H_0 (1 - n_2) + 2 h_1 h_0 k_1 (n_1 - 1) + 2 h_2 k_2 h_0 (n_2 - 1) - k_3 h_0^2 \} \quad (101)$$

Na eenige omrekening ontstaat hieruit:

$$Q = \frac{1}{e} \{ k_3 (H_0^2 - h_0^2) - 2 h_2 k_3 (H_0 - h_0) + 2 k_2 (h_2 - h_1) (H_0 - h_0) + 2 h_1 k_1 (H_0 - h_0) \} \quad (102)$$

Uit de vergelijking 102 blijkt, dat zoowel k_1 als k_2 alleen in termen voorkomen, die $(H_0 - h_0)$ bevatten. Dit wil dus zeggen, dat bij 3 verschillende Q -waarden, waarbij de H_0 -waarden in elk geval natuurlijk grooter zijn dan h_0 — dus grooter dan h_2 —, de termen met k_1 en k_2 in dezelfde verhouding veranderen in tegenstelling met de termen, waarin k_3 voorkomt. Hieruit volgt dus, dat k_1 en k_2 niet meer zijn te berekenen.

Hetzelfde resultaat verkrijgen we in alle andere gevallen, waarbij zich meer dan 1 laag geheel onder het 0-vlak bevindt. Wel is het nog mogelijk behalve den doorlaatfactor van één laag, die zich geheel onder het 0-vlak bevindt, ook nog den doorlaatfactor te berekenen van een laag, die zich gedeeltelijk onder, gedeeltelijk boven het 0-vlak bevindt. Dit zal echter slechts zelden toegepast behoeven te worden. Zooals reeds eerder is opgemerkt, is het gewenscht zoo mogelijk de geheele laag onder het 0-vlak als één geheel te beschouwen, daar alleen de gemiddelde doorlaatfactor van deze laag te berekenen is en de veronderstelling van een laag, die zich gedeeltelijk onder gedeeltelijk boven het 0-vlak bevindt tot willekeur aanleiding geeft, tenzij natuurlijk bij het profielonderzoek de aanwezigheid van deze homogene laag is vastgesteld.

3. De doorlatendheid verandert geleidelijk

Ook nu weer zijn verschillende gevallen mogelijk en ook nu weer zullen we ons beperken tot enkele gevallen.

1. De grond onder de drains is ondoorlatend; er bevindt zich geen water boven de drains of in elk geval niet, wanneer $Q = 0$

Is de ondergrond ondoorlatend en bevindt zich dus geen water boven de drains, wanneer het debiet nul is, dan zal het duidelijk zijn, dat een algemeene oplossing mogelijk is door toepassing van de algemeene vergelijking (zie ook de vergelijking 68), nl.:

$$Q = \frac{1}{e} \left(k_0 (H_0^2 - h_0^2) + \frac{1}{3} a (H_0^3 - h_0^3) + \frac{1}{6} b (H_0^4 - h_0^4) + \frac{1}{10} c (H_0^5 - h_0^5) + \text{enz.} \right) \quad (103)$$

Daar in het gegeven geval $H_0 = m_0$ en $h_0 = n$, kan de vergelijking ook als volgt worden geschreven:

$$Q = \frac{1}{e} \left(k_0 (m_0^2 - n^2) + \frac{1}{3} a (m_0^3 - n^3) + \frac{1}{6} b (m_0^4 - n^4) + \frac{1}{10} c (m_0^5 - n^5) + \text{enz.} \right) \quad (104)$$

Beschouwen we nu zooveel termen, dat de bereikte nauwkeurigheid voldoende is, dan kan men de onderstaande vergelijking 105 tot evenveel termen berekenen, nl.:

$$k_m = k_0 + am + bm^2 + cm^3 + \dots \text{enz.} \quad (105)$$

Uit de $Q : m_0$ - en $Q : n$ -lijnen worden daarvoor voor evenveel Q -waarden de bijbehorende m_0 - en n -waarden afgelezen en in de vergelijking 104 ingevuld, waardoor evenveel vergelijkingen als onbekenden worden verkregen, die daaruit dus zijn op te lossen. Noodzakelijk is het nu om voor tusschenlig-

gende m_o - en n -waarden de Q -waarden met de nu volledig bekende vergelijking 105 te berekenen, waarbij deze waarden dus met voldoende benadering overeen moeten komen met de Q -waarden, die uit de $Q : m_o$ -lijnen kunnen worden afgelezen. Is de bereikte nauwkeurigheid onvoldoende dan moeten meer termen worden beschouwd.

Hierbij kan worden opgemerkt, dat k_m — op welke hoogte dan ook in het profiel — nooit negatief kan worden. Verder zal bij toepassing van deze methode voor de geheele $Q : m_o$ -lijn vaak blijken, dat het aantal te beschouwen termen zoo groot moet worden, dat daardoor de berekening zeer tijdrovend, tot practisch onmogelijk, wordt. Beter is dan ook de in sub γ aan enkele voorbeelden (geval I, II en III) besproken methode toe te passen en alleen voor een niet te groot gedeelte van de $Q : m_o$ -lijn de hier besproken methode te benutten, tenzij de hieronder en bij het tweede voorbeeld besproken methode kan worden toegepast.

Verder moge hier nog een eenvoudige methode besproken worden om de functie van de verandering van de doorlatendheid met de hoogte boven de drains te bepalen. Deze methode is namelijk toe te passen, wanneer de functie van k_m en m_o kan worden aangegeven door de algemeene functie:

$$k_m = k_o + am^b \quad (106)$$

waarin a en b positieve of negatieve; geheele of gebroken getallen voorstellen, en *wanneer geen water boven de drains voorkomt*. In dit geval is dus, als de grond onder de drains ondoorlatend is (zie ook de vergelijking 64):

$$Q = \frac{1}{e} \left(k_o H_o^2 + \frac{2a}{(b+2)(b+1)} H_o^{b+2} \right) = \frac{1}{e} \left(k_o m_o^2 + \frac{2a}{(b+2)(b+1)} m_o^{b+2} \right) \quad (107)$$

daar hier $H_o = m_o$ (de grond onder de drains is ondoorlatend).

Deze vergelijking is ook aldus te schrijven (33):

$$\frac{Qe}{m_o^2} = k_o + \frac{2a}{(b+2)(b+1)} m_o^b \quad (108)$$

Hieruit blijkt, dat afgezien van den constanten factor het rechterlid overeenkomt met het rechterlid van de vergelijking 106. We kunnen deze functie nu grafisch nagaan door in een diagram op de ordinaat $\frac{Qe}{m_o^2}$ en op de abscis $m_o, m_o^2, \sqrt{m_o}, \log m_o$ enz. af te zetten en na te gaan in welk diagram een rechte lijn wordt verkregen. Is dit b.v. het geval, wanneer op de abscis m_o^2 wordt afgezet, dan is de factor $b = 2$, waardoor de vergelijking 108 zich vereenvoudigt tot de vergelijking:

$$\frac{Qe}{m_o^2} = k_o + \frac{2a}{12} m_o^2 \text{ of } Q = \frac{k_o m_o^2 + \frac{1}{6} a m_o^4}{e}$$

De constanten k_0 en a zijn nu zeer eenvoudig uit te rekenen, door voor 2 verschillende Q -waarden de bijbehorende m_0 -waarden uit de $Q : m_0^2$ -lijnen af te lezen en in bovenstaande vergelijking in te vullen, waardoor 2 vergelijkingen met 2 onbekenden worden verkregen, waaruit deze onbekenden zijn op te lossen; enz.

II. De ondergrond (34) is doorlatend; de grond onder de drains is ondoorlatend; er bevindt zich dus water boven de drains, wanneer $Q = 0$

Bevindt zich water boven de drains op het moment, dat het debiet nul wordt ¹⁾, dan is de eenig mogelijke oplossing deze, dat de laag onder het 0-vlak als één geheel wordt beschouwd, waarvan de gemiddelde doorlaatfactor k_1 is. De algemeene oplossing is nu deze, dat we den doorlaatfactor k_m vanaf het 0-vlak laten veranderen volgens de functie:

$$k_m = k_0 + f(y - h) \quad (109)$$

waarin m' de hoogte boven het 0-vlak aangeeft en h de afstand van het 0-vlak tot de ondoorlatende laag voorstelt. In dit geval is blijkbaar als n met Q varieert:

$$q_x = Q \left(\frac{e-x}{e} \right) = k_1 h \frac{dy}{dx} + \frac{dy}{dx} \int_{y=h}^{y=x} (k_0 + f(y-h)) dy$$

Geïntegreert van $y = n$ tot $y = m_0$ en van $x = 0$ tot $x = e$ ontstaat:

$$Q = \frac{2}{e} k_1 h (m_0 - n) + \frac{2}{e} \int_{y=n}^{y=m_0} \int_{y=h}^{y=y} (k_0 + f(y-h)) dy dy \quad (110)$$

Nu is echter $y = h + m$ en $m_0 = h + m_0'$, zoodat $dy = dm'$. Verder is $n = h + n'$, waarin dus n' den grondwaterstand boven de drains en boven het 0-vlak voorstelt.

De vergelijking 110 is dan ook om te vormen tot de vergelijking:

$$Q = \frac{2}{e} k_1 h (m_0 - n) + \frac{2}{e} \int_{m'=n'}^{m'=m_0'} \int_{m'=0}^{m'=m'} (k_0 + f(m')) dm' dm' \quad (111)$$

Stellen we nu $f(m') = am' + bm'^2 + cm'^3 + dm'^4 + \text{enz.}$ (112)

dan wordt dus:

$$Q = \frac{2}{e} \left(k_1 h (m_0 - n) + \frac{1}{2} k_0 (m_0'^2 - n'^2) + \frac{1}{6} a (m_0'^3 - n'^3) + \frac{1}{12} b (m_0'^4 - n'^4) + \frac{1}{20} c (m_0'^5 - n'^5) + \frac{1}{30} d (m_0'^6 - n'^6) + \text{enz.} \right) \quad (113)$$

¹⁾ Een soortgelijke oplossing is natuurlijk mogelijk, wanneer de grond onder de drains tot een bepaalde diepte doorlatend is en er al of geen water boven de drains voorkomt, wanneer $Q = 0$.

waarin m'_0 den grondwaterstand midden tusschen de drains en boven het 0-vlak aangeeft.

Op dezelfde wijze als dit bij het eerste voorbeeld is aangegeven, is dus nu de vergelijking 113 tot zooveel termen op te lossen als men wenscht door bij evenveel Q -waarden de m_0 en n - (resp. de m'_0 en n' -waarden) uit de $Q : m_0$ - en $Q : n$ -lijn af te lezen (zoo noodig op m'_0 en n' -waarden om te rekenen) en deze in de bovenstaande vergelijking in te vullen, waarbij evenveel vergelijkingen als onbekenden ontstaan, zoodat deze onbekenden dus te berekenen zijn. Evenals bij het eerste voorbeeld kan het aantal termen, dat beschouwd moet worden om voldoende nauwkeurige resultaten te krijgen, zoo groot worden, dat practisch deze methode niet kan worden toegepast. Ook in dit geval is het beter de in sub γ besproken methode te volgen.

Nu kan er nog de aandacht op gevestigd worden, dat ook nu een eenvoudige oplossing mogelijk is, wanneer de waterstand boven de drains constant is en dus niet met Q verandert. Dit is nl. mogelijk, zoodra $k_1 h$ bekend is, of, wanneer we weer $k_1 h = G =$ totale geleidingsvermogen voor water van de laag onder het 0-vlak noemen, dus G bekend is. Immers $n' = 0$ (waterstand boven de drains is constant of dus $n = h =$ constant) dan is de vergelijking 111 aldus te schrijven:

$$\Delta Q = Q_e - 2G(m_0 - h) = 2 \int_{m'_0 = n'}^{m'_0 = m'_0} \int_{m' = 0}^{m' = m'} (k_0 + f(m')) dm' dm' \quad (114)$$

Is nu weer $f(m') = am'^b$, dan gaat dus de vergelijking 114, na eenige omvorming over in de vergelijking:

$$\frac{Q_e - 2G(m_0 - h)}{m_0^2} = k_0 + \frac{2a}{(b+2)(b+1)} m_0'^b \quad (115)$$

Is het linkerlid nu bekend, dan is, door dit in een diagram op de ordinaat uit te zetten tegen m_0' , $m_0'^2$ enz. op de abscis, weer de factor b na te gaan.

De factor G kan op relatief eenvoudige wijze worden bepaald. Daar dit ook in sub γ geval II besproken zal worden, mag daarnaar worden verwezen.

Is de $f(m')$ bekend, dan kan men probeeren of ook onder het 0-vlak de doorlaatfactor op dezelfde wijze verandert. Daar hier m' verandert van 0 tot $-h$, moet dus k_m voor $m'_0 = -h$ een positieve waarde hebben, terwijl bovendien, zooals duidelijk zal zijn,

$$G = \int_{m'_0 = -h}^{m'_0 = 0} (k_0 + f(m'_0)) dm'_0 \quad (116)$$

β. De ligging van de ondoorlatende laag is onbekend

Is de ligging van de ondoorlatende laag onbekend, dan verdient het nog meer dan de in sub α behandelde gevallen aanbeveling de laag onder het 0-vlak als een geheel op te vatten met het totale geleidingsvermogen G . In dit geval doet het er verder ook niets toe of de ondoorlatende laag op geringe dan wel op groote diepte onder de drains ligt, daar automatisch met de berekening van G de correctie voor het feit, dat de drains eventueel niet op de ondoorlatende laag ligt, in rekening wordt gebracht. Uit de $Q : m_0$ -lijnen kan verder behalve het feit, of de grond onder het 0-vlak al dan niet doorlatend is, meestal ook worden nagegaan, hoe de doorlatendheid boven het 0-vlak verandert.

Verder kan men de verandering van de doorlatendheid aangeven door de algemeene vergelijking (65). Zooals onder sub α echter reeds is medegedeeld, zullen dan vaak zooveel termen moeten worden beschouwd, dat practisch deze oplossing niet meer is toe te passen. Komt geen water boven het 0-vlak voor, dan verdient het aanbeveling de methode toe te passen, die in sub α nader is uiteengezet. Overigens zal in sub γ nog een algemeene methode worden aangegeven, waarnaar verder mag worden verwezen. Hieronder zal alleen de methode worden besproken om het totale geleidingsvermogen G voor water van de laag onder het 0-vlak te bepalen, indien de grond onder het 0-vlak namelijk doorlatend is, daar anders $G = 0$.

Reeds vroeger is afgeleid, dat $\frac{dQ}{dm_0}$ bij $Q = 0$ en $m_0 =$ minimaal gelijk is aan $\frac{2G}{e}$. Nu geeft $\frac{dQ}{dm_0}$ de tangens van den hoek aan, die de raaklijn aan de

$Q : m_0$ -lijn bij het punt, waar $m_0 =$ minimaal is, maakt met de m_0 -as (35). Uit de tangens van den genoemden hoek zou dus G te berekenen zijn. Om de tangens van dezen hoek te bepalen, moet men echter de raaklijn bij het punt, waar $Q = 0$ en $m_0 =$ minimaal, aan de $Q : m_0$ -lijn trekken. Het trekken van deze raaklijn komt echter hierop neer, dat men het eerste stukje van de $Q : m_0$ -lijn als recht aanneemt, terwijl de raaklijn daarvan het verlengde is. In verband met hetgeen reeds over een volkomen rechte $Q : m_0$ -lijn is opgemerkt, zal het duidelijk zijn, dat dit beteekent, dat men over dit stukje den doorlaatfactor van den grond nul heeft gemaakt, hetgeen in verband met het feit, dat de ondergrond doorlatend is, niet juist kan zijn. Het zal duidelijk zijn, dat we dit kunnen ondervangen, door den grond over een klein traject, dat natuurlijk zoo klein mogelijk gekozen moet worden, homogeen te veronderstellen. Is b.v. de $Q : m_0$ -lijn recht van $m_0 = 0$ tot $m_0 = 3$ cm en buigt zij daarna af, zoodat bij b.v. $m_0 = 8$ cm de $Q : m_0$ -lijn duidelijk van een rechte lijn is afgeweken, dan zal door toepassing van de vergelijking voor homogene

gronden met een doorlatenden ondergrond, waarvan het totale geleidingsvermogen G bedraagt, en waarvan de doorlatendheid boven het 0-vlak k bedraagt, de groote van G kunnen worden berekend. Valt het 0-vlak met het vlak van de drains samen en verandert n bovendien met Q , dan luidt deze vergelijking:

$$Q = \frac{2 G (m_o - n) + k (m_o^2 - n^2)}{e} \quad (117)$$

terwijl indien geen water boven het vlak van de drains voorkomt ($n = 0$):

$$Q = \frac{2 G m_o + k m_o^2}{e} \quad (118)$$

Valt het 0-vlak niet samen met het vlak van de drains, dan luidt de vergelijking, wanneer n' met Q verandert:

$$Q = \frac{2 G (m'_o - n') + k (m_o'^2 - n'^2)}{e} \quad (119)$$

en wanneer geen water boven het 0-vlak voorkomt ($n' = 0$)

$$Q = \frac{2 G m'_o + k m_o'^2}{e} \quad (120)$$

Valt nu b.v. het 0-vlak samen met het vlak van de drains (d.w.z. $n = 0$ bij $Q = 0$) dan zijn dus bij twee m_o -waarden, nl. waarbij dus de $Q : m_o$ -lijn van de rechte lijn begint af te wijken en waarbij deze afwijking duidelijk vaststaat (deze laatste m_o -waarde moet zoo klein mogelijk zijn), de bijbehorende Q -waarden en eventueel ook n -waarden uit de $Q : m_o$ - resp. $Q : n$ -lijnen af te lezen en in een van de vergelijkingen 117 of 118 in te vullen, waardoor dus G en k te berekenen zijn. De fout, die men nu nog maakt, is deze, dat men de laag grond boven het 0-vlak tot de hoogste m_o - (resp. m'_o -) waarde als homogeen heeft aangenomen. Deze fout is echter gering, daar het 0-vlak zoo diep onder het maaiveld ligt, dat snelle veranderingen in de doorlatendheid daar niet te verwachten zijn en zeker niet in dit geval, waarbij de beschouwde laag slechts dun is. Verder kan men de berekende k -waarde, zoo men wil, invoeren als k_o in de functie, die de continue verandering van de doorlatendheid boven het 0-vlak aangeeft; resp., wanneer het 0-vlak met het vlak van de drains samenvalt, in de functie, die de continue verandering van de doorlatendheid boven het vlak van de drains aangeeft.

γ rracusche toepassing op enkele experimenteel bepaald $Q : m_0$ -lijnen, zooals deze op enkele vakken van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder zijn bepaald

Ten slotte zal aan de hand van enkele experimenteel bepaalde $Q : m_0$ -lijnen de *continue* verandering van de doorlatendheid van den grond worden berekend. Als voorbeeld zullen 3 $Q : m_0$ -lijnen beschouwd worden, zooals deze voor de perioden 1930—1931 en 1933—1934 op het 10 m begreppelde vak Gr_2 en voor de periode 1933—1934 op het op 10 m gedraineerde vak Dr_2 van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder zijn bepaald. Het zal na het voorafgaande verder duidelijk zijn, dat men voor een exacte berekening den doorlaatfactor van den grond vanaf het 0-vlak als een continue veranderlijke grootheid moet beschouwen, waarbij natuurlijk wel kan blijken, dat deze doorlaatfactor voor bepaalde lagen constant is. Bij deze berekeningen is het niet geoorloofd den gemiddelden doorlaatfactor (effectieven doorlaatfactor) voor een bepaalde laag te berekenen en om met behulp daarvan de continue verandering van den doorlaatfactor in de hooger gelegen lagen uit te rekenen, daar daardoor immers de k_0 -waarde en zelfs de wijze van verandering van de doorlaatfactor in de hooger gelegen lagen beïnvloed kan worden. Een en ander is het gevolg van het feit, dat de genoemde gemiddelde doorlaatfactor slechts een effectieve doorlaatfactor is, die alleen geldt voor m_0 - en (eventueel) n -waarde (resp. m'_0 - en n' -waarden), die deze laag begrenzen. Bij andere m_0 - en n -waarden kan nl. deze effectieve doorlaatfactor ook van de beschouwde laag veranderen, waarvoor echter naar het hoofdstuk V mag worden verwezen.

a. Geval I. Berekening van de doorlatendheid van den grond uit de $Q : m_0$ -lijn van de 10 m strooken van vak Gr_2 van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder in de periode 1930—1931

Uit de $Q : m_0$ -lijn en de daaruit geconstrueerde $Q : m_0^2$ -lijn blijkt, dat de grond onder den greppelbodem (hier gelijk 0-vlak; daar geen water in de greppel staat) als ondoorlatend moet worden beschouwd, terwijl althans eerst de doorlatendheid van den grond boven den greppelbodem met de hoogte boven den greppelbodem moet toenemen. Verder blijkt uit de $Q : m_0$ -lijn, dat de grond van $m_0 = 0$ tot $m_0 = 0,25$ meter wel zeer slecht doorlatend moet zijn, daar voor deze m_0 -waarden het debiet zeer klein tot practisch nul is (36).

In dit geval is de ligging van de ondoorlatende laag bekend, terwijl ook geen water in de greppels voorkomt. We kunnen dus gebruik maken van de vergelijking 108 om de functie van de verandering in de doorlatendheid te leeren kennen, waarvoor we dus de waarde van $\frac{Qe}{m_0^2}$ voor verschillende Q - en bij-

behoorende m_o -waarden moeten berekenen. Dit is in de onderstaande tabel geschied; de Q - en m_o -waarden zijn aan de $Q : m_o$ -lijn ontleend. Opgemerkt moet worden, dat Q in het $Q : m_o$ -diagram in liters per uur per 120 m greppel is aangegeven. Om Q in m^3 per 24 uur per strekkenden meter en van één zijde komend uit te drukken moet deze waarde met 0.0001 worden vermenigvuldigd.

Q .	m_o .	m_o^2 .	$\frac{Qe}{m_o^2}$.
0,0001	0,35	0,1225	0,0041
0,00025	0,40	0,16	0,0078
0,0005	0,45	0,2025	0,0123
0,0010	0,52	0,2704	0,0185
0,0016	0,60	0,36	0,0222

Hieruit blijkt — zie diagram 8 —, dat voor m_o -waarden groter dan 0.35 m de factor $\frac{Qe}{m_o^2}$ met m_o toeneemt. Voor m_o -waarden kleiner dan 0,35 meter is de

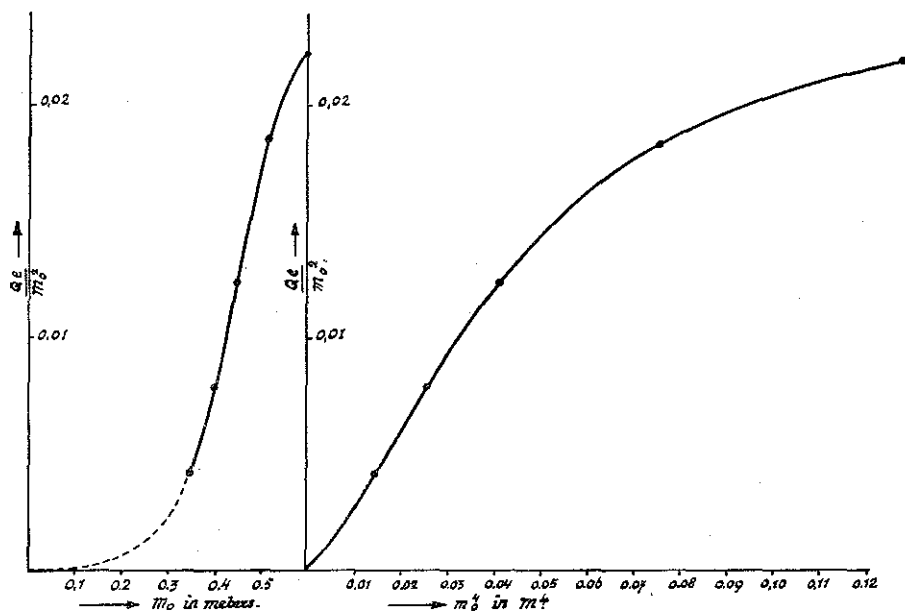


Diagram 8

samenhang tusschen m_0 en $\frac{Qe}{m_0^2}$ niet na te gaan, daar het debiet te klein is om uit de $Q : m_0$ -lijn te worden afgelezen. Vermoedelijk zal de samenhang in deze laag ongeveer door de gestippelde lijn worden aangegeven. Hieruit volgt dus, dat de doorlaatfactor eerst zeer snel met m_0 toeneemt, terwijl $k_0 = 0$ kan worden genomen.

Uit het bovenstaande volgt in elk geval, dat de functie van k_m en m_0 tamelijk ingewikkeld en niet in een eenvoudige machtsfunctie van m_0 voor alle m_0 -waarden tot uiting is te brengen. Zet men op de abscis m_0^4 in plaats van m_0 af, dan blijkt, dat tot $m_0 = 0.35$ de lijn $\frac{Qe}{m_0^2} : m_0^4$ waarschijnlijk praktisch recht zal zijn, terwijl bij hogere m_0 -waarden een afbuiging naar de abscis optreedt. Tot $m_0 = 0.35$ is dus blijkbaar b in de vergelijking 108 gelijk aan 4, terwijl $k_0 = 0$. De vergelijking wordt dus:

$$\frac{Qe}{m_0^2} = \frac{2a}{30} m_0^4 = \frac{1}{15} am_0^4 \quad (121)$$

Daar de gemiddelde waarde van $\frac{Qe}{m_0^2} : m_0^4 = \frac{0.0041}{0.0151} = 0.272$ is, is dus de constante a gelijk aan 4.08, zoodat tot $m_0 = 0.35$, $k_m = am_0^4 = 4.08 m_0^4$. Bij $m_0 = 0.35$ meter is dus $k_m = 0.061$ m. p. 24 uur.

Gezien de geleidelijke veranderingen zouden we deze laatste k_m -waarde als de k'_0 -waarde kunnen beschouwen voor de laag van $m_0 = 0.35$ tot 0.60 m; in vele gevallen wordt de oplossing eenvoudiger door hier een sprongsgewijze verandering van de doorlatendheid toe te laten. Dit beteekent dus, dat in het laatste geval in werkelijkheid een zeer snelle verandering van den doorlaatfactor in een dunne laag optreedt, die men dus eenvoudigheidshalve in een oneindig dunne laag — dus sprongsgewijze — laat optreden.

Om nu te kunnen nagaan, hoe de doorlatendheid in de hooger gelegen laag verandert, zullen we aannemen, dat in deze laag de doorlaatfactor k_m verandert volgens de functie $k_m = k'_0 + f(m - h)$, waarin h dus gelijk is aan 0.35 meter.

In dit geval hebben we dus te maken met een profiel, waarin 2 lagen voorhanden zijn en waarin in beide lagen de doorlaatfactor continue verandert. Onder verwijzing naar de afleiding van de vergelijking voor 2 op zich zelf homogene lagen in het profiel, is de afleiding voor deze vergelijking als volgt:

Voor $m = 0$ tot $m = h$ en van $x = 0$ tot $x = p$ (dit is het punt, waar het phreatisch oppervlak het scheidingsvlak van de beide lagen snijdt; hier is voor $m = h$, $x = p$) is, wanneer voor dit gedeelte $k_m = k_0 + f(m)$ wordt gesteld:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = \frac{dm}{dx} \int_{m=0}^{m=m} (k_0 + f(m)) dm \quad (122)$$

Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = p$ en van $m = 0$ tot $m = h$ ontstaat:

$$Q \left(p - \frac{p^2}{2e} \right) = \int_{m=0}^{m=h} \int_{m=0}^{m=m} (k_0 + f(m)) dm dm \quad (123)$$

Voor m grooter dan h en x grooter dan p geldt:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = \frac{dm}{dx} \int_{m=0}^{m=h} (k_0 + f(m)) dm + \frac{dm}{dx} \int_{m=h}^{m=m} (k'_0 + f(m-h)) dm \quad (124)$$

Geïntegreerd van $x = p$ tot $x = x$ en van $m = h$ tot $m = m$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) - Q \left(p - \frac{p^2}{2e} \right) = \int_{m=h}^{m=m} \int_{m=0}^{m=h} (k_0 + f(m)) dmdm + \\ + \int_{m=h}^{m=m} \int_{m=h}^{m=m} (k'_0 + f(m-h)) dmdm \quad (125)$$

Wordt de vergelijking 123 in de vergelijking 125 ingevuld, dan ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \int_{m=h}^{m=m} \int_{m=0}^{m=h} (k_0 + f(m)) dmdm + \int_{m=0}^{m=h} \int_{m=0}^{m=m} (k_0 + f(m)) dmdm + \\ + \int_{m=h}^{m=m} \int_{m=h}^{m=m} (k'_0 + f(m-h)) dmdm \quad (126)$$

Nu is voor $x = e$ $m = m_0$, zoodat de vergelijking 126 overgaat in:

$$Q = \frac{2}{e} \int_{m=h}^{m=m_0} \int_{m=0}^{m=h} (k_0 + f(m)) dmdm + \frac{2}{e} \int_{m=0}^{m=h} \int_{m=0}^{m=m} (k_0 + f(m)) dmdm + \\ + \frac{2}{e} \int_{m=h}^{m=m_0} \int_{m=h}^{m=m} (k'_0 + f(m-h)) dmdm \quad (127)$$

Stellen we nu $m - h = m''$, d.w.z. stelt m'' de hoogte boven het scheidingsvlak van de 2 lagen voor, dan is dus, daar $dm = dm''$;

$$Q = \frac{2}{e} \int_{m=h}^{m=m_0} \int_{m=0}^{m=h} (k_0 + f(m)) dmdm + \frac{2}{e} \int_{m=0}^{m=h} \int_{m=0}^{m=m} (k_0 + f(m)) dmdm + \\ + \frac{2}{e} \int_{m''=0}^{m''=m_0} \int_{m''=0}^{m''=m''} (k'_0 + f(m'')) dm'' dm'' \quad (128)$$

Verder is

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q - \frac{2}{e} \int_{m=h}^{m=m_0} \int_{m=0}^{m=h} (k_0 + f(m)) dm dm - \frac{2}{e} \int_{m=0}^{m=h} \int_{m=0}^{m=m} (k_0 + f(m)) dm dm = \\ &= \frac{2}{e} \int_{m''=0}^{m''=m''} \int_{m''=0}^{m''=m''} (k'_0 + f(m'')) dm'' dm'' \end{aligned} \quad (129)$$

Hieruit volgt dus, dat in de vergelijking 128 de eerste twee leden achter het gelijktteken de strooming door het water in de onderste laag en het derde lid de strooming in de bovenste laag voorstelt. Het zal dus duidelijk zijn, dat dit 3de lid ($= \Delta Q$; zie de vergelijking 129) is uit te rekenen, zoodra de strooming door de eerste laag bekend is. Is dit het geval, dan kunnen we de functie $k_{m''} = f(m'')$ weer bepalen door $k_{m''} = k'_0 + a' m''^{b'}$ te stellen. Het zal duidelijk zijn, dat na uitvoering van de integratie en na eenige hervorming we een vergelijking zullen krijgen, die analoog vergelijking 108 is, nl.:

$$\frac{\Delta Q e}{m_0'^2} = k'_0 + \frac{2a'}{(b'+2)(b'+1)} m_0'^{b'} \quad (130)$$

We kunnen dus nu weer in een diagram op de ordinaat $\frac{\Delta Q e}{m_0'^2}$ en op de abscis m''_0 enz. afzetten en de functie $k_{m''} = f(m'')$ op dezelfde wijze onderzoeken als in de eerste laag van dit voorbeeld (zie ook sub α , b, 3 II van deze paragraaf) is aangegeven.

Nu hebben we reeds gezien, dat k_0 in dit geval nul is en $f(m) = am_0^4 = 4.08 m_0^4$, terwijl $h = 0.35$ en $e = 5$ meter. De vergelijking 129 gaat daardoor over in de vergelijking:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q - \frac{2ah^5(m_0 - h)}{5e} - \frac{2ah^6}{30e} = Q - \frac{2}{25} \cdot 4.08 \cdot 0.35^5 (m_0 - 0.35) - \\ &- \frac{4.08}{75} 0.35^6 = \left(k'_0 + \frac{2a'}{(b'+2)(b'+1)} m_0'^{b'} \right) \frac{m_0'^2}{e} \end{aligned} \quad (131)$$

Uit de vergelijking 131 is dus de ΔQ waarde bij verschillende m_0 -waarden grooter dan 0.35 (m_0' -waarden grooter dan 0) te berekenen. Dit is in de onderstaande tabel geschied.

Q	m_0	m_0'	ΔQ	$\frac{\Delta Q e}{m_0'^2}$
0,00025	0,40	0,05	0,00006	0,12
0,0005	0,45	0,10	0,00023	0,12
0,0010	0,52	0,17	0,00061	0,11
0,0016	0,60	0,25	0,00107	0,09

Uit de tabel blijkt, dat de factor $\frac{\Delta Q_e}{m_o'^2}$ vrijwel constant is, d.w.z. onafhankelijk van m_o , zoodat blijkbaar de grond hier ongeveer homogeen is. Uit de vergelijking 131 volgt, dat dan

$$\Delta Q = \frac{k_o' m_o'^2}{e} \text{ of } \frac{\Delta Q_e}{m_o'^2} = k_o' \quad (132)$$

Daar $\frac{\Delta Q_e}{m_o'^2}$ gemiddeld 0.11 is, is dus $k_o' = 0.11$ m p. 24 uur, d.w.z., dat de doorlaatfactor van $m_o = 0.35$ tot 0.60 gelijk is aan bovengenoemd bedrag. Geheel juist is dit niet, daar de factor $\frac{\Delta Q_e}{m_o'^2}$ volgens bovenstaande tabel nog iets afneemt, hetgeen wil zeggen, dat de doorlaatfactor bij stijgende m_o -waarden nog iets afneemt. Dit laatste zullen we hier echter verwaarlozen.

Het resultaat der berekeningen is dus, dat van $m_o = 0$ tot 0.35 (60 tot 25 cm onder het maaiveld) de doorlaatfactor snel toeneemt om voor m_o -waarden groter dan $0.35 \pm$ constant te worden, hetgeen dus wil zeggen, dat de laag van 0—25 cm onder het maaiveld vrijwel homogeen is.

b. Geval II. Berekening van de doorlatendheid van den grond uit de $Q : m_o$ -lijn van de 10 m strooken van het vak Gr₂ van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringer-meerpolder voor de periode 1933—1934

Uit een beschouwing van de $Q : m_o$ - en $Q : m_o^2$ -lijnen (er bevindt zich geen water in de greppels) kan worden afgeleid, dat de ondergrond doorlatend moet zijn ($\frac{dQ}{dm}$ bij $Q = 0$ is niet gelijk nul), terwijl de doorlatendheid van den grond boven den bodem van de greppels althans eerst moet toenemen ($Q : m_o^2$ -lijn buigt bij grotere m_o -waarden naar de Q -as om).

Voor de berekening van de doorlatendheid van den grond kunnen we nu gebruik maken van de vergelijking 115, ($h = 0$, zoodat $m_o' = m_o$), waarbij we het totale geleidingsvermogen voor water van den grond onder den greppel-bodem gelijk G stellen. Deze vergelijking luidt dus:

$$\frac{\Delta Q}{m_o^2} *) = \frac{Q_e - 2Gm_o}{m_o^2} = k_o + \frac{2a}{(b+2)(b+1)} m_o^b \quad (133)$$

waarin dus m_o de hoogte van den grondwaterspiegel midden tusschen de greppels en boven den bodem van de greppels voorstelt.

1) Men lette erop, dat de beteekenis van ΔQ iets anders is als in de vergelijking 130.

Uit de vergelijking 133 volgt, dat we ΔQ alleen kunnen berekenen, indien G bekend is. Deze laatste waarde berekenen we met behulp van de vergelijking 118, nl.

$$G = \frac{2Gm_o + km_o^2}{e} \quad (134)$$

Uit de $Q : m_o$ -lijn blijkt, dat tot $m_o = 0,07$ meter de $Q : m_o$ -lijn recht blijft en daarna overgaat in een gekromde lijn. Voor een debiet van 5 L of 0.0005 m^3 per 24 uur is $m_o = 0.0714 \left(0.0005 \frac{0.50}{0.0035}; \frac{dQ}{dm_o} \text{ bij } Q=0 \text{ is nl. } \frac{0.50}{0.0035} \right)$ en voor $Q = 10 \text{ L}$ of 0.0010 m^3 p. 24 uur, is $m_o = 0.12$ meter. Vullen we deze waarden in de vergelijking 134 in dan krijgen we 2 vergelijkingen, waaruit G en k kunnen worden berekend; nl.:

$$0.0010 = \frac{2}{5} G \cdot 0.12 + \frac{1}{5} k (0.12)^2 \quad (135)$$

$$0.0005 = \frac{2}{5} G \cdot 0.0714 + \frac{1}{5} k (0.0714)^2 \quad (136)$$

Hieruit volgt dat $G = 0.0126$ en $k = 0.137 \text{ m. p. 24 uur}$. Deze k -waarde is dus tevens de k_o -waarde van den grond boven den bodem van de greppel. Verder kan hierbij nog worden opgemerkt, dat we de grootste m_o -waarde zoodanig gekozen hebben, dat deze niet te ver van de m_o -waarde afligt, waar de $Q : m_o$ -lijn van de raaklijn aan deze lijn bij $m_o = 0$ begint af te wijken.

We zijn dus nu in staat ΔQ van de vergelijking 133 te berekenen, hetgeen in de onderstaande tabel is geschied:

Q	m_o	ΔQ	$\frac{\Delta Q}{m_o^2}$
0,00035	0,05	0,00049	0,20
0,00070	0,10	0,00098	0,10
0,0015	0,15	0,00372	0,16
0,0023	0,20	0,00646	0,16
0,00275	0,22	0,01098	0,21
0,0042	0,25	0,0147	0,24
0,0094	0,30	0,0394	0,44
0,0152	0,35	0,0672	0,55
0,0221	0,40	0,100	0,63
0,0298	0,45	0,1377	0,68
0,0383	0,50	0,1789	0,72

Uit het bovenstaande blijkt, dat tot $m_o = 0,20$ meter de waarde van $\frac{\Delta Q}{m_o^2}$ vrijwel constant is, daar de afwijking bij $m_o = 0,05$ en $0,10$ meter

slechts klein is. Dit wil zeggen, dat deze laag homogeen is. Van de vergelijking 133 blijft dus over:

$$\frac{\Delta Q}{m_o^2} = k \text{ of dus daar } \frac{\Delta Q}{m_o^2} = 0,16 \text{ is dus } k = 0,16 \text{ m. p. 24 uur.}$$

Dit is in goede overeenstemming met wat uit de vergelijkingen 135 en 136 voor k is berekend nl. 0,14 m. p. 24 uur.

De eenvoudigste oplossing om voor grootere m_o -waarden het verband van den doorlaatfactor met m_o na te gaan, bestaat nu hier in, dat het profiel boven den bodem van de greppels in 2 lagen ingedeeld wordt. De eerste laag (van $m_o = 0$ tot $m_o = 0,2$) heeft een doorlaatfactor k , terwijl in de tweede laag we den doorlaatfactor laten veranderen volgens de functie $k_m'' = k_o + f(m'' - h)$, waarin k_o weer den doorlaatfactor voorstelt van een oneindig dun laagje grond vlak boven den bovenkant van de eerste laag. Snijdt het phreatisch oppervlak het scheidingsvlak tusschen beide lagen bij een punt, waar $m = h$ en $x = p$ dan geldt, dat van $x = 0$ tot $x = p$ en $m = 0$ tot $m = h$:

$$dQ = Q \frac{(e-x)}{e} = G \frac{dm}{dx} + km \frac{dm}{dx} \quad (137)$$

Geïntegreerd van $m = 0$ tot $m = h$ en van $x = 0$ tot $x = p$ ontstaat:

$$Q \left(p - \frac{p^2}{2e} \right) = Gh + \frac{1}{2} kh^2 \quad (138)$$

Voor x grooter dan p en m grooter dan h geldt:

$$dQ = Q \frac{(e-x)}{e} = G \frac{dm}{dx} + kh \frac{dm}{dx} + \frac{dm}{dx} \int_{m=h}^{m=m} (k_o + f(m-h)) dm \quad (139)$$

Geïntegreerd van $x = p$ tot $x = e$ en van $m = h$ tot $m = m_o$ ontstaat:

$$\frac{Qe}{2} - Q \left(p - \frac{p^2}{2e} \right) = Gm_o - Gh + hkm_o - kh^2 + \int_{m=h}^{m=m_o} \int_{m=h}^{m=m} (k_o + f(m-h)) dm dm \quad (140)$$

Na invulling van de vergelijking 138 in de vergelijking 140 ontstaat, wanneer $m'' = m - h$:

$$\frac{Qe}{2} = Gm_o + khm_o - \frac{1}{2} kh^2 + \int_{m''=0}^{m''=m''} \int_{m''=0}^{m''=m''} (k_o + f(m'')) dm'' dm'' \quad (141)$$

$$\text{of } \Delta Q' = Qe - 2Gm_o - 2khm_o + kh^2 = k_o m_o^2 + \frac{2a'}{(b'+2)(b'+1)} m_o^{b'+2} \quad (142)$$

$$\text{of } \frac{\Delta Q'}{m_o'^2} = \frac{Qe - 2Gm_o - 2khm_o + kh^2}{m_o'^2} = k_o + \frac{2a'}{(b' + 2)(b' + 1)} m_o'^{b'} \quad (143)$$

waarin voor $f(m')$ is ingevuld: $a'm_o'^{b'}$.

Nu zijn G , k en h bekend, nl. resp. 0,0126; 0,16 en 0,2, zoodat we $\Delta Q'$ en $\frac{\Delta Q'}{m_o'^2}$ voor verschillende m_o - of dus m_o' -waarden kunnen berekenen ($m_o' = m_o - 0,2$). Dit is in de onderstaande tabel geschied.

Q	m_o	m_o'	$\Delta Q'$	$\frac{\Delta Q'}{m_o'^2}$
0,0042	0,25	0,05	0,0051	2,0
0,0094	0,30	0,10	0,0266	2,7
0,0152	0,35	0,15	0,0512	2,3
0,0221	0,40	0,20	0,0812	2,3
0,0298	0,45	0,25	0,1153	1,8
0,0383	0,50	0,30	0,1533	1,7
			Gemiddeld	2,1

Uit de bovenstaande tabel volgt, dat ook de laag van $m_o = 0,25$ tot $m_o = 0,50$ ongeveer homogeen is. Geheel juist is dit niet: feitelijk neemt in de laag van $m_o = 0,4$ tot $0,5$ de doorlatendheid weer af. Het verschil is echter klein en zal daarom verder buiten beschouwing blijven; temeer daar de $Q : m_o$ -lijn door haar stijl verloop hier (zie diagram 6) moeilijk is vast te stellen. Van de vergelijking 143 blijft dus over:

$$\frac{\Delta Q'}{m_o'^2} = k \text{ of daar de eerste factor gemiddeld } 2,1 \text{ is, is dus } k = 2,1 \text{ m per 24 uur.}$$

Als resultaat der berekeningen blijkt dus, dat $G = 0,0126$; de doorlaatfactor van $m_o = 0$ tot $0,2$ (40—60 cm onder het maaiveld) bedraagt 0,16 m per 24 uur en van $m_o = 0,2$ tot $0,5$ (10—40 cm onder het maaiveld) 2,1 m per 24 uur. Hierbij kan worden opgemerkt, dat de doorlaatfactor van de laag van 0—10 cm onder het maaiveld niet te bepalen is, daar de $Q : m_o$ -lijn uit de debiet- en grondwaterstandwaarnemingen niet verder is door te trekken. De sprongsgewijze verandering van de doorlatendheid zal vermoedelijk hierdoor verklaard kunnen worden, dat door de indroging in den zomer van 1933 de doorlaatfactor van de laag 0—40 cm onder het maaiveld is verhoogd, doordat deze indroging (en scheurvorming) in dat jaar ongeveer tot deze diepte is doorgedrongen. Overigens moet men zich de sprongsgewijze verandering van k zoo voorstellen dat in een dunne laag van enkele cm's boven $m_o = 0,2$ doorlaatfactor snel van 0,16 tot 2,1 m per 24 uur oploopt.

c. Geval III. De berekening van de doorlatendheid van den grond uit de $Q : m_0$ -lijn van de 10 m gedraineerde strooken van het vak Dr₂ van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder voor de periode 1933—1934

In het gegeven geval tereft naast een $Q : m_0$ -lijn ook een $Q : n$ -lijn op. We zullen dus in de eerste plaats dienen na te gaan of $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$ wel analoog zijn, daar immers alleen dan uit den vorm van de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijn besluiten over de doorlatendheid van den grond zijn te trekken. In de onderstaande tabel, waarin genoemde functies zijn nagegaan, blijkt, dat de factor $\frac{m_0}{n}$ in elk geval tot $m_0 = 0,45$ vrijwel constant is en daarna pas systematisch begint te veranderen. Hieruit volgt dus, dat tot $m_0 = 0,45$ meter uit den vorm van de $Q : m_0$ en $Q : m_0^2$ -lijnen conclusies over de doorlatendheid getrokken mogen worden. Daar $\frac{dQ}{dm}$ bij $Q = 0$ gelijk 0 is, is de grond onder de drains als ondoorlatend op te vatten. Verder blijkt uit het rechte gedeelte van de $Q : m_0^2$ -lijn, dat de doorlatendheid van den grond tot ± 40 cm boven het vlak van de drains ongeveer constant moet zijn, terwijl bij een grotere hoogte boven het vlak van de drains de doorlatendheid — althans aanvanke-lijk — toeneemt.

m_0	m_0^2	Q	n	$\frac{m_0}{n}$	n^2	$m_0^2 - n^2$	$Q : (m_0^2 - n^2)$
0,1	0,01	0,00015	0,06	1,67	0,0036	0,0064	0,023
0,2	0,04	0,0006	0,14	1,43	0,0196	0,0204	0,029
0,3	0,09	0,00135	0,20	1,50	0,04	0,05	0,027
0,4	0,16	0,00235	0,24	1,60	0,0625	0,0975	0,024
0,45	0,2025	0,00325	0,30	1,50	0,0900	0,1125	0,029
0,5	0,25	0,0053	0,37	1,35	0,1369	0,1131	0,047
0,55	0,3025	0,0090	0,45	1,22	0,2025	0,1000	0,090
0,6	0,36	0,0168	0,51	1,18	0,2601	0,0999	0,168

De eenvoudige oplossing, die in geval I en II is toegepast, is hier onbruikbaar, daar water boven de drains voorkomt. We zullen echter hieronder voor dergelijke gevallen een methode aangeven, die slechts weinig ingewikkelder is.

Om nu de bovenstaande conclusies, zooals deze uit den vorm van de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen getrokken zijn, nader te onderzoeken, zijn uit de $Q : m_0$ en $Q : n$ -lijnen bij m_0 -waarden van resp. 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,45; 0,5; 0,55 en 0,6 meter de bijbehorende waarden van Q en met behulp hiervan de bijbehorende waarden van n (dus bij dezelfde Q -waarden de n -waarden uit de $Q : n$ -lijnen aflezen) ontnomen.

Daar de ondergrond ondoorlatend is, zou, wanneer de grond homogeen was, blijkens de formule $Q = \frac{k_1(m_0^2 - n^2)}{e}$, $\frac{Qe}{m_0^2 - n^2} = k_1 = \text{constant}$ moeten zijn. Blijft dus het quotient $Q : (m_0^2 - n^2)$ constant, dan beteekent dit dus, dat de grond homogeen is. Neemt dit quotient toe, zoo neemt de doorlatendheid toe.

Uit de bovenstaande tabel blijkt, dat tot $m_0 = 0,4$ meter dat quotient practisch constant is en daarna systematisch begint toe te nemen. We moeten namelijk bedenken, dat de Q -waarden bij $m_0 = 0,1$ en $0,2$ zoo klein zijn, dat 1 l verschil in het debiet de breuken gelijk maakt aan de breuken bij $m_0 = 0,3$ en $0,4$ meter, hetgeen binnen de foutengrenzen ligt. De doorlaatfactor van deze laag rekenen we hier het beste uit met behulp van de Q en n -waarden, die bij een $m_0 = 0,4$ meter behooren en wel is dit hier nog des te juister, daar we de hoeveelheid water willen berekenen, die door de hooger gelegen lagen naar de drains wordt afgevoerd. Daar voor deze homogene laag dus geldt, dat

$$Q = \frac{k_1(m_0^2 - n^2)}{e}, \text{ is dus } k_1 = 0,12 \text{ m. p. } 24 \text{ uur.}$$

Om nu na te gaan, hoe de doorlatendheid in de hooger gelegen lagen verandert, zullen we — evenals in het tweede voorbeeld — berekenen, welke hoeveelheid water door de laag boven $m_0 = 0,4$ meter boven het vlak van de drains wordt afgevoerd. Daartoe verdeelen we het watervoerend profiel in 2 lagen; nl. een homogene laag tot $m_0 = 0,4$ ($= h_1$) boven het vlak van de drains en in een daarboven gelegen heterogene laag, waarin we ook nu weer den doorlaatfactor laten veranderen volgens de functie

$$k_m = k_0 + f(m - h_1) = k_0 + f(m'').$$

Hierin stelt ook nu k_0 den doorlaatfactor van een oneindig dunne laag vlak boven de eerste laag voor, terwijl $m'' = m - h_1$. Op soortgelijke wijze als in het tweede voorbeeld — alleen is nu $G = 0$ — kan worden afgeleid, dat voor de waarnemingen, waarbij $n < h_1$ ($=$ waterspiegel boven de drains bevindt zich in de eerste laag):

$$Q = \frac{k_1(2h_1m_0 - h_1^2 - n^2)}{e} + \frac{k_0m_0^2}{e} + \frac{2}{e} \int_{m''=0}^{m''=m''_0} \int_{m''=0}^{m''=m''_0} f(m'') dm'' dm'' \quad (144)$$

of daar $k_0 = k_1$ is dus

$$\Delta Q = Q - \frac{k_1(2h_1m_0 - h_1^2 - n^2 + m_0^2)}{e} = \frac{2}{e} \int_{m''=0}^{m''=m''_0} \int_{m''=0}^{m''=m''_0} f(m'') dm'' dm'' \quad (145)$$

Voor de waarnemingen, waarbij $n > h_1$ of dus, indien $n'' = n - h_1$,

positief is, geldt voor alle waarden van x (de waterspiegel boven de drains bevindt zich in de bovenste laag):

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = k_1 h_1 \frac{dm}{dx} + \frac{dm}{dx} \int_{m=h_1}^{m=m} (k_0 + f(m-h_1)) dm \quad (146)$$

Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = e$ en van $m = n$ tot $m = m_0$, ontstaat, wanneer tevens in aanmerking wordt genomen, dat $m'' = m - h_1$ en $n'' = n - h_1$:

$$Q = \frac{2k_1 h_1 (m_0 - n)}{e} + \frac{k_0 (m''^2 - n''^2)}{e} + \frac{2}{e} \int_{m''=n''}^{m''=m_0''} \int_{m''=0}^{m''=m''} f(m'') dm'' dm'' \quad (147)$$

of daar $k_0 = k_1$ kan worden genomen:

$$\Delta Q = Q - \frac{2k_1 (h_1 (m_0 - n) + m''^2 - n''^2)}{e} = \frac{2}{e} \int_{m''=n''}^{m''=m_0''} \int_{m''=0}^{m''=m''} f(m'') dm'' dm'' \quad (148)$$

Uit het bovenstaande volgt dus, dat voor de waarnemingen, waarbij n kleiner is dan h_1 of dus n kleiner is dan 0.4 meter, we direct de functie tusschen ΔQ en m'' kunnen bepalen, daar n'' hierin niet voorkomt. Dit blijkt het geval te zijn voor $m_0 = 0.45$ en $m_0 = 0.50$ of dus $m'' = 0.05$ resp. $m'' = 0.10$ meter en resp. $n = 0.30$ en 0.37 of n'' in beide gevallen negatief, zoodat zij niet in de formule 145 voorkomen. Met behulp van deze formule 145 is dus nu te berekenen, dat resp. ΔQ gelijk is aan 0.00055 en 0.00259 m³ p. 24 uur, per strekkenden meter en van één zijde komend. Daar de bijbehorende m_0'' -waarden resp. 0.05 en 0.10 m zijn, zien we dus, dat ΔQ practisch evenredig is met $m_0''^2$. Dit wil dus zeggen, dat de doorlatendheid van de laag van $m'' = 0$ ($m = 0.4$) tot $m'' = 0.10$ ($m = 0.5$) constant is of m.a.w. deze laag homogeen is, daar na dubbele differentiatie m'' uit de functie $f(m'')$ verdwijnt. In de genoemde laag is dus de doorlatendheid gelijk aan $k_0 + k' = k_1 + k' = 0.12 + k'$, waarin k' een doorlaatfactor voorstelt, die dus berekent kan worden uit de vergelijking:

$$\Delta Q = \frac{k' (m_0'')^2}{e} \quad (149)$$

Ook nu berekenen we k' uit de ΔQ -waarde bij de hoogste m_0'' -waarde van deze laag. Voor $\Delta Q = 0.00259$ en $e = 5$ m is $m_0'' = 0.1$; hieruit volgt, dat $k' = 1.30$, zoodat dus de doorlaatfactor van de laag van $m'' = 0$ ($m = 0.4$) tot $m'' = 0.1$ ($m = 0.5$) bedraagt: $1.30 = 0.12 = 1.42$ m p. 24 uur¹⁾.

Uit het bovenstaande volgt dus, dat we in het profiel 2 lagen — nl. met m_0 -waarden van 0 — 0.4 en van 0.4 — 0.5 voorkomen, waarin de doorlatendheid

¹⁾ Bij toepassing van vergelijking 144 vindt men direct voor den doorlaatfactor 1.42 m. p. 24 uur, door hierin k_0 te berekenen.

constant is en resp. 0.12 en 1.42 m p. 24 uur bedraagt. Noemen we nu h_2 de afstand van den bovenkant van de tweede laag tot het vlak van de drains (dus $h_2 = 0.5$ m) dan kunnen we, op soortgelijke wijze als hierboven voor de laag van $m = 0.4$ tot $m = 0.5$ m is geschied, berekenen hoeveel water door de laag van $m = 0.5$ tot 0.6 m naar de drains wordt afgevoerd. Deze derde laag nemen we ook nu als heterogeen aan en laten ook nu den doorlaatfactor variëren volgens de functie: $k_m = k_0 + f(m - h_2)$. Hierin stelt k_0 weer den doorlaatfactor voor van een oneindig dunne laag vlak boven den bovenkant van de tweede laag, terwijl $m''' = m - h_2$. Ook nu kan k_0 voorloopig gelijk k_2 worden genomen.

Voor de waarnemingen, waarbij $n < h_2$ en $> h_1$ of dus, indien $n''' = n - h_2$ wordt gesteld, n''' negatief of gelijk nul is, geldt:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = k_1 h_1 \frac{dm}{dx} + k_2 (h_2 - h_1) \frac{dm}{dx} + \frac{dm}{dx} \int_{m=h_1}^{m=m} (k_0 + f(m - h_2)) dm \quad (150)$$

Bij de integratie moet erom gedacht worden, dat bovenstaande vergelijking niet voor alle x en m -waarden geldig is, nl. niet voor de waarden van $x = 0$ tot de waarde van x en de overeenkomende m -waarde, waar het phreatisch oppervlak den bovenkant van de tweede laag snijdt, indien tenminste voor de te beschouwen m_0 -waarden de overeenkomstige n -waarden kleiner zijn dan h_2 . Daar we voor de opsporing van de onbekende functie van $k_{m''}$ alleen die waarden zullen gebruiken, waarbij $n_1 > h_1$ d.w.z. groter zijn dan 0.4 m, geldt voor de eerst genoemde waarden van x en m dus:

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = k_1 h_1 \frac{dm}{dx} + k_2 (m - h_1) \frac{dm}{dx} \quad (151)$$

Beide vergelijkingen worden dus afzonderlijk geïntegreerd, waarbij de uitkomst van de vergelijking 151 in de vergelijking 150 wordt verwerkt. Daar dit reeds vaker is besproken geven we alleen het eindresultaat nl.:

$$Q = \frac{2}{e} \left(k_1 h_1 (m_0 - n) + \frac{1}{2} k_2 (h_2^2 - n^2) - k_2 h_1 (h_2 - n) + k_2 (h_2 - h_1) (m_0 - h_2) + \frac{1}{2} k_2 m_0'' \right) + \frac{2}{e} \int_{m'''=0}^{m'''=m_0'''} \int_{m'''=0}^{m'''=m'''} f(m''') dm''' dm''' \quad (152)$$

of dus:

$$Q = Q - \frac{2}{e} \left(k_1 h_1 (m_0 - n) + \frac{1}{2} k_2 (h_2^2 - n^2) - k_2 h_1 (h_2 - n) + k_2 (h_2 - h_1) m_0 - h_2 \right) + \frac{1}{2} k_2 m_0'' \quad (153)$$

$$= \frac{2}{e} \int_{m'''=0}^{m'''=m_0'''} \int_{m'''=0}^{m'''=m'''} f(m''') dm''' dm'''$$

In die gevallen, waarbij n gelijk is dan h_2 geldt de vergelijking 150 voor alle x - en m -waarden. Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = e$ en van $m = n$ tot $m = m_0$ ontstaat, wanneer bedacht wordt, dat $m_0''' = m_0 - h_2$ en $n''' = n - h_2$ en indien $n''' = 0$:

$$Q = \frac{2}{e} \left(k_1 h_1 (m_0 - n) + k_2 (h_2 - h_1) (m_0 - n) + \frac{1}{2} k_2 m_0'''^2 \right) + \\ + \frac{2}{e} \int_{m'''=0}^{m'''=m_0'''} \int_{m'''=0}^{m'''=m'''} f(m''') dm''' dm''' \quad (154)$$

of dus:

$$\Delta Q = Q - \frac{2}{e} \left(k_1 h_1 (m_0 - n) + k_2 (h_2 - h_1) (m_0 - n) + \frac{1}{2} k_2 m_0'''^2 \right) = \\ = \frac{2}{e} \int_{m'''=0}^{m'''=m_0'''} \int_{m'''=0}^{m'''=m'''} f(m''') dm''' dm''' \quad (155)$$

Indien echter n''' positief is, d.w.z., dat n grooter is dan h_2 , dan geldt, zooals zonder meer duidelijk zal zijn:

$$\Delta Q = Q - \frac{2}{e} \left(k_1 h_1 (m_0 - n) + k_2 (h_2 - h_1) (m_0 - n) + \frac{1}{2} k_2 (m_0'''^2 - n'''^2) \right) = \\ = \frac{2}{e} \int_{m'''=n'''}^{m'''=m_0'''} \int_{m'''=0}^{m'''=m'''} f(m''') dm''' dm''' \quad (156)$$

Voor de berekeningen van de ΔQ -waarden moeten in dit geval $m = 0.55$ en 0.60 ($m''' = 0.05$ en 0.10) en $n = 0.45$ resp. 0.51 dus resp. de vergelijking 153 en 156 worden gebruikt. Voor deze ΔQ -waarden vinden we resp. 0.00144 en 0.00715 m³ p. 24 uur per strekkenden meter en van één zijde komend.

In genoemd geval is de onbekende functie van $k_{m'''}$ niet grafisch te bepalen, daar de hoogste ΔQ -waarde ook nog afhangt van n''' . Wel is waar zou in het gegeven geval het ten slotte slechts weinig verschil uitmaken, indien $n''' = 0$ werd genomen, daar n''' bij de hoogste ΔQ -waarden slechts 0.01 m is. In een ander geval zou dit eens anders kunnen zijn, waarom we dan ook de algemeene oplossing zullen geven. We kunnen echter wel vaststellen, dat de doorlatendheid volgens de 2 berekende Q - en bijbehorende m_0''' -waarden met stijgende m_0''' -waarden toeneemt, daar immers de breuk van $\Delta Q : m_0'''^2$ resp. $\Delta Q : (m_0'''^2 - n'''^2)$ toeneemt. In het gegeven geval zullen we de onbekende functie van $k_{m'''}$ ontwikkeld denken in de reeks:

$$k_{m'''} = k'_0 + am''' + bm''' + \text{enz.},$$

waarbij we ons — gezien het kleine stukje, waarover $k_{m'''}$ gemeten wordt

(10 cm) — tot 3 termen zullen beperken. Om de berekening te vergemakkelijken is een nieuwe k_0 -waarde (nl. k_0') ingevoerd. Hierdoor worden namelijk snelle stijgingen van de doorlatendheid bij den overgang van de tweede naar de derde laag opgevangen in een discontinue sprong in de doorlatendheid.

In het gegeven geval zijn echter minstens 3 ΔQ -waarden noodig om de functie van $k_{m''}$ tot in 3 termen te kunnen bepalen. Uit de $Q : m_0$ - en $Q : n$ -lijnen lezen we af, dat bij $m_0 = 0.58$ $Q = 0.0131$ en $n = 0.49$ en bij $m_0 = 0.53$ $Q = 0.0070$ en $n = 0.41$, zoodat ΔQ voor deze 2 waarden van m (berekend volgens de vergelijking 153) resp. worden: 0.00449 en 0.00064 m³ p. 24 uur per strekkenden meter en van één zijde komend; evenzoo is voor $m_0 = 0.55$ en 0.60 ΔQ resp. gelijk 0.00144 en 0.00715 en n resp. gelijk 0.45 en 0.51.

Alvorens echter op de berekening van de functie van $k_{m''}$ in te gaan, willen we eerst met behulp van de 4 verkregen ΔQ -waarden nog eens nagaan hoe de doorlatendheid verandert. Daartoe deelen we de 3 kleinste ΔQ -waarden door de bijbehorende waarden van $m_0'''^2$ en de hoogste ΔQ -waarde door de bijbehorende waarde van $(m_0'''^2 - n'''^2)$, daar voor de laatste ΔQ -waarde n''' positief is. We vinden daarvoor resp. 7.11; 5.76; 7.01 en 7.22. Hieruit volgt, dat vanaf $m_0''' = 0.05$ de doorlatendheid toe moet nemen, terwijl voor de m_0''' -waarde van 0.03 de doorlatendheid groter zou moeten zijn dan voor $m_0''' = 0.05$ en hooger. Bedenken we echter, dat de ΔQ -waarde van $m_0''' = 0.03$ slechts klein is (nl. 0.00064) en bij een verschil van slechts 2 L ($\Delta Q = 0.00044$; de breuk is dan 4.9) een toename van den doorlaatfactor van $m_0''' = 0$ tot $m_0''' = 0.1$ zou optreden en een dergelijk verschil vrijwel binnen de foutengrenzen liggen, zoo ligt het voor de hand deze waarde niet voor de berekening in aanmerking te nemen en dus alleen de ΔQ -waarden te beschouwen bij de m_0''' -waarden van 0.05; 0.008 en 0.10. Gezien het feit, dat de beschouwde laag heterogeen is, mag voor k_0 niet meer k_2 worden ingevuld. Inplaats van $k_0 + k_0' = k_2 + k_0'$ komt dus gewoon $k_0'' =$ doorlaatfactor oneindig dunne laag van $m_0 = 0,5$ tot $m_0 = 0,5 + dm_0$ in de plaats. Voor de 2 kleinste ΔQ -waarden geldt dus:

$$\Delta Q = \frac{2}{e} \left(\frac{1}{2} k_0'' m_0'''^2 + \frac{1}{6} a m_0'''^3 + \frac{1}{12} b m_0'''^4 \right) \quad (157)$$

en voor de hoogste ΔQ -waarde:

$$\Delta Q = \frac{2}{e} \left(\frac{1}{2} k_0'' (m_0'''^2 - n'''^2) + \frac{1}{6} a (m_0'''^3 - n'''^3) + \frac{1}{12} b (m_0'''^4 - n'''^4) \right) \quad (158)$$

De bovenaangegeven waarden van m_0''' en n''' hierin ingevuld, evenals voor ΔQ resp. 0,00215; 0,00631 en 0,00996 ($\frac{1}{6} \cdot 1,42 \cdot m_0'''^2$, resp. $\frac{1}{6} \cdot 1,42 \cdot (m_0'''^2 - n'''^2)$ bij de reeds eerder berekende ΔQ -waarden optellen), geven de volgende vergelijkingen:

$$0.00215 = 0.0005k_o' + 0.00000833a + 0.000000208b$$

$$0.00631 = 0.00128k_o' + 0.0000341 a + 0.00000137 b$$

$$0.00996 = 0.00198k_o' + 0.0000666 a + 0.00000667b$$

Hieruit is af te leiden, dat $k_o'' = 3,12$; $a = + 75,4$ en $b = - 185$, zoodat

$$k_m''' = k_o'' + am_o''' + bm_o'''^2 = 3,12 + 75,4 m_o''' - 185 m_o'''^2 \quad (159)$$

en dus k_m''' bij $m_o''' = 0.1$ of dus bij $m_o = 0.6$ gelijk is aan 8,81 m p. 24 uur.

Als totaal resultaat van deze berekeningen blijkt dus, dat de laag van 0 — 40 cm boven het vlak van de drains (het vlak van de drains ligt 90 cm onder het maaiveld) vrijwel homogeen is en een doorlaatfactor van 0.12 m p. 24 uur bezit. De laag van 40 — 50 cm boven het vlak van de drains is eveneens homogeen maar heeft een doorlaatfactor van 1.42 m p. 24 uur. Voor de laag van 50 — 60 cm boven het vlak van de drains neemt de doorlaatfactor toe van 3.45 tot 8.81 m p. 24 uur. Hierbij kan worden opgemerkt, dat men zich de, volgens de berekeningswijze gevonden, sprongsgewijze veranderingen van den doorlaatfactor op 40 en 50 cm boven het vlak van de drains moet voorstellen als in werkelijkheid te zijn zeer snelle veranderingen over een laag van enkele centimeters dikte.

d. Slotopmerking

Uit de uitvoerige berekeningen van de drie gegeven voorbeelden blijkt duidelijk, dat een volledige berekening van de veranderingen van den doorlaatfactor zeer tijdroovend is en bovendien tot ingewikkelde berekeningen kan voeren. Voor *practische* toepassingen zijn deze berekeningen dan ook minder geschikt, terwijl bovendien — zooals we zullen zien — veel eenvoudiger tot soms zelfs zeer eenvoudige berekeningen een voldoende inzicht kunnen geven. Deze berekeningen, waarbij we o.a. ook reële en effectieve doorlaatfactoren moeten onderscheiden, zullen in hoofdstuk V nader besproken worden, waarbij tevens ook de reeds vaker genoemde „schijnbare doorlaatfactor” nader beschouwd zal worden.

§ 2. ER IS EEN HANGKROMME VAN HET PHREATISCH OPPEERVLAK NAAR DEN WATERSPIEGEL IN DE SLOOT

Treedt er tenslotte een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar den waterspiegel in de sloot op, zoo zal het duidelijk zijn, dat ook nu de voor de oplossing benodigde gegevens het beste zijn af te leiden uit de $Q : m_o$ - en $Q : n$ -lijnen.

We zullen de oplossing van dit geval slechts ten deele behandelen. In de eerste plaats heb ik namelijk een dergelijk geval reeds elders (zie noot 3) besproken en in de tweede plaats is de oplossing slechts gedeeltelijk anders dan in de gevallen, waarin geen hangkromme aanwezig is. Alleen dit eerste

gedeelte zal hieronder besproken worden. Verder zal eenvoudigheidshalve verondersteld worden, dat de hangkromme zich over de geheele lengte van de drains uitstrekt. Ook voor andere gevallen zijn analoge oplossingen op te stellen; het is echter uitgesloten deze hier te behandelen. Tenslotte zal om soortgelijke redenen een mogelijke heterogeniteit in de z -richting (evenwijdig de drains) niet in aanmerking worden genomen.

Het zal duidelijk zijn, dat wanneer er een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar den waterspiegel in de sloot bestaat, deze hangkromme bij verschillende debietwaarden moet worden vastgesteld. Dit wil dus zeggen, dat de $Q : m_0$ - en de $Q : n$ -lijnen op verschillende afstanden van de sloot bekend moeten zijn, hetgeen dus mogelijk is, wanneer op het betreffende perceel op verschillende afstanden van de sloot midden tusschen en boven de drains grondwaterstandsbuizen zijn geplaatst, waarin de waterstand dagelijks wordt waargenomen.

Zetten we nu de m_0 -waarden op verschillende afstanden uit de sloot in een $m_0 - z$ diagram uit, waarvan dus z den afstand uit de sloot aangeeft en verbinden we deze punten door een vloeiende lijn, dan is dus door deze lijn bij een bepaald debiet de functie $m_0 = f(z)$ aangegeven. Het zou nu kunnen zijn, dat bij een ander debiet deze functie anders was. Men kan dit nagaan door bij één bepaalden afstand van de sloot en bij twee debietwaarden de verhouding der m_0 -waarden te berekenen. Deze factor moet dan ook bij andere afstanden uit de sloot, maar bij dezelfde 2 debietwaarden dezelfde zijn, hetgeen ook het geval moet zijn, wanneer iets dergelijks bij weer 2 andere debietwaarden wordt uitgevoerd. Blijft deze factor dezelfde dan blijft $m_0 = f(z)$ in wezen ook dezelfde; alleen verandert in deze functie met een ander debiet een getallenfactor. Het is het waarschijnlijkste, dat iets dergelijks zal optreden, hetgeen duidelijk wordt, wanneer men bedenkt, dat, wanneer op een bepaalden afstand uit de sloot bij een bepaald debiet m_0 b.v. het grootste is, dit ook het geval zal zijn bij andere debietwaarden, enz. Ook te Nieuwolda (zie noot 3) werd iets dergelijks waargenomen.

Ook voor de n -waarden op verschillende afstanden van de sloot zal de functie $n = f(z)$ bij verschillende debietwaarden, afgezien dan van een getallenfactor, gewoonlijk dezelfde blijven. Ook dit kan op analoge wijze worden gecontroleerd.

Nu zijn de functies $m_0 = f(z)$ en $n = f(z)$ alleen bekend door de lijnen in het $m_0 - z$ - en $n - z$ -diagram. De onbekende functies zullen echter gewoonlijk met voldoende benadering zijn aan te geven door eens enkele typen van functies te probeeren. Zeer vaak zal de functie van het type

$$m_0 = cz^d \text{ resp. } n = ez^f \quad (160)$$

de resp. functies met voldoende benadering aangeven. Hierin stellen c en d resp. e en f constanten voor. Deze constanten worden verkregen door bij een bepaald debiet uit de m_0 : z -lijn resp. n : z -lijn 2 daarvoor geschikte punten te kiezen. Met behulp van de bijbehorende waarden van m_0 en z resp. n en z zijn dan de constanten c , d resp. e en f te berekenen, waarbij natuurlijk ook voor tusschenliggende punten moet worden nagegaan of de betreffende functie de lijn met een voldoende benadering aangeeft.

We hebben dus gezien, dat bij verschillende debietwaardens de functies van $m_0 = f(z)$ en $n = f(z)$ wel is waar dezelfde blijven, maar dat een getallen factor verandert. Nemen we nu bij een bepaald debiet Q deze factor gelijk 1, dan zal deze factor bij een willekeurig ander debiet Q_x voor de functie $m_0 = f(z)$ b.v. gelijk α en voor de functie $n = f(z)$ gelijk β zijn, zoodat algemeen:

$$m_0 = \alpha cz^d \quad (161)$$

$$n = \beta ez^f \quad (162)$$

waarin α en β dus alleen nog maar afhangen van het totaal debiet van de drainreeks; d.w.z. dus van het debiet, dat bij de uitmonding van den drain in de sloot wordt bepaald.

Deze factoren α en β zijn op eenvoudige wijze uit de Q : m_0 - en Q : n -lijnen op verschillende afstanden van de sloot af te lezen. Zijn deze factoren α en β bij het debiet Q_1 gelijk 1 en is bij dit debiet de gemiddelde m_0 -waarde

van b.v. 5 afstanden uit de sloot gelijk: m_0

gem. bij	en de gemiddelde n -
$Q = Q_1$	

waarde van dezelfde afstanden uit de sloot gelijk: n

gem. bij	en is verder bij
$Q = Q_1$	

een willekeurig ander debiet Q_x de gemiddelde waarde van m_0 op dezelfde

afstanden van de sloot gelijk: m_0

gem. bij	en de gemiddelde waarde van n
$Q = Q_x$	

gelijk: n

gem. bij	dan is blijkbaar voor dit debiet Q_x de factor α gelijk aan:
$Q = Q_x$	

$$\alpha = \frac{\begin{array}{c|c} \text{gem.} & \\ m_0 & \text{bij} \\ \hline & Q = Q_x \end{array}}{\begin{array}{c|c} \text{gem.} & \\ m_0 & \text{bij} \\ \hline & Q = Q_1 \end{array}} \quad (163)$$

en de factor β :

$$\beta = \frac{n \left| \begin{array}{c} \text{gem.} \\ \text{bij} \\ Q = Q_x \end{array} \right.}{n \left| \begin{array}{c} \text{gem.} \\ \text{bij} \\ Q = Q_1 \end{array} \right.} \quad (164)$$

Het vervolg van de berekeningen is nu volkomen gelijk aan de behandelde voorbeelden, waarbij geen hangkromme optrad, zoodat daarna verder kan worden verwezen.

Opgemerkt kan nog worden, dat in plaats van de factoren m_0 en n nu de functies 161 en 162 in de vergelijkingen voorkomen (zie ook hoofdstuk II : I A § 7 en I B § 3 en II D § 1 en § 2.

HOOFDSTUK IV

Infiltratie

I. Inleiding

Onder infiltratie wordt verstaan het verhoogen van den grondwaterstand in den grond en daarmee van het vochtgehalte van den grond door in greppels op bepaalden onderlingen afstand water tot een bepaald peil in te laten. In het algemeen zal dit alleen op zandgronden (het geschiedt echter ook op zelfs lichte kleigronden in boomgaarden in de Betuwe) en in de maanden Mei tot midden September worden toegepast.

De strooming van het water in den grond vindt hier op dezelfde wijze plaats als dit bij de ontwatering het geval is. Het verschil ligt vrijwel alleen in het feit, dat de stroomrichting van het water juist omgekeerd is. Bij ontwatering stroomt het water *van* het land tusschen de drains of greppels *naar* deze drains of greppels, terwijl bij infiltratie het water juist stroomt *van* de greppels of drains *naar* het land tusschen de drains of greppels.

Bij *ontwatering* is er dan ook een verval in het water *van* het midden tusschen de drains of greppels *naar* deze drains of greppels, zoodat het phreatisch oppervlak hier een gewelfden, bollen vorm heeft; dit komt b.v. zeer mooi tot uiting bij de waarnemingen in den bak in de kas van het Instituut.

Bij de *infiltratie* is er daarentegen een verval in het water *van* de greppels of drains *naar* het land tusschen de greppels en drains. Het phreatisch oppervlak heeft hier dan ook een hollen vorm, zooals ook herhaaldelijk bij grondwaterstandsmetingen op geïnfilteerd land kon worden waargenomen. Is dus

bij ontwatering de grondwaterstand midden tusschen de drains en greppels hooger dan den waterstand in de greppels of boven de drains; bij infiltratie treedt juist het omgekeerde op en is dus de grondwaterstand midden tusschen de greppels en drains lager dan de waterstand in de greppels resp. boven de drains.

De vergelijkingen, die voor verschillende gevallen bij infiltratie kunnen worden afgeleid, zijn dan ook sterk verwant aan de vergelijkingen, zooals deze voor overeenkomstige gevallen bij ontwatering zijn afgeleid. Het opstellen en ontwikkelen van de vergelijkingen zelf is volkomen identiek; alleen is bij infiltratie het verval *negatief*, daar dit verval bij ontwatering positief is aangenomen.

Bij de afleiding van de vergelijkingen voor ontwateringsgevallen hebben we verder verondersteld, dat per oppervlakte-eenheid overal (dus op alle afstanden van de drains of greppels) evenveel wordt afgevoerd. Bij de infiltratie kunnen we iets overeenkomstigs veronderstellen. De verdamping evenals het watergebruik door de planten zullen immers eveneens overal tusschen de greppels of drains gelijk zijn. Wanneer er dan ook nog een grooter verschil tusschen de vergelijkingen in overeenkomstige gevallen optreedt, dan wordt dit veroorzaakt door het feit, dat infiltratie in hoofdzaak geschiedt in zandgronden, waarbij de capillaire laag in het stroomgebied moet worden opgenomen; zie ook hoofdstuk II, 1 A § 3 (37).

II. *Homogene gronden*

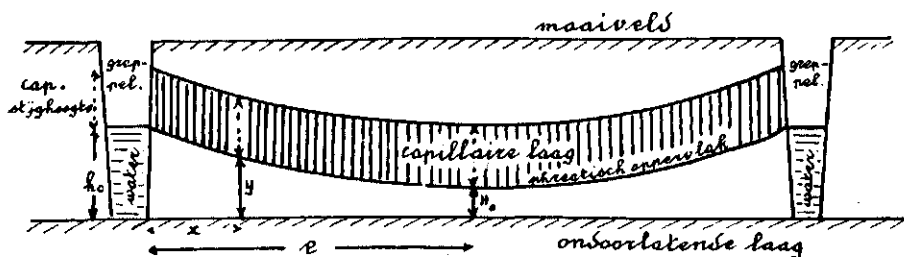
A. De ondergrond is ondoorlatend

§ 1. DE AFLEIDING VAN DE VERGELIJKING

In de eerste plaats zal ook nu weer het geval besproken worden, waarbij de bodem van de greppels reikt tot de ondoorlatende laag of — indien drains worden gebruikt — de drains liggen op de ondoorlatende laag. Daar gewoonlijk voor infiltratie greppels gebruikt worden, zal in het vervolg steeds van greppels gesproken worden. Het spreekt vanzelf, dat alle vergelijkingen, opmerkingen, enz., even goed toe te passen zijn, wanneer drains voor de infiltratie mochten zijn gebezigd; alleen komt voor den waterstand in de greppels nu de waterstand boven de drains in de plaats. We zullen nu hier het geval beschouwen, dat een *zandgrond* geïnfiltreerd wordt, waarbij we 3 gevallen kunnen onderscheiden en dat een *grond van de tweede soort* (met structuur) wordt geïnfiltreerd, waarbij we de horizontale waterbeweging in de capillaire zône kunnen verwaarloozen.

a. Het capillair oppervlak reikt nergens tot het maaiveld

In de eerste plaats zal worden verondersteld, dat het capillaire oppervlak nergens reikt tot het maaiveld, dat wil zeggen, dat de grondwaterspiegel overal dieper onder het maaiveld ligt, dan de capillaire stijghoogte bedraagt. De afgeleide vergelijking geldt tevens voor het geval, dat de horizontale



Figuur 16

streaming in de capillaire laag verwaarloosd kan worden; alleen zijn de h_0 - en H_0 -waarden dan iets anders.

Uit de figuur 16¹⁾ blijkt, dat de hoeveelheid water q_x , die in de eenheid van tijd door de doorsnede y op een afstand x van de greppels stroomt, gelijk is aan

$$q_x = Q \frac{(e-x)}{e} = -ky \frac{dy}{dx} \quad (165)$$

Hierin beteekent dus Q nu de hoeveelheid water in m^3 , die in 24 uur per strekkenden meter van één zijde uit de greppel vloeit. Verder is $\frac{dy}{dx}$ hier negatief, daar het verval hier negatief is. Bij integratie van de vergelijking 165 van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_0$ tot $y = y$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k h_0^2 - \frac{1}{2} k y^2 \quad (166)$$

Daar verder voor $x = e$; $y = H_0$, gaat dus vergelijking 166 over in:

$$Q = \frac{k(h_0^2 - H_0^2)}{e} \quad (167)$$

Gewoonlijk zal men hier de hoeveelheid geïnfiltreerd water aangeven door het waterverbruik, uitgedrukt als een laag water in meters, die per eenheid van tijd (24 uur) noodig is. Het zal duidelijk zijn, dat in dat geval de vergelijking 167 overgaat in:

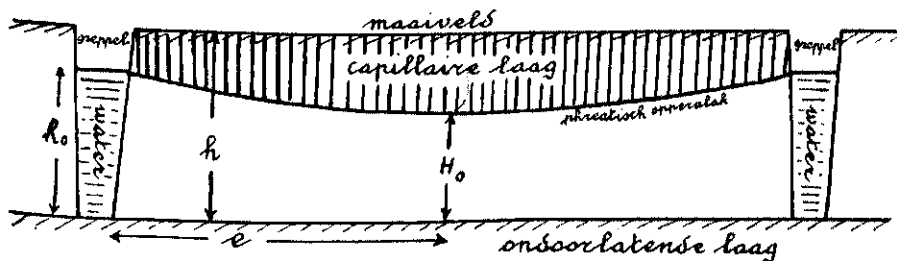
$$S = \frac{Q}{e} = \frac{k(h_0^2 - H_0^2)}{e^2} \quad (168)$$

¹⁾ Het capillaire oppervlak is in werkelijkheid een grillig verlopend vlak; voor de berekeningen maakt dit geen verschil, daar we voor het werkelijke capillaire oppervlak een gemiddeld capillair oppervlak, als in figuur 16 is aangegeven, in de plaats kunnen denken.

In een grond van de tweede soort (dus geen zandgrond en met een structuur), waarin dus de horizontale strooming van het water in de capillaire laag verwaarloosd kan worden, wordt onder h_0 en H_0 resp. de hoogte van den waterstand in de greppels boven de ondoorlatende laag (hier dus den greppelbodem) en de hoogte van den grondwaterspiegel midden tusschen de greppels boven de ondoorlatende laag verstaan. In gronden van de eerste soort (in een éénkorrel structuur; dus voornamelijk zandgronden) behoort echter de capillaire laag bij het stroomingsprofiel, zoodat onder h_0 en H_0 nu resp. verstaan worden de hoogte van den waterspiegel in de greppels + de capillaire stijghoogte (hoogte capillair oppervlak in den grond vlak naast de greppel) boven de ondoorlatende laag en de hoogte van den grondwaterspiegel + de capillaire stijghoogte (= de hoogte van het capillair oppervlak) midden tusschen de greppels boven de ondoorlatende laag (dus hier boven den bodem van den greppel). In de twee volgende gevallen is alleen sprake van gronden van de eerste soort, zoodat h_0 en H_0 de laatst genoemde beteekenis hebben.

b. Het capillair oppervlak reikt overal tot het maaiveld

In de tweede plaats moet het geval besproken worden, dat het capillaire oppervlak overal reikt tot het maaiveld, hetgeen dus wil zeggen, dat de grondwaterspiegel overal minder diep onder het maaiveld staat dan de capillaire stijghoogte bedraagt. In dit geval (zie figuur 17) behoort dus de geheele laag



Figuur 17

van het maaiveld tot de ondoorlatende laag tot de watervoerende laag. Het zal duidelijk zijn, dat in dit geval

$$q_x = Q \frac{e-x}{e} = -kh \frac{dy}{dx} \quad (169)$$

waarin h den afstand van het maaiveld tot de ondoorlatende laag voorstelt. Bij integratie van de vergelijking van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_0$ tot $y = y$

(het verval in ieder vertikale doorsnede wordt ook nu bepaald door de ligging van de raaklijn aan het phreatisch oppervlak) in het snijpunt van de vertikale doorsnede met dit phreatisch oppervlak ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = kh (h_o - y) \quad (170)$$

Daar voor $x = e$ $y = H_o$, gaat de vergelijking 170 over in:

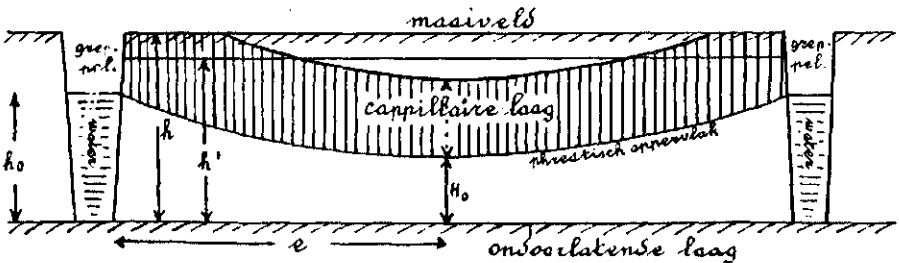
$$Q = \frac{2kh (h_o - H_o)}{e} \quad (171)$$

$$\text{of dus } S = \frac{2kh (h_o - H_o)}{e^2} \quad (172)$$

Hierin komt dus het verschil van h_o en H_o voor. Dit verschil is natuurlijk gelijk aan het verschil tusschen de (grond)waterstanden midden tusschen en in de greppels.

c. Het capillair oppervlak reikt gedeeltelijk wel, gedeeltelijk niet tot het maaiveld

In de derde plaats zal nog worden verondersteld, dat het capillaire oppervlak gedeeltelijk wel (het gedeelte grenzend aan de greppels) gedeeltelijk niet (meer in het midden tusschen de greppels) tot het maaiveld reikt. Dit zal het geval zijn, indien de grondwaterstand in het gedeelte grenzend aan de greppel zoo hoog is, dat de afstand tot het maaiveld kleiner is dan de capillaire stijghoogte, terwijl meer in het midden tusschen de greppels de grondwaterspiegel dieper onder het maaiveld ligt dan de capillaire stijghoogte bedraagt (zie figuur 18). In dit geval behoort dus niet de geheele laag onder het maaiveld vanaf de ondoorlatende laag tot het stroomingsgebied. Het zal echter duidelijk



Figuur 18

zijn, dat we deze gemiddelde dikte h' voor ieder geval gemakkelijk kunnen berekenen. Reikt b.v. bij de greppel het capillair oppervlak tot het maaiveld

en noemen we ook nu den afstand van het maaiveld tot de ondoorlatende laag h , dan is met voldoende nauwkeurigheid $h' = \frac{h + H_0}{2}$, enz. De vergelijkingen voor dit geval blijven dezelfde als in geval b ; alleen komt voor h nu h' in de plaats. Verder is uit den aard der zaak hier H_0 de hoogte van het phreatisch oppervlak + de capillaire stijghoogte boven de ondoorlatende laag; zie de opmerking bij geval a . De factor $h_0 - H_0$ is echter weer gelijk aan het verschil in den grondwaterstand resp. waterstand midden tusschen en in de greppels; dus gelijk $h_0 - H_0$.

d. Eenige algemeene opmerkingen over de ontwikkelde vergelijkingen

In de eerste plaats moet worden opgemerkt, dat wanneer k in meters per 24 uur, h_0 , H_0 en e in meters worden uitgedrukt, we daarmede Q in m^3 per 24 uur per strekkenden meter van één zijde in den grond infiltrerend, of S als een waterlaag in meters per 24 uur infiltrerend, krijgen uitgedrukt. Gewoonlijk zal men het watergebruik uitgedrukt willen zien als de waterlaag, die per 24 uur door de planten of door de verdamping wordt verbruikt. Gewoonlijk zal men dus de grootheid S bepalen. Deze grootheid wordt dus berekend in meters per 24 uur en kan dus in mm per 24 uur worden ongerekend door het berekende getal met 1000 te vermenigvuldigen.

In de tweede plaats blijkt, dat de vergelijkingen 166 tot 168 alleen in zoverre met de vergelijkingen 3 tot 5 verschillen, dat alleen het teeken van de factoren h_0^2 en H_0^2 juist omgekeerd is. Ook in het geval, dat het capillaire oppervlak tot het maaiveld reikt treden dergelijke verschillen op; vergelijk b.v. de vergelijkingen 170 tot 172 met de vergelijkingen 9 tot 11).

Verder spreekt het vanzelf, dat we in alle nog te behandelen gevallen steeds de mogelijkheid hebben met gronden van de eerste en tweede soort te doen te hebben of dus met gevallen, waarbij de capillaire laag al dan niet bij het doorstromingsprofiel moet worden gerekend. In het vervolg zullen we het doorstromingsprofiel moet worden gerekend. In het vervolg zullen we volstaan met slechts één geval te behandelen, nl. het geval, dat, of de capillaire laag *niet* bij het watervoerende profiel moet worden gerekend (h_0 en H_0 dus rekenen vanaf het phreatisch oppervlak), of het phreatisch oppervlak zich overal dieper dan de capillaire stijghoogte onder het maaiveld bevindt (geval a ; h_0 en H_0 nu rekenen vanaf het capillaire oppervlak; zie de opmerking bij geval a gemaakt), daar de afgeleide vergelijkingen dezelfde zijn en alleen h_0 en H_0 een andere beteekenis hebben. De opstelling van de vergelijkingen voor andere gevallen kan na een bestudeering van de behandelde gevallen geen moeilijkheden meer geven (zie ook hoofdstuk VI, sub III).

§ 2. WELKE GEGEVENS ZIJN VOOR DE TOEPASSING VAN DE VERGELIJKINGEN
NOODIG EN HOE KUNNEN DEZE WORDEN VERKREGEN?

Het zal duidelijk zijn, dat al naar het doel, waarvoor men de vergelijkingen wil gebruiken, verschillende gegevens bekend moeten zijn om de gevraagde gegevens te kunnen berekenen. In elk geval zal echter de doorlaatfactor van den grond bekend moeten zijn. Daar de infiltratie gewoonlijk plaats vindt op zandgronden, zal deze doorlaatfactor in het laboratorium (zie noot 1) bepaald kunnen worden, wanneer althans het klei-, humus- en koolzure kalk-gehalte niet te hoog is. Om den in het laboratorium bepaalde doorlaatfactor om te kunnen rekenen op de natuurlijke omstandigheden moeten we dus het poriënvolume en het luchtgehalte van den grond in zijn natuurlijke ligging kennen evenals de temperatuur van het grondwater. Het poriënvolume kan men of rechtstreeks bepalen of berekenen uit het vochtgehalte van de dieper gelegen lagen, daar deze meestal weinig of hoogstens een te verwaarloozen hoeveelheid lucht bevatten. Het luchtgehalte kan men nu met behulp van het poriënvolume en het vochtgehalte in de verschillende lagen berekenen, terwijl de temperatuur van het grondwater gemakkelijk rechtstreeks kan worden bepaald (in de zomermaanden gemiddeld = 15° C).

Bevat de zandgrond te veel klei, humus of koolzure kalk of betreft het een niet-zandgrond dan kan de doorlatendheid door middel van de boorgaten-methode worden bepaald (zie noot 4).

Wil men nu bij een bestaande infiltratie het watergebruik berekenen, dan is dus de grootte S onbekend. De greppelafstand, evenals de stand van het water in de greppels en de grondwaterstand midden tusschen de greppels moeten dan bekend zijn. De bepaling van den grondwaterstand moeten met daarvoor geschikte grondwaterstandsbuizen worden bepaald (zie noot 1, blz. 221 e.v.). Daar de traagheid van de buizen in deze soort gronden klein is, kunnen de metingen van dag tot dag afzonderlijk gebruikt worden. Verder verdient het aanbeveling om de waarnemingen in de late morgenuren of 's middags te verrichten (in verband met de mogelijkheid van het optreden van het Lissephenomeen of het Wieringermeereffect). Verder spreekt het wel vanzelf, dat men voor de berekeningen geen waarnemingen gebruikt die tijdens of vlak na regenbuien zijn opgenomen (b.v. pas den derden dag na een regendag, daar men dan kan aannemen, dat het waterverbruik weer volledig gedekt wordt uit toegestroomd water uit de greppels). Evenmin mag men die waarnemingen gebruiken, die verricht zijn op dagen, waarin het peil van het water in de greppels nog al sterk gewijzigd is.

Is daarentegen het watergebruik bekend of kent men daaraan een bepaalde waarde toe, dan is te berekenen welke grondwaterstanden bij een bepaald

laag voorstelt; immers voor de strooming van het water in de laag boven den bodem van de greppel behoeft geen correctie te worden aangebracht. Tenslotte stelt e den afstand tusschen de 2 greppelzijwanden voor; zie hoofdstuk II, sub I B.

De gecorrigeerde vergelijking 167 luidt dus:

$$Q = \frac{k (h_o^2 - H_o^2)}{e + \frac{1}{2} (r + b) \frac{r}{h_o}} \quad (173)$$

De vergelijking 168 wordt dus:

$$Q = \frac{k (h_o^2 - H_o^2)}{e \left(e + \frac{1}{2} (r + b) \frac{r}{h_o} \right)} \quad (174)$$

Uit de vergelijkingen blijkt dus tevens, wanneer er aanleiding bestaat om deze correctie aan te brengen en wanneer we deze wel kunnen verwaarloozen.

Bij het aanbrengen van deze correctie moet er echter op attent gemaakt worden, dat deze correctie niet het feit in aanmerking neemt, dat de hoeveelheid water, die door een doorsnede van de eenheid van dikte stroomt, afneemt, naarmate deze laag zich dieper onder den bodem van de greppels bevindt, hetgeen in werkelijkheid wel het geval is. Ligt de ondoorlatende laag zeer diep onder den greppelbodem dan zal door de dieper gelegen lagen dus hoe langer hoe minder water stroomen. Ook de gecorrigeerde vergelijkingen zijn derhalve slechts geldig voor het geval de ondoorlatende laag zich niet te diep onder den bodem van de greppels bevindt. Gezien de resultaten, die in den bak in de kas van het Instituut verkregen zijn (zie Hoofdstuk II, sub I B, § 2; het feit, dat hier de strooming van het water juist naar de drains gericht is, heeft hier geen invloed) is de fout, die gemaakt wordt, wanneer de ondoorlatende laag ± 1 m onder de drains ligt bij een onderlingen afstand van 10 m te verwaarloozen klein (verhouding $e : r = 5 : 1$). Waarschijnlijk zal de fout, die gemaakt wordt, wanneer de ondoorlatende laag zich op 2 m onder den bodem bevindt nog niet groot zijn, vooral niet, wanneer de correctie wordt aangebracht. Mogelijk kan bij een aangebrachte correctie in den boven aangegeven geest de ondoorlatende laag nog dieper onder den bodem van de greppels (onder de drains) liggen; voorloopig zou ik ook de gecorrigeerde vergelijkingen alleen voor die gevallen willen zien toegepast, waarbij deze ligging niet meer dan 2 m onder den bodem van de greppels (onder de drains) bedraagt.

Ligt de ondoorlatende laag dieper onder het maaiveld dan boven is aangegeven dan zal het duidelijk zijn, dat de fouten des te grooter worden, naarmate de diepteligging grooter is.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat een oplossing van bovenaangeduid geval (dus de ondoorlatende laag ligt zeer diep onder den greppelbodem) in den zin, zooals dit bij ontwateringsvraagstukken is aangegeven, hier niet mogelijk is, daar geen $Q : m_0$ - en $Q : n$ -lijnen bepaald worden en de bepaling daarvan het meten van het watergebruik op die manier zou beteekenen, dat de hoeveelheid toegelaten water in de greppels of drains van dag tot dag gemeten zou moeten worden, hetgeen hoogstens, in verband met daaraan verbonden kosten, slechts uitzonderingsgewijze zou kunnen geschieden. Een berekening kan hier geschieden met de z.g. potentiaaltheorie; zie hoofdstuk I. Hierop zal in volgende publicatie worden teruggekomen.

III. *Heterogene gronden*

A. Inleiding

Evenals dit voor ontwatering is geschied, kunnen ook voor infiltratie vergelijkingen worden afgeleid voor heterogene gronden. Ook nu zullen we twee gevallen onderscheiden, nl., dat

1. De doorlatendheid sprongsgewijze met de diepte onder het maaiveld verandert, of m.a.w. er komen in het profiel scherp begrensde lagen met een verschillende doorlatendheid voor
2. de doorlatendheid geleidelijk verandert.

Verder spreekt het wel vanzelf, dat er ook voor mengsels van deze twee gevallen vergelijkingen op te stellen zijn.

Daar er reeds eerder de aandacht op gevestigd is, dat de methode voor de afleiding van de vergelijkingen voor infiltratie vrijwel gelijk is aan de afleiding van de vergelijkingen voor ontwatering, zullen we ons dan ook kortheidshalve tot slechts enkele gevallen bepalen.

B. De ondergrond is ondoorlatend

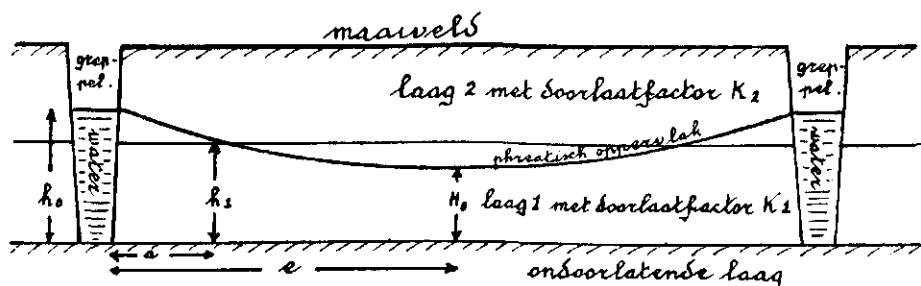
§ 1. DE DOORLATENDHEID VERANDERT SPRONGSGEWIJZE

a. Er komen twee lagen in het watervoerend profiel voor

1. De afleiding van de vergelijking voor het geval $H_0 < h_1$

We zullen nu de vergelijking afleiden voor het geval in het watervoerende profiel 2 scherp begrensde lagen voorkomen en de bodem van de greppels gevormd wordt door den bovenkant van de ondoorlatende laag, terwijl H_0 kleiner is dan h_1 of, wat hetzelfde is, de grondwaterspiegel midden tusschen de

greppels zich bevindt in de onderste laag. In figuur 20 is dit geval weergegeven. Tevens blijkt hieruit de beteekenis van de factoren, die in de onderstaande



Figuur 20

berekeningen worden gebruikt. Deze zullen dan ook niet verder worden besproken en wel is dit des te maar onnoodig, omdat zij dezelfde beteekenis hebben als in het overeenkomstige geval bij de ontwatering (zie echter ook II, A, § I van dit hoofdstuk).

Voor het geval, dat x kleiner is dan a en y groter is dan h_1 , geldt:

$$q_x = Q \frac{e-x}{e} = - \left(h_1 k_1 \frac{dy}{dx} + (y-h_1) k_2 \frac{dy}{dx} \right) \quad (175)$$

Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = a$ en van $y = h_0$ tot $y = h_1$ ontstaat:

$$Q \left(a - \frac{a^2}{2e} \right) = h_1 k_1 h_0 - k_1 h_1^2 + \frac{1}{2} k_2 h_0^2 - \frac{1}{2} k_2 h_1^2 - k_2 h_1 h_0 + k_2 h_1^2 \quad (176)$$

Voor het geval x groter is dan a en y kleiner is dan h_1 geldt:

$$q_x = Q \frac{e-x}{e} = - y k_1 \frac{dy}{dx} \quad (177)$$

Geïntegreerd van $x = a$ tot $x = x$ en van $y = h_1$ tot $y = y$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) - Q \left(a - \frac{a^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_1 h_1^2 - \frac{1}{2} k_1 y^2 \quad (178)$$

De vergelijkingen 176 in 178 ingevuld geeft na eenige vereenvoudiging:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_2 h_0^2 + k_1 h h_0 (1-n_1) + \frac{1}{2} k_1 h_1^2 (n_1-1) - \frac{1}{2} k_1 y^2 \quad (179)$$

waarin ook nu weer $n_1 = k_2 : k_1$ is gesteld.

Voor $x = e$ is $y = H_0$, zoodat de vergelijking 179 ook als volgt geschreven kan worden:

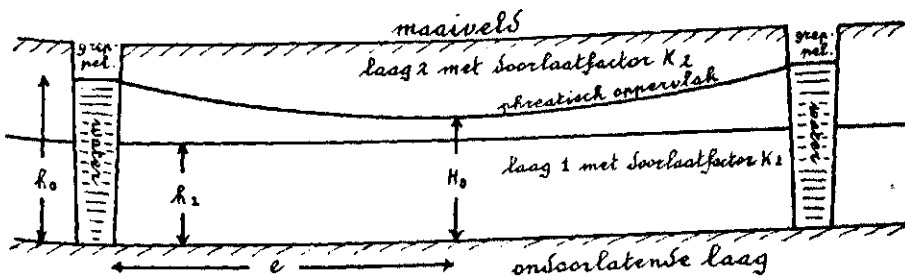
$$Q = \frac{k_2 h_0^2 + 2k_1 h h_0 (1-n_1) + k_1 h_1^2 (n_1-1) - k_1 H_0^2}{e} \quad (180)$$

en dus

$$S = \frac{Q}{e} = \frac{k_2 h_0^2 + 2k_1 h_0 (1-n_1) + k_1 h_1^2 (n_1-1) - k_1 H_0^2}{e^2} \quad (181)$$

2. De afleiding van de vergelijking voor het geval $H_0 > h_1$

Indien H_0 grooter is dan h_1 of m.a.w. voor het geval, dat de grondwater-spiegel zich tusschen de greppels in de bovenste laag bevindt, wordt de afleiding van de vergelijking iets anders, nl.:



Figuur 21

Uit figuur 21 blijkt, dat voor alle waarden van x en y geldt:

$$q_x = Q \frac{e-x}{e} = - \left(h_1 k_1 \frac{dy}{dx} + (y-h_1) k_2 \frac{dy}{dx} \right) \quad (182)$$

Geïntegreerd van $x=0$ tot $x=x$ en van $y=h_0$ tot $y=y$ ontstaat na eenige omwerking:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_2 h_0^2 + k_1 h_1 y (n_1-1) + k_1 h_1 h_0 (1-n_1) - \frac{1}{2} k_2 y^2 \quad (183)$$

Daar voor $x=e$, $y=H_0$ is dus de vergelijking 183 ook om te vormen tot de volgende vergelijking:

$$Q = \frac{k_2 h_0^2 + 2k_1 h_1 H_0 (n_1-1) + k_1 h_1 h_0 (1-n_1) - k_2 H_0^2}{e} \quad (184)$$

en dus

$$S = \frac{Q}{e} = \frac{k_2 h_0^2 + 2k_1 h_1 H_0 (n_1-1) + k_1 h_1 h_0 (1-n_1) - k_2 H_0^2}{e^2} \quad (185)$$

3. Enkele opmerkingen in verband met de toepassingen van de vergelijkingen

Wat de toepassing van deze vergelijkingen betreft, kan worden opgemerkt, dat deze hier beperkt zal blijven tot het geval, dat de doorlaatfactor van de verschillende lagen in het profiel daartoe aanleiding geeft.

Zooals reeds bij de bespreking van de vergelijking voor homogene gronden is opgemerkt, moet de doorlaatfactor van deze grond bekend zijn. Indien dit geschiedt in het laboratorium op een wijze als in de noot 1 genoemde literatuur is aangegeven, dan komt dit hierop neer, dat b.v. van de laag van 0—10, 10—20, 20—30 cm onder het maaiveld monsters worden genomen, waarin de doorlaatfactor wordt bepaald. Na omrekening op de omstandigheden, zooals deze in de natuurlijke omstandigheden optreden (zie sub II, A, § 2 van dit hoofdstuk) kan het voorkomen, dat de doorlaatfactoren zoodanig uitvallen, dat zij in 2 bovenelkaar gelegen lagen telkens gelijk zijn. Dit zou b.v. het geval zijn, wanneer voor de doorlaatfactoren na omrekening op de natuurlijke omstandigheden voor de lagen 0—10; 10—20; 20—30; 30—40; 40—50; 50—60; 60—70 en 70—80 cm onder het maaiveld gevonden zou zijn resp.: 3.0; 3.2; 3.4; 3.0; 0.90; 0.94; 0.86 en 0.92. In dat geval zijn er dus 2 lagen te onderscheiden nl. van 0—40 cm onder het maaiveld met een gemiddelden doorlaatfactor van 3.15 en een laag van 40—80 cm onder het maaiveld met een gemiddelden doorlaatfactor van 0.905.

Zijn daarentegen de doorlaatfactoren bepaald met de boorgatmethode voor 2 lagen, dan spreekt het vanzelf, dat ook de vergelijking voor 2 lagen wordt toegepast, enz. Men moet er echter wel op verdacht zijn, dat men met de boorgatmethode de schijnbare doorlaatfactoren van genoemde lagen bepaald (zie de in noot 4 genoemde literatuur en hoofdstuk V).

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat wat de andere gegevens betreft, die noodig zijn om de vergelijkingen te kunnen toepassen, dezelfde opmerkingen kunnen worden gemaakt als bij de homogene gronden, waarnaar kan worden verwezen.

b. Er komen meer dan 2 lagen in het profiel voor

Het zal duidelijk zijn, dat ook vergelijkingen kunnen worden afgeleid voor het geval, dat meer dan 2 lagen in het profiel voorkomen. Zijn dit b.v. 3 lagen dan moet men er op verdacht zijn, dat hier 3 vergelijkingen mogelijk zijn, nl. voor het geval:

1. $H_0 < h_1$ of m.a.w. de grondwaterspiegel zich midden tusschen de greppels in de onderste laag bevindt;

2. $h_2 > H_0 > h_1$ of m.a.w. de grondwaterspiegel zich midden tusschen de greppels in de middenste laag bevindt;

3. $H_0 > h_2$ of m.a.w. de grondwaterspiegel zich midden tusschen de greppels in de bovenste laag bevindt.

Hierin stelt h_1 en h_2 resp. de hoogte van den bovenkant van de onderste en de middenste laag boven de ondoorlatende laag voor.

Wat de toepassing betreft, kunnen analoge opmerkingen worden gemaakt als voor het geval 2 lagen in het profiel voorkomen, zoodat daarnaar kan worden verwezen.

§ 2. DE DOORLATENDHEID VERANDERT GELEIDELIJK

a. Inleiding

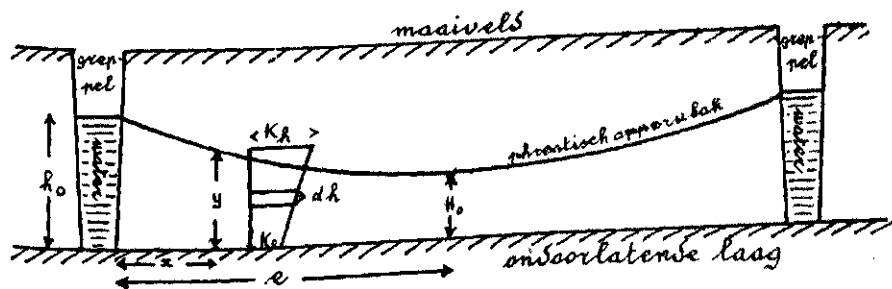
We zullen nu het geval beschouwen, dat de doorlatendheid geleidelijk volgens de een of andere functie met de hoogte boven de doorlatende laag verandert. Anders dan bij ontwatering is nu deze functie bekend, daar zij kan worden afgeleid uit de doorlaatfactoren voor de verschillende lagen, zooals deze op het laboratorium zijn bepaald.

Het spreekt vanzelf, dat deze functie, die de verandering van den doorlaatfactor boven de ondoorlatende laag aangeeft, alle mogelijke vormen kan hebben. Hier zullen we volstaan met voor 2 gevallen de vergelijkingen af te leiden.

b. De afleiding van de vergelijking voor het geval de doorlaatfactor lineair met de hoogte boven de ondoorlatende laag toeneemt

In de eerste plaats zullen we dus de vergelijking afleiden voor het geval de doorlaatfactor lineair met de hoogte boven de ondoorlatende laag toeneemt. In dit geval is dus (zie figuur 22):

$$k_h = k_0 + ay \quad (186)$$



Figuur 22

Door een doorsnede dh stroomt dus per strekkenden meter en bij een val I een hoeveelheid

$$dq_x = k_h I dy$$

en dus door de geheele doorsnede y op een afstand x van de greppel:

$$q_x = \int_{y=0}^{y=y} k_h I dy = \int_{y=0}^{y=y} (k_0 + ay) I dy = \left(k_0 y + \frac{1}{2} ay^2 \right) I \quad (187)$$

Daar $q_x = Q \frac{e-x}{e}$ en $I = -\frac{dy}{dx}$, is dus

$$q_x = Q \frac{e-x}{e} = -k_0 y \frac{dy}{dx} - \frac{1}{2} a y^2 \frac{dy}{dx} \quad (188)$$

Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_0$ tot $y = y$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_0 h_0^2 + \frac{1}{6} a h_0^3 - \frac{1}{2} k_0 y^2 - \frac{1}{6} a y^3 \quad (189)$$

Verder is voor $x = e$, $y = H_0$, zoodat de vergelijking ook te schrijven is als:

$$Q = \frac{k_0 h_0^2 + \frac{1}{3} a h_0^3 - k_0 H_0^2 - \frac{1}{3} a H_0^3}{e} \quad (190a)$$

of

$$S = \frac{k_0 h_0^2 + \frac{1}{3} a h_0^3 - k_0 H_0^2 - \frac{1}{3} a H_0^3}{e^2} \quad (190b)$$

c. De afleiding van de vergelijking voor het geval de functie van den doorlaatfactor met de hoogte boven de ondoorlatende laag gelijk te stellen is aan $k_y = k_0 + ay^b$

In de tweede plaats zullen we nog de vergelijking afleiden voor het geval de functie van den doorlaatfactor met de hoogte boven de ondoorlatende laag gelijk te stellen is aan:

$$k_h = k_0 + ay \quad (191)$$

waarin a en b constanten zijn. Het zal duidelijk zijn, dat in dit geval:

$$q_x = \int_{y=0}^{y=y} (k_0 + ay^b) I dy = - \left(k_0 y + \frac{a}{b+1} y^{b+1} \right) \frac{dy}{dx} = Q \frac{e-x}{e} \quad (192)$$

Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = x$ en van $y = h_0$ tot $y = y$ ontstaat:

$$Q \left(x - \frac{x^2}{2e} \right) = \frac{1}{2} k_0 h_0^2 + \frac{a}{(b+1)(b+2)} h_0^{b+2} - \frac{1}{2} k_0 y^2 - \frac{a}{(b+1)(b+2)} y^{b+2} \quad (193)$$

Daar voor $x = e$, $y = H_0$ is dus ook:

$$Q = \frac{k_0 h_0^2 + \frac{2a}{(b+1)(b+2)} h_0^{b+2} - k_0 H_0^2 - \frac{2a}{(b+1)(b+2)} H_0^{b+2}}{e} \quad (194)$$

terwijl de vergelijking voor S alleen hierin met vergelijking 194 verschilt, dat nu in den noemer e^2 voorkomt.

d. Enkele opmerkingen in verband met de toepassing van de afgeleide vergelijkingen

De vergelijkingen van dit type zullen waarschijnlijk wel het meeste worden toegepast; althans voor die gronden, waarvan de doorlaatfactoren in monsters op het laboratorium kunnen worden bepaald. Meestal zal namelijk de doorlaatfactor wel geleidelijk veranderen. Het verdient overigens aanbeveling dit type vergelijking zooveel mogelijk te gebruiken, daar zij veel beknopter zijn dan de vergelijkingen voor het geval 2 of meer lagen in het profiel voorkomen.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat in hoofdstuk VI enkele resultaten, op infiltratieproefvelden verkregen, zullen worden besproken; tevens zal daar worden aangegeven hoe men de functie van den doorlaatfactor met de hoogte boven de ondoorlatende laag uit de in het laboratorium bepaalde en op de natuurlijke omstandigheden omgerekende doorlaatfactoren kan afleiden.

C. De ondergrond is doorlatend

Is de ondergrond doorlatend, d.w.z. is de grond onder den bodem van de greppels of onder de drains doorlatend, dan moeten de grootheden H_0 en h_0 weer gerekend worden vanaf de ondoorlatende laag. Daar nu echter, anders dan bij de ontwatering, de doorlaatfactoren van de verschillende lagen bekend moeten zijn, wil men de vergelijkingen kunnen toepassen, zullen dus hier vanaf de ondoorlatende laag de doorlaatfactoren in de verschillende lagen bekend zijn. De afleiding van de vergelijkingen geschiedt dan ook op dezelfde wijze, als wanneer de bodem van de greppels resp. de drains op de ondoorlatende laag zouden liggen, daar men eenvoudig veronderstelt, dat de greppels tot de ondoorlatende laag doorloopen resp. de drains op de ondoorlatende laag liggen. Evenals bij de homogene gronden is besproken, kan een correctie worden aangebracht voor het drukverlies, dat optreedt, doordat de greppelbodem enz. in werkelijkheid niet op de ondoorlatende laag ligt. De correctie hangt — wanneer we de contractie van de stroombanen bij den greppelbodem verwaarloosen — echter nu niet alleen af van de ligging van de ondoorlatende laag onder den greppelbodem, maar ook van de verhouding van de gemiddelde doorlatendheid van de laag in het watervoerende profiel boven den bodem van de greppel tot de gemiddelde doorlatendheid van de laag in het watervoerend profiel onder den bodem van de greppels, terwijl bovendien de dikte van deze lagen van invloed is. Het zal immers duidelijk zijn, dat voor de hoeveelheid water, die uit de greppel in het land infiltreert in de laag boven den greppelbodem geen correctie behoeft te worden aangebracht en het dus van

de verhouding van de hoeveelheid water, die door de laag onder den bodem der greppels infiltreert tot de hoeveelheid water, die in totaal wordt geïnfiltreert afhangt, hoe groot deze correctie is. Ligt de bodem van de greppels r meter boven de ondoorlatende laag, dan is dus met voldoende benadering de correctie van den factor e , indien de gemiddelde doorlaatfactor van het geheele watervoerende profiel K is en van de laag onder den greppelbodem k (deze correctie wordt dus bij e in de vergelijkingen met de grootheid Q opgeteld):

$$\text{correctie} = \frac{rk}{2Kh_0} (r + b)^1 \quad (195)$$

Hierbij kan worden opgemerkt, dat deze gemiddelde doorlaatfactoren z.g. schijnbare doorlaatfactoren zijn (zie hoofdstuk V). Zij worden dan ook berekend als ter plaatse voor de berekening van deze schijnbare doorlaatfactoren zijn aangegeven en wel resp. voor de laag van 0 tot h_0 en van 0 tot r .

Tenslotte kan, evenals bij de homogene gronden, worden opgemerkt, dat ook de gecorrigeerde vergelijkingen niet meer geldig zijn, wanneer de ondoorlatende laag zeer diep onder het maaiveld ligt, zie verder aldaar.

Neemt de doorlatendheid van den grond lineair met de hoogte boven de ondoorlatende laag toe, dan luidt dus de gecorrigeerde vergelijking (zie ook vergelijking 190)

$$Q = \frac{k_0 h_0^2 + \frac{1}{3} a h_0^3 - k_0 H_0^2 - \frac{1}{3} a H_0^3}{e + \frac{rk}{2h_0 K} (r + b)} \quad (196)$$

of dus

$$S = \frac{Q}{e} = \frac{k_0 h_0^2 + \frac{1}{3} a h_0^3 - k_0 H_0^2 - \frac{1}{3} a H_0^3}{e \left(e + \frac{rk}{2h_0 K} (r + b) \right)} \quad (197)$$

HOOFDSTUK V

Vereenvoudigde berekeningen

De reële, de effectieve en de schijnbare doorlaatfactor

A. Inleiding

Zooals in hoofdstuk I reeds is medegedeeld, ligt het in de bedoeling in dit hoofdstuk te doen uitkomen, dat door toepassing van de *eenvoudigste* verge-

¹⁾ Bij het gebruik van drains vervalt de factor b .

lijkingen toch vaak resultaten verkregen kunnen worden, waarmede of genoeg kan worden genomen of althans een juiste indruk verkregen kan worden van de vraagstukken, waarom het gaat (zie ook hoofdstuk VI).

Bovenbedoelde vergelijkingen zijn voornamelijk de eenvoudige vergelijkingen, die voor homogene gronden zijn afgeleid, maar die ook voor heterogene gronden kunnen worden toegepast; alleen dient men zich dan een klaar beeld te vormen van wat deze toepassing beteekent. Zooals we verder zullen zien, voert deze toepassing tot een onderscheiding in reële, effectieve en schijnbare doorlaatfactoren.

Behalve de genoemde vergelijkingen komen dan nog in aanmerking de vergelijkingen voor 2 of desnoods 3 lagen in het profiel. Ook deze vergelijkingen zijn namelijk steeds toe te passen; dus ook in het geval, dat de doorlatendheid geleidelijk (continue) met de diepte onder het maaiveld verandert. De bedoelde vergelijkingen zijn grootendeels zoo eenvoudig, dat het mij voorkomt, dat niets een algemeene toepassing daarvan in den weg staat. Ik heb daarom gemeend, dat een korte samenvattende bespreking van de bovengenoemde vergelijkingen, waarbij ook enkele getallen-voorbeelden gegeven zullen worden, van belang zou zijn; te meer, daar waarschijnlijk dat gedeelte der lezers, dat minder mathematisch geschoold is, zich wel tot de lezing van dit en het volgende hoofdstuk en enkele gedeelten van hoofdstuk III zal beperken.

Uitdrukkelijk moet echter worden opgemerkt, dat er gevallen voorkomen, waarbij juist de wijze van verandering van de doorlatendheid van laag tot laag een essentieel punt vormt en waarbij men dus nauwkeuriger methoden van berekening moet toepassen. Voor zoover daarvan in dit of het volgende hoofdstuk sprake is, zal getracht worden de beteekenis daarvan ook met woorden te omschrijven.

B. Korte bespreking van de eenvoudigste vergelijkingen voor ontwatering en infiltratie

§ 1. ONTWATERING

De toepassing van de vergelijkingen voor de kwantitatieve strooming van het water uit den grond naar drains, greppels, slooten enz. zal in hoofdzak tweeërlei zijn, nl.:

- a. De doorlaatfactor is bekend (b.v. met behulp van de boorgatmethode bepaald) en hetzij de drainafstand bij een bekenden afvoer, bekenden grondwaterstand midden tusschen en boven de drains en bekende draindiepte, hetzij de waterafvoer resp. de grondwaterstand bij de andere bekende gegevens, enz. moet worden berekend.

- b. De doorlaatfactor is onbekend en moet worden berekend uit een bekend debiet, bekenden drainafstand, bekende draindiepte en bekende grondwaterstanden.

a. De doorlaatfactor is bekend

Voor deze gevallen kan gebruik gemaakt worden van de vergelijkingen:

$$Q = \frac{k (H_o^2 - h_o^2)}{e} \quad (198)$$

$$\text{of } S = \frac{k (H_o^2 - h_o^2)}{e^2} \quad (199)$$

voorzover de doorlaatfactor van de beschouwde laag in zijn geheel met behulp van de boorgatenmethode is bepaald.

In deze vergelijkingen stelt Q het debiet in m^3 per etmaal voor, dat per strekkenden meter drain (greppel, enz.) van één zijde komend wordt afgevoerd, terwijl S dat debiet voorstelt, uitgedrukt als een schijf water (in meters), dat per 24 uur door de drains enz. wordt afgevoerd. k is de doorlaatfactor en wordt aangegeven in meters per 24 uur, e is de halve drainafstand in meters, terwijl H_o en h_o resp. den grondwaterstand midden tusschen de drains (greppels, enz.) en boven de drains (in de greppels, enz.) voorstelt, *gerekend vanaf de ondoorlatende laag* en uitgedrukt in meters, waarbij dus H_o steeds grooter is dan h_o (zie b.v. figuur 1). Bevindt zich geen of een te verwaarloozen hoeveelheid water boven de drains, in de greppels, enz. dan is h_o gelijk aan den afstand van den bodem van de greppel, van de drainreeks enz. boven de ondoorlatende laag. Een getallenvoorbeeld moge dit verduidelijken.

Op een perceel knikkgigen zwaren kleigrond in het noorden van ons land werd met behulp van de boorgatenmethode bepaald, dat de doorlaatfactor van dezen grond tot ± 1 meter diepte 0.026 m p. 24 uur bedroeg. Legt men de drains op gemiddeld 90 cm diepte en op een onderlingen afstand van 8 meter, dan zal, wanneer gezorgd wordt, dat de drainsleuven goed doorlatend zijn en dus geen water boven de drains komt te staan, zeer gemakkelijk met behulp van bovenstaande vergelijking 198 kunnen worden berekend, hoe groot de maximale hoeveelheid overtollig regenwater is, die door den grond kan worden afgevoerd. Dit laatste is namelijk het geval, wanneer de grondwaterstand midden tusschen de drains tot het maaiveld is gestegen. Verder zal de doorlatendheid van den grond op grootere diepte dan 1 meter waarschijnlijk nog kleiner tot veel kleiner zijn en dus te verwaarloozen zijn. Is dit het geval dan is $h_o = 0.1$ en $H_o = 1.0$, $e = 4$ en $k = 0.026$, zoodat dus $S = \frac{0.026 (1.0^2 - 0.1^2)}{16}$

= 0.0016 meter of 1.6 mm per 24 uur. Het zal duidelijk zijn, dat deze afvoer-

capaciteit totaal onvoldoende is. Het gevolg is dan ook, dat in een regenrijke periode de grondwaterstand snel tot het maaiveld zal oploopen en water bovengronds (of door het bovenste mogelijk iets beter doorlatende laagje) naar de drainsleuven zal stroomen en hierin wegzakken. Zou men dit land dan ook draineeren, dan zou men vooruit kunnen voorspellen, dat de drains hier (nl. voor den bovengrondsch en afvoer) alleen effect zouden hebben, zoolang de doorlatendheid van den grond in de drainsleuf goed blijft. De drains zouden hier dus als open greppels werken. Zoodra de doorlatendheid van den grond in de drainsleuven weer klein geworden zou zijn, zou ieder effect van de drainage practisch verdwenen zijn. Voor dezen grond is een even goede ontwatering te krijgen door het bol leggen van het land tusschen ondiepe greppeltjes.

Een getallen-voorbeeld van een ander geval, waarbij de grond onder de drains als doorlatend moet worden beschouwd en waarbij eveneens deze eenvoudigste vergelijking is toegepast, is in verband met andere waarnemingen besproken in een vroegere publicatie (nl. Bijdragen tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, N^o. 4; zie noot 4), waarnaar mag worden verwezen.

Verder spreekt het vanzelf, dat het soms voordeelen geeft, de vergelijking voor 2 of 3 lagen in het profiel toe te passen, waardoor reeds in zekere mate met de heterogeniteit rekening is gehouden. Dit is b.v. het geval, wanneer met de boorgatenmethode de doorlatendheid bepaald is in 2 lagen b.v. van 50 — 100 (drains liggen in dit denkbeeldig geval op 100 cm onder het maaiveld) en van 100 — 150 cm onder het maaiveld. Stel b.v., dat daarvoor gevonden is resp. 1.0 en 0.2 m p. 24 uur, terwijl dieper dan 150 cm de doorlatendheid zoo klein is, dat de strooming door de dieper dan 150 cm gelegen lagen naar de drains te verwaarloozen is, zoodat de ondoorlatende laag op 150 cm onder het maaiveld is te veronderstellen. Neemt men nu aan, dat bij een afvoer van 5 mm overdag de grondwaterstand niet hooger dan 50 cm onder het maaiveld mag stijgen, dan kan de benodigde drainafstand worden berekend door toepassing van de vergelijkingen voor 2 lagen in het watervoerende profiel, waarbij we zullen veronderstellen, dat de drainsleuven, stootvoegen en drainbuizen zoo doorlatend zijn, dat geen water boven de drains komt te staan.

De vergelijking voor 2 lagen in het watervoerend profiel luidt in dit geval:

$$S = \frac{1}{e^2} (k_2 H_0^2 + 2h_1 (1-n_1) k_1 H_0 + k_1 h_1^2 (n_1-1) - k_1 h_0^2) \quad (200)$$

In het gegeven geval is $S = 5$ mm of 0.005 m p. 24 uur. k_2 en k_1 zijn resp. de doorlaatlactoren van de bovenste en de onderste laag, dus hier resp. 1.0 en

0.2 m p. 24 uur. H_0 en h_0 hebben dezelfde beteekenis als in de vergelijkingen 197 en 198; zij worden dus gerekend vanaf de ondoorlatende laag en uitgedrukt in meters en zijn hier resp. 1.0 en 0.5 meter. Onder h_1 wordt de dikte van de onderste laag — dus van 1.0 tot 1.5 meter onder het maaiveld — verstaan en en eveneens uitgedrukt in meters; zij is hier dus 0.5 meter. Tenslotte beteekent

$n_1 = \frac{k_2}{k^1}$ of dus hier $1.0 : 0.2 = 5$, zoodat

$$0,005 = \frac{1}{e^2} (1,0 \cdot 1^2 + 2 \cdot 0,5 (1-5) 0,2 \cdot 1,0 + 0,2 \cdot 0,5^2 (5-1) - 0,2 \cdot 0,5^2)$$

of dus $e = 8.4$ m, zoodat de drainafstand dus ± 17 meter kan bedragen. Hierbij kan worden opgemerkt, dat ofschoon natuurlijk volstrekt niet bedoeld is te zeggen, dat 5 mm afvoer bij een maximalen grondwaterstand van 50 cm onder het maaiveld als de juiste maat voor de drainagebehoefte kan worden aangemerkt, we voorloopig meenen met dezen eisch te kunnen volstaan. Opgemerkt moet echter worden, dat onze kennis op dat gebied — vooral ook van de landbouwkundige zijde (opbrengsten; bedrijfszekerheid) bekeken — nog zeer klein is.

Zou men door de één of andere oorzaak moeten aannemen, dat er water boven de drains zou komen te staan, zoo zou de afstand bij dezelfde eischen aan den waterafvoer kleiner moeten zijn, hetgeen men gemakkelijk hierdoor kan aantoonen door in boven gegeven voorbeeld voor h_0 een grootere waarde dan 0,5 in de vergelijking in te vullen, waardoor een kleinere drainafstand berekend zou worden. Een dikke laag water boven de drains (ontstaan door een verstopt raken van de drainbuizen zelf, door het verstopt worden van de stootvoegen of door het ondoorlatend worden van de drainsleuf) is dan ook fataal voor een goede werking van de drainage.

Verder kan nog worden opgemerkt, dat op soortgelijke wijze ook de vergelijkingen voor 3 lagen in het watervoerend profiel zijn toe te passen, waarvoor naar de voorafgaande hoofdstukken mag worden verwezen. Men denke erom de juiste vergelijking in verband met de grootte van h_0 ten opzichte van h_1 en eventueel h_2 te kiezen (zie hoofdstuk II, sub II B, § 2, α).

Tenslotte kan in dit verband nog worden opgemerkt, dat met de boorgatenmethode z.g. schijnbare doorlaatfactoren bepaald worden, terwijl men in genoemde berekeningen feitelijk z.g. effectieve doorlaatfactoren noodig heeft. De fout, die men daarbij *kan* maken, zal in sub C van dit hoofdstuk besproken worden.

b. De doorlaatfactor is onbekend

Is de doorlaatfactor onbekend en ligt het juist in de bedoeling deze te berekenen uit de waargenomen grondwaterstanden en debietcijfers, dan is het gewenscht hier 2 gevallen te onderscheiden, nl.

1. De ligging van de ondoorlatende laag is bekend en
2. De ligging van de ondoorlatende laag is onbekend.

1. De ligging van de ondoorlatende laag is bekend

Is de ligging van de ondoorlatende laag bekend, dan kunnen we dezelfde vergelijkingen toepassen als in sub *a* zijn gebruikt. Het debiet en de daarbij behorende grondwaterstand midden tusschen en boven de drains evenals de drainafstand en draindiepte moeten dan bekend zijn. Het verdient aanbeveling de gegevens daartoe af te leiden uit de $Q : m_0$ - en $Q : n$ -lijnen, waarvoor naar hoofdstuk III mag worden verwezen. Deze lijnen zijn nl. de gemiddelden van vele waarnemingen en daar zij het verband tusschen debiet en grondwaterstand midden tusschen de drains resp. tusschen debiet en waterstand boven de drains aangeven, kunnen dus uit deze lijnen bij een bepaald debiet gemakkelijk de bijbehorende waarden van m_0 en n en daarmee (al of niet omgerekend) van H_0 en h_0 worden afgeleid. Hier zullen we volstaan met een getallen voorbeeld te geven, waarbij de grond onder de drains ondoorlatend is. Dit is b.v. vaak (er zijn echter ook vele gevallen, waarbij dit niet optreedt) het geval bij gedraineerde zware kleigronden, waarbij ook onder de drains zware klei voorkomt. Is de drainreeks b.v. 100 m lang en bedraagt het debiet tusschen de drains de grondwaterstand tot 70 cm onder het maaiveld reikt en de drains gemiddeld op 120 cm onder het maaiveld liggen, dan is de doorlaatfactor van den grond te berekenen met behulp van de vergelijking 198; immers: Het debiet bedraagt immers 200 l per uur of $\frac{200}{1000} \cdot 24 = 4.8 \text{ m}^3$ per uur per 100 m drain van twee zijden komen. Per strekkenden meter van één zijde komen is dus het debiet $\frac{1}{200} \cdot 4.8 = 0.024 \text{ m}^3$. Verder is $h_0 = 0.1$ en $H_0 = 1.2 - 0.7 = 0.5$ en $e = 5$, zoodat

$$0,024 = \frac{k(0,5^2 - 0,1^2)}{e} \text{ of } k = 0,5 \text{ m p. 24 uur.}$$

Hierbij kan worden opgemerkt, dat wanneer de betreffende grond in werkelijkheid heterogeen is — b.v. de doorlatendheid neemt met de diepte onder het maaiveld af — men op deze wijze dus een soort gemiddelden doorlaatfactor berekent. Deze gemiddelde doorlaatfactor is de z.g. effectieve doorlaatfactor. Zij zal later uitvoeriger besproken worden. Hier kunnen we volstaan met op te merken, dat men een indruk van de heterogeniteit krijgt door b.v. bij verschillende grondwaterstanden midden tusschen en boven de drains en de daarbij behorende debietwaarden den doorlaatfactor te berekenen. Is b.v.

in het bovenbehandelde voorbeeld bij een debiet van 400 l de grondwaterstand 60 cm onder het maaiveld en is ook nu b.v. h_0 nog 0.1, dan berekent men nu een doorlaatfactor van ± 0.7 . Hieruit is dus af te leiden, dat de gemiddelde doorlatendheid van de laag vanaf den drain tot 50 cm boven de drains kleiner is dan de gemiddelde doorlatendheid van de laag grond vanaf den drain tot 60 cm boven den drain of m.a.w. de doorlatendheid neemt dus met een stijgende hoogte boven de drains toe.

Verder kan men ook nu de vergelijkingen voor 2 of meer lagen in het watervoerende profiel toepassen. Dit kan men b.v. doen, wanneer in denzelfden grond drains (gemiddeld b.v. 100 cm onder het maaiveld) en greppels (diepte b.v. 60 cm) voorkomen en men na eenige jaren de doorlatendheid van den grond wil vergelijken. Is de grond onder de drains ondoorlatend dan kan men in beide gevallen de ondoorlatende laag op 100 cm onder het maaiveld kiezen (verondersteld althans dat uit de $Q : m_0$ -lijn voor de begreppelde strooken blijkt, dat de grond onder den greppelbodem doorlatend is; zie hoofdstuk III; en nu met behulp van de vergelijking voor 2 lagen in het watervoerende profiel in beide gevallen de doorlatendheid van de laag van 60 — 100 cm onder het maaiveld (0 — 40 cm boven de ondoorlatende laag) en b.v. 30 — 60 cm onder het maaiveld (40 — 70 cm boven de ondoorlatende laag) bepalen, indien namelijk in beide gevallen de grondwaterstand tot 30 cm onder het maaiveld is opgelopen. Ook nu doet men het beste de benodigde gegevens aan de $Q : m_0$ - en $Q : n$ -lijnen te ontleenen.

Ook hierbij kan worden opgemerkt, dat men van de betreffende lagen de effectieve doorlaatfactoren bepaalt.

2. De ligging van de ondoorlatende laag is niet bekend

Is de ligging van de ondoorlatende laag niet bekend, d.w.z. bevindt zij zich ergens op een onbekende plaats onder de drains resp. onder den bodem van de greppel, enz. zoo moeten bovenstaande vergelijkingen vervangen worden door een overeenkomstige vergelijking, waarbij de laag grond onder de drains enz. of algemeen onder het 0-vlak (vlak door den waterspiegel boven de drains, in de greppels, enz. wanneer het debiet juist nul geworden is; bij drains komt dit vlak in het algemeen overeen met het vlak van de drains) afzonderlijk wordt genomen evenals de laag daarboven. Voor de eerstgenoemde laag voeren we het begrip „totaal leidingsvermogen“ voor water = G in, dat de hoeveelheid water aangeeft, die bij gegeven grondwaterstanden midden tusschen en boven de drains en bij gegeven drainafstand door deze laag naar de drains enz. stroomt. Verder noemen we m_0' en n' resp. de hoogte van den grondwaterspiegel midden tusschen drains boven het nulvlak en de hoogte van den grondwaterspiegel boven de drains boven het nulvlak. De nu te gebruiken vergelijkingen zijn:

In het eerste geval geldt:

$$S = \frac{k(h_o^2 - H_o^2)}{e^2} \quad (203)$$

waarin nu h_o en H_o den waterstand in de greppels resp. den grondwaterstand midden tusschen de greppels en boven de ondoorlatende laag, beide vermeerderd met de capillaire stijghoogte, voorstellen.

In het tweede geval geldt:

$$S = \frac{2kh(h_o - H_o)}{e^2} \quad (204)$$

waarin h den afstand van het maaiveld tot de ondoorlatende laag voorstelt of, daar de dikte van de graszode kan worden afgetrokken, van 5 à 10 cm onder het maaiveld tot de ondoorlatende laag. Voor $h_o - H_o$ kan men eenvoudig het verschil van den waterstand in de greppels en den grondwaterstand midden tusschen de greppels nemen, dat natuurlijk ook nu uitgedrukt moet worden in meters.

Uit de formules blijkt, dat men S (watergebruik), h_o (waterpeil) in de greppels, H_o (grondwaterstand midden tusschen de greppels of e (halve greppelafstand) kan berekenen, wanneer de andere grootheden bekend zijn. Gezien het feit, dat deze berekeningen volkomen analoog zijn aan de in § 1 vermelde berekeningen, lijkt het mij niet noodig hiervoor een getallenvoorbeeld te geven. Wel kan nog even worden opgemerkt, dat het voor de hand ligt, dat H_o altijd zoodanig moet zijn, dat bij den diepsten grondwaterstand (grootste watergebruik) de bovenkant van de capillaire laag zich nog in den wortelhorizont moet bevinden.

C. Bespreking van de foutenmogelijkheden bij de toepassing van de onder sub B besproken eenvoudigste vergelijkingen. De reële, de effectieve en de schijnbare doorlaatfactor

§ 1. ALEMEENE BESCHOUWINGEN OVER DEN BEELEN, DEN EFFECTIEVEN EN DEN SCHIJNBAREN DOORLAATFACTOR. DE DEFINITIES VAN DEZE DOORLAATFACTOREN

a. De reële doorlaatfactor

Bij de in sub B besproken eenvoudigste vergelijkingen is reeds medegedeeld, dat bij toepassing van deze vergelijkingen op heterogene gronden — vooral wanneer de doorlaatfactor geleidelijk in het profiel verandert — een soort gemiddelde doorlaatfactor berekend wordt. Verder hebben we bij de uitvoerige

berekeningen van de 3 voorbeelden (zie hoofdstuk III, E γ) reeds opgemerkt, dat, wanneer we bij een geleidelijk veranderenden doorlaatfactor den doorlaatfactor van een laag van eindige afmetingen willen aangeven, we ook tot een soort gemiddelden doorlaatfactor zullen moeten komen. Het zal dan ook wel duidelijk zijn, dat onder een reëlen doorlaatfactor het volgende dient te worden verstaan:

De reële doorlaatfactor is de doorlaatfactor, die de grond werkelijk heeft. Een laag grond van eenige dikte heeft alleen een reëlen doorlaatfactor, wanneer die laag volkomen homogeen is. Voor een grond, waarin de doorlaatfactor geleidelijk verandert, is alleen de doorlaatfactor van een oneindig dunne laag reëel. De functie van deze verandering van den doorlaatfactor geeft dus de functie van de verandering van den reëlen doorlaatfactor aan.

b. De effectieve doorlaatfactor

Past men de in sub B, § 1, besproken vergelijkingen 198 en 199 (dus ook de vergelijkingen 3 tot 5) toe op heterogene gronden voor de berekening van den doorlaatfactor, dan wordt, zooals reeds vaker is opgemerkt, een soort gemiddelde doorlaatfactor berekend. *De berekende doorlaatfactor geldt alleen voor de H_0 - en h_0 -waarden, waarbij de berekening is uitgevoerd.* Neemt b.v. in werkelijkheid de doorlatendheid in het profiel met de diepte onder het maaiveld af, dan zal de doorlaatfactor, die met behulp van de vergelijking 198 berekend wordt, afhangen van de grootte van h_0 en H_0 . Bij kleinere h_0 - en H_0 -waarden zal in het gegeven geval dan natuurlijk een kleinere gemiddelde doorlaatfactor berekend worden dan bij een hogere Q -waarde en dus bij hogere h_0 - en H_0 -waarden. Den, door toepassing van de vergelijkingen 198 en 199 berekenenden, gemiddelden doorlaatfactor zullen we den effectieven doorlaatfactor noemen, die dus alleen geldt voor een bepaalden toestand (h_0 , H_0 , Q en natuurlijk e). Verder zal het duidelijk zijn, dat deze effectieve doorlaatfactor niet alleen zal afhangen van de grootte van h_0 en H_0 op zich zelf, maar ook van de *verhouding* van h_0 ten opzichte van H_0 . Zou het b.v. in het gegeven voorbeeld — de doorlatendheid neemt dus met de diepte onder het maaiveld af — eens mogelijk zijn bij 2 gelijke H_0 -waarden en bij verschillende h_0 -waarden den doorlaatfactor te berekenen, dan zou blijken, dat de effectieve doorlaatfactor in de beide gevallen verschillend was en het grootste was in dat geval, waarbij h_0 het grootste was. De effectieve doorlaatfactor hangt dus zoowel van H_0 als h_0 af.

Onder den effectieven doorlaatfactor dient dan ook die doorlatendheid te worden verstaan, die de grond zou moeten hebben, opdat, bij de gemaakte veronderstellingen en bij gegeven H_0 , h_0 en e , het debiet Q is.

Gebruiken we dus de vergelijkingen 198 en 199, dan is de effectieve door-

laatfactor met die vergelijking verkregen den doorlaatfactor, die een homogenen grond zou moeten hebben *om onder dezelfde omstandigheden (zelfde H_0 , h_0 en e) eenzelfde debiet te geven.*

Bij gebruik van de vergelijkingen voor sprongsgewijze verandering van de doorlatendheid (vergelijkingen voor 2 en meer lagen in het profiel) zullen voor ieder laag ook nu effectieve doorlaatfactoren worden verkregen, wanneer de doorlatendheid in werkelijkheid anders verloopt, dan door de veronderstelling van 2 of meer lagen in het profiel is aangenomen. *De effectieve doorlaatfactoren van deze lagen geven dus die doorlaatfactoren aan, die een gelaagden, maar in iedere laag volkomen homogenen grond zou moeten hebben om bij dezelfde H_0 , h_0 en e -waarden hetzelfde debiet te geven.*

Is de grond onder de drains doorlatend en de ligging van de ondoorlatende laag onbekend, zoo verdeelen we, zooals we gezien hebben, het watervoerende profiel in een gedeelte onder het vlak van de drains (feitelijk onder het 0-vlak) en in een gedeelte daarboven. Van het eerste gedeelte bepalen we het totale geleidingsvermogen, dat feitelijk ook een effectieve grootte is, ofschoon men het ook als een reële kan opvatten. De doorlaatfactor van het bovenste gedeelte van het watervoerende profiel is echter een effectieve factor. *Onder den effectieven doorlaatfactor van de laag boven den drain verstaat men in dit geval dien doorlaatfactor, die een homogenen grond boven den drain (0-vlak), bij deze H_0 , h_0 en e -waarden en bij hetzelfde totaal geleidingsvermogen in de laag onder de drains, zou moeten hebben om dezelfde hoeveelheid water naar de drains, enz af te voeren.*

Verder kan nog worden opgemerkt, dat, wanneer er een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar het wateroppervlak in de sloot, waarin de drains uitmonden, optreedt, men eveneens een effectieve grootte berekend, wanneer men deze hangkromme, niet in aanmerking neemt.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat, daar over het algemeen het aantal volkomen homogene gronden niet groot is, men bij toepassing van de eenvoudigste in sub B besproken vergelijkingen dus vrijwel steeds effectieve doorlaatfactoren berekend.

c. De schijnbare doorlaatfactor

Behalve den effectieven doorlaatfactor bestaat er ook een ander soort „gemiddelden” doorlaatfactor, die we den *schijnbaren doorlaatfactor* zullen noemen. Deze doorlaatfactor zullen we eerst in een aantal gevallen berekenen, alvorens hiervan een definitie te geven.

Stel b.v. eens, dat in een bepaald geval in werkelijkheid drie op zich zelf homogene lagen in het profiel voorkomen. Bevindt het phreatisch oppervlak zich in de bovenste laag dan vloeit door een verticale doorsnede van het profiel

bij het verval I ter plaatse een hoeveelheid water q (zie figuur 10 en vergelijking 44).

$$q = h_1 k_1 I + (h_2 - h_1) k_2 I + (y - h_2) k_3 I \quad (205)$$

Was echter het geheele profiel als een geheel beschouwd, dan was een soort gemiddelde doorlaatfactor, nl. de schijnbare doorlaatfactor (k_{sch}) berekend en voor q gevonden

$$q = k_{sch} \cdot y \cdot I \quad (206)$$

Daar q en I in beide vergelijkingen aan elkaar gelijk zijn, volgt dus uit de vergelijkingen 205 en 206:

$$k_{sch} \cdot y = h_1 k_1 + (h_2 - h_1) k_2 + (y - h_2) k_3 \quad (207)$$

of indien $h_2 - h_1 = d_2$ en $y - h_2 = d_3$ en $h_1 = d_1$

$$k_{sch} = \frac{d_1 k_1 + d_2 k_2 + d_3 k_3}{y} \quad (208)$$

Hierbij kan worden opgemerkt, dat, wanneer in het gegeven voorbeeld in den grond met de drie lagen de gemiddelde doorlaatfactor was bepaald met de boorgat methode, waarbij dus de vergelijking voor homogene of homegeen gedachte gronden is toegepast (zie lit. noot 4), men den schijnbaren doorlaatfactor van dit profiel bepaalt. Dit is gemakkelijk op soortgelijke wijze te bewijzen als boven is geschied. Door gelijkstelling van de vergelijking voor de opstijging van het water in boorgaten voor homogene of homegeengedachte gronden en de vergelijking voor 3 lagen in het profiel komen we tot een vergelijking, die identiek is met de vergelijking 208.

Verder spreekt het vanzelf, dat we op soortgelijke wijze den schijnbaren doorlaatfactor berekenen kunnen, wanneer een ander aantal op zich zelf homogene lagen in het profiel van $y = 0$ tot $y = y$ aanwezig is. In dit geval is

$$k_{sch} = \frac{d_1 k_1 + d_2 k_2 + d_3 k_3 + d_4 k_4 + \text{enz.}}{y} \quad (209)$$

Bevinden deze lagen zich tusschen $y = y_1$ en $y = y_2$ dan is

$$k_{sch} = \frac{d_1 k_1 + d_2 k_2 + d_3 k_3 + d_4 k_4 + \text{enz.}}{y_2 - y_1} \quad (209a)$$

Verandert de doorlatendheid in het profiel geleidelijk volgens de een of andere functie met de hoogte boven de ondoorlatende laag (of boven een bepaald vlak) dan wordt de schijnbare doorlaatfactor ook nu op soortgelijke wijze berekend:

Verandert b.v. de doorlaatfactor in het profiel boven het 0-vlak volgens de

functie $k_{m'} = f(m')$ dan stroomt door een verticale doorsnede m' van deze laag boven dit 0-vlak bij een verval I dus een hoeveelheid water:

$$q = \int_{m'=0}^{m'=m'} k_{m'} I dm' \quad (210)$$

Was de beschouwde laag als een geheel beschouwd dan was dus met den schijnbaren doorlaatfactor gerekend en was gevonden:

$$q = k_{sch} m' I \quad (211)$$

Uit de vergelijking 210 en 211 volgt:

$$k_{sch} = \frac{\int_{m'=0}^{m'=m'} k_{m'} dm'}{m'} \quad (212)$$

Het zal duidelijk zijn, dat ook voor een bepaalde laag de schijnbare doorlaatfactor berekend kan worden; zoo is b.v. voor de laag van $y = y_1$ tot y_2 boven de ondoorlatende laag:

$$k_{sch} = \frac{\int_{y=y_1}^{y=y_2} k_y dy}{y_2 - y_1} \quad (213)$$

Verder is het op soortgelijke wijze ook mogelijk den schijnbaren doorlaatfactor van een profiel te berekenen, waarin gedeeltelijk homogene lagen, gedeeltelijk lagen voorkomen, waarin de doorlatendheid geleidelijk verandert.

Uit het bovenstaande volgt dus, dat de schijnbare doorlaatfactor van het watervoerend profiel — afgezien van de wijze, waarop de reële doorlaatfactor in dit profiel verandert — *alleen* bepaald wordt door de doorsnede van het watervoerende profiel, waarvan men den schijnbaren doorlaatfactor wil bepalen; d.w.z. dus b.v. midden tusschen de drains alleen van H_0 , enz. Het spreekt vanzelf, dat de schijnbare doorlaatfactor, naast de doorsnede van het geheele beschouwde watervoerend profiel, ook afhangt van de dikte, het aantal en de doorlatendheid van de lagen, waaruit de beschouwde doorsnede van het profiel bestaat of de wijze, waarop de reële doorlaatfactor in dit profiel verandert.

De schijnbare doorlaatfactor is dus die doorlaatfactor, die een volkomen homogeen profiel of laag uit dat profiel zou moeten hebben om bij hetzelfde verval eenzelfde hoeveelheid water door te laten.

Het verschil tusschen den effectieven en den schijnbaren doorlaatfactor is, dat we bij den schijnbaren doorlaatfactor alleen den gemiddelden doorlaat-

factor van één doorsnede van een watervoerend profiel (of laag daaruit) beschouwen, terwijl we bij den effectieven doorlaatfactor den gemiddelden doorlaatfactor van het geheele profiel resp. de geheele laag berekenen. Beschouwen we dus b.v. het geval, dat de grond onder de drains ondoorlatend is, geen water boven de drains voorkomt en de doorlatendheid met de diepte onder het maaiveld afneemt, dan berekent men bij de toepassing van de vergelijking 198 den gemiddelden doorlaatfactor van het profiel begrensd door het phreatisch oppervlak van drain tot drain en het vlak door de drains. De schijnbare doorlaatfactor geldt alleen voor één doorsnede en kan dus voor alle doorsneden op alle afstanden uit de drains berekend worden. Daar de doorlatendheid afneemt met de diepte onder het maaiveld en de doorsnede van het watervoerend profiel hier dus van het midden tusschen de drains naar de drains afneemt, zal de schijnbare doorlaatfactor dus des te kleiner zijn, naarmate een doorsnede van het watervoerend profiel dichter bij de drains beschouwd wordt. De schijnbare doorlaatfactor k_{sch} hangt hier dus af van den afstand x van den drain; d.w.z.; dat dus $k_{sch} = f(x)$. Het zal duidelijk zijn, dat in dit geval dus b.v.:

$$k_{\text{effectief}} = \frac{\int_{x=0}^{x=e} k_{sch} dx}{e} = \frac{\int_{x=0}^{x=e} f(x) dx}{e} \quad (214)$$

§ 2. BESPREKING VAN DE FOUT, DIE KAN WORDEN GEMAAKT, WANNEER BIJ DENZELFDE GRONDWATERSTAND MIDDEN TUSSEN DE DRAINS, GREPPELS ENZ. DE SCHIJNBARE DOORLAATFACTOR GELIJK GENOMEN WORDT AAN DEN EFFECTIEVEN DOORLAATFACTOR

Zooals reeds in § 1 medegedeeld is bepalen we met de boorgatmethode den schijnbaren doorlaatfactor van één of meer lagen in het profiel. Betreft het zandgronden en kunnen de doorlaatfactoren in het laboratorium bepaald worden met behulp van monsters (b.v. van de lagen 0 — 25 cm; 50 — 75 cm en 75 — 100 cm) dan bepalen we in werkelijkheid de schijnbare doorlaatfactoren van den grond in de betreffende lagen na omrekening op natuurlijke omstandigheden, terwijl in werkelijkheid b.v. het luchtgehalte niet sprongsgewijze maar geleidelijk in deze lagen kan veranderen en dus in werkelijkheid de doorlatendheid geleidelijk verandert. We kunnen ons nu afvragen welke fouten we kunnen maken, indien we deze doorlaatfactoren gebruiken voor berekeningen in verband met ontwaterings- of infiltratievraagstukken, waarbij men dus juist de effectieve doorlaatfactoren zou moeten weten. ¹⁾

¹⁾ De reële doorlaatfactoren zijn onbekend. De bedoelde berekeningen zijn exact mogelijk, wanneer bij de gegeven omstandigheden de effectieve doorlaatfactoren bekend zouden zijn.

Passen we de schijnbare doorlaatfactoren dan ook toe dan beteekent dit, dat we deze gelijk stellen aan de effectieve doorlaatfactoren. Het is gewenscht na te gaan, welke fout we daardoor zouden kunnen maken.

Om het bovenstaande na te kunnen gaan, bedenken we, dat de effectieve doorlaatfactor behalve door e zoowel door H_0 als door h_0 (dus de grondwaterstand midden tusschen en boven de drains, enz.) wordt bepaald. De schijnbare doorlaatfactor hangt echter alleen af van de dikte van de doorsnede, waarvoor hij geldt. Hebben we nu b.v. eens een geval, waarbij de grond onder de drains ondoorlatend is en boren we boorgaten midden tusschen de drains tot het vlak van de drains (dus tot de ondoorlatende laag), waarin we door middel van de boorgatenmethode den doorlaatfactor bepalen, dan is op deze wijze de schijnbare doorlaatfactor bepaald van een laag grond ter dikte van H_0 -meter. Het zal dan ook wel duidelijk zijn, dat hoe de doorlatendheid ook in het profiel moge veranderen de effectieve doorlaatfactor (afh. van H_0 en h_0) des te meer gelijk zal zijn aan den schijnbaren doorlaatfactor, naarmate h_0 meer gelijk is aan H_0 of dus naarmate de vorm van het phreatisch oppervlak tusschen de drains meer tot een plat vlak nadert. De schijnbare en effectieve doorlaatfactor van een laag van overal dezelfde doorsnede, d.w.z. zoodra deze laag *geheel* doorstroomend wordt, zijn dan ook gelijk, zooals b.v. optreedt, wanneer de capillaire laag bij infiltratie overal tot het maaiveld reikt of wanneer een laag grond wordt beschouwd onder de drains of onder het 0-vlak.

Verder zal het duidelijk zijn, dat ook bij sterk verschillende H_0 en h_0 -waarden de effectieve en de schijnbare doorlaatfactor des te meer aan elkaar gelijk zijn, naarmate de doorlatendheid langzamer met de hoogte boven de ondoorlatende laag verandert. Zijn dus H_0 en h_0 , of niet te sterk verschillend, of verandert de doorlatendheid niet te sterk, dan zal de fout, die men maakt door den schijnbaren doorlaatfactor gelijk te stellen aan den effectieven doorlaatfactor, steeds klein zijn.

Verandert de doorlatendheid snel met een toenemende diepte onder het maaiveld, of wat hetzelfde is, met een toenemende hoogte boven de ondoorlatende laag, terwijl bovendien h_0 en H_0 sterk verschillend zijn, zoo kunnen echter grootere fouten gemaakt worden, wanneer de schijnbare doorlaatfactor gelijk gesteld wordt aan den effectieven doorlaatfactor. Een voorbeeld moge dit verduidelijken:

Stel, dat de doorlaatfactor boven de ondoorlatende laag toeneemt volgens de vergelijking: $k_y = 10 y^3$. Is de watervoerende laag midden tusschen de drains 1 meter dik, dan is de schijnbare doorlaatfactor van dit profiel aldaar (deze doorlaatfactor zou dus ook met een boorgatmethode, in een boorgat tot de ondoorlatende laag en midden tusschen de drains, bepaald zijn):

$$k_{sch} = \frac{\int_{y=0}^{y=1} 10y^3 dy}{y} = 2,5 \text{ m p. 24 uur.}$$

Om nu een effectieven doorlaatfactor te kunnen berekenen, zullen we aannemen, dat de drains op de ondoorlatende laag liggen. Verder is b.v. $H_0 = 1\text{m}$; $e = 5\text{m}$ en $h_0 = 0$, zoodat h_0 en H_0 zoo verschillend mogelijk zijn (bij dezelfde e -waarde). Het debiet bedraagt in dit geval (exact berekend) $Q = \frac{H_0^5}{e} = \frac{1^5}{5} = 0.2 \text{ m}^3 \text{ p. 24 uur}$ per strekkenden meter en van één zijde komend.

Hadden we nu de vergelijking 198 toegepast, dan hadden we dus den effectieven doorlaatfactor (k_{ef}) berekend en wel hadden we gevonden $Q = \frac{k_{ef} H_0^2}{e} = \frac{k_{ef} \cdot 1^2}{5} = 0.2$ of $k_{ef} = 1 \text{ m}$ per 24 uur.

In het bovenstaande voorbeeld is dus de effectieve doorlaatfactor in werkelijkheid slechts $\frac{2}{5}$ gedeelte van den schijnbaren doorlaatfactor, zoodat we een groote fout gemaakt zouden hebben, wanneer we den schijnbaren doorlaatfactor gelijk genomen hadden aan den effectieven doorlaatfactor. Het bovenstaande zou dus het geval zijn geweest, wanneer we met de boorgatmethode alleen den doorlaatfactor van de betreffende 1 m dikke laag zouden hebben bepaald en nu b.v. eens zouden hebben uitgerekend hoeveel water de drains in dit terrein zouden afvoeren, wanneer dit gedraineerd zou zijn op de gegeven manier en verder H_0 en h_0 de gegeven waarden hadden. Een veel kleinere fout zouden we echter in dit geval gemaakt hebben, wanneer we den doorlaatfactor van de laag van 0—50 en 50—100 cm boven de drains afzonderlijk met de boorgatmethode hadden bepaald en nu weer berekeningen zouden willen maken over den afvoer van drains in dit terrein, wanneer dit ook nu op dezelfde manier gedraineerd was en H_0 en h_0 dezelfde waarde hadden, daar we nu de afname van de doorlatendheid naar diepere lagen reeds gedeeltelijk in aanmerking zouden hebben genomen. Dit mag hieronder nog eens aan het bovengenoemde geval duidelijk worden gemaakt.

Voor de schijnbare doorlaatfactoren voor de laag van 0—50 en 50—100 cm boven de drains zijn in het beschreven geval de schijnbare doorlaatfactoren midden tusschen de drains in te vullen, nl. resp. 0.32 en 2.18 m per uur. Berekenen we nu daarmede den afvoer, als $h_0 = 0$ en $H_0 = 1 \text{ m}$ en de drainsafstand gelijk 10 m is, dan moet daarvoor dus de vergelijking van 2 lagen in het profiel worden gebruikt, waarin dus $k_1 = 0.32$ en $k_2 = 2.18 \text{ m}$ per 24 uur, terwijl $n_1 = 2.18 : 0.32$. Met behulp van deze vergelijking (nl. de ver-

gelijking 29) is dus voor Q te berekenen 0.185 m^3 per 24 uur per strekkenden meter en van één zijde komend. Het debiet bedraagt in werkelijkheid 0.2 m^3 per 24 uur enz. Het verschil is dus nog slechts gering. Hieruit volgt dan ook, dat het voor het aangegeven doel aanbeveling verdient met de boorgatmethode de doorlatendheid van 2 of misschien in enkele gevallen van 3 lagen te bepalen, waardoor de fout, die ontstaan kan door gelijkstelling van de schijnbare en effectieve doorlaatfactoren, klein wordt. Ook uit een ander oogpunt is het gewenscht met de boorgatmethode zoo mogelijk van meer dan 1 laag in het profiel den doorlaatfactor te bepalen, nl. in het geval ook bij *andere* H_0 -waarden, dan waarbij de bepaling van den doorlaatfactor is geschied, berekeningen moeten worden uitgevoerd. In dat geval stellen we namelijk den schijnbaren doorlaatfactor voor als een reëelen factor, waarvan de mogelijke fouten echter in de volgende paragraaf besproken zullen worden.

§ 3. BESPREKING VAN DE FOUT, DIE KAN WORDEN GEMAAKT, WANNEER DE SCHIJNBARE OF DE EFFECTIEVE DOORLAATFACTOR BESCHOUWD WORDT ALS EEN REEELEN DOORLAATFACTOR

Verder kan het voorkomen, dat men met de boorgatmethode de doorlatendheid bepaald heeft van b.v. de laag van 30 — 100 cm onder het maaiveld en dat men bij berekeningen over waterafvoer enz. uit wil gaan van b.v. de laag van 50 — 100 cm onder het maaiveld. Past men nu den schijnbaren doorlaatfactor van de laag van 30 — 100 cm op de berekeningen van de laag van 50 — 100 cm toe, dan beteekent dit feitelijk, dat men aanneemt, dat de grond homogeen is. Men heeft dus den schijnbaren doorlaatfactor als een reëelen doorlaatfactor opgevat of zoo men wil; men heeft den schijnbaren doorlaatfactor bij een bepaalden grondwaterstand gelijk gesteld aan een effectieven doorlaatfactor bij een anderen grondwaterstand midden tusschen de drains. Het zal duidelijk zijn, dat de te maken fout des te grooter is, naarmate de doorlaatfactor sneller met de diepte onder het maaiveld verandert en naarmate de grondwaterstand, die men voor de berekening van b.v. den waterafvoer van drains, enz. toepast, meer verschilt van den grondwaterstand, waarbij men den schijnbaren doorlaatfactor heeft bepaald. Met het in § 2 genoemde voorbeeld is dit gemakkelijk in te zien door b.v. den schijnbaren doorlaatfactor eerst te berekenen bij een grondwaterstand van 1 meter boven de ondoorlatende laag ($k_{sch} = 2.5 \text{ m}$ per 24 uur) en nu met behulp van deze factor het debiet te berekenen, dat zal worden afgevoerd, wanneer midden tusschen de drains de grondwaterspiegel zich b.v. slechts 0.25 m boven de ondoorlatende laag bevindt, enz.

Een soortgelijke fout kan gemaakt worden, wanneer bij een bepaalden

grondwaterstand midden tusschen en boven de drains en met het daarbij optredende debiet de effectieve doorlaatfactor wordt berekend en nu voor diepere grondwaterstanden met behulp van dezen effectieven doorlaatfactor het debiet bij die diepere grondwaterstanden wordt berekend. In dit geval is dus de effectieve doorlaatfactor als een reëlen doorlaatfactor beschouwd. Ook nu is de fout des te grooter naarmate de twee genoemde grondwaterstanden meer uiteenwijken en de doorlatendheid sneller met de diepte onder het maaiveld verandert. In overigens overeenkomstige gevallen zal de fout, die op deze wijze gemaakt wordt, kleiner zijn dan wanneer de schijnbare doorlaatfactor als een reëlen doorlaatfactor wordt beschouwd, daar in het laatste geval ook nog de fout gemaakt wordt, dat de schijnbare doorlaatfactor gelijk gesteld wordt aan een effectieven doorlaatfactor.

Verder zal het duidelijk zijn, dat de te maken fout kleiner wordt, wanneer de schijnbare doorlaatfactor voor twee lagen in het watervoerend profiel afzonderlijk bepaald is.

Samenvattend kan dan ook gezegd worden, dat meestal de genoemde foutenmogelijkheden betrekkelijk klein zullen zijn, daar meestal de doorlatendheid niet zoo snel met de diepte onder het maaiveld zal veranderen, dat daardoor groote fouten zouden kunnen ontstaan. Het verdient echter aanbeveling voor genoemde doel met de boorgatenmethode van meer dan één laag in het watervoerend profiel den doorlaatfactor te bepalen of, indien het een zandgrond betreft, waarvan de doorlaatfactor op het laboratorium kan worden bepaald, van meerdere lagen in dat profiel monsters te nemen, waarin de doorlaatfactoren afzonderlijk kunnen worden bepaald.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat natuurlijk in meerdere gevallen dergelijke fouten als de boven besprokene kunnen optreden. Dit is in het algemeen steeds het geval, wanneer de werkelijke doorlaatfactor en de wijze van verandering in het profiel anders is als bij de berekening wordt aangenomen. Zoo b.v. wanneer de doorlaatfactor in werkelijkheid met de hoogte boven de ondoorlatende laag toeneemt en men uit de $Q : m_0$ (eventueel ook mede uit de $Q : n$)-lijn met behulp van de vergelijking voor drie lagen in het profiel den doorlaatfactor van ieder van deze lagen berekent. Deze aldus verkregen doorlaatfactoren zijn dan *effectieve* doorlaatfactoren van deze 3 lagen, wanneer tenminste geen van drieën geheel doorstroomd wordt of m.a.w., wanneer h_0 kleiner is dan h_1 . Korthedshalve kan hierop echter voldoende zijn om een gegaan. Het in § 2 en § 3 medegedeelde zal echter voldoende zijn om een indruk te geven, wanneer deze fouten kunnen optreden en of zij groot dan wel klein en dus te verwaarloozen zijn.

HOOFDSTUK VI

Enkele toepassingen (48 en 49)

I. *Inleiding*

In hoofdstuk I is opgemerkt, dat in het laatste hoofdstuk verschillende toepassingen van de in de vorige hoofdstukken ontwikkelde theorie zullen worden behandeld. Hoofdzakelijk zullen deze betrekking hebben op ontwateringsvraagstukken, daar deze de belangrijkste zijn; daarnaast zullen echter enkele berekeningen worden gemaakt met behulp van de verkregen resultaten op een enkel infiltratieproefveld.

We zullen echter eerst eens in woorden — zij het ook globaal — trachten uit te drukken, wat in de vorige hoofdstukken in mathematische formules en vergelijkingen is aangegeven. Dit zullen we zoo opvatten, dat we eens globaal zullen trachten na te gaan, waardoor de drainagebehoefte (detailontwateringsbehoefte (38)) van gronden wel in hoofdzaak zal worden bepaald.

Nu zal het duidelijk zijn, dat de detailontwateringsbehoefte kleiner is, naarmate de grond een grootere *doorlatendheid* bezit, d.w.z. dat, naarmate de grond doorlatender is, de afstand van de detailontwateringssystemen (b.v. drains, enz.) grooter kan zijn.

Daarnaast zal de *dikte van de laag* (met name ook onder de drains), die nog een goede doorlatendheid bezit, van belang zijn. Het regenwater, dat op de strook grond tusschen twee drainreeksen valt, zal immers voor zoover het niet door den grond wordt vastgehouden eerst vrijwel verticaal naar beneden zakken tot den grondwaterspiegel is bereikt en daarna in de laag grond onder den grondwaterspiegel in meer horizontale richting naar de drains afvloeien. Het zal duidelijk zijn, dat hoe dikker deze laag bij gelijkblijvende doorlatendheid is, hoe grooter de drainafstand kan zijn.

Verder kan de *diepteligging van de drains* (dus ook de diepte van de greppels, enz.) van invloed zijn. Stel b.v. eens, dat de grond tot 1.5 m diepte een bepaalde overal gelijke doorlatendheid bezit; zijn nu in het ééne geval drains op 1 m diepte en in een ander geval (dezelfde doorlatendheid, enz.) op 1.5 m diepte aanwezig, dan zal, wanneer geen water boven de drains voorkomt, het duidelijk zijn, dat de grondwaterstand midden tusschen de drains bij eenzelfde afvoer van overtollige regenwater in het eerste geval hooger moet zijn dan in het andere geval. Dit zal het geval zijn, omdat in het laatste geval het gemiddelde verval in het water, dat naar de drains stroomt, veel grooter kan zijn dan in het eerste geval, zonder dat de grondwaterstand midden tusschen de drains tot eenzelfde hoogte onder het maaiveld behoeft te stijgen. Het gemiddelde verval in het water kunnen we immers bij deze globale beschouwing

uitgedrukt denken door het verschil in hoogteligging van den grondwater-spiegel midden tusschen de drains en boven de drains gedeeld door een halven drainafstand. Staat er dus geen water boven de drains en staat bij een bepaalden afvoer van overtollig regenwater in het eerste geval de grondwaterstand midden tusschen de drains b.v. 50 cm onder het maaiveld dan is het gemiddelde

verval hier $\frac{1.00 - 0.50}{e}$. Zou het in het tweede geval de grondwaterstand

ook 50 cm onder het maaiveld staan en bevindt zich ook hier geen water boven de drains, dan is het gemiddelde verval hier $\frac{1.50 - 0.50}{e}$. Het zal duidelijk

zijn, dat door dit veel grooter verval meer water kan worden afgevoerd, zoodat dit gemiddelde verval hier kleiner kan zijn om *eenzelde* hoeveelheid overtollig regenwater af te voeren als in het eerste geval; d.w.z. de grondwaterstand kan hier dieper zijn dan 50 cm onder het maaiveld om evenveel overtollig regenwater af te voeren. ¹⁾ Hierbij moet echter worden opgemerkt, dat in sommige gevallen de draindiepte geen invloed heeft; zie onder sub II A: „Het bovengrondsche type”.

Uit het bovenstaande volgt verder, dat er ten slotte nog twee factoren moeten zijn, die het drainage-effect bij gegeven drainafstand en diepte bepalen, nl. *het feit of water boven de drains voorkomt*, b.v. doordat de drains iets verstopt zijn of zich een slecht doorlatend laagje in de drainsleuf heeft gevormd en verder, wanneer de doorlatendheid niet overal gelijk is, hetgeen gewoonlijk het geval is, *op welke wijze deze doorlatendheid in het profiel verandert*.

Het zal duidelijk zijn, dat wanneer in een bepaald geval de drains b.v. op 100 cm diepte onder het maaiveld liggen en *boven* de drains de grondwater-spiegel 50 cm onder het maaiveld staat, de grondwaterstand *midden* tusschen de drains nog hooger moet zijn om het benoodigde verval te leveren, waardoor het overtollige regenwater naar de drains kan stroomen. Dit wil zeggen, dat bij overigens dezelfde omstandigheden de grondwaterspiegel midden tusschen de drains veel hooger moet stijgen in het geval, dat water boven de drains voorkomt, dan wanneer dit niet het geval is.

Tenslotte zal het duidelijk zijn, dat, wanneer in het ééne geval b.v. de grond tot 1 m diepte (daaronder is de grond ondoorlatend) overal dezelfde doorlatendheid heeft, terwijl in een ander geval bij dezelfde draindiepte en drainafstand de doorlatendheid met de diepte onder het maaiveld afneemt, en de gemiddelde doorlatendheid van den grond tot 1 m onder het maaiveld dezelfde

¹⁾ De hoogte van den grondwaterstand midden tusschen de drains en gerekend *vanaf het vlak van de drains* zal bij gelijken afvoer bij de ondiepe drainage kleiner kunnen zijn, ten gevolge van de doorlatende laag van 50 cm dikte onder de drains, dan bij de diepe drainage, daar de grond hier onder de drains ondoorlatend is.

is, in het laatste geval de grondwaterstand bij eenzelfde afvoer van overtollig regenwater *hooger* moet oploopen dan in het eerste geval en wel omdat in het laatste geval het overtollige regenwater de beter doorlatende lagen hooger in het profiel moet doorstroomen (d.w.z. tot het doorstroombingsprofiel moeten behooren) om dezelfde hoeveelheid water te kunnen afvoeren, waarbij tevens het verval grooter wordt.

Het bovenstaande vormt nu het essentieele gedeelte van hetgeen in de vorige hoofdstukken exacter, uitgebreider en in kwantitatieven zin is medegedeeld. Het zou mij geen moeite kosten het bovenmedegedeelde met behulp van de ontwikkelde vergelijkingen in de vorige hoofdstukken en getallenvoorbeelden te bewijzen. Uit den aard der zaak is dit echter niet mogelijk zonder in herhaling te vervallen. Om dit te vermijden zullen we het bovenstaande nog eens op een geheel andere wijze toelichten, nl. door twee van de meest uiteenlopende ontwateringstypen te beschouwen en daarvan de eigenschappen te bespreken. Deze twee typen heb ik genoemd:

- A. Het bovengrondsche type, en
- B. Het doordengrondsche type,

waarvan het eerste type een zeer groote detailontwateringsbehoefte en het tweede type een zeer kleine detailontwateringsbehoefte heeft.

II. Ontwatering

*Het bovengrondsche en het doordengrondsche type;
overgangstypen*

A. Het bovengrondsche type

§ 1. BESCHRIJVING

Met het bovengrondsche type bedoel ik in zijn scherpsten vorm dat type, waarbij de afvoer van het overtollig regenwater voornamelijk over de oppervlakte van den grond plaats vindt, terwijl bij een iets milder type ook water door den bovengrond (= eerste laag onder het maaiveld; b.v. bouwvoor, door bewerking en indroging enz. beter doorlatend gemaakt) kan worden afgevoerd. *De diepere lagen zijn zoo slecht doorlatend, dat de hoeveelheid water, die daardoor nog wordt afgevoerd in elk geval zeer gering is.*

Wanneer nu een dergelijke grond gedraineerd wordt, kan de vraag gesteld worden, wat de kenmerkende eigenschappen zijn. Deze zullen nu in de volgende paragraaf worden behandeld.

§ 2. DE KENMERKENDE EIGENSCHAPPEN VAN HET BOVENGRONDSCH TYPE

We zullen nu de kenmerkende eigenschappen van het bovengrondsch type nagaan en wel zullen we in de eerste plaats *de veranderingen van den grondwaterstand in verloop van tijd* bespreken.

Stel b.v. eens, dat de drains op 100 cm diepte en op 10 m onderlingen afstand liggen, terwijl de doorlaatfactor 0.02 m p. 24 uur is en de grond onder de drains nog slechter doorlatend is, zoodat deze als ondoorlatend kan worden opgevat. Bevindt zich nu geen water boven de drains, dan is de hoeveelheid water, die wordt afgevoerd, wanneer de grondwaterstand midden tusschen de drains tot het maaiveld is gestegen:
$$S = \frac{kH_0^2}{e^2} = \frac{0.02 \cdot 1^2}{25} = 0.0008 \text{ m} =$$

0.8 mm per 24 uur. Dit wil zeggen, dat bij een overtolligen neerslag van 0.8 mm per dag de grondwaterstand midden tusschen de drains tot het maaiveld oploopt. Het gevolg zal zijn, dat in regenrijke perioden met een geringe verdamping de grondwaterstand onmiddellijk tot het maaiveld oploopt, en, daar de afvoer door den grond dan nog veel te gering is, zich daarna plassen op het land zullen vormen, terwijl tenslotte een afstroming van water over het land naar de drainsleuven zal plaats vinden. Hierin zal het regenwater dan naar de drainreeks wegzakken, wanneer althans de drainsleuf doorlatend is (de drains werken hier dus als open greppels voor den afvoer van het overtollige water). Dit wil dus zeggen, dat in genoemde tijden de grondwaterstanden zeer hoog zullen zijn, het land zeer nat zal zijn en veelvuldig (in het besproken geval) afvloeiing van water over het land zal optreden. In daarop volgende perioden met een sterkere verdamping zullen eerst de plassen opdrogen, daarna zal de grondwaterstand snel dalen. In een dergelijke grond zal immers het aantal niet capillaire ruimten met vrij beweegelijk water zeer gering zijn, daar anders de doorlatendheid wel grooter zou zijn geweest. Dit wil dus zeggen, dat de hoeveelheid water, die afgevoerd moet worden om den grondwaterstand 1 cm te doen dalen, zeer gering is (39), zoodat bij een sterke verdamping een snelle daling van den grondwaterstand zal optreden. Het gevolg is dus, dat, wanneer regenrijke en droge perioden elkaar opvolgen, zooals in verloop van het jaar steeds het geval is, *de grondwaterstand midden tusschen de drains aan zeer sterke schommelingen onderhevig zal zijn*. In een diagram, waarop de abscis de voortschrijdende tijd en op de ordinaat de grondwaterstand onder het maaiveld is afgezet, heeft dus de lijn, die de verandering van den grondwaterstand in verloop van tijd aangeeft, een zeer grillig verloop. Een dergelijk geval heeft zich b.v. voorgedaan op de begreppelde en gedraineerde strooken van het Ontwateringsproefveld B 45 (zwaren kleigrond) in den Wieringermeerpolder in het eerste jaar na de droog-

legging. De doorlatendheid van den grond was nog zeer klein (40). In diagram 9 zijn deze lijnen van de 10 m begreppelde en gedraineerde strooken voor het jaar 1930—1931 weergegeven, waaruit het grillig verloop van deze lijnen duidelijk naar voren komt. De aandacht wordt er verder op gevestigd, dat de greppels slechts 60 cm diep zijn, terwijl de drains op 95 cm diepte ter plaatse van de grondwaterstandsbuizen liggen. Desondanks zijn toch de grondwaterstanden vrijwel gelijk. Hierop zal in § 3 worden teruggekomen.

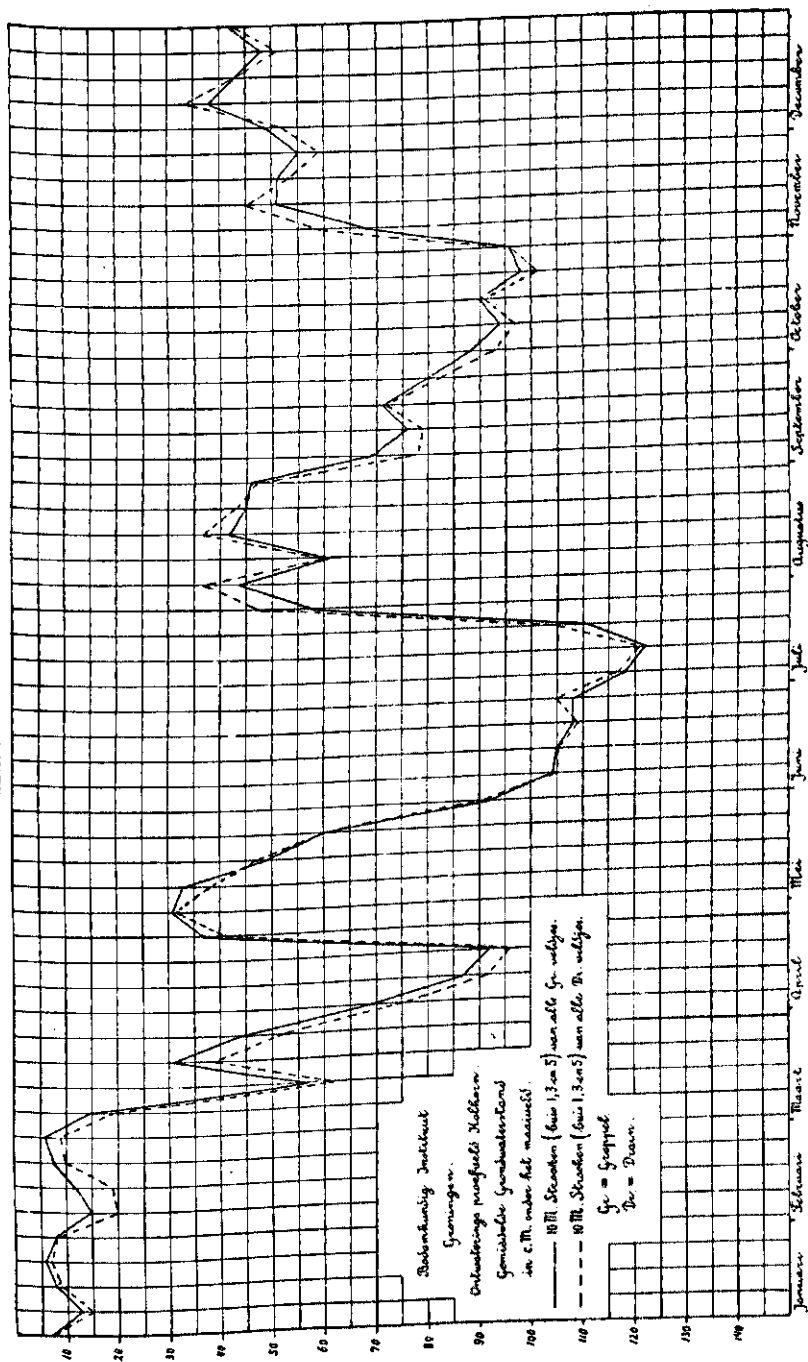
Het *debiet* vormt lang niet een zulk karakteristieke grootheid als de grondwaterstand. Op zich zelf beschouwd is het voor den ontwateringstoestand van een land ook feitelijk van geen belang; alleen in samenhang met grondwaterstanden zijn hieruit belangrijke gegevens (nl. de doorlatendheid) af te leiden. Men ziet dit onmiddellijk in, wanneer men bedenkt, dat het de bedoeling van ontwatering is een z.g. diepe ontwatering d.w.z. diepe grondwaterstanden te krijgen, waarbij het ons onverschillig kan laten hoe groot het debiet is. Een debiet kan b.v. door kwel zeer groot zijn, terwijl, wanneer de grondwaterstanden hoog blijven, het land toch slecht ontwaterd blijft.

Terugkomende op het debiet van drains in gronden van het bovengrondsche type, zal het duidelijk zijn, dat, wanneer de grondwaterstand hier eenmaal zoo hoog is, dat een volgende neerslag over het land moet afvloeien, de drainsleuven zeer goed doorlatend zijn en de wind meehelpt, de overtollige neerslag nu zeer snel zal worden afgevoerd. Op genoemd proefveld B 45 werden in den winter zelfs afvoersnelheden van 10 L/sec./ha en bij de greppels (het water behoeft hier niet meer als bij de drains door de drainsleuven naar beneden te zakken) zelfs van 20 L sec. ha waargenomen. Een dergelijke afvoersnelheid duurt echter slechts kort en daalt na afloop van den neerslag weer zeer snel. Bij het nog te bespreken doordengrondsche type kunnen wel is waar ook hoge afvoersnelheden voorkomen; tot een dergelijke hoogte stijgen zij echter niet, maar duren dan ook langer.

De beantwoording van de vraag, of een afvoersnelheid hoog is, blijft echter — behalve de extreme gevallen — iets persoonlijks behouden, terwijl bovendien ook bij het doordengrondsche type groote afvoersnelheden kunnen voorkomen, waarom het mij dan ook beter lijkt het debiet als kenmerkende eigenschap buiten beschouwing te laten.

Zien we af van het proefveld B 45 in den Wieringermeerpolder, dat uit den aard der zaak een bijzonder geval is, dan zullen ook kleigronden van het bovengrondsche type in den zomer meer en sneller last van droogte hebben dan gronden van het doordengrondsche type en wel vooral, wanneer het weilanden betreft en dus ook de bovenste laag geen structuurverbetering meer door de bewerking van den grond, als bij bouwland het geval is, kan ver-

Maastricht



krijgen. Vooral bij knikgronden met een dikke kniklaag en een ondoorlatenden ondergrond zal dit laatste optreden. De oorzaak daarvan zou ik willen zoeken in het ontbreken van niet-capillaire ruimten en van ruimten met een niet te groote capillaire stijghoogte (niet te kleine doorlatendheid), waardoor de plantenwortels, door de zeer langzame beweging van het water door den grond, alleen kunnen putten uit de kleine watervoorraden hier vlak omheen voor zoover deze althans nog opgenomen kunnen worden, daar nalevering door capillaire werking niet kan optreden. Ook de worteldoordringbaarheid van een dergelijken grond is gering, waardoor de beworteling vlak blijft. In de gronden van het doordengrondsche type — voor zoover daarbij ook de bovengrond een goede structuur heeft en goed doorlatend is (zie onder sub II B) — is de hoeveelheid beschikbaar water door het aanwezig zijn van vele niet capillaire ruimten van een niet te groote capillaire stijghoogte op zich zelf reeds veel grooter, terwijl ook nalevering van water door capillaire opstijging mogelijk is, daar de waterbeweging in dezen grond veel sneller plaats vindt dan in de eerstgenoemde gronden.

Samengevat kunnen we dus zeggen, dat de gronden van het bovengrondsche type gekenmerkt zijn door *hooge grondwaterstanden in tijden met een grooten neerslag en een kleine verdamping, terwijl de grondwaterstand zeer sterk verandert bij overgang van natte in droge perioden en omgekeerd*. De grondwaterstand wordt hier voornamelijk beheerscht door den regenval en de verdamping, terwijl de afvoer van overtollig regenwater *door den grond* een slechts geringen invloed uitoefent. Verder is het land in natte perioden met een geringe verdamping zeer nat, terwijl in den zomer spoediger last van droogte optreedt dan bij het doordengrondsche type.

Worden omgekeerd dergelijke verschijnselen waargenomen, als boven zijn beschreven (vooral sterk wisselende grondwaterstanden), zoo zal de grond hier slecht doorlatend zijn.

§ 3. DE INVLOED VAN DEN DRAINAFSTAND, DE DRAIN DIEPTE EN HET AL OF NIET DOORLATEND ZIJN VAN DE DRAINSLEUF

a. De invloed van de draindiepte

Ofschoon de drainafstand veelal den grootsten invloed heeft, zal hier echter eerst de invloed van de draindiepte en het al of niet doorlatend zijn van de drainsleuf worden besproken, daar ook deze weer karakteristiek zijn voor het besproken type.

Bij het bovengrondsche type is dus de grond — en zeker de grond onder de bovenste laag — slecht doorlatend. Bedenken we nu wat het verschil is tusschen

een drainage op b.v. gemiddeld 60 cm en op 100 cm diepte, dan is het blijkbaar alleen, dat bij de diepe drainage een grootter verval in het water mogelijk is dan bij de ondiepe drainage, wanneer er althans geen water boven de drains komt te staan, die dat voordeel weer teniet zou doen. Alleen, wanneer de grond op 60 cm diepte reeds volkomen ondoorlatend is en dus de drainsleuven van de drains op 100 cm diepte gedeeltelijk als sleuven in een ondoorlatende massa moeten worden opgevat, vervalt dit voordeel geheel. Begint immers de volkomen ondoorlatende laag op 60 cm diepte, dan behooren de diepere lagen niet meer tot het stroomingsprofiel. Het water stroomt over deze laag heen om bij de drainsleuven naar de drains op 100 cm diepte af te zakken, terwijl het verschil in waterstand midden tusschen en boven de drains (eigenlijk vlak naast de drains) ook nu maximaal 60 cm kan zijn.

Het voordeel van een grootter verval bij een diepere drainage is echter ook van geringe beteekenis, wanneer de grond slecht doorlatend is, of, — wanneer de bovengrond (bouwvoor) nog goed doorlatend is — de doorlatendheid snel met de diepte onder het maaiveld afneemt, zooals dit bij het bovengrondsche type het geval is, terwijl, wanneer de diepere drainsleuf in verloop van tijd slecht doorlatend wordt (er komt water boven de drains) dit voordeel in een groot nadeel kan worden omgezet, waarop verder onder zal worden teruggekomen.

Stel b.v. dat de doorlatendheid van den grond tot 1 m diepte 0.02 m per 24 uur is, de drainafstand 8 m is en de draindiepte resp. 60 en 100 cm bedraagt, terwijl de drainsleuf zoo doorlatend wordt verondersteld, dat geen waterspiegel boven de drains optreedt. De maximale hoeveelheid water, die door den grond kan worden afgevoerd, zonder dat het water over het land stroomt, is die, waarbij de grondwaterstand midden tusschen de drains tot het maaiveld reikt. Bij de 60 en de 100 cm diepe drainage is h_0 dus resp. 0.4 en 0 m; verder is $e = 4$ m en H_0 in beide gevallen 1.0 m. Bij de 60 cm diepe drainage is dus $S = \frac{k(H_0^2 - h_0^2)}{e^2} = \frac{0.02(1.0^2 - 0.4^2)}{16} = 0.0011 \text{ m} = 1.1 \text{ mm}$ per

24 uur en bij de 100 cm diepe drainage $\frac{0.02 \cdot 1^2}{16} = 0.0013 \text{ m} = 1.3 \text{ mm}$ per

24 uur. Beide hoeveelheden zijn klein ten opzichte van de hoeveelheid overtollige neerslag, die in regenrijke perioden afgevoerd moet kunnen worden. Het gevolg is dus, dat in regenrijke perioden de grondwaterstanden in het gegeven geval vrijwel gelijk zullen zijn, ondanks dus in het eene geval de drains 40 cm dieper liggen, terwijl alleen in drogere perioden een klein verschil kan optreden. Ook dit verschil zal, indien het al optreedt, klein zijn, daar nu de verdamping (eventueel ook watergebruik door de planten) veel grooter is dan den waterafvoer door den grond naar de drains, waardoor dus deze verdamping en het

watergebruik door de planten den grondwaterstand bepalen en dus uit den aard der zaak een diepere ligging van de drains hoogstens slechts een kleinen invloed kan uitoefenen.

Het zal duidelijk zijn, dat het bovenstaande ook het geval is, wanneer de doorlatendheid snel met de diepte afneemt, terwijl zij anderzijds in den bovengrond zoo groot is, dat afvoer van water *over* het land niet optreedt. Berekenen we namelijk van drains op 8 m onderlingen afstand en resp. op 60 en 100 cm diepte eens den grondwaterstand onder het maaiveld, wanneer geen water boven de drains voorkomt, de doorlatendheid vanaf 1 m onder het maaiveld (= ligging ondoorlatende laag) toeneemt volgens de functie $k_y = y^3$, terwijl 5 mm overtollig regenwater per 24 uur moet worden afgevoerd. In dit geval is voor de drainage op 60 cm diepte ($h_0 = 0.4$ meter; de ondoorlatende laag ligt immers op 100 cm diepte) $S = 0.005 = \frac{2(H_0^5 - h_0^5)}{20e^2} = \frac{H_0^5 - 0.5^5}{160}$ of dus $H_0 = 0.959$ of dus $1.00 - 0.959 = 0.041$ meter of 4.1 cm onder het maaiveld en bij de drainage op 100 cm onder het maaiveld:

$$S = 0.005 = \frac{2H_0^2}{20e^2} \text{ of dus } H_0 = 0.956 \text{ m of dus } 100 - 95.6 = 4.4 \text{ cm}$$

onder het maaiveld. Op enkele mm's na zijn beide grondwaterstanden gelijk, ofschoon toch de drains in het eene geval 40 cm dieper liggen. Voor 2 mm afvoer zijn de grondwaterstanden resp. 20.2 en 20.4 cm onder het maaiveld en dus ook nog practisch gelijk. Bij nog kleinere afvoeren komt bij de daarmede optredende grondwaterstanden een grooter verschil tot uiting. Zooals reeds is opgemerkt moet men er echter op verdacht zijn, dat de afvoer dan weer zoo klein is, dat de verdamping en het watergebruik door de planten (behalve natuurlijk in perioden, waarin deze verdamping of dit watergebruik gering zijn; b.v. bij mistig weer in den winter) weer voornamelijk den grondwaterstand beheerscht, waardoor het verschil tusschen beide gevallen weer vervaagd wordt of althans niet meer in direct verband staat met de draindiepte.

Het zal nu wel duidelijk zijn, waarom ook in het eerste jaar na de drooglegging de grondwaterstanden op de 10 m gedraineerde akkers (drains 95 cm diep) en 10 m begreppelde akkers (greppels 60 cm diep) van het proefveld B 45 in den Wieringermeerpolder vrijwel gelijk zijn geweest. In latere jaren is door het slechter doorlatend worden van de drainsleuven en ook door andere oorzaken water boven de drains voorgekomen, waardoor de begreppelde strooken in regenrijke perioden zelfs diepere grondwaterstanden te zien gaven dan de gedraineerde strooken.

Samengevat kunnen we dus zeggen, dat bij gronden van het bovengrondsche type een groote draindiepte van geen belang is en men eerder de draindiepte zoo

gering mogelijk moet kiezen als in verband met de bewerking van het land mogelijk is (41).

b. De invloed van het al of niet doorlatend zijn van de drainsleuf

Verder zal het uit het bovenstaande duidelijk zijn geworden, *dat de toestand, waarin de drainsleuf verkeert, van groot belang moet zijn.* Denken we aan de groote hoeveelheid water, die bij dit type door den bovengrond of zelfs over het land naar de drainsleuven moet worden afgevoerd en hierin naar de drainbuizen zelf snel moet kunnen wegzinken, dan zal het duidelijk zijn, *dat een goed doorlatend zijn en blijven van de drainsleuven van het grootste belang is.* Zou b.v. bij een knikkigen gedraineerden grond na enkele jaren de grond in de drainsleuven weer dezelfde slechte doorlatendheid krijgen als den omringenden grond, of zelfs wanneer zich slechts een slecht doorlatend laagje vlak boven de drains zou vormen, zou ieder resultaat van de drainage weer geheel verdwenen zijn. In dit geval vormt zich namelijk een waterlaag boven de drains, waardoor het mogelijk verval in het grondwater midden tusschen en boven de drains veel kleiner wordt, hetgeen niets anders beteekent, dan dat de hoeveelheid water, die bij eenzelfde grondwaterstand onder het maaiveld midden tusschen de drains wordt afgevoerd, sterk wordt verkleind.

Opmerkelijk is het nu, dat over het algemeen zoo weinig aandacht aan de doorlatendheid van den grond in de drainsleuf wordt besteed. Gewoonlijk komt het hierop neer, dat na het leggen van de drainbuizen de drainsleuven, al of niet afgedekt met een laagje turfstrooisel of dergelijk materiaal, weer met den uitgegraven grond worden dichtgegooid, waarmede het dan maar in orde moet zijn. Zelfs is mij een geval bekend, dat men den grond in de drainsleuven heeft aangestampt, hetgeen, wanneer de grond nat is, zeker fataal is en overigens in geen enkel geval aanbeveling verdient, ook al is dit nog het minst bezwaarlijk, wanneer de grond goed droog is. In verband met het bovenstaande zal het duidelijk zijn, dat het veel beter is op de drainbuizen een steek drogen *eventueel goed bijgekalkten grond* uit de bouwvoor te brengen en ook den uitgegraven grond zoo noodig *sterk bij te kalken* voor deze voor het wederopvullen van de drainsleuven wordt gebruikt, waarbij ieder aanstampen achterwege dient te blijven. Indien mogelijk, verdient het verder ten zeerste aanbeveling den uitgegraven grond eerst eenigen tijd te laten uitdrogen (uitwinteren) om pas daarna en na eventueele bekalking weer de drainsleuven met dit materiaal op te vullen (42). Verder zal men bij de bewerking van het land zooveel mogelijk *loodrecht* de drainsleuven moeten ploegen, waardoor de ploegvoor zelf weer geultjes naar de drainsleuven vormt, die den afvoer van water naar de drainsleuven bevorderen, terwijl verder zorg gedragen moet worden, dat de wielen

van zwaar beladen wagens, enz. niet juist in de lengterichting over de drainsleuven gaan.

c. De invloed van den drainafstand

Beschouwen we nu tenslotte nog den invloed van den drainafstand, dan zal het duidelijk zijn, dat, daar de grond slecht doorlatend is, de drainafstand in elk geval klein moet zijn, terwijl het bij dit type (bij de overgangsvormen naar het doordengrondsche type wordt dit reeds veel beter) veelvuldiger zal voorkomen, dat zelfs bij de kleinste economisch nog te verantwoorden afstanden (7 meter?) de hoeveelheid water, die door den grond wordt afgevoerd, zoo klein is, dat drainage hier geen resultaat meer heeft (voor een getallenvoorbeeld zie hoofdstuk V). Dit wil zeggen, dat ook na de drainage de grondwaterstand midden tusschen de drains nog zeer hoog tot zelfs aan het maaiveld toe kan oploopen. Wil men deze gronden toch draineeren, dan moet men dit niet doen om daardoor een betere ontwatering te krijgen, maar omdat de bewerking van gedraineerd land zooveel gemakkelijker is, enz. Het zal immers duidelijk zijn, dat in de gronden van dit type voor de ontwatering evengoed en misschien nog wel beter ondiepe greppeltjes met daartusschen rondgelegde akkers kunnen worden toegepast.

§ 4. VOORBEELDEN

Voorbeelden van dit type zijn b.v. alle knikachtige gronden, waarvan de kniklaag dik is en waaronder geen doorlatende laag voorkomt. Verder behooren hiertoe alle gronden met een slechte doorlatendheid, die in den winter te nat zijn en waarbij de oorzaak niet verklaard kan worden door een te hoog polderpeil. Het zal immers duidelijk zijn, dat in gronden van het besproken type het polderpeil op zich zelf geen invloed uitoefent op den grondwaterstand in het land. Wel spreekt het vanzelf, dat dit peil, wil men ooit verbetering krijgen, zoodanig moet zijn, dat het overtollige water uit de drains, greppels, enz. naar de slooten zal kunnen wegvloeien.

B. Het doordengrondsche type

§ 1. BESCHRIJVING

Met het doordengrondsche type wordt dat type bedoeld, *waarbij de afvoer van overtollig regenwater door den grond en dan wel voornamelijk door de diepere lagen (ondergrond) geschiedt*. Hierbij zijn de diepere lagen — vooral ook de laag onder de drains — goed doorlatend, waarbij dus een goede doorlatendheid van den grond en een dik watervoerend profiel samengaan. Verder zal het nu wel reeds duidelijk zijn, dat de drainagebehoefte van de gronden van dit type (in zijn meest uitgesproken vorm) zeer gering is.

Ook nu zullen we nagaan, wat de kenmerkende eigenschappen zijn van een dergelijken grond, wanneer deze gedraineerd zou worden.

§ 2. DE KENMERKENDE EIGENSCHAPPEN VAN HET DOORDENGRONDSCH TYPE

Ook nu vormt de grondwaterstand midden tusschen de drains ¹⁾ en de veranderingen, die daarin in verloop van tijd optreden, een karakteristiek gegeven van dit type.

We zullen het bovenstaande ook nu weer met getallenvoorbeelden toelichten. Is b.v. de grond tot 2 m diepte doorlatend en is de doorlaatfactor daarvan b.v. 2 m per 24 uur, dan zullen we eens uitrekenen tot welke hoogte de grondwaterstand midden tusschen de drains op 1 m diepte en op 20 m onderlingen afstand bij een overtolligen neerslag van 0 — 5 mm per 24 uur zal oploopen. Nu zal het duidelijk zijn, dat in een droge periode met een geringe verdamping (herfst, winter) de grondwaterstand tot de diepteligging van de drains zal dalen; d.w.z. dus hier tot 100 cm onder het maaiveld. Berekenen we nu tot welke hoogte de grondwaterstand midden tusschen de drains zal oploopen, wanneer de neerslag 5 mm per 24 uur is, dan volgt hier meteen uit tusschen welke waarden de grondwaterstand schommelt, indien de overtollige neerslag schommelt van 0 — 5 mm. We kunnen dit hier berekenen met behulp van de formule

$$S = \frac{k (H_o^2 - h_o^2)}{e^2} \text{ of dus daar } k = 2; h_o = 1.0; S = 0.005 \text{ en } e = 10 \text{ is dus}$$

$$0,005 = \frac{2 (H_o^2 - 1^2)}{100} \text{ of } H_o = 1.11 \text{ m of dus } 2.00 - 1.11 = 0.89 \text{ m} = 89 \text{ cm}$$

onder het maaiveld. De grondwaterstand wisselt hier dus slechts van 100 tot 89 cm onder het maaiveld, wanneer de overtollige hoeveelheid neerslag wisselt van 0 — 5 mm per 24 uur. Zelfs wanneer de overtollige neerslag 10 mm per 24 uur bedraagt, loopt de grondwaterstand slechts tot 78 cm onder het maaiveld op. Hieruit volgt dus, dat in dit geval de grondwaterstand slechts aan kleine schommelingen onderhevig is en dus de grondwaterstandslijn, die dus de veranderingen van den grondwaterstand in verloop van tijd aangeeft, slechts weinig verandert. Het spreekt vanzelf, dat dit algemeen voor dit type geldt. *Karakteristiek voor dit type zijn dus weinig veranderende grondwaterstanden bij sterk wisselende hoeveelheden neerslag.*

Een dergelijk geval, waarbij de grondwaterstanden zijn opgenomen, heeft zich voorgedaan op een ontwateringsproefveld van de Gemeente Amsterdam in den Rietwijkeroorderpolder. In dit proefveld waren de drains op gemiddeld

¹⁾ In plaats van drains kunnen natuurlijk ook greppels of slooten gedacht worden; voor de hieronder te bespreken eigenschappen is dit van geen belang (zie ook § 4).

102 cm diepte en op 10,15 en 20 m onderlingen afstand aanwezig; ook waren hier greppels van 60 cm diepte en op 10 m onderlingen afstand aangebracht. Diagram 10 geeft de veranderingen van de grondwaterstanden in verloop van den winter van 1935 op 1936 aan, waarbij kan worden opgemerkt, dat in den tijd, waarover de metingen loopen, de overtollige neerslag maximaal ± 5 mm per 24 uur heeft bedragen. Ofschoon de grondwaterstand uit den aard der zaak midden op de 15 m akkers hooger was dan op de 10 m akkers, de grondwater-

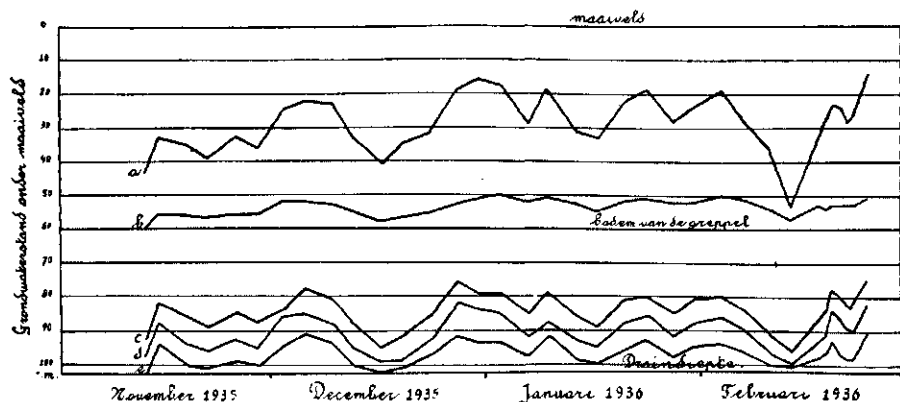


Diagram 10

Toelichting: Alle grondwaterstanden zijn in cm onder het maaiveld aangegeven.

- a. Grondwaterstand op een niet ontwaterd vak (300 × 135 m).
- b. Grondwaterstand midden tusschen greppels op een onderlingen afstand van 10 m.
- c. Grondwaterstand midden tusschen drains op een onderlingen afstand van 20 m.
- d. Grondwaterstand midden tusschen drains op een onderlingen afstand van 15 m.
- e. Grondwaterstand midden tusschen drains op een onderlingen afstand van 10 m.

Opmerking: De gemiddelde ligging van het maaiveld (N.A.P.) werd in het diagram als nulvlak aangenomen.

stand op de 20 m akkers weer hooger was dan op de 15 m akkers en verder de grondwaterstand op de op 10 m begreppelde akkers weer hooger was, zoo valt vooral bij een vergelijk met diagram 9 (o.a. drains op 95 cm diepte en op 10 m onderlingen afstand) op, aan hoeveel geringere veranderingen de grondwaterstand hier onderhevig is geweest. Bij een drainage op de aangegeven diepte en op 10 m onderlingen afstand is de grondwaterstand maximaal tot 12 cm boven het vlak van de drains gestegen. Verder valt hierbij op, dat de grondwaterstand op de 10 m gedraineerde strooken evenveel hooger is dan deze op de 10 m begreppelde strooken bedraagt, als de draindiepte grooter is dan de greppeldiepte (zie in dit verband ook Mededeeling N°. 4 en noot 48).

Hieruit volgt reeds, dat bij dit type de draindiepte in tegenstelling met hetgeen we hierover bij het bovengrondsche type hebben opgemerkt, van groot belang is. Dit zal echter in de volgende paragraaf worden behandeld

Verder zal het duidelijk zijn, dat de verdamping hier bij lange niet dien invloed heeft op den grondwaterstand als dit bij gronden van het bovengrondsche type het geval is. Het aantal niet capillaire ruimten of althans ruimten met niet al te groote capillaire stijghoogten, is hier tamelijk groot, zoodat er vrij wat water moet worden afgevoerd (of verdampen, resp. door de planten worden verbruikt), voordat de grondwaterstand sterk begint te dalen. Is het aantal niet-capillaire ruimten immers b.v. 20 % dan beteekent dit, dat een laag van 2 cm water moet verdwijnen, voordat de grondwaterstand 10 cm kan dalen. Hieruit volgt dan ook, dat ook in perioden met een groote verdamping of waterverbruik door de planten de grondwaterstand toch lang niet zoo sterk zal dalen als dit bij het bovengrondsche type het geval is (b.v. van ongeveer maaiveldshoogte tot 170 cm en meer onder het maaiveld, zooals dit op B 45 is waargenomen). Ook over een vol jaar beschouwd, is dus in gronden van dit type de grondwaterstand aan vele kleinere schommelingen onderhevig, dan dit in gronden van het bovengrondsche type het geval is. Tevens zal hier in den zomer (althans in gronden met een voldoende dikke laag klei) veel minder later last van droogte optreden dan dit op gronden van het bovengrondsche type het geval is. De verklaring is deze, dat en de hoeveelheid gemakkelijk op te nemen water in gronden van het doordengrondsche type veel grooter is en de waterbeweging (aanvulling onder invloed van capillaire krachten) hier veel sneller optreedt terwijl bovendien de worteldoordringbaarheid hier veel grooter ^{is} ~~zijn~~. Het spreekt vanzelf, dat er ook gronden voorkomen, bestaande uit een dunne kleilaag of uit een laag lichte grond, waaronder goed doorlatend zand voorkomt. De afvoer kan hier in den zomer te goed zijn, waardoor dus door de te diepe grondwaterstanden last van droogte optreedt; vooral, wanneer het capillair oppervlak in de zandlaag niet meer reikt tot de daarboven gelegen laag.

Hierbij kan worden opgemerkt, dat er gronden van het doordengrondsche type voorkomen met een zeer doorlatenden ondergrond, waarbij toch de bovengrond slecht doorlatend (knikkig) kan zijn. Hiervoor geldt het laatst opgemerkte (geen last van droogte in den zomer) dus niet of althans in mindere mate. Een zuivere karakterstiek gegeven vormt dit laatste — nl. al of geen last van droogte in den zomer — dan ook niet, evenmin als het debiet. Het debiet van de drains kan ook bij het ~~bovengrondsche~~ ^{doordengrondsche} type tot een groote hoogte stijgen, ook al zullen nooit dergelijke hooge waarden voorkomen als dit bij het bovengrondsche type mogelijk is. De overtollige neerslag wordt bij het doordengrondsche type in zijn meest uitgesproken vorm wel snel afgevoerd, maar toch over

een langer tijdsbestek verdeeld, dan dat bij het bovengrondsche type het geval kan zijn.

Samengevat blijkt dus, dat gronden van het doordengrondsche type gekenmerkt zijn door weinig in verloop van tijd veranderende grondwaterstanden. De drainagebehoefte van deze gronden is relatief gering. De grondwaterstanden worden hier in de eerste plaats beheerscht door den afvoer van overtollige regenwater door den grond, terwijl verdamping en waterverbruik door de planten slechts in de tweede plaats van invloed zijn.

§ 3. DE INVLOED VAN DEN DRAINAFSTAND, DE DRAIN DIEPTE EN HET AL OF NIET DOORLATEND ZIJN VAN DE DRAINSLEUF

a. De invloed van de draindiepte

Ofschoon bij gronden van dit type de drainafstand zeker den grootsten invloed op de ontwatering van den grond uitoefent, zullen we ook nu weer beginnen met den invloed van de draindiepte te bespreken, daar deze weer karakteristiek is voor dit type.

Ook nu zullen we met een getallenvoorbeeld beginnen en veronderstellen dat drains op 20 m onderlingen afstand en op 1 meter resp. 1,5 meter diepte aanwezig zijn in een grond, die tot 1,5 meter onder het maaiveld een doorlatendheid van 2 m p. 24 uur bezit en daaronder ondoorlatend is. Komt geen water boven de drains voor, dan is h_0 bij de drains op 100 cm diepte gelijk aan 0,5 meter en bij de drains op 150 cm diepte gelijk aan 0. Vergelijken we den grondwaterstand bij een gelijken afvoer van overtolligen neerslag dan kan dit dus geschieden met behulp van de vergelijking: $S = \frac{k (H_0^2 - h_0^2)}{e^2}$. Ofschoon

het verschil in grondwaterstand afhankelijk is van de grootte van den afvoer, zullen we hier voorloopig met een afvoer van 5 mm per 24 uur of dus 0,005 meter p. 24 uur volstaan. Bij de drains op 100 cm diepte is dan $H_0 = 0,71$ meter of dus de grondwaterstand $150 - 71 = 79$ cm onder het maaiveld. Bij de drains op 150 cm diepte ($h_0 = 0$) is $H_0 = 0,50$ meter of dus de grondwaterstand $150 - 50 = 100$ cm onder het maaiveld. We zien dus, dat het verschil in grondwaterstand 21 cm bedraagt, terwijl het verschil in draindiepte 50 cm bedraagt. Verder zal het duidelijk zijn, dat bij grootere afvoeren dit verschil in grondwaterstand kleiner en bij kleinere afvoeren grooter moet worden, daar immers bij een afvoer van juist nul (en geen verdamping) de grondwaterstand juist tot het vlak van de drains is gedaald en dus het verschil 50 cm is geworden. Nu zal het verder duidelijk zijn, dat hoe dikker het watervoerend profiel is, hoe meer het verschil in grondwaterstand bij *alle* afvoeren van overtolligen neerslag

gelijk wordt aan het verschil in draindiepte. Is in bovenbesproken getallen-voorbeeld de doorlatende laag 2 meter dik en is verder alles hetzelfde, dan is bij de drainage op 1 meter diepte ($h_0 = 1,0$ m) nu de grondwaterstand 88 cm onder het maaiveld bij een afvoer van 5 mm per 24 uur en bij de drainage op 1,5 meter diepte 129 cm, zoodat het verschil in grondwaterstand dus nu 41 cm bedraagt, terwijl het verschil in grondwaterstand bij dezen afvoer in in het eerste geval slechts 21 cm was. Het zal nu duidelijk zijn, dat alleen bij *alle* afvoeren het verschil in grondwaterstand gelijk is aan het verschil in draindiepte, wanneer de doorlatende laag onder de drains zoo dik is, dat het totale geleidingsvermogen voor water bij beide draindiepten dezelfde blijft en natuurlijk geen water boven de drains voorkomt en de grond *boven* de drains dezelfde doorlatendheid *bij grootere draindiepte* behoudt. Blijkens vergelijking 118 is dan

$$S = \frac{Q}{e} = \frac{2Gm_0 + km_0^2}{e^2},$$

waarin dus m_0 (= grondwaterstand midden tusschen de drains) gerekend wordt vanaf het vlak van de drains. Is het verschil in draindiepte gelijk a en rekenen we ook bij de ondiepe drainage de grondwaterstanden vanaf het vlak van de diepst gelegen drains, dan zal het duidelijk zijn, dat voor de ondiepe drains m_0 gelijk $m'_0 - a$ wordt, wanneer m'_0 den grondwaterstand boven het vlak van de diepst gelegen drains voorstelt. Komt in beide gevallen geen water boven de drains voor, dan is bij beide drains $n = 0$. Daar verder de afvoer S dezelfde is evenals e , is dus bij de ondiepe drains:

$$S = \frac{2G(m'_0 - a) + k(m'_0 - a)^2}{e^2} \text{ of } m'_0 = -\frac{G}{k} + a \pm \frac{1}{k} \sqrt{(G^2 + Se^2 k)}$$

Voor de diepst gelegen drains is:

$$S = \frac{2Gm_0 + km_0^2}{e^2} \text{ of } m_0 = -\frac{G}{k} \pm \frac{1}{k} \sqrt{(G^2 + Se^2 k)}$$

Hieruit volgt dus, dat $m'_0 - m_0 = a$ of m.a.w. het verschil in grondwaterstand is, onafhankelijk van de grootte van den afvoer, steeds gelijk aan het verschil in draindiepte.

Uit het bovenstaande volgt dus, dat alleen in de beste omstandigheden, nl. als G en k dezelfde blijven, de grondwaterstand bij *alle* afvoeren evenveel daalt als de draindiepte grooter wordt genomen.

Het zal echter duidelijk zijn, dat het bovenbehandelde geval een ideaal geval is, dat wel voorkomt, maar toch niet vaak. Ten eerste blijft gewoonlijk

k niet constant met een toenemende diepte onder het maaiveld (43), met als gevolg daarvan ook de grootte G niet. Meestal zal men er dus bij diepere drainage op verdacht moeten zijn, dat de grondwaterstand minder tot veel minder daalt dan wanneer de drains dieper worden gelegd. Het zal duidelijk zijn, dat wanneer we afzien van bijzondere gevallen (b.v. zand, veen- of kalkrijke lichte zavelagen onder kleilagen, enz.), de doorlatendheid gewoonlijk met de diepte onder het maaiveld afneemt. Ook op het reeds eerder genoemde proefveld in den Rietwijkeroorderpolder (zie § 2) was dit het geval. Deze afname gaat in de hooger gelegen lagen echter langzaam; de grond behoudt hier tot 150 cm en meer, nl. tot ongeveer 200 cm onder het maaiveld nog een tamelijke doorlatendheid¹⁾. Het gevolg is dan ook, dat de grondwaterstand op de 10 m begreppelde en gedraineerde veldjes vrijwel evenveel verschilt, als de diepte van de greppels kleiner is dan de gemiddelde diepteligging van de drains onder het maaiveld (nl. $102 - 60 = 42$ cm). In deze gevallen zijn dus k en G nog niet erg verschillend. Nu liggen deze drains echter met een zekere helling in het terrein. Vergelijken we den grondwaterstand bij het dieper gelegen gedeelte van de drainreeks ten opzichte van het hooger gelegen gedeelte, dan blijkt hier het verschil niet meer gelijk te zijn aan het verschil in diepteligging (dit komt in het diagram 10 niet tot uiting). Hier is dus ϵ en G en k voor de twee verschillende diepteliggingen van de drainreeksen verschillend. Zij zijn beide bij de diepere ligging der drains kleiner geworden.

Verder zal het duidelijk zijn, dat, *wanneer onder een slecht doorlatende laag een goed doorlatende laag voorkomt* — zooals soms bij knikgronden het geval is — men de drains in deze doorlatende laag moet leggen. Doet men dit niet, dan kan het contact van de drains door de geringe doorlatendheid van de scheidingslaag onder de drains met de doorlatende laag zoo gering zijn, dat de gunstige werking van deze laag vrijwel wordt opgeheven; temeer daar de drainsleuven ter plaatse van de drains gewoonlijk niet veel breeder zijn dan de drainbuizen zelf. Legt men echter de drainbuizen zoo diep, dat zij in de doorlatende laag liggen, dan kan men van de gunstige doorlatendheid daarvan profiteeren. Het is daarbij natuurlijk noodig, dat de laag grond boven deze goed doorlatende laag *een niet al te kleine doorlatendheid bezit* en natuurlijk ook weer niet te dik is. Anderzijds kan deze doorlatendheid op zich zelf beschouwd nog al klein zijn, terwijl toch nog een goede tot zeer goede ontwatering mogelijk is, indien de doorlatendheid van de daaronder gelegen laag slechts groot genoeg is (44). Deze goede ontwatering wordt veroorzaakt door het feit, dat het water de slecht doorlatende laag in hoofdzaak verticaal (verval 1)

¹⁾ Zie in dit verband de in noot 48 genoemde literatuur.

passeert en pas in de goed doorlatende laag in een meer horizontale richting naar de drains afstroomt.

We zullen nu als getallenvoorbeeld een geval behandelen, waarbij de afstromingsmogelijkheid in de goed doorlatende laag groot genoeg is om lage grondwaterstanden te behouden. Tevens zal daarbij dan de invloed van de daarboven gelegen slecht doorlatende laag besproken worden. Is k van de bovenste laag b.v. 0,01 m p. 24 uur. dan kan hiervoor dus bij een verval $1 \rightarrow 1 \cdot 0,01 = 0,01$ m = 10 mm per 24 uur doorstromen. Beschouwen we b.v. een grond bestaande uit een slecht doorlatende laag van 0,5 m diepte met daaronder een laag van 1,0 m dikte met een doorlatendheid 2,0 m p. 24 uur, terwijl op grotere diepte (dus meer dan 150 cm) de grond ondoorlatend is. Liggen de drains op b.v. 120 cm diepte, komt geen water boven de drains voor en liggen de drains op 10 m onderlingen afstand, dan is dus de grondwaterstand bij een afvoer van 5 mm overtolligen neerslag per dag uit te rekenen. Daar het grondwater waarschijnlijk in de onderste laag blijft, (anders moet vergelijking 9 worden gebruikt) is dus:

$$S = \frac{Q}{e} = \frac{k (H_o^2 - h_o^2)}{e^2}.$$

Hierin is dus $e = 5$ m; $k = 2$ m per 24 uur; H_o onbekend en $h_o = 1,5 - 1,2 = 0,3$ m, zoodat $0,005 = \frac{2 (H_o^2 - 0,3^2)}{25}$ of $H_o = 0,39$ meter of dus $1,50 - 0,39 = 111$ cm onder het maaiveld.

Ondanks de slecht doorlatende bovenlaag is de ontwatering hier toch uitstekend. Hierbij moet echter worden opgemerkt, dat dit laatste alleen geldt, *wanneer de overtollige neerslag zoodanig valt, dat de snelheid daarvan kleiner blijft dan den doorlaatfactor van de bovenste laag bedraagt* (feitelijk is alleen de doorlatendheid van deze laag in verticale richting beslissend). Is deze 0,01 m p. 24 uur, dan geldt het bovenafgeleide alleen, zoolang de neerslag kleiner is dan 0,01 m per 24 uur of dus kleiner is dan 10 mm per 24 uur *en deze neerslag bovendien regelmatig over deze 24 uur is verdeeld*. Vaak is dit laatste echter niet het geval en zal b.v. 5 mm in 2 uur vallen. De snelheid daarvan is dus $12 \times 5 = 60$ mm per 24 uur en het zal duidelijk zijn, dat deze neerslag niet snel genoeg de bovenste laag kan passeeren. Het gevolg is, dat het water over den grond afvloeit (hierbij is dus verondersteld, dat de grond zelf geen water meer kan opnemen), of, wanneer b.v. de bovenste 30 cm een betere doorlatendheid bezit, hier tijdelijk een schijnspiegel ontstaat. Dit wil dus zeggen, dat in een dergelijk geval de grondwaterstand (*tijdelijk*) toch hoog wordt, er tijdelijk plassen op het land komen te staan en de grond daarom toch nat en week kan worden. De drainage geeft hier dan dus niet het resultaat,

dat men bij beschouwing van den doorlatenden ondergrond *alleen* zou mogen verwachten, hoewel deze drainage toch zeer zeker een belangrijk effect zal hebben. Het zal echter duidelijk zijn, dat indien de doorlaatfactor (althans in verticale richting) van de bovenste laag maar zoo groot is, dat geen plassen meer optreden of m.a.w. de neerslag — doordat het verval hierin 1 is — altijd kan worden afgevoerd, de doorlatende ondergrond volledig het resultaat zal geven, dat men er van kan verwachten. Hoe groot deze doorlaatfactor daarvoor moet zijn, is niet precies te zeggen, daar de grootte niet alleen afhangt van de intensiteit van de regenbuien, maar ook van b.v. de waterberging en de watersorptie van den grond; verder van de verdamping en eventueel waterverbruik door de planten, enz. Een doorlaatfactor van 0.1 is in elk geval meer dan voldoende, terwijl het mij waarschijnlijk lijkt dat ook een doorlaatfactor van 0.05 reeds voldoende is.

b. De invloed van het al of niet doorlatend zijn van de drainsleuf

In een dergelijken grond, als in het laatste getallenvoorbeeld is besproken, speelt de doorlatendheid van de drainsleuf weer een groote rol, zooals zonder meer duidelijk zal zijn. In alle andere gevallen is deze doorlatendheid van de drainsleuf van minder belang, ofschoon de doorlatendheid van den grond om de drainbuis zelf in elk geval goed moet zijn. Het spreekt van zelf, dat ook hier een goed doorlatend zijn en blijven van de drainsleuf slechts ten gunste kan werken, want mocht, door welke oorzaak dan ook, water boven de drains komen te staan, dan zal het effect van de drainage daardoor ten zeerste kunnen worden geschaad. In het behandelde getallenvoorbeeld behoeft men dit slechts aan te nemen (d.w.z. h_0 grooter nemen) om dit onmiddellijk in te zien.

c. De invloed van den drainafstand

Tenslotte moet nog de invloed van den drainafstand besproken worden. Deze heeft hier een zeer grooten invloed, daar immers de afgevoerde laag water S bij overigens dezelfde omstandigheden omgekeerd evenredig is met e^2 of dus omgekeerd evenredig is met het kwadraat van den onderlingen afstand van de drains. Deze invloed is bij dit type daarom zoo sterk, omdat in regenrijke perioden verreweg de grootste hoeveelheid overtollig regenwater *door den grond* naar de drains wordt afgevoerd.

De drainafstand kan verder, zooals vanzelfsprekend is, zoodanig zijn, dat in het ééne geval (groote drainafstand) de grondwaterstand zich meer gedraagt als dien in een gedraineerden grond van het bovengrondsche type, terwijl bij een kleineren afstand de grondwaterstand zich juist meer gedraagt als dien in een grond van het doordengrondsche type.

Is de grond b.v. tot 1 m doorlatend ($k = 2$ m p. 24 uur) en liggen de drains op 10 m onderlingen afstand, terwijl geen water boven de drains voorkomt, dan is bij een afvoer van 5 mm dus:

$$S = \frac{k H_0^2}{e^2} \text{ of } 0.005 = \frac{2 H_0^2}{25} \text{ of } H_0 = 23 \text{ cm of dus } 77 \text{ cm onder het maaiveld.}$$

Bij een overtolligen neerslag van 0 — 5 mm per dag verandert de grondwaterstand dus van 77 — 100 cm onder het maaiveld.

Waren in denzelfden grond drains op 30 m onderlingen afstand aanwezig, terwijl overigens alles hetzelfde was, dan was dus:

$$0.005 = \frac{2 H_0^2}{225} \text{ of } H_0 = 75 \text{ cm of dus } 25 \text{ cm onder het maaiveld. De}$$

grondwaterstand verandert dus nu bij een overtolligen neerslag van 0 — 5 mm van 25 — 100 cm onder het maaiveld of dus in veel sterkere mate dan in het eerste geval.

Verder zal het duidelijk zijn, dat men bij het bovengrondsche type den drainafstand grooter kan nemen, wanneer de draindiepte tevens grooter wordt genomen. In verband met hetgeen reeds over den invloed van de draindiepte is gezegd, zal het duidelijk zijn, dat dit des te beter mogelijk is, naarmate de doorlatendheid van den grond tot grooter diepte goed blijft. Ook spreekt het vanzelf, dat, afgezien van het polderpeil, de grootste diepte van de drains bepaald wordt door de ligging van de ondoorlatende laag of althans van die laag, waarvan de doorlatendheid van den grond in verband met de doorlatendheid van de daarboven gelegen lagen te verwaarloozen klein wordt.

Met een getallenvoorbeeld moge de invloed van de draindiepte op den drainafstand nog worden toegelicht.

Komt geen water boven de drains voor en liggen deze op 10 m onderlingen afstand en op 1 m diepte, terwijl de grond tot 1.5 m diepte een doorlatendheid van 3 m p. 24 uur bezit en daaronder de grond ondoorlatend is, dan is H_0 bij een afvoer van 5 mm: $S = \frac{k (H_0^2 - h_0^2)}{e^2}$ of $0.005 = \frac{3 (H_0^2 - 0.5^2)}{25}$ of $H_0 = 0.54$ m of dus $150 - 54 = 96$ cm onder het maaiveld. Denken we ons nu drains op 1.5 m diepte in denzelfden grond, terwijl ook nu geen water boven de drains voorkomt, dan zal bij denzelfden afvoer en denzelfden grondwaterstand (H_0) de afstand grooter mogen zijn. Deze afstand is dan ($h_0 = 0$): $S = \frac{k H_0^2}{e^2}$ of $0.005 = \frac{3 \cdot 0.54^2}{e^2}$ of $e = 13.2$ m of dus de drainafstand $2e = 26.4$ m.

Is in een ander geval alles hetzelfde, terwijl de doorlatende laag nu 2 m dik is, dan is de grondwaterstand bij 5 mm afvoer en bij de drains op 1 m diepte ($h_0 = 1$ m): $0.005 = \frac{3 (H_0^2 - 1^2)}{25}$ of $H_0 = 1.02$ m of dus 98 cm onder

het maaiveld. Indien de drains in dezen grond op 150 cm diepte aanwezig waren, zou bij denzelfden afvoer van 5 mm en denzelfden grondwaterstand ($H_0 = 1,02$) de afstand mogen bedragen ($h_0 = 0.5$) : $0.005 = \frac{3(1.02^2 - 0.5^2)}{e^2}$
 of $e =$ rond 22 m of de drainafstand 44 m.

Ofschoon we dus in beide gevallen de drains 50 cm dieper hebben gelegd, kan toch in het laatste geval de drainafstand veel meer vergroot worden, hetgeen dus samenhangt met het feit, dat in het laatste geval de invloed van de diepteligging van de drains grooter is. *Een vaste verhouding tusschen vergrooting van de draindiepte en vergrooting van den drainafstand bestaat dus niet; deze verandert van geval tot geval.*

§ 4. VOORBEELDEN

In de provincie Groningen is ons b.v. een perceel zwaren kleigrond (klei tot groote diepte) in den Oostwolderpolder van den Heer H. E. STIKKER bekend, waar de ontwatering op 43.5 m door de zwetsloten voldoende is (45).

Ook op een perceel van den Heer S. A. SEBENS (eveneens zwaren kleigrond; naar onderen echter overgaande in lichte klei tot zware zavel) geven drains op een afstand van ruim 35 meter onderlingen afstand en ruim 1 meter diepte een voldoende ontwatering. Wel is waar is de grond tot ± 50 cm diepte onder het maaiveld knikkelig en slecht doorlatend; de ondergrond daarentegen heeft een zoo goede doorlatendheid, dat toch een goede ontwatering door de drains op den aangegeven afstand en diepte mogelijk is. Van dit perceel werd met de boorgatmethode de doorlaatfactor bepaald van de laag van $\pm 80 - 120$ cm onder het maaiveld. Deze bedroeg gemiddeld 1.8 m p. 24 uur, terwijl ook de zich daaronder bevindende, niet onderzochte, laag althans voor de eerste dms nog wel een goede doorlatendheid zal hebben. Hierbij kan worden opgemerkt, dat plassen nooit op genoemd perceel voorkomen, hetgeen dus wil zeggen, dat de doorlatendheid van de knikkige laag in elk geval groot genoeg is om den neerslag in verticale richting steeds snel genoeg door te laten.

Verder komen in den Houtrak- en Groote IJ-polder perceelen zware kleigrond (tot 1 m en meer blijft het profiel, volgens ingewonnen inlichtingen, klei), waar alleen slooten op 75 m een zoo goede ontwatering gegeven hebben, dat men zelfs de tusschensloot heeft gedempt en ook de resteerende slooten op 150 m nog een voldoende ontwatering geven. Het zal duidelijk zijn, dat hier de kleilaag zelf reeds een goede doorlatendheid moet bezitten, terwijl onder deze kleilaag goed doorlatende lagen (zand?; veen?) tot minstens eenige meters dikte moeten voorkomen. Met de boorgatmethode zou dit onmiddellijk blijken; dergelijke onderzoekingen hebben echter in deze polders nog niet plaats gehad.

Ook het onderzochte gedeelte van den Rietwijkeroorderpolder en het Ontwateringsproefveld in dezen polder behoort tot dit type (zie in dit verband ook de in noot 4 en 48 genoemde literatuur).

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat bij al de genoemde perceelen het polderpeil voldoende laag was om de afstroming van de drains en slooten mogelijk te maken.

C. Overgangstypen

Het spreekt van zelf, dat tusschen het bovengrondsche en het doordengrondsche type in hun meest uitgesproken vorm allerlei overgangstypen voorkomen. Een scherpe grens tusschen deze 3 groepen is uit den aard der zaak niet te trekken; vooral ook daarom niet, omdat onder sub B van dit hoofdstuk besproken is hoe de drainafstand reeds kan maken, dat in het eene geval (bij kleine drainafstand) de grondwaterstand midden tusschen de drains — en de veranderingen, die daarin optreden — zich meer overeenkomstig het doordengrondsche type en in het andere geval (bij grooteren drainafstand) zich meer overeenkomstig het bovengrondsche type kan gedragen, hetgeen natuurlijk vooral bij overgangstypen het beste tot uiting komt.

Verder zal het duidelijk zijn, dat de meeste gronden behooren tot de overgangstypen. Na de uitvoerige uiteenzetting over de karakteristieke eigenschappen en over de invloeden van drainafstand, draindiepte en den toestand van de drainsleuf bij het bovengrondsche en het doordengrondsche type of althans van gronden, die sterk naar één van deze typen verschoven liggen, lijkt het mij niet noodig bij de overgangstypen nogmaals deze eigenschappen en invloeden te bespreken. Uit den aard der zaak ligt het gedrag van deze gronden tusschen die van de twee besproken typen in.

III. Infiltratie

Berekening van het waterverbruik op een infiltratieproefveld in den Wieringermeerpolder

§ 1. INLEIDING

Tenslotte zal nog van het infiltratieproefveld A 60 in den Wieringermeerpolder, waarvan mij door den Directeur van den Wieringermeerpolder, den Heer Ir. S. SMEDING, de gegevens welwillend ter beschikking zijn gesteld, het waterverbruik op een bepaalden dag als voorbeeld van berekening worden nagegaan. Daarvoor zijn noodig de grondwaterstanden midden tusschen de greppels en de waterstanden in de greppels, die op het beschouwde proefveld dagelijks werden waargenomen. Voor deze berekeningen kunnen, zooals reeds is opgemerkt, alleen de gegevens van die dagen worden gebruikt, waarop geen

regen is gevallen, terwijl ook geen regen op den voorafgaanden dag — liefst twee voorafgaande dagen — moet zijn gevallen, zoodat kan worden aangenomen, dat het waterverbruik inderdaad volledig door het geïnfiltreerde water wordt gedekt. Op deze dagen heeft het phreatisch oppervlak in overeenstemming met de theorie een hollen vorm, zooals uit waarnemingen in grondwaterstandsbuizen op verschillende afstanden van deze greppels blijkt (periode van infiltratie). Op dagen met een geringer waterverbruik of met een geringen neerslag is het phreatisch oppervlak vlakker tot volkomen vlak, terwijl bij grootere neerslagen het phreatisch oppervlak een hollen vorm aanneemt, hetgeen dus wil zeggen, dat op deze dagen juist het water uit den grond naar de greppels stroomt (periode van uitfiltratie of drainage).

§ 2. BEREKENING VAN HET WATERVERBRUIK OP EEN BEPAALDEN DAG OP HET INFILTRATIEPROEFVELD A 60 IN DEN WIERINGERMEERPOLDER

In de eerste plaats zal nu het waterverbruik op een bepaalden dag op het infiltratieproefveld A 60 berekend worden. Op dit proefveld zijn greppels op 24 m onderlingen afstand en van 50 cm diepte aanwezig. Het profiel bestaat tot 100 cm onder het maaiveld uit zandgrond, terwijl daaronder klei optreedt. Deze kleilaag is als ondoorlatend ten opzichte van de zandlaag te beschouwen, zoodat de ondoorlatende laag zich op 100 cm onder het maaiveld bevindt. De zandgrond bevat verder zoo weinig klei en humus, dat de doorlaatfactor op het laboratorium in de genomen grondmonsters kan worden bepaald. Deze doorlaatfactor wordt daarbij aangegeven bij een lucht vrij poriënvolume van 35 Vol. % en een temperatuur van het grondwater van 10°C ($k_{10:35}$).

Deze doorlaatfactor moet nu verder worden omgerekend op de omstandigheden, zooals die in werkelijkheid optreden. Hiervoor moet dus het poriënvolume p , het lucht vrij poriënvolume p_0 en de temperatuur van het grondwater bekend zijn. Deze laatste is op 18°C aangenomen, terwijl het poriënvolume p berekend is uit het vochtgehalte van de diepst gelegen laag in de veronderstelling, dat hierin geen lucht meer aanwezig is. Uit het vochtgehalte van de hooger gelegen lagen kan dan, in de veronderstelling, dat het poriënvolume gelijk is aan dat in de onderste laag, het lucht vrij poriënvolume p_0 worden berekend (tijdens de perioden van infiltratie verandert het vochtgehalte niet veel). De omrekening van de $k_{10:35}$ factoren op deze factoren bij een temperatuur van het grondwater van 18°C , een lucht vrij poriënvolume p_0 en een poriënvolume p geschiedt met de vergelijking 25 van de in noot 1 genoemde literatuur. Hierin moet voor p^3 , p_0^3 gelezen worden; voor de onderste laag is dus $p = p_0$. Ook de capillaire stijghoogte werd in de betreffende monsters in het laboratorium bepaald en bij een poriënvolume van 35 Vol. % aangegeven. De omrekening op het poriënvolume p geschiedt

met behulp van de vergelijking 40 van de in noot I genoemde literatuur; het luchtgehalte behoeft hier niet in rekening te worden gebracht.

In de onderstaande tabel zijn deze cijfers met het specifieke oppervlak U en het klei-, humus- en CaCO_3 -gehalte van de betreffende lagen aangegeven.

Laag	Klei	Humus	CaCO_3	U (op zand)	k ($p = p_0$ $= 35\%$ $t = 10^\circ\text{C}$)	H $p = 35\%$	p_0	(In natuurlijke omstandigheden)	
								k	H
2,5—25	1,5	0,4	3,4	67,9	4,2	64	25,2	2,5	47
25 — 50	1,7	0,4	2,8	84,4	1,9	80	35,9	3,2	58
50 — 75	2,1	0,4	3,1	92,4	1,9	84	39,5	4,3	61
75 — 100	3,2	0,5	4,1	92,0	1,9	97	$= p = 42,5$	5,4	71

Uit de in de 9de kolom medegedeelde doorlaatfactoren volgt, dat in genoemd profiel de doorlaatfactor met voldoende benadering met de toenemende hoogte boven de ondoorlatende laag afneemt volgens de vergelijking:

$$k_y = k_0 - ay = 5,95 - 4,4 y \quad (215)$$

Verder is de capillaire stijghoogte in de laag van 2,5 — 25 cm 47 cm of 0.47 m. Deze waarde moet dus bij de H_0 en h_0 -waarde worden opgeteld (in zandgronden behoort de capillaire laag immers tot het doorstrotingsprofiel).

We zullen nu het waterverbruik berekenen op 22 Juli 1933. Op dezen dag werd nl. $\pm$ het gemiddelde geïnfiltreerd, dat in dezen zomer uit waarnemingen op verschillende andere dagen (uit den aard der zaak dus droge dagen) werd berekend. Op deze dag was $h_0 = 0.62$ m en $H_0 = 0.51$ m en dus, wanneer hierbij de capillaire laag wordt opgeteld resp. 1.09 en 0.98 m. Daar de geheele watervoerende laag slechts 1.00 m dik is en we voor de graszode 5 cm mogen aftrekken, volgt hier dus uit, dat het geheele profiel, dat besloten is door maaiveld, greppelwanden en de ondoorlatende laag tot de watervoerende laag behoort. De afleiding van de vergelijking voor dit geval is als volgt:

$$q_x = Q \frac{e-x}{e} = -I \int_{y=0}^{y=h} (k_0 - ay) dy \quad (216)$$

$$\text{of } Q \frac{e-x}{e} = - \left(k_0 h - \frac{1}{2} ah^2 \right) \frac{dy}{dx} \quad (217)$$

waarin h dus de dikte van de geheele watervoerende laag (hier dus 0.95 cm)

voorstelt. Geïntegreerd van $x = 0$ tot $x = e$ en van $y = h_0$ tot $y = H_0$ ontstaat:

$$Q = \frac{2}{e} \left(k_0 h - \frac{1}{2} a h^2 \right) (h_0 - H_0) \quad (218)$$

of dus

$$S = \frac{Q}{e} = \frac{2}{e^2} \left(k_0 h - \frac{1}{2} a h^2 \right) (h_0 - H_0) \quad (219)$$

Uit de vergelijking 219 blijkt, dat alleen het verschil van h_0 en H_0 van belang is, waarvoor we dus het verschil van den grondwaterstand midden tusschen de greppels en den waterstand in de greppels kunnen nemen. Vullen we nu de waarden van k_0 , a en b uit de vergelijking 215 in vergelijking 219, in, evenals de waarden van e , h en $h_0 - H_0$ (0.11 m) dan volgt uit de vergelijking 219 dat S gelijk is aan 5.6 mm per 24 uur. Een correctie voor het feit, dat de greppelbodem 50 cm boven de ondoorlatende laag ligt, is niet aangebracht, daar zij toch van zeer geringe betekenis is.

Het spreekt vanzelf, dat we dezelfde berekening ook met de vergelijking voor homogene gronden kunnen uitvoeren, waarin voor den factor k dan de effectieve doorlaatfactor van het watervoerend profiel moet worden ingevoerd, maar waarvoor we den schijnbaren factor moeten gebruiken, omdat alleen deze laatste uit de bepaalde doorlaatfactoren is te berekenen. Deze berekening geeft hier, zooals vooruit te voorspellen is, precies dezelfde waarde, daar de effectieve en de schijnbare doorlaatfactor hier dezelfde is (de dikte van het watervoerend profiel is hier immers overal gelijk aan h). De schijnbare doorlaatfactor is hier zelfs zonder differentiaal en integraalrekening te berekenen. Zij is immers gelijk aan het gemiddelde van den doorlaatfactor op 0 en 95 cm boven de ondoorlatende laag. Uit de vergelijking 215 volgt, dat deze doorlaatfactor resp. 5,95 en 1,77 of dus gemiddeld 3,86 m per 24 uur bedraagt. Verder zal het duidelijk zijn, dat in dit geval de vergelijking luidt:

$$S = \frac{2kh(h_0 - H_0)}{e^2} = 5,6 \text{ mm.}$$

Uit deze berekening blijkt dus, dat op den betreffenden dag het waterverbruik 5,6 mm bedroeg, hetgeen dus tevens als ongeveer het daggemiddelde van de droogste periode in 1933 kan worden opgevat (46).

Door Prof. Ir. M. F. VISSER te Wageningen is, uit hetgeen in den polder „Callantsoog” 's zomers voor de infiltratie wordt ingemalen, berekend, dat in de droogste periode in 1921 gemiddeld een hoeveelheid van 4,4 mm per dag werd ingemalen (zie Bijvoegsel Hollandsche Mij. van Landbouw, 13de Jaargang N°. 681-23; 4 Juni, 1927, blz. VII). Deze hoeveelheid komt dus vrij goed overeen met de waarde door mij berekend. De door mij berekende waarde is iets hooger dan het gemiddelde, dat door Prof. VISSER in den polder

„Callantsoog” uit de gegevens van de inmaling werd berekend, hetgeen hierdoor veroorzaakt kan zijn, dat mijn berekeningen alleen zijn uitgevoerd op dagen zonder regen, waarbij bovendien op voorafgaande dagen geen regen is gevallen. Ofschoon natuurlijk de gemaakte vergelijking tusschen den polder „Callantsoog” en het infiltratieproefveld A 60 slechts globaal mogelijk is, lijkt het mij echter ook niet onmogelijk, dat de door mij gevonden waarde op het infiltratieproefveld A 60 voor geïnfilteerd grasland in het algemeen te hoog is en wel omdat zoowel door berekening als op andere wijze kon worden aangetoond, dat op dit proefveld een luxe verbruik van water door het grasgewas plaats vindt. Ik kan hier echter niet nader op ingaan, daar het mijn bedoeling niet kan zijn de verkregen resultaten op dit proefveld te bespreken.

Tenslotte kan nog worden opgemerkt, dat, weet men eenmaal het optimale waterverbruik, men bij gegeven greppelafstand en gegeven grondwaterstand midden tusschen de greppels (afhankelijk van de capillaire stijghoogte) het meest gewenschte peil in de greppels kan berekenen, wanneer natuurlijk de doorlatendheid van het profiel bekend is, enz.

NOTEN

- (1) HOOGHOUTD, S. B.: Bijdrage tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, N°. 2; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen*, N°. 40 B, 1934, blz. 215 e. v.
- (2) HOOGHOUTD, S. B.: Verslag eener in December 1931 gemaakte studiereis naar Breslau, Praag en Zürich; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen*, N°. 38 B, 1932.
- (3) Zie ook: HOOGHOUTD, S. B.: Mededeeling over grondwaterstand- en debietmetingen op een gedraineerd perceel zwaren zeekleigrond te Nieuwolda; met een uiteenzetting van het doel, waarvoor deze bepalingen moesten dienen, 1935 (gecyclostyleerd).
- (4) HOOGHOUTD, S. B.: Bijdrage tot de kennis van eenige natuurkundige grootheden van den grond, N°. 4; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen*, N°. 42 B, 1936, blz. 449 e. v.
- (5) HOOGHOUTD, S. B.: Die Beziehungen zwischen Wasserabfluss, Grundwasserstand, Dränentfernung und Wasserdurchlässigkeit. Kontrollversuche an Sandboden; *Transactions of the Third International Congress of Soil Science*, Oxford, England, 1935, Vol. I, blz. 397 e. v.
- (6) Met homogene gronden worden gronden bedoeld, die overal dezelfde doorlatendheid hebben. Homogeniteit in mechanische samenstelling verzekert dit niet, daar gronden met dezelfde mechanische samenstelling in hetzelfde profiel een verschillende doorlatendheid kunnen bezitten. Bijvoorbeeld bij zandgronden, wanneer het poriënvolume met de diepte onder het maaiveld afneemt of het luchtgehalte verandert, enz.
- (7) DISERENS, E.: Les méthodes scientifiques pour l'étude des nappes souterraines; *Second International Congress of Soil Science*, Leningrad—Moscow, U.S.S.R., 1930, Vol. VI, blz. 99 e. v. Zie ook van denzelfden schrijver: Les moyens permettant de déterminer le mode d'action des travaux d'assainissement, canaux et drainages; *Third International Congress of Soil Science*, Oxford, England, 1935, Vol. III, blz. 45 e. v.
- (8) In deze en in de volgende figuren zijn vrijwel steeds greppels aangegeven, daar deze gewoonlijk een duidelijker beeld geven van de kwestie, waarom het gaat, dan drains dit vermogen te doen.
- (9) Opgemerkt kan worden, dat alle in deze publicatie behandelde gevallen behooren tot het type, waarbij de hoeveelheid water, die door een doorsnede evenwijdig de ontwateringssystemen vloeit, *niet* constant is, maar toeneemt, naarmate de afstand tot die ontwateringssystemen kleiner wordt. Een ander type, waarbij de hoeveelheid water, die door een doorsnede stroomt, *wel* constant is, is bijv. het geval, waarbij 2 kanalen, die dicht bij elkaar liggen, zoodat de regenval kan worden verwaarloosd, een verschillend waterpeil hebben. Er zal nu water van het kanaal met het hooge peil door den grond naar het kanaal met lage peil stroomen. De vergelijkingen voor deze gevallen blijven, wat het rechterlid betreft, dezelfde. Voor het linkerlid moet men bedenken, dat q_x nu onafhankelijk is van x en dus gelijk is aan Q . Is de grond onder de twee genoemde kanalen bijv. ondoorlatend en daarboven homogeen, dan vindt men: $Q = ky \frac{dy}{dx}$ of na integratie van $x = 0$ tot $x = 2e =$ afstand kanalen en van $y = h_0 =$ laagste peil tot $y = H_0 =$ hoogste peil: $Q = \frac{\frac{1}{2} k (H_0^2 - h_0^2)}{2e}$. Verder spreekt het vanzelf, dat, wanneer de regen niet te verwaarlozen is, beide afvoeren algebraïsch opgeteld moeten worden, waarop hier niet nader kan worden ingegaan, daar dergelijke gevallen voor ons van weinig belang zijn.

- (10) Los hiervan staat het feit, dat de grondwaterstandsbuizen over hun geheele lengte geperforeerd zijn, terwijl het geperforeerde gedeelte vaak een groot gedeelte van het watervoerend profiel beslaat. De veronderstelling, dat $\frac{\delta p}{\delta y} = 0$ is daardoor nog des te eerder te aanvaarden, daar ten slotte met de gegevens, in die buizen verkregen, de verdere berekeningen worden uitgevoerd.
- (11) De drains zijn bijv. gewoonlijk met een zekere helling in het terrein gelegd. Eenzelfde hoogte boven de drains, waarop het aankomt, beteekent dus op verschillende diepten onder het maaiveld.
- (12) Dit is in tegenstelling met hetgeen ik voor kort voor waarschijnlijk hield (zie het Verslag van de Iste Wetenschappelijke bijeenkomst van de Sectie Nederland van de Internationale Bodemkundige Vereeniging op 22 Februari 1936 te Utrecht). De betreffende proefnemingen, die nadien zijn uitgevoerd, hebben het echter noodzakelijk gemaakt mijn meening in dat opzicht te moeten herzien; zie sub I A, § 6, van dit hoofdstuk.
- (13) Voor de practijk beteekent een aanwezig zijn van een hangkromme, dat, of vlak bij tochten, kanalen, enz., waarnaar een hangkromme van den grondwaterspiegel optreedt, geen drainage noodig is, of hier althans de drainafstand grooter kan worden genomen.
- (14) Strekt de hangkromme zich niet over de geheele lengte uit, dan moet men twee gedeelten beschouwen, nl. één deel met een hangkromme en één deel, waarin den grondwaterstand boven de drains resp. boven den bodem van de greppels constant is.
- (15) Daar de kromme van het phreatisch oppervlak bekend is, als de grondwaterstand op verschillende afstanden van de sloot wordt waargenomen, zijn dus, door 2 punten op deze kromme te kiezen en met behulp van de bij deze punten behorende H_0 - en z -waarden, de constanten a en b te berekenen. De keuze van deze 2 punten moet zoodanig zijn, dat de functie met voldoende benadering de werkelijke kromme benadert, hetgeen zeer gemakkelijk is na te gaan door enkele tusschenliggende punten te berekenen.
- (16) In een onderzocht geval op het proefveld te Nieuwolda werd dit ook inderdaad gevonden; zie Mededeeling over grondwaterstand- en debietmetingen op een gedraineerd perceel zwaren zeekleigrond, enz.; noot 3.
- (17) Hierbij kan worden opgemerkt, dat, wanneer dit getallenvoorbeeld zich eens werkelijk mocht voordoen, de betreffende grond nooit homogeen zou kunnen zijn, maar de doorlaatfactor grooter zou moeten worden, naarmate de afstand van de sloot kleiner wordt. Dit ziet men onmiddellijk in, wanneer men den globalen rechtstreekschen afvoer naar de sloot berekent, die op zich zelf te klein is om een volledige hangkromme van het begin tot het eind van de drainreeks te veroorzaken. De grond is voor de berekening dus homogeen gedacht, hetgeen voor de kwestie, waarom het hier gaat, geen verschil maakt.
- (18) De geheele lengte van den bak bedraagt 10 m. De middellijn van de drainbuis bevindt zich echter op 6 cm van den zijwand van den bak. Het leek mij gewenscht in elk geval deze 6 cm van de geheele lengte van den bak af te trekken, maar van een correctie van het debiet af te zien, daar deze in elk geval kleiner is dan 1 % en dus verwaarloosd kan worden.
- (19) De vergelijkingen voor homogene gronden zijn steeds toe te passen voor heterogene gronden. Men berekent dan echter een soort gemiddelde doorlatendheid, waarvoor verder naar hoofdstuk V mag worden verwezen.

- (20) Dit geval is in rekening te brengen door te bedenken, dat de doorlaatfactor k dan een functie wordt van x . Noemt men bijv. K den doorlaatfactor van de laag juist midden tusschen de drains, dan is de doorlaatfactor van de overeenkomstige laag op den afstand x van den drain gelijk $k_x = K / (x)$. Men kan dit nu in de vergelijkingen invoeren en deze verder ontwikkelen. Ook indien de doorlaatfactor bovendien in de y - en (of) z -richting verandert, is het veranderen van den doorlaatfactor in de x -richting in rekening te brengen. De doorlaatfactor is dus in het ergste geval een functie van x , y en z .

Wil men echter de verandering van den doorlaatfactor in de x -richting in rekening brengen, dan moet de verandering van den doorlaatfactor in deze richting bekend zijn, hetgeen bijv. door het meten van de doorlaatfactoren met behulp van de boorgatenmethode op verschillende afstanden van de drains zou kunnen geschieden. Nogmaals kan hier met nadruk worden herhaald, dat deze laatste verandering van den doorlaatfactor — indien zij al voorkomt — van geen belang is en verder buiten beschouwing kan worden gelaten.

- (21) In het geval de grond onder den bodem van de greppels resp. onder de drains doorlatend is en dus nog 1 of meer lagen onder den bodem van de greppels resp. onder de drains moeten worden beschouwd, worden genoemde lagen gerekend vanaf de ondoorlatende laag, tenzij uitdrukkelijk anders is aangegeven.
- (22) Men kan echter ook het totale geleidingsvermogen van water voor de laag onder de drains invoeren. Dit kan echter beter in hoofdstuk III besproken worden, waarnaar mag worden verwezen.
- (23) Het boren van een gat van grotere afmetingen, die dan nà het plaatsen van de grondwaterstandsbuis wordt aangevuld met grind, dient in elk geval te worden afgeraden, wanneer de grondwaterstand in klei- en dergelijke gronden moet worden bepaald. De traagheid van de buis wordt daardoor slechts vergroot, zonder dat daar voordeelen tegenover staan.
- (24) Overigens is dit een merkwaardig effect. Bij intredende vorst daalt de grondwaterstand en het debiet zeer snel. Bij intredenden dooi, ook zonder dat er regen valt, stijgt de grondwaterstand weer snel tot ongeveer de waarde, die hij vóór de vorst had. De daling van den grondwaterstand wordt dus niet veroorzaakt door afvoer van water. Het is niet onwaarschijnlijk, dat dit effect sterk verwant is aan het zgn. Lisse-phenomeen, in zooverre ook hier een luchtdrukverandering in den grond onder de bevroren laag optreedt.
- (25) Hierbij moet worden opgemerkt, dat men de grondwaterstandsbuis niet boven of vlak tegen de drains in den grond moet brengen, maar ± 30 cm daarvan af. De oorzaak van het voorkomen van water boven de drains kan nl. zijn, dat het laagje grond in de drainsleuf vlak boven de drainbuizen (eventueel vlak boven de turfmolmlaag) slecht doorlatend is geworden. Het zal duidelijk zijn, dat een dergelijk laagje niet met de grondwaterstandsbuis mag worden doorgestoken, daar daardoor plaatselijk andere toestanden zouden kunnen ontstaan als elders. Plaats men de buis zoover van den drain, dat zij juist niet meer in de oude drainsleuf komt, zoo bestaat dit gevaar niet, terwijl de waterstand practisch dezelfde is als juist boven de drains.
- (26) Daar in dit geval de ondergrond ondoorlatend is, kunnen dus desgewenscht ook direct de $Q : H_0$ - en de $Q : h_0$ -lijnen worden geconstrueerd.
- (27) Uit de waterpassing is feitelijk zonder meer niet de diepteligging of beter uitgedrukt de effectieve diepteligging van de drains af te leiden. Men weet immers niet of men daarvoor het centrum of den onderkant van de drainbuizen moet nemen. Beter is deze diepte uit de $Q : M_0$ -lijnen af te leiden, hetgeen mogelijk is, wanneer ook M_0 -waarden bekend zijn bij kleine Q -waarden. Is dit om de een of andere redenen niet mogelijk, zoo kan men m. i. daarvoor het beste het centrum

van de drainbuizen nemen. Overigens zal trouwens een verschil in diepteligging van enkele cms meestal hoogstens een te verwaarloozen fout kunnen geven.

- (28) Het is dus van geen belang hoe de doorlatendheid in de laag onder de drains verandert, daar men voor deze laag een homogene laag in de plaats mag denken, waardoor onder dezelfde omstandigheden (nl. e , m en n) evenveel water vloeit; d. w. z. dat men deze laag vervangen mag door een willekeurige laag, waarvan het product van de doorsnede en de doorlatendheid dezelfde is. In de behandelde gevallen is eenvoudigheidshalve verondersteld, dat de doorlatendheid vanaf de ondoorlatende laag toeneemt, daar de vergelijkingen dan zeer eenvoudig zijn.
- Is bijv. $k_y = y^2$, dan is $Q = \frac{H_0^4 - h_0^4}{6e}$ enz.
- (29) Men onderscheide dit geval wel van het geval, dat de $Q : m_0^3$ -lijn voor kleine m_0 -waarden eerst naar de Q -as ombuigt en nu tot een rechte lijn nadert; zie onder § 4 van sub C.
- (30) Feitelijk is dit geval, wanneer n met Q verandert, ingewikkelder. In dit geval hangt $\frac{dQ}{dm_0}$ ook af van de functie $Q = f(n)$. Daar de conclusies zich daardoor niet wijzigen (het gaat er hier alleen om of $\frac{dQ}{dm_0}$ al dan niet gelijk 0 is) en bij latere berekeningen deze fout toch vermeden wordt, heb ik gemeend dit hier verder buiten beschouwing te kunnen laten.
- (31) Streng genomen geldt dit alleen bij kleine m_0 -waarden, daar de stroombanen bij grotere m_0 -waarden (resp. sterk afwijkende m_0 -waarden) door dieper gelegen lagen gaan en dus het totale geleidingsvermogen eveneens iets zal toenemen. Bij de berekeningen, waarom het hier gaat, kan echter met voldoende benadering worden aangenomen, dat Q constant is, daar de m_0 -waarden relatief steeds klein blijven.
- (32) Is de invloed van de vorst wel vast te stellen, dan moeten de $Q : M_0$ -lijnen voor de periode vóór en na de vorst afzonderlijk worden opgesteld, waardoor de invloed van de vorst tevens kan worden vastgesteld.
- (33) Deze vergelijking geldt alleen voor m_0 -waarden groter dan 0. Voor $m_0 = 0$ wordt de vergelijking onbepaald, daar dan ook $Q = 0$ wordt.
- (34) Onder „ondergrond” wordt hier — als gewoonlijk — de grond onder het 0-vlak verstaan. Bij drains kan water blijvend boven de drains voorkomen, wanneer de drains bijv. onder het wateroppervlak in de sloot uitmonden, enz. Een meer voorkomend geval is dit bij greppels, terwijl dit bij slooten regel is. Ook op deze laatste systemen zijn — zooals reeds vaker werd opgemerkt — de bovenstaande beschouwingen van toepassing.
- (35) Valt het 0-vlak niet samen met het vlak van de drains, dan is, bij $Q = 0$, m_0 niet gelijk nul. Dit laatste is wel het geval, indien beide vlakken samenvallen.
- (36) Hierbij moet worden opgemerkt, dat de verdamping van water uit de greppel niet in rekening is gebracht, daar dit van geen belang is voor de bovenstaande berekening, die slechts als voorbeeld bedoeld is.
- (37) In analogie met hetgeen bij ontwatering over den critischen neerslag is opgemerkt, zal het duidelijk zijn, dat bij infiltratie een equivalent hiervan gevonden wordt in een „critisch watergebruik”. Het zal immers duidelijk zijn, dat, indien het watergebruik groter is dan uit de greppels bij de gegeven omstandigheden kan worden aangevoerd, er ook een afplating van het phreatisch oppervlak zal optreden. Alleen vlak bij de greppels, waar vanuit water geïnfilteerd wordt, zal de aanvoer

van water het watergebruik kunnen dekken. Het spreekt vanzelf, dat in het laatste geval de verder in den tekst nog te ontwikkelen vergelijkingen niet geldig zijn. Dit wil zeggen, dat, rekent men toch met den gegeven grondwaterstand midden tusschen de greppels en met de verdere gegevens het mogelijk watergebruik uit, alsof de vergelijkingen wel geldig zouden zijn, direct zou blijken, dat het berekende watergebruik te klein is om aan de waterbehoefte te voldoen, waaruit dus tevens weer volgt, dat meestal — tenzij het waterverbruik (op regenachtige dagen) slechts gering is — het phreatisch oppervlak een afgeplattten vorm moet hebben. Ten slotte spreekt het vanzelf, dat, indien de wanden van de greppels, van waaruit geïnfilteerd wordt, slecht doorlatend zijn, men ook een dergelijk verschijnsel verkrijgt, wanneer de waterbehoefte van de planten niet uit de door de greppelwanden doorgelaten hoeveelheid water gedekt kan worden.

- (38) Hierbij kan worden opgemerkt, dat het begrip „doorlatendheid” in de practijk twee beteekenissen heeft. Vraagt men bijv. aan een practicus of zijn grond goed doorlatend is, dan zal hij bijv. antwoorden, dat zijn grond goed doorlatend is, omdat bijv. *de kavelstooten op 50 m onderlingen afstand op zich zelf reeds een goede ontwatering geven*. Hier is het begrip „doorlatendheid” dus gebruikt in de betekenis van „detailontwateringsbehoefte”. De juiste betekenis voor de doorlatendheid houdt alleen verband met de hoeveelheid water, die onder bepaalde omstandigheden door den grond of een gedeelte van dien grond vloeit en die dus het beste wordt uitgedrukt door den doorlaatfactor van den betreffenden grond. De doorlaatfactor van den grond is echter slechts één van de factoren, die de detailontwateringsbehoefte bepalen, zooals dit verder in den tekst zal worden uiteengezet en natuurlijk ook reeds uit het behandelde in de voorgaande hoofdstukken is gebleken. Om verwarring te voorkomen, lijkt het mij gewenscht de twee begrippen scherp te onderscheiden en dus de naam „detailontwateringsbehoefte” te gebruiken als men dit laatste bedoeld, en hiervoor dus niet den naam „doorlatendheid” te benutten. Men kan dus spreken van de doorlatendheid van een kluitgrond, van de laag van bijv. 0—10 cm onder het maaiveld, enz. Daarentegen zegt men, dat een perceel land een kleine detailontwateringsbehoefte heeft, wanneer slechts weinig detailontwateringssystemen — dus op grooten onderlingen afstand — voldoende zijn om een goede ontwatering te geven, enz.
- (39) Deze afvoer kan plaats vinden door verdamping in samenhang met capillaire opstijging en door afvoer door den grond. Deze laatste is klein ten opzichte van de eerste; vooral wanneer de grondwaterstand reeds iets onder het maaiveld is gedaald.
- (40) Door de indroging van den zeer vochtrijken grond en daardoor ontstane scheurvorming is de doorlatendheid in latere jaren zeer sterk verbeterd en verbetert nog steeds. Deze later ontstane veranderingen zijn echter in dit verband van geen belang.
- (41) Alleen in die gevallen, waarbij door de drainage een aanmerkelijke indroging en daardoor scheurvorming (= vergroting van de doorlatendheid) en klink te verwachten is, zijn er althans redenen voorhanden om in verband met de toekomst een diepere drainage toe te passen. Men moet er echter wel om denken, dat men voor het heden daarmee geen diepere ontwatering bereikt, terwijl, wanneer de diepere lagen zeer week zijn, men wel alle voorzorgen mag nemen, dat de drainsleuf goed doorlatend blijft, zoodat geen water boven de drains kan voorkomen.
- (42) Bij sportvelden zijn ook deze maatregelen onvoldoende, ⁸daar de eischen, die men hier aan de ontwatering moet stellen, veel grooter zijn. Hier zal men de drainsleuven moeten opvullen met een goed doorlatenden zandgrond en zoo mogelijk nog meerdere maatregelen moeten nemen; zie *Twintig Jaar Bodemkundig Onderzoek en Tien Jaar Bodemkundig Instituut*, 1936, blz. 75.
- (43) Het zal duidelijk zijn, dat naarmate de doorlatendheid van de laag tusschen het vlak van de ondiepe en de diepe drains kleiner is ten opzichte van de doorlatendheid

van de laag boven het vlak van de ondiepe drains, de grondwaterstanden minder zullen verschillen.

- (44) Een dergelijk geval, waarbij echter de doorlatendheid van de bovenste slecht doorlatende laag grooter is dan 0,01 (er komen nooit plassen op het land voor; zie hieronder), is bijv. waargenomen op een perceel land van den heer S. A. Sebena te Nieuwolda.
- (45) HISSINK, D. J.: De bodemkundige gesteldheid van de achtereenvolgens ingedijkte Dollardpolders; *Verslagen van Landbouwkundige Onderzoekingen*, N^o. 41 B, blz. 47 e.v.
- (46) In de in noot 1 genoemde literatuur, blz. 224, is de waarde 4,0 mm genoemd, hetgeen verband houdt met het feit, dat hier de horizontale strooming in de capillaire laag nog niet in aanmerking is genomen. Zooals reeds eerder is opgemerkt, hebben latere onderzoeken het noodzakelijk gemaakt de capillaire laag in zandgronden wel in het doorstrotingsprofiel op te nemen.
- (47) Zie HOOGHOUT, S. B.: Rapport betreffende de kwel in den Nijkspolder en de veranderingen, die deze kwel eventueel zou ondergaan bij een vergrooting van den Nijkspolder met het westelijk daarvan gelegen complex verveende gronden en betreffende de grondgesteldheid van genoemden polder en het westelijk daarvan gelegen complex verveende gronden; Groningen, October 1937 (gecyclostyleerd).
- (48) Zie ook: HOOGHOUT, S. B.: Die Bohrlöchermethode zur Ermittlung der Durchlässigkeit des Bodens und ihr Nutzen für die Praxis; *Comptes Rendus de la Sixième Commission de l'Association Internationale de la Science du Sol*; Zürich, 1937 (nog niet verschenen).
- (49) In een vergadering van den Landbouwkundigen Kring op 9 Maart 1938 werd door schrijver een lezing gehouden, over hetgeen in dit hoofdstuk VI is medegedeeld. Hierin werden, op een veel uitgebreidere wijze dan in dit hoofdstuk en met verschillende figuren toegelicht, de verschillende factoren behandeld, die het effect van de drainage bepalen, terwijl bovendien nog eens een kort overzicht werd gegeven van het begrip doorlatendheid, de definitie en de bepalingsmethoden daarvan. Van verschillende zijden is toen gebleken, dat men juist den vorm, waarin een en ander behandeld is en de talrijke figuren, die dit nader verduidelijken, in het bijzonder op prijs heeft gesteld. De vorm, waarin een en ander is medegedeeld, is minder geschikt om als zoodanig gepubliceerd te worden, waarom besloten werd deze lezing te laten cyclostyleeren, van de figuren afdrukken te laten maken en deze voor belangstellenden op aanvraag bij het Bodemkundig Instituut Groningen beschikbaar te stellen.

INHOUD

HOOFDSTUK I

	Blz.
<i>Inleiding</i>	461

HOOFDSTUK II.

<i>Ontwatering</i>	464
I. Homogene gronden	464
A. De ondergrond is ondoorlatend	464
§ 1. Afleiding van de vergelijking, geldig bij een regenval kleiner dan de „critische regenval”	464
§ 2. Omschrijving van de gevallen, waaronder de vergelijkingen in § 1 ontwikkeld ook geldig zijn	467
§ 3. Nadere beschouwing van hetgeen impliciet bij de afleiding van de vergelijkingen is aangenomen	467
§ 4. Voor- en nadeelen van de bepaling van de doorlatendheid van den grond met de reeds besproken en nog te bespreken vergelijkingen	472
§ 5. De critische regenval	473
§ 6. Contrôleproefnemingen van de ontwikkelde vergelijkingen	476
a. Inleiding	476
b. Korte beschrijving van den bak met toebehooren, waarin de metingen zijn uitgevoerd	476
c. Korte beschrijving van de vulling van den bak met rivierzand; bepaling van het volumegewicht en van het poriënvolume en het luchtvrje poriënvolumen van den grond	477
d. Uitvoering van de metingen	479
e. Berekening van den doorlaatfactor	480
f. Bespreking van de verkregen cijfers	481
§ 7. Er is een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot, enz., waarin de drains of greppels, uitmonden	488
B. De ondergrond is doorlatend	494
§ 1. De afleiding van de vergelijking	494
§ 2. Contrôlewaarnemingen van de opgestelde vergelijkingen	496
§ 3. Er is een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot, waarin de greppels of drains, enz. uitmonden	502

	Blz.
II. Heterogene gronden	502
A. Inleiding	502
B. De ondergrond is ondoorlatend	504
§ 1. Algemeene opmerkingen	504
§ 2. Afleiding van de vergelijkingen	504
α. In het watervoerend profiel komen scherp begrensde lagen voor; d.w.z. de doorlatendheid verandert sprongsgewijze terwijl de grond in iedere laag op zich zelf homogeen is	504
a. Inleiding	504
b. Er komen 2 lagen in het profiel voor	505
1. Afleiding van de vergelijking, indien h_0 kleiner dan h_1	505
2. De afgeleide vergelijkingen voldoen aan de te stellen eischen	507
3. Afleiding van de vergelijking, indien h_0 grooter is dan h_1	509
c. Er komen 3 lagen in het profiel voor	509
1. Afleiding van de vergelijking voor het geval, dat h_0 kleiner is dan h_1	509
2. Afleiding van de vergelijking voor het geval, dat h_0 kleiner is dan h_2 , maar grooter is dan h_1	511
3. Afleiding van de vergelijking voor het geval, dat h_0 grooter is dan h_2	512
d. Er komen meer dan 3 lagen in het profiel voor	513
e. Bespreking van de gegevens, waarover men voor de toepassing van de vergelijkingen moet beschikken	513
f. Enkele opmerkingen over de toepassing van de ontwikkelde vergelijkingen	514
g. De geldigheid van de ontwikkelde vergelijkingen	515
β. In het profiel komen geen scherp begrensde lagen voor; de doorlatendheid verandert geleidelijk	516
a. Inleiding	516
b. Afleiding van de vergelijking, indien de doorlaatfactor lineair met de hoogte boven het vlak van de drains toeneemt	516

c. Afleiding van de vergelijking voor het geval de doorlaatfactor volgens de functie $ky = k_0 + ay^b$ toeneemt	518
d. Algemeene oplossing van het geval, dat de doorlaatfactor volgens een willekeurige functie met de hoogte boven het vlak van de drains, enz. verandert	518
e. Eenige opmerkingen in verband met de toepassing van deze vergelijkingen	520
C. De ondergrond is doorlatend	520
§ 1. Algemeene opmerkingen	520
§ 2. De doorlatendheid in het profiel boven het vlak van de drains of den bodem van de greppels, enz. verandert sprongsgewijze	522
a. Het profiel bestaat uit een homogene laag boven en onder de drains, enz.	522
b. Het profiel bestaat boven den bodem van de greppels, resp. boven de drains uit 2 of meer lagen	523
§ 3. De doorlatendheid van den grond verandert geleidelijk . .	523
D. Er treedt een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot, waarin de drains of greppels uitmonden, op . . .	526
§ 1. De doorlatendheid in overeenkomstige lagen is op alle afstanden van de sloot dezelfde of wordt als zoodanig verondersteld	527
§ 2. De doorlatendheid in overeenkomstige lagen is op alle afstanden van de sloot niet dezelfde	528

HOOFDSTUK III

<i>De Q : H₀; de Q : h₀-lijnen en dergelijke lijnen, die de samenhang van het debiet met den grondwaterstand in lijnen tot uiting brengen en wat hieruit kan worden afgeleid of berekend</i>	530
A. Bepaling van den grondwaterstand en het debiet	530
§ 1. Bepaling van den grondwaterstand	530
§ 2. Bepaling van het debiet	532
B. Enkele beschouwingen over de Q : H ₀ -, de Q : h ₀ - en dergelijke lijnen; de constructie van deze lijnen	533
§ 1. Inleiding	533

§ 2. De constructie van de $Q : H_0$ -($Q : M_0$)-lijnen, indien de ondergrond ondoorlatend is en geen water boven de drains of in de greppels, voorkomt	534
§ 3. De constructie van de $Q : H_0$ - en $Q : h_0$ - (of $Q : M_0$ - en $Q : N$ -) lijnen, indien de ondergrond niet doorlatend is en zich boven de drains (25), resp. in de greppels, water bevindt.	538
§ 4. De constructie van de $Q : M_0$ - en $Q : N$; de $Q : m_0$ - en $Q : n$; de $Q : m_0'$ en $Q : n'$ -lijnen, indien de ondergrond doorlatend is en er zich al of niet water boven de drains, resp. in de greppels bevindt.	540
C. Beschouwing over hetgeen de vorm van de $Q : H_0$ -($Q : m_0$ -) en de $Q : H_0^2$ -($Q : m_0^2$)-lijnen kan leeren	541
§ 1. Inleiding	541
§ 2. De vorm van de $Q : m_0$ - en $Q : m_0^2$ -lijnen	543
α. De grond onder de drains is ondoorlatend; $n = 0$ of te verwaarloozen klein	543
a. De grond is homogeen	543
b. De doorlatendheid neemt met een toenemende hoogte boven de drains, enz. toe.	544
c. De doorlatendheid neemt af met een toenemende hoogte boven het vlak van de drains, enz.	545
d. De grond vlak boven de drains is in verhouding veel beter doorlatend dan op grotere hoogte daarboven.	546
e. Samenvatting	547
β. De grond onder de drains is ondoorlatend; n is niet gelijk nul en niet te verwaarloozen klein	548
a. n is constant	548
b. n is niet constant, maar verandert met Q	548
1. De functies $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$ zijn, afgezien van een constante, identiek	548
2. De functies $Q = f(m_0)$ en $Q = f(n)$ zijn niet identiek	549
c. Samenvatting	550
γ. De grond onder de drains is doorlatend; $n = 0$	550
a. De grond is homogeen tot de ondoorlatende laag en bestaat uit een laag onder en boven de drains.	550

b.	De doorlatendheid van den grond neemt met een toenemende hoogte boven de ondoorlatende laag toe. . .	553
c.	De doorlatendheid van den grond neemt met een toenemende hoogte boven de ondoorlatende laag af . . .	555
d.	Samenvatting	555
δ.	De grond onder de drains is doorlatend; n is niet nul en niet te verwaarloozen klein	556
§ 3.	De waarde van $\frac{dQ}{dm_0}$ bij het snijpunt van de $Q : m_0$ -lijn met de m_0 -as	556
α.	De grond is homogeen	557
a.	De grond is homogeen; de grond onder de drains is ondoorlatend; er komt geen water boven de drains voor	557
b.	De grond is homogeen; de ondergrond is tot een bepaalde ondoorlatende laag doorlatend; er komt geen water boven de drains, enz. voor	557
c.	De grond is homogeen; de grond onder de drains is ondoorlatend; er komt water boven de drains, enz. voor	557
1.	De waterstand boven de drains is constant of althans bij $Q = 0$ niet gelijk nul	557
2.	Er komt alleen water boven de drains voor, zoolang Q grooter is dan nul	558
d.	De grond is homogeen; de ondergrond is tot een bepaalde ondoorlatende laag doorlatend; de waterstand boven de drains is constant, resp. verandert met Q	558
e.	De grond is homogeen; de ondergrond is tot groote diepte doorlatend	559
f.	Samenvatting	560
β.	De grond is heterogeen	560
a.	De doorlatendheid in het profiel verandert sprongsgewijze	560
1.	Er komen 2 lagen in het profiel voor; de ondergrond is ondoorlatend; $n = 0$	560
2.	Er komen 2 lagen in het profiel voor; de ondergrond is tot een bepaalde, ondoorlatende laag doorlatend; $n = 0$	560

3. Er komen 3 lagen in het profiel voor; de drains liggen op de scheiding tusschen de onderste en de middelste laag; n is niet gelijk nul en bij $Q = 0$ gelijk n_0 en ligt in de bovenste laag.	561
b. De doorlatendheid verandert geleidelijk in het profiel	562
1. De grond onder de drains is ondoorlatend; $k_y = k_0 + ay$; $n = 0$	562
2. De grond onder de drains is ondoorlatend; $k_y = k_0 + ay$; $n = n_0$ bij $Q = 0$	562
3. De grond onder de drains is doorlatend; n is al of niet gelijk nul bij $Q = 0$; $k_y =$ willekeurige functie van m	563
§ 4. Samenvatting van hetgeen in § 3 is behandeld.	563
D. De $Q : M_0$ ($Q : m_0$)-lijnen als indicatoren voor de veranderingen, die in de doorlatendheid van den grond in verloop van tijd optreden. De $Q : N(Q : n)$ -lijnen als indicatoren voor de veranderingen, die in de doorlatendheid van den grond in de drainsleuven en (of) in de drainreeks zelf optreden.	566
§ 1. De $Q : M_0$ -($Q : m_0$)-lijnen	566
a. Er komt geen water boven de drains of in de greppels, enz. voor, of deze waterstand is althans in de beschouwde periode constant gebleven.	566
b. Er komt water boven de drains voor; deze waterstand boven de drains verandert met het debiet.	568
§ 2. De $Q : N$ -($Q : n$)-lijnen	570
E. De $Q : m_0$ - en de $Q : n$ -lijnen vormen het aangewezen uitgangsmateriaal voor de berekening van de(n) doorlaatfactor(en) van den grond	571
§ 1. Er treedt geen hangkromme van het phreatisch oppervlak naar de sloot op	571
a. De ligging van de ondoorlatende laag is bekend.	571
a. De grond onder het vlak van de drains is ondoorlatend; de grond is homogeen; er bevindt zich al of geen water boven de drains	572
b. De grond is heterogeen; de grond onder de drains is al dan niet doorlatend	572

	Blz.
1. Inleiding	572
2. Er komen in het profiel 2 of meer lagen voor; de doorlatendheid verandert sprongsgewijze	573
3. De doorlatendheid verandert geleidelijk	576
i. De grond onder de drains is ondoorlatend; er bevindt zich geen water boven de drains of in elk geval niet, wanneer $Q = 0$	576
ii. De ondergrond (34) is doorlatend; de grond onder de drains is ondoorlatend; er bevindt zich dus water boven de drains, wanneer $Q = 0$	578
β . De ligging van de ondoorlatende laag is onbekend	580
γ . Practische toepassing op enkele experimenteel bepaalde $Q : m_o$ -lijnen, zooals deze op enkele vakken van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder zijn bepaald	582
a. Geval I. Berekening van de doorlatendheid van den grond uit de $Q : m_o$ -lijn van de 10 m strooken van vak Gr_2 van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder in de periode 1930—1931	582
b. Geval II. Berekening van de doorlatendheid van den grond uit de $Q : m_o$ -lijn van de 10 m strooken van het vak Gr_2 van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder voor de periode 1933—1934	587
c. Geval III. De berekening van de doorlatendheid van den grond uit de $Q : m_o$ -lijn van de 10 m gedraineerde strooken van het vak Dr_2 van het Ontwateringsproefveld B 45 in den Wieringermeerpolder voor de periode 1933—1934	591
d. Slotopmerking	597
§ 2. Er is een hangkromme van het phreatisch oppervlak naar den waterspiegel in de sloot	597

HOOFDSTUK IV

<i>Infiltratie</i>	600
I. Inleiding	600

	Blz.
II. Homogene gronden	601
A. De ondergrond is ondoorlatend	601
§ 1. De afleiding van de vergelijking	601
a. Het capillair oppervlak reikt nergens tot het maaiveld	602
b. Het capillair oppervlak reikt overal tot het maaiveld	603
c. Het capillair oppervlak reikt gedeeltelijk wel, gedeelte- lijk niet tot het maaiveld	604
d. Eenige algemeene opmerkingen over de ontwikkelde vergelijkingen	605
§ 2. Welke gegevens zijn voor de toepassing van de vergelijkin- gen noodig en hoe kunnen deze worden verkregen? . . .	606
B. De ondergrond is doorlatend	607
III. Heterogene gronden	609
A. Inleiding	609
B. De ondergrond is ondoorlatend	609
§ 1. De doorlatendheid verandert sprongsgewijze	609
a. Er komen twee lagen in het watervoerend profiel voor	609
1. De afleiding van de vergelijking voor het geval $H_0 < h_1$	609
2. De afleiding van de vergelijking voor het geval $H_0 > h_1$	611
3. Enkele opmerkingen in verband met de toepassing van de vergelijkingen	611
b. Er komen meer dan 2 lagen in het profiel voor . .	612
§ 2. De doorlatendheid verandert geleidelijk	613
a. Inleiding	613
b. De afleiding van de vergelijking voor het geval de door- laatfactor liniair met de hoogte boven de ondoorlatende laag toeneemt	613
c. De afleiding van de vergelijking voor het geval de functie van den doorlaatfactor met de hoogte boven de ondoor- latende laag gelijk te stellen is aan $k_y = k_0 + ay^b$	614
d. Enkele opmerkingen in verband met de toepassing van de afgeleide vergelijkingen	615
C. De ondergrond is doorlatend	615

HOOFDSTUK V

<i>Vereenvoudigde berekeningen. De reële, de effectieve en de schijnbare doorlaatfactor</i>	616
A. Inleiding	616
B. Korte bespreking van de eenvoudigste vergelijkingen voor ontwatering en infiltratie	617
§ 1. Ontwatering	617
a. De doorlaatfactor is bekend	618
b. De doorlaatfactor is onbekend	620
1. De ligging van de ondoorlatende laag is bekend	621
2. De ligging van de ondoorlatende laag is niet bekend	622
§ 2. Infiltratie	623
C. Bespreking van de foutenmogelijkheden bij de toepassing van de onder sub B besproken eenvoudigste vergelijkingen. De reële, de effectieve en de schijnbare doorlaatfactor	624
§ 1. Algemeene beschouwingen over den reëlen, den effectieven en den schijnbaren doorlaatfactor. De definities van deze doorlaatfactoren	624
a. De reële doorlaatfactor	624
b. De effectieve doorlaatfactor	625
c. De schijnbare doorlaatfactor	626
§ 2. Bespreking van de fout, die kan worden gemaakt, wanneer bij denzelfden grondwaterstand midden tusschen de drains, greppels enz. de schijnbare doorlaatfactor gelijk genomen wordt aan den effectieven doorlaatfactor	629
§ 3. Bespreking van de fout, die kan worden gemaakt, wanneer de schijnbare of de effectieve doorlaatfactor beschouwd wordt als een reëlen doorlaatfactor	632

HOOFDSTUK VI

<i>Enkele toepassingen</i>	634
I. Inleiding	636
II. Ontwatering. Het bovengrondsche en het doordengrondsche type; overgangstypen	636

	Blz.
A. Het bovengrondsche type	636
§ 1. Beschrijving	636
§ 2. De kenmerkende eigenschappen van het bovengrondsche type	637
§ 3. De invloed van den drainafstand, de draindiepte en het al of niet doorlatend zijn van de drainsleuf	640
a. De invloed van de draindiepte	640
b. De invloed van het al of niet doorlatend zijn van de drainsleuf	643
c. De invloed van den drainafstand	644
§ 4. Voorbeelden	644
B. Het doordengrondsche type	644
§ 1. Beschrijving	644
§ 2. De kenmerkende eigenschappen van het doordengrondsche type	645
§ 3. De invloed van den drainafstand, de draindiepte en het al of niet doorlatend zijn van de drainsleuf	648
a. De invloed van de draindiepte	648
b. De invloed van het al of niet doorlatend zijn van de drainsleuf	652
c. De invloed van den drainafstand	652
§ 4. Voorbeelden	654
C. Overgangstypen	655
III. Infiltratie. Berekening van het waterverbruik op een infiltratieproefveld in den Wieringermeerpolder	655
§ 1. Inleiding	655
§ 2. Berekening van het waterverbruik op een bepaalden dag op het infiltratieproefveld A 60 in den Wieringermeerpolder . .	656
Noten	660